



HAL
open science

Une approche qualitative spatiale pour une description sémantique des reliefs

Yann Chevriaux

► **To cite this version:**

Yann Chevriaux. Une approche qualitative spatiale pour une description sémantique des reliefs. Autre [cs.OH]. Université Rennes 1, 2008. Français. NNT: . tel-00315651

HAL Id: tel-00315651

<https://theses.hal.science/tel-00315651>

Submitted on 29 Aug 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.

N° d'ordre : 3383

THÈSE

présentée

DEVANT L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1

pour obtenir

le grade de : **DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1**

Mention *INFORMATIQUE*

par

Yann Chevriaux

Équipe d'accueil : *Institut de Recherche de l'École Navale (IRENav, EA 3634)*

École doctorale : *Mathématiques, Télécommunications, Informatique, Signal, Système et Electronique (MATISSE)*

Composante universitaire : *IFSIC*

Une approche qualitative spatiale pour une description sémantique des reliefs

soutenue le 21 janvier 2008 devant la commission d'examen :

Composition du Jury

Président : Bruno Arnaldi, Professeur, INSA, Rennes

Rapporteurs : Jacques Le Maître, Professeur, Université de Toulon
Philippe Rigaux, Professeur, Université Paris IX

Examineurs : Christophe Claramunt, Professeur, École Navale, Lanvéoc
Stéphane Donikian, Chargé de Recherches, IRISA, Rennes
Eric Saux, Maître de Conférences, École Navale, Lanvéoc

Remerciements

Comme le veut la tradition, je vais sacrifier au difficile exercice des remerciements qui prolonge la soutenance. Non pas que j'y sois contraint ou que je ne ressente aucune gratitude envers ceux qui m'ont soutenu durant cette aventure, mais tout simplement parce qu'ils ont été si nombreux que la difficulté réside dans la volonté de n'oublier personne ! Je remercie donc aussi ceux qui n'apparaissent pas dans cette page mais envers qui je suis redevable de leur aide à un moment ou à un autre. Je pense qu'ils se reconnaîtront et j'espère qu'ils me pardonneront.

La première personne que je veux explicitement remercier est mon encadrant, Eric Saux. Je le remercie surtout pour m'avoir accordé sa confiance et m'avoir fait croire en ma capacité à terminer ma thèse. Il a fait preuve d'une très grande patience et a trouvé les mots justes pour me remotiver lorsque le découragement m'envahissait ou que l'objectif me semblait inaccessible. Il s'est efforcé de m'inculquer une rigueur qui ne m'était pas coutumière. Je pense que cette thèse s'est énormément enrichie de cette exigence et ne serait pas ce qu'elle est – ou du moins comprendrait beaucoup plus de raccourcis et d'imprécisions – si je n'avais pas été poussé à mieux expliquer, motiver et prouver ce que j'avançais.

Si j'ai eu la chance de pouvoir aborder cette thématique particulière et sortir des sentiers battus, je le dois à mon directeur de thèse, Christophe Claramunt. Il a su me donner une grande liberté sur l'orientation de mes recherches tout en conservant une grande disponibilité lorsque je le sollicitais. Je voudrais ici exprimer ma profonde gratitude pour ses conseils, la pertinence scientifique de ses remarques et la constante bienveillance qu'il a montré à mon égard.

Je remercie Bruno Arnaldi de l'INSA et Stéphane Donikian de l'IRISA d'avoir bien voulu évaluer mon travail et d'avoir accepté de participer au jury de soutenance. Je remercie aussi tout particulièrement Philippe Rigaux de l'Université Paris-Dauphine et Jacques Le Maître de l'Université de Toulon pour avoir rapporté sur ma thèse. Leurs critiques et leurs conseils m'ont aidé à prendre conscience ce que qui avait été fait et de ce qui reste à faire.

Je remercie l'ensemble des personnels enseignant-chercheur, administratif et de soutien de l'Institut de Recherche de l'École Navale que j'ai eu le plaisir de côtoyer durant ces quelques années. Ils ont tous contribué, d'une façon ou d'une autre, au bon déroulement de mes travaux. Au delà de l'IRENav et des personnes, c'est l'École Navale, et à travers elle, la Marine

Nationale que je voudrais remercier. Il m'a été donné des moyens conséquents et un cadre exceptionnel pour réaliser ma thèse.

Je suis très reconnaissant à Manell Zakharia qui m'a fait découvrir l'acoustique sous-marine et m'a apporté tout son soutien pour que je puisse intégrer l'IFREMER.

Je tiens à remercier Rémy Thibaud, chef du groupe SIG de l'IRENav. L'idée d'appliquer le modèle aux dunes sous-marines est à mettre à son crédit. Son aide et son expertise en géomorphologie m'ont été précieuses.

J'ai également une pensée particulière pour chacun des thésards que j'ai croisé et avec qui j'ai partagé un moment, un café, un repas, un match de foot ou tout simplement mes angoisses : Salem Benramdane, Rodéric Bera, Thomas Breteau, Antoine Brient, David Brosset, Jean-Christophe Cexus, Antoine Ducoin, Sébastien Fournier, Marie-Laure Gobert, Eric Guilbert, Rachel Jaouen, Jean-Marie Le Yaouanc, Ariane Mascret, Amin Mehel, Sébastien Mounoury, Valérie Noyon, Mathieu Petit, Thierry Le Pors, Cyril Ray, Zineb Saidi, Christophe Sarraf, Franck Scullier et Myriem Sriti.

Une thèse est une aventure riche mais exigeante. Elle n'aurait pas pu être menée à son terme sans le soutien et l'amitié de mes collègues, Béatrice Sommier, Pierre Tracol, Cécile Arnould, Rodica Micu, Anne Hervéou et Sylvie Stéphan, durant cette longue période de doutes que fut mon passage à l'Ecole Supérieur de Commerce de Brest.

Je suis aussi redevable envers Jean-Marc Siquin et Marc Nokin, respectivement chef du service Ingénierie des Logiciels Embarqués et responsable du département Navires et Systèmes Embarqués de l'IFREMER. Malgré l'urgence des projets dans lesquels j'étais impliqué, ils m'ont laissé préparer sereinement la soutenance.

Enfin, je remercie mes parents, ma sœur, ma femme Karine et mes deux princesses Alice et Flavie pour avoir supporté un fils, un frère, un mari et un père absent, angoissé et stressé. Qu'ils soient assurés ici de tout mon amour.

Lanvéoc-Poulmic, le 21 janvier 2008.

À Alice et Flavie ...

Résumé

Dans les années 1990, il a été mis en évidence que la perception de l'espace géographique par un observateur situé au sol ne pouvait pas être entièrement modélisée par les outils cartographiques. Nous abordons dans cette thèse la problématique de la compatibilité entre modèle numérique et cognition de l'espace à travers un modèle original de description du relief.

L'objectif des travaux présentés dans cette thèse est de poser les fondements d'une formalisation qui permettrait, d'une part la description d'une représentation numérique de terrain dans un langage intelligible à destination d'observateurs localisés au sol et, d'autre part, de faciliter les échanges entre des communautés scientifiques disposant de corpus sémantiques différents.

Nous cherchons à décrire une silhouette - i.e., une coupe de terrain ou la séparation terre/ciel à l'horizon - selon la perception que peut en avoir un observateur. Nous introduisons un modèle, fondé sur une approche qualitative, qui consiste à décrire une silhouette par une séquence de symboles signifiants. L'utilisateur ayant la possibilité de définir ses propres catégories, le modèle possède la capacité de s'adapter à différents contextes.

L'originalité de notre modèle repose dans la méthode de détection des formes significatives. Nous nous écartons volontairement des méthodes numériques généralement utilisées dans les systèmes de détection ou de reconnaissance de forme. Nous considérons que la perception d'une forme particulière de relief est contingente de la perception de saillances, définies ici comme des points qualitativement remarquables. La description d'une silhouette inclut les relations topologiques qui relient les formes de relief détectées. Afin de tenir compte de l'imprécision des frontières des formes de relief, nous proposons une extension de la méthode 9-intersection. Les relations méreologiques, quant à elles, nous sont utiles pour dériver des représentations à différents niveaux d'abstraction.

Nous avons implanté le modèle en Java. Le prototype réalisé permet de définir des catégories, d'analyser des silhouettes, de déterminer les relations topologiques qui lient les formes détectées et d'obtenir une description à différents niveaux d'abstraction.

Cette thèse a bénéficié du soutien financier de la Région Bretagne.

Table des matières

Introduction	1
Contexte et motivation de la thèse	1
Intérêt applicatif	4
Méthodologie	6
1 Perception des formes de relief	9
1.1 Sens commun	9
1.2 La perception comme expérience du monde	10
1.2.1 Intellectualisme	11
1.2.2 Comportementalisme	11
1.2.3 Gestaltisme	12
1.2.4 Approche écologique et affordances	12
1.2.5 Réalisme expérientiel	12
1.2.6 Phénoménologie	13
1.2.7 Discussion	14
1.3 Considérations ontologiques	15
1.3.1 La montagne en tant que catégorie	16
1.3.2 La montagne en tant qu'objet	17
1.4 Conclusion	20
2 De la cartographie à une géographie de sens commun	23
2.1 Le paradigme cartographique	24
2.1.1 Principes	24
2.1.2 Les limites de la carte	26
2.2 Représentations cognitives	28

2.2.1	Le modèle pyramidal	28
2.2.2	La hiérarchie sémantique spatiale	29
2.2.3	Discussion	30
2.3	La géographie naïve	31
2.3.1	Du sens commun comme fondement de la géographie naïve	31
2.3.2	Le raisonnement spatial qualitatif pour modéliser le sens commun	31
2.4	Vers des SIG intuitifs	32
3	Représentation qualitative de l'espace	35
3.1	Topologie	36
3.1.1	Définitions	37
3.1.2	Considérations épistémologiques	39
3.1.3	Méthodes n-intersection	42
3.1.3.1	Méthode 4-intersection (4IM)	42
3.1.3.2	Méthode 9-intersection (9IM)	42
3.1.4	RCC	44
3.1.5	Méréologie et méréotopologie	46
3.1.6	De la nature des frontières	47
3.2	Morphologie	49
3.2.1	Formes et topologie	50
3.2.2	Saillances visuelles et partition des formes	50
3.2.3	Séquences de primitives	51
3.2.4	Influence de la résolution	51
3.3	Discussion	52
4	Analyse qualitative des silhouettes	53
4.1	Silhouette de terrain	54
4.2	Courbures et points particuliers	55
4.2.1	Codons de Richards et Hoffman	56
4.2.2	L'approche multi-résolution de Cinque et Lombardi	58
4.2.3	Approche qualitative de Galton et Meathrel	59
4.2.4	Discussion	60
4.3	Langages de description	61

4.3.1	Grammaire qualitative de Magee	62
4.3.2	Langage de Kulik et Egenhofer	63
4.3.2.1	Description qualitative des lignes primitives	63
4.3.2.2	Capture des formes de relief	64
4.3.2.3	Changement de résolution	64
4.3.2.4	Schéma général	66
4.4	Conclusion	67
4.4.1	Rôle de la topologie et de la nature des frontières <i>fiat</i>	68
4.4.2	Influence de la multi-résolution	69
4.4.3	De la nécessité d'une nouvelle approche	69
5	Un modèle qualitatif pour la description sémantique du relief	71
5.1	Définitions	72
5.1.1	Points de mesure	72
5.1.2	Motifs	73
5.1.3	Opérateurs ensemblistes sur les motifs	74
5.1.3.1	Inclusion	74
5.1.3.2	Union	74
5.1.3.3	Intersection	75
5.2	Modélisation d'une forme de relief	76
5.2.1	Séquence de saillances	77
5.2.2	Saillances frontières et saillances intérieures	79
5.2.2.1	Saillances frontières	80
5.2.2.2	Saillances intérieures	81
5.2.3	Extension spatiale	81
5.2.3.1	Ensemble des motifs associés à une forme de relief	82
5.2.3.2	Expression calculable de l'extension spatiale	83
5.3	Topologie	83
5.3.1	Caractéristiques topologiques des motifs	83
5.3.1.1	Ouverts et fermés	84
5.3.1.2	Voisinage	84
5.3.1.3	Intérieur, adhérence, frontière et extérieur d'un motif	85

5.3.2	Influence des frontières <i>fiat</i> sur l'interprétation des relations méréologiques et topologiques	87
5.3.2.1	Influence sur la méréologie	87
5.3.2.2	Influence sur la topologie	87
5.3.3	Intérieur, frontière, adhérence et extérieur d'une forme de relief	88
5.3.4	Calcul des relations topologiques	90
5.3.4.1	Matrice 9-intersections	90
5.3.4.2	Contraintes	91
5.3.4.3	Configurations valides	93
5.3.5	Méréologie et méréotopologie	97
5.4	Modélisation des catégories	98
5.4.1	Séquences régulières	99
5.4.2	Construction d'une catégorie	103
5.4.2.1	Méthode explicite	103
5.4.2.2	Méthode par filtrage	104
5.5	Conclusion	106
6	Prototype et exemple d'application	109
6.1	Prototype	109
6.1.1	Silhouette de test	109
6.1.2	Description de la silhouette	110
6.1.2.1	Construction des catégories	110
6.1.2.2	Capture des formes de relief	112
6.1.2.3	Représentation hiérarchique	115
6.1.2.4	Relations topologiques	116
6.2	Calculabilité	117
6.3	Description de dunes sous-marines	118
6.3.1	Contexte	119
6.3.2	Analyse	120
6.3.2.1	Construction des catégories	120
6.3.2.2	Silhouette 1	120
6.3.2.3	Silhouette 2	124
6.4	Bilan	125

Conclusion et perspectives	127
A Calcul des relations topologiques	131
B Algorithmes	135
B.1 Séquence de saillances	135
B.1.1 Construction de la boîte min-max	135
B.1.2 Calcul des intersections	135
B.1.3 Calcul des séquences de saillances	136
B.2 Capture des formes de relief	137
Bibliographie	138

Liste des figures

1	Carte selon la géographie de Strabon (extrait de [Figuier, 1884]).	2
2	Ce que perçoit un observateur : entre concept, symbole et objet physique. . .	5
3	L'échange d'informations sur un relief entre un SIG et un utilisateur nécessite généralement une étape de numérisation [Vance et Van Hamme, 1985, p. 33] (©Dargaud Benelux).	6
4	Organisation des principaux concepts abordés dans la thèse.	7
5	Reliefs et silhouettes correspondantes.	7
1.1	L'interprétation d'une forme dépend du contexte.	14
1.2	L'Everest est une montagne très connue. Pourtant peu de personnes sont capables de l'identifier d'après sa forme et dire laquelle de ces deux photos en est une représentation.	18
2.1	Cartes thématiques des environs du Menez-Hom en Presqu'île de Crozon : (<i>de g. à d.</i>) routière, topographique et touristique.	26
2.2	Le Menez-Hom tel qu'il peut être perçu par un observateur au sol.	26
2.3	Les composantes cognitive et informationnelle du modèle pyramidal (adapté de [Mennis <i>et al.</i> , 2000]).	29
2.4	Interaction homme-SIG.	33
3.1	L'ensemble des huit relations topologiques exhaustives et deux-à-deux disjointes. <i>En haut</i> : terminologie n-intersection. <i>En bas</i> : terminologie RCC. . .	36
3.2	Taxonomie <i>T1</i> : la relation <i>meet</i> fusionne avec la résolution <i>overlap</i> (adapté de [Grigni <i>et al.</i> , 1995]).	40
3.3	Taxonomie <i>T2</i> : la relation <i>meet</i> fusionne avec la résolution <i>disjoint</i>	40
3.4	Le ruban de Mœbius [Gotts <i>et al.</i> , 1996].	41
3.5	Une montagne composante d'une autre montagne.	46
3.6	De la difficulté de délimiter une montagne.	49

3.7	Exemples de silhouettes caractérisant une forme.	51
3.8	Influence de la résolution sur la détection des formes.	52
4.1	Montagnes d'Amérique du Sud avec, en blanc, la frontière entre ciel et terre.	54
4.2	Perception et représentation d'une silhouette. Le relief est mis en évidence en construisant les segments qui relient les points de mesure consécutifs.	55
4.3	Le paradoxe du disque d'Attneave (extrait de [Hoffman et Singh, 1997]).	56
4.4	Ensemble initial des codons. Les traits indiquent les courbures négatives minimales et les points les zéros de courbure. Le sens de parcours est matérialisé par les flèches. (extrait de de [Richards et Hoffman, 1985]).	57
4.5	Les codons ne capturent pas une dépression dans un profil de terrain.	57
4.6	Application de l'approche mutli-résolution de Cinque et Lombardi (extrait de [Cinque et Lombardi, 1995]).	58
4.7	Deux silhouettes différentes décrites par la même séquence.	60
4.8	De l'importance de l'orientation dans l'interprétation des formes de relief.	61
4.9	Les symboles de la grammaire qualitative de Magee (extrait de [Magee, 2002]).	62
4.10	Description d'une vue de Ayers Rock par la grammaire qualitative de Magee (extrait de [Magee, 2002]).	62
4.11	Les cinq types de ligne primitive retenus par Kulik et Egenhofer pour décrire les silhouettes (extrait de [Kulik et Egenhofer, 2003]).	63
4.12	Exemples de règles d'agrégation. De gauche à droite : une montagne (<i>mt</i>), une vallée (<i>vl</i>) et un plateau (<i>pl</i>).	64
4.13	Exemples de généralisation : une ligne verticale ascendante suivie d'une ligne primitive d'un ordre de magnitude inférieur (extrait de [Kulik et Egenhofer, 2003]).	65
4.14	Exemple de biais introduit par les règles de généralisation (avec $\omega < o$).	65
4.15	Schéma général de l'analyse qualitative d'une silhouette par le langage de Kulik et Egenhofer.	66
4.16	Exemple de silhouette. à gauche : représentation au niveau le plus fin. à droite : représentation au niveau le plus grossier, après application des règles de généralisation et de simplification.	67
4.17	Approche à base de primitives.	68
4.18	Approche basée sur les formes de relief.	70
5.1	Motifs, boîtes min-max et saillances. La flèche pointe une saillance partagée par deux boîtes min-max.	77

5.2	La boîte min-max et ses huit nœuds. Les quatre coins sont LT , RT , RD et LD . Les quatre bords sont T , R , D et L	78
5.3	Exemple de saillance dont l'extension spatiale est délimitée par deux points de mesure.	79
5.4	Une montagne modélisée par la séquence (LD, T, RD)	80
5.5	Une montagne modélisée par la séquence (LD, T, RD) . Les deux <i>saillances frontières</i> LD et RD peuvent occuper une position différente en fonction du choix des frontières <i>fiat</i>	80
5.6	Exemple d'une forme de relief qui ne possède pas de saillance intérieure.	81
5.7	Caractéristiques topologiques d'un motif. La flèche indique le sens de parcours.	86
5.8	Trois configurations possibles en fonction du choix des frontières <i>fiat</i>	88
5.9	La matrice des intersections.	90
5.10	Exemple d'une montagne contenant une autre montagne sans que les intérieurs s'intersectent.	97
5.11	Exemple d'auto-intersection dans une séquence irrégulière.	99
5.12	Exemple de séquence irrégulière qui n'inclut pas au moins un nœud du côté droit de la boîte min-max.	100
5.13	Choix du premier et du deuxième nœud.	100
5.14	Choix du nœud v_k et dérivation de deux nouveaux sous-ensembles connectés et ordonnés, pour $n = 6$ et $k = 3$	101
5.15	Les quatres côtes de la boîte min-max et les nœuds correspondants.	102
5.16	Ambiguïté de l'interprétation de la séquence (LT, RT)	103
5.17	Exemples de montagnes dont la silhouette est modélisée par la séquence (LD, T, RD) . Les flèches indiquent le sens de parcours de la silhouette.	104
5.18	Schématisation des 13 séquences régulières commençant par le nœud LD , se terminant par le nœud RD et ne comprenant pas le nœud D	104
6.1	Affichage de la silhouette de test dans l'interface.	110
6.2	Edition d'une séquence.	111
6.3	Application de la conjonction de trois filtres pour générer l'ensemble des séquences modélisant une élévation et sélection de la séquence modélisant la catégorie montagne.	111
6.4	Filtres utilisés pour définir la catégorie terrasse. <i>A gauche</i> : terrasse dont la partie ascendante précède la partie horizontale. <i>A droite</i> : terrasse dont la partie horizontale précède la partie descendante.	111

6.5	Une même forme de relief peut apparaître à deux niveaux d'abstractions différents.	112
6.6	Formes de relief capturées	113
6.7	Instanciation d'un point implicite.	114
6.8	Principales formes capturées en ajoutant les points implicites.	114
6.9	Méréologie des formes de relief capturées.	115
6.10	Résultat de l'analyse. L'utilisateur peut naviguer dans les différents niveaux d'abstraction (cadre en bas à droite).	116
6.11	Situation géographique des dunes de sables sous-marines aux abords de la rivière Trieux.	119
6.12	Modèle numérique de terrain des dunes de sables sous-marines et localisation des silhouettes analysées.	120
6.13	Résultat de l'analyse de la silhouette 1. Les quatre dunes sont mises en évidence.120	
6.14	Description hiérarchique de la silhouette 1.	122
6.15	Hiérarchie de la dune F_5	123
6.16	Description de la silhouette 2 dans laquelle trois dunes sont détectées.	124
6.17	Description de la silhouette une fois l'ambiguïté de la nature de D_1 levée.	124

Liste des tableaux

3.1	Les huit relations topologiques et les matrices 4-intersections correspondantes.	43
3.2	Les huit relations topologiques et les matrices 9-intersections correspondantes.	43
3.3	Interprétation ensembliste de RCC-8 (adapté de [Renz, 2002]).	46
4.1	Ensemble des segments de l'approche multi-résolution de Cinque et Lombardi.	58
5.1	Les 42 matrices 9-intersections correspondant aux configurations topologiques valides.	94
5.2	Expression des relations topologiques par des patrons 9-intersections.	95
5.3	Interprétation des 42 configurations valides.	96
5.4	Quelques exemples de catégories de forme de relief. Les silhouettes sont parcourues de gauche à droite de façon à ce que la terre soit toujours sur la droite.	99
5.5	Les différentes séquences modélisant les segments verticaux et horizontaux. La première séquence (en gras) correspond à la modélisation que nous privilégions par convention. Les flèches représentent le sens de parcours de la silhouette de façon à ce que la terre soit toujours à droite.	102
5.6	Distribution des séquences de la super-catégorie <i>élévation</i> dans les sous-catégories <i>montagne</i> , <i>plateau</i> et <i>crête</i>	105
6.1	Relations topologiques entre les formes de relief capturées.	116

Introduction

Durant les cinquante dernières années, l'informatique et ses applications ont radicalement modifié notre rapport à la géographie. Si, dans un premier temps, la géomatique a pu s'apparenter à une sorte de cartographie automatisée, l'émergence des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) s'est accompagnée de nouvelles perspectives.

La carte s'est imposée au fil des siècles comme une représentation évidente de l'information géographique. Il est donc naturel que les SIG se soient développés autour de modèles quantitatifs et de représentations géométriques principalement dérivés d'une vision cartographique du monde. Bien que ce type d'approche soit adapté dans de nombreux cas, il reste des situations dans lesquelles la carte ne reflète pas la façon dont un observateur conceptualise son environnement [Kuipers, 1978, Mark, 1999] ou interagit avec lui [Montello *et al.*, 2003]. C'est notamment le cas si on considère la perspective particulière d'un observateur situé au sol qui regarde le relief à l'horizon. Pour rendre compte de cette perspective, il est nécessaire de concevoir d'autres approches, plus en lien avec la cognition spatiale et dans lesquelles le rôle de la perception et de la communication prend une place prépondérante [Mark *et al.*, 1997, Mark et Smith, 2005].

Contexte et motivation de la thèse

L'évolution de la cartographie, de l'antiquité à nos jours, met en évidence la relation étroite entre une représentation de l'espace et les contextes culturel, religieux et scientifique dans lequel évolue le cartographe. La géographie de Strabon [Tardieu, 1867] décrit le monde connu par la civilisation occidentale au I^{er} siècle (*cf.* figure 1). Elle repose sur des données observées généralement qualitatives, mais elle est globalement juste d'un point de vue topologique [Kowalski *et al.*, 2007]. L'impossibilité d'accéder à une mesure précise de l'espace, notamment en mer, a favorisé la représentation, non pas de l'espace objectif tel que l'entend la cartographie moderne, mais d'un espace constitué de formes remarquables et de références culturelles.

Sous l'influence de Cosmas d'Alexandrie, la carte chrétienne du Moyen-Âge n'a plus pour objet de rendre compte de ce qui est observable mais de représenter le monde selon une interprétation théologique, un monde dont le centre est Jérusalem et dans lequel le Paradis



Figure 1 — Carte selon la géographie de Strabon (extrait de [Figuier, 1884]).

et l'Enfer ne sont pas relégués à des dimensions inaccessibles. Le mythe accède à une réalité aussi manifeste que l'expérience physique du monde prodigué par les sens. La carte n'est plus tant une représentation utilitaire qu'une expression de la foi chrétienne. Il a fallu attendre le XV^e siècle pour que la cartographie prenne sa forme moderne. En effet, jusqu'à cette période, les navigateurs ne disposaient pas de cartes pour la navigation et en étaient réduits au cabotage. Le lancement de grandes expéditions maritimes et la découverte de nouveaux territoires ont rendu nécessaire le développement de méthodes cartographiques efficaces pour la navigation dont sont issues les cartes que nous utilisons quotidiennement aujourd'hui.

Nous voyons à travers ces exemples qu'une représentation de l'espace géographique dépend à la fois des données disponibles (le monde connu), de l'interprétation qu'il en est donné (e.g., théologique, politique, scientifique, technique, narrative) et du message que l'on veut faire passer. Il en découle qu'une représentation de l'espace géographique tire sa complexité de la multiplicité des points de vue dont elle est issue et du contexte dans lequel évolue le cartographe.

Cela est particulièrement le cas lorsque nous abordons le relief. En effet, alors que la cité et les objets qui la composent sont le produit d'une intentionnalité fonctionnelle – et sont donc objectivement organisés en immeubles, rues, parcs, etc. – les formes de relief sont l'expression présente de phénomènes tectoniques et géologiques dynamiques. La géomorphologie fournit des typologies étendues des différentes formes de relief que nous pouvons observer sur la Terre. Selon ce point de vue scientifique, les formes de relief sont définies soit à travers une fonction (e.g., un bassin versant en hydrologie), soit en tant que résultat d'une dynamique géologique (e.g., l'érosion d'une montagne). Peut-on pour autant délimiter avec précision l'ensemble des formes de relief? Il semble bien que non. En effet, les approches ontologiques ont soulevé

plusieurs obstacles à un tel inventaire [Frank, 1997, Mark *et al.*, 1999, Smith et Mark, 1998, Smith et Mark, 2001, Smith et Mark, 2003, Mark et Turk, 2003b] :

- l'ensemble des formes de relief disponibles dépend de la langue et du contexte socio-culturel. Par exemple, le terme français *montagne* ne correspond pas exactement au terme allemand *berg* ;
- les formes de relief ne sont pas définies formellement en tant qu'elle-même. Elles apparaissent dans les théories scientifiques pour expliquer et rendre compréhensible une formation géologique ou un phénomène dynamique. Quand [Chorowicz et Deroin, 2003] isolent 12 types de profils suffisant pour extraire tous les types de profils topographiques d'un modèle numérique de terrain (MNT), ils ne relient pas ces profils à des formes de relief du langage courant ;
- une forme de relief n'est pas nécessairement bien délimitée. Ses frontières sont approximatives, ce qui rend difficile son association à un objet physique concret.

Le *monde perçu* n'est donc pas le monde modélisé dans les SIG. Il n'en a en effet ni la rigueur métrique, ni la cohérence globale, ni l'objectivité. Il n'est pour autant pas totalement dépourvu de structure, comme en attestent, par exemple, les expériences cognitives des Gestalt-théoriciens et des phénoménologues, les *affordances* de Gibson ou les prototypes de Rosch. En accordant une structure au monde perçu, nous formulons implicitement l'hypothèse qu'il doit exister une part d'objectivité dans les objets reconnus par un observateur. Nous partons donc du principe qu'il est possible de relier les objets du sens commun aux objets décrits par les modèles physiques du monde [Smith, 1995c].

Selon une perspective essentiellement cognitive, les formes de relief existent et acquièrent une fonctionnalité ou un sens à travers la perception que peut en avoir un observateur à un instant donné et ne peuvent prétendre à une existence objective en dehors de la relation observant/observé. Dans cette optique, nous pouvons admettre que le concept de forme de relief réifiée est, soit un concept subjectif propre à une société ou une culture donnée, soit une abstraction scientifique utile pour décrire un phénomène géophysique. Mais, dans la mesure où l'explication scientifique des phénomènes géologiques repose en grande partie sur l'usage de concepts du sens commun, c.-à-d. de principes et de concepts non formels auxquels nous nous référons pour évoluer quotidiennement dans notre environnement, ces deux façons de concevoir les formes de relief ne sont pas mutuellement exclusives. L'existence d'une certaine forme de consensus entre les individus, les communautés scientifiques et les cultures sur le fait qu'une montagne, par exemple, est identifiable comme une entité émergeant du relief, infirme l'hypothèse selon laquelle le processus cognitif qui donne un sens aux formes de relief est dénué de toute objectivité.

La question du sens donné aux objets géographiques et de l'adéquation des SIG à la conceptualisation propre à un utilisateur reste posée depuis la fin des années 1980 et la remarque de Couclelis : « *People manipulate objects (but cultivate fields)* » [Couclelis, 1988]. A l'époque, il s'agissait de sortir du débat raster-vector dans les SIG. En effet, le questionnement ne se situe pas dans le mode de représentation, forcément numérique, à mettre en œuvre dans

les SIG, mais dans la prise en compte des processus cognitifs guidant la perception des objets par un observateur humain. Il est possible d'aborder cette problématique en structurant séparément les données numériques d'un SIG et la conceptualisation humaine du monde, puis en proposant des passerelles efficaces entre ces structures. On retrouve, par exemple, ce type d'approche dans la triade de [Peuquet, 2002] qui projette tout objet dans les trois dimensions thématique, temporelle et spatiale. Mais, même si les structures formelles du relief (par exemple, les profils de [Chorowicz et Deroin, 2003]) sont reliées à des références sémantiques via la dimension thématique, cette association est imposée par l'utilisateur et est considérée comme allant de soi.

Le triangle sémiotique est couramment utilisé en linguistique pour différencier signifiant, signifié et référent. Si nous l'appliquons à la perception du paysage de la figure 2, nous distinguons trois aspects d'un même objet [Kuhn, 2005]. A partir du moment où la forme perçue correspond au concept de montagne tel que l'entend l'observateur, il est possible d'identifier un objet physique « montagne » puis d'y faire référence dans une représentation à l'aide d'un ou plusieurs symboles lexicographiques (e.g., montagne dans le discours, ▲ sur une carte). Les concepts et les symboles étant par nature soumis à la subjectivité de celui qui les définit, il est légitime de penser que l'objectivité de la présence d'une forme (que nous lui donnions le nom de *montagne*, *colline*, *hill*, *mount*, *berg* ou *menez*) tient dans certaines particularités physiques du relief. Ces particularités qui émergent de la matière et s'imposent à la perception sont les saillances à partir desquelles la perception organise la matière en objets signifiants et cohérents. Sans la présence de saillances, la matière paraît uniforme et aucun objet significatif n'en émerge. Une catégorie sémantique peut alors être définie comme une configuration spécifique de saillances qui permet de reconnaître un objet sans ambiguïté. Cette définition laisse une grande liberté de choix à chaque individu pour définir ses propres catégories. L'existence de consensus culturels ou communautaires n'est finalement que le produit de la nécessité de s'accorder sur des catégories communes afin de pouvoir dialoguer selon des références communes.

Intérêt applicatif

La diversité des modèles et des approches mis en œuvre dans les SIG pour représenter et analyser l'espace géographique reflète la complexité des phénomènes géographiques. Un SIG est compris comme une version moderne de la carte et rejoint en cela le paradigme cartographique. Son rôle est d'abstraire la complexité de l'espace et de fournir à l'utilisateur un outil efficace, rapide et intuitif pour accéder à l'information qui le concerne. En effet, l'apport de l'informatique ne s'est ni réduit à une croissance exponentielle des capacités de calcul à notre disposition, ni au géoréférencement des données stockées dans les bases de données. Elle a profondément modifié les moyens de communication, d'accès et de présentation de l'information. Une carte papier est construite *a priori*, selon des données accessibles, en fonction d'un besoin connu et à destination d'un public identifié. Les questions auxquelles

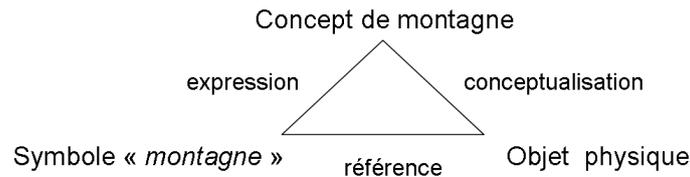


Figure 2 — Ce que perçoit un observateur : entre concept, symbole et objet physique.

doit répondre la carte sont connues – et tiennent dans les réponses qui sont données – alors qu’un SIG est conçu pour mettre à disposition les informations dont *pourrait avoir besoin* l’utilisateur.

La question de l’interaction entre un SIG et un utilisateur prend alors une ampleur négligée par la cartographie traditionnelle. En mettant en relation le sens commun et les modèles physiques de représentation de l’espace, il est possible de concevoir des SIG interagissant selon les conceptions de l’utilisateur tout en reposant sur des modèles numériques standards. Dans cette thèse, nous explorons cette voie pour la description du relief. A partir d’un modèle numérique de terrain, notre modèle permet à un SIG de construire une description sémantique, c.-à-d. une structure composée d’entités signifiantes et des relations qui les lient. Inversement, la description de son environnement physique par un utilisateur peut être transmise à un SIG afin, par exemple, de se situer ou de situer une scène particulière. Actuellement, pour effectuer une telle tâche, l’environnement doit être numérisé afin d’être compatible avec les représentations implantés dans un SIG (*cf.* figure 3). Dans la mesure où un SIG devient capable d’interpréter une description sémantique d’un relief et de le comparer à un modèle numérique de terrain, la tâche de l’utilisateur est simplifiée. Au lieu de transmettre une silhouette numérisée, il lui suffit de soumettre au SIG les entités remarquables (e.g., montagne, vallée) et leur organisation spatiale (e.g., recouvrement, adjacence).

En outre, le domaine d’application de la mise en relation sens commun-modèle physique ne se limite pas aux interactions entre un utilisateur et un SIG. En effet, la subjectivité des limites et de l’existence des formes de relief a généré un ensemble de conventions propres à chaque communauté scientifique. Dès lors, les données géographiques sont interprétées différemment par chaque communauté d’utilisateur. Par exemple, à partir d’un même relief, les vulcanologues et les géologues n’explorent ni les mêmes objets, ni les mêmes phénomènes¹. Cette

¹Ce point est très bien explicité par Combaluzier lorsqu’il cloisonne, certes péjorativement, les différentes



Figure 3 — L'échange d'informations sur un relief entre un SIG et un utilisateur nécessite généralement une étape de numérisation [Vance et Van Hamme, 1985, p. 33] (©Dargaud Benelux).

divergence interdisciplinaire – dont une conséquence majeure est la multiplicité des sources et des bases de données géographiques (e.g., SIG urbain, SIG marin) – donne une vision éclatée de l'information géographique, d'autant plus que les SIG sont de plus en plus facilement accessibles (notamment via le Web) et diffusés largement. Il devient alors nécessaire de faire le chemin inverse et d'intégrer dans les SIG les données nécessaires à l'interopérabilité entre différentes communautés tout en les structurant de façon à ce que chaque communauté en ait une vision cohérente avec ses usages et ses habitudes.

Méthodologie

Cette thèse a pour vocation d'établir une passerelle entre les représentations numériques implantés dans les SIG et les modèles cognitifs. La figure 4 présente les principaux concepts abordés et leur organisation dans le document.

Dans une première partie, nous avons tenté de mettre en évidence les principes de perception visuelle qui entrent en compte lorsqu'un observateur donne une signification à des éléments du relief. Au-delà de la perception, nous nous sommes posé la question de la réalité objective des objets physiques que tout individu identifie dans un relief. Autrement dit, la montagne existe-elle indépendamment de la représentation qu'un observateur se fait de son environnement ? [Smith et Mark, 2003] ont mis en évidence que la montagne du sens commun n'existe pas physiquement. Néanmoins, il existe certaines formes de saillances dans le relief qui imposent la présence de la montagne à un observateur. C'est pourquoi le modèle que nous proposons repose sur la notion de saillance.

disciplines associées à l'étude des montagnes : « *Laissant de côté les « horst », volcans et autres montagnes du profane qui, malgré parfois deux ou trois milliers de mètres d'altitude, ne présentent pas grand intérêt tectonique, étudions sommairement les chaînes plissées qui sont les vraies montagnes de géologues* » [Combaluzier, 1961, p. 134].

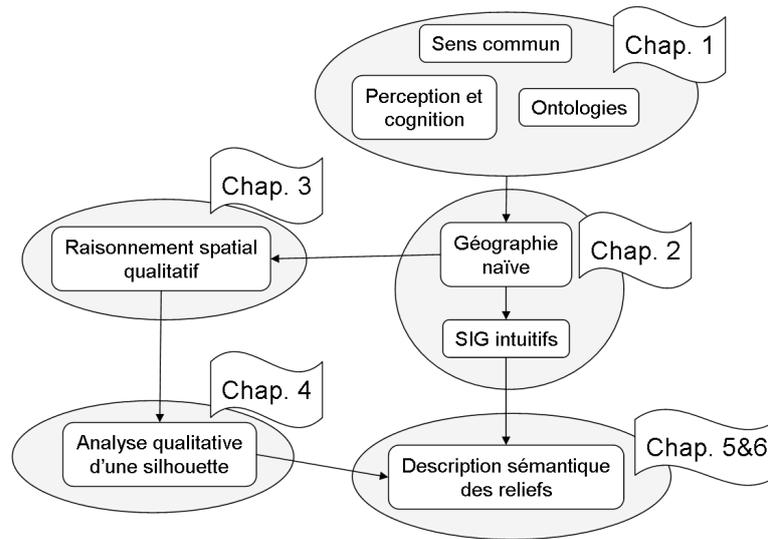


Figure 4 — Organisation des principaux concepts abordés dans la thèse.

La seconde partie de la thèse a été consacrée au développement du modèle. Nous nous sommes placés dans le cadre défini par la *géographie naïve* [Egenhofer et Mark, 1995] dont l'objet d'étude est l'ensemble des modèles formels du sens commun en géographie. Le raisonnement et la représentation qualitatif de l'espace offrent des méthodes efficaces pour lancer des passerelles entre des modèles quantitatifs et des modes de raisonnement cognitifs essentiellement symboliques. Le relief à l'horizon forme une silhouette (*cf.* figure 5) dont l'analyse qualitative consiste à en extraire les formes remarquables sous la forme d'une séquence de symboles. Toutefois, la plupart des approches sont fondées sur des symboles asémantiques. Le langage de [Kulik et Egenhofer, 2003] a ouvert la voie vers une description sémantique des reliefs mais il repose sur des primitives géométriques plutôt que sémantiques. Dans cette thèse, nous proposons une nouvelle approche qualitative pour la description sémantique des reliefs fondée sur des primitives perceptuelles (les saillances) et sémantiques (les formes de relief).

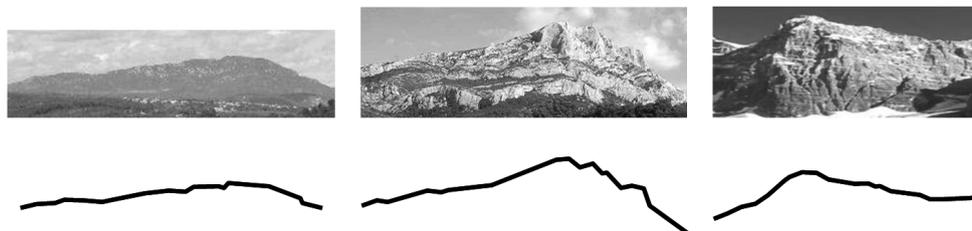


Figure 5 — Reliefs et silhouettes correspondantes.

Le mémoire de thèse est organisé comme suit. Le chapitre 1 aborde la question de la perception d'un point de vue cognitif tout en intégrant le sens commun. La perception est ici

comprise comme la construction d'un ensemble de signifiants par une intelligence complexe et non comme la mise en forme de données sensorielles par un processus mécaniste, ce qui nous amène à distinguer l'objet de sa signification. Dans le chapitre 2, nous traitons de la représentation de l'espace et de l'intérêt de la géographie naïve pour la réalisation de SIG intuitifs. Les principes du raisonnement spatial qualitatif, essentiel dans le cadre de la géographie naïve, sont décrits dans le chapitre 3. Le chapitre 4 présente un état de l'art des méthodes d'analyse qualitative de silhouettes présentant un intérêt pour notre approche. Notre réflexion a abouti à un modèle qualitatif pour la description sémantique des reliefs. Il est détaillé dans le chapitre 5. Le chapitre 6 présente le prototype que nous avons implanté afin de tester et de confronter notre modèle à des cas concrets. Enfin, le mémoire se conclut par un bilan des travaux effectués et par les perspectives ouvertes par notre recherche.

Perception des formes de relief

« Voir le monde comme je suis, non comme il est. »

Paul Eluard

Selon [Lalande, 1926], la perception est « *l'acte par lequel un individu, organisant immédiatement ses sensations, les interprétant et les complétant par des images et des souvenirs, s'oppose un objet qu'il juge spontanément distinct de lui, réel et actuellement connu de lui* ». Elle est une représentation par l'esprit du monde réel, extérieur à l'individu et dont l'expérience qu'il en a est limitée par ses sens. Ainsi, les objets du sens commun ne sont pas toujours les objets de la réalité physique. Il est alors nécessaire de s'interroger sur la nature des objets du monde réel, à la fois en tant que catégorie sémantique et en tant qu'objet qui s'impose comme une entité individuelle à la perception.

1.1 Sens commun

Le sens commun désigne l'ensemble des vérités, des évidences et des lois de la croyance humaine. Il se rapporte au « bon sens » de Descartes et représente le « *monde des ombres* » selon Platon. [Wilson, 1992] précise que le sens commun est une intuition autonome (*unaided intuition*) : c'est un raisonnement sans instrument ni mesure. Dire que la Terre tourne autour du soleil est totalement compatible avec le sens commun puisque c'est un fait *apparemment* évident.

Le sens commun porte sa légitimité dans l'universalité de ses lois sans que celles-ci aient besoin d'être démontrées. Ce qui n'inclut pas les mythes, les légendes ou les contes qui sont généralement, et à dessein, hors du domaine du sens commun. Le magique, le merveilleux ne sont pas des phénomènes directement accessibles à la perception et à l'action. Or, justement, le sens commun se construit en fonction des interactions d'un observateur avec son environnement immédiat et de la perception particulière – et nécessairement égocentrique – qu'il

en a. Les concepts que nous manipulons ont non seulement un sens par eux mêmes et par interactions internes, mais aussi, et surtout, par l'aspect fonctionnel qu'ils recouvrent lors de l'interaction entre l'agent intelligent et son environnement¹.

Barry Smith insiste sur le fait que les concepts spatiaux ou les représentations spatiales ne s'assemblent pas sous la forme d'une carte ou d'une banque de données [Smith, 1995a, Smith, 1995c]. De même, lorsque Kuipers parle de la « carte dans la tête » [Kuipers, 1982], il prend bien garde de préciser que le terme « carte » qu'il utilise ne renvoie pas à la notion de carte géographique. Le monde du sens commun n'est donc pas le monde physique, au sens mécaniste du terme. Cependant, [Smith et Casati, 1993] ont remarqué que les travaux qui se réclament de la *physique naïve* supposent comme acquis la soumission du monde conçu selon le sens commun à des schémas standards tels que la logique du premier ordre ou la théorie des ensembles. Il s'agit, selon les mêmes auteurs, d'un réductionnisme pragmatique tout a fait adapté à l'objectif final de l'intelligence artificielle (i.e., implémenter un raisonnement sensé et autonome) mais dont la portée est limitée et ne saurait englober tous les raisonnements de sens commun.

Le sens commun n'impose pas, au sens où l'entendent les logiciens, une cohérence globale de la connaissance. Deux propositions peuvent se contredire et des considérations sociales ou culturelles peuvent intervenir dans les rapports entre l'homme et son environnement géographique. Le cadastre, et plus généralement la délimitation de frontières arbitraires, est un exemple de cette interaction entre des idées (des objets purement conceptuels n'ayant pas d'existence physique objective) et le monde réel. Dans cette optique, la modélisation du sens commun renvoie aux processus sensori-cognitif d'où émergent ces objets issus de la relation entre l'observé et l'observant.

1.2 La perception comme expérience du monde

La perspective galiléo-newtonienne stipule que la nature a une structure objective, indépendante de l'observation, et que l'espace est un cadre primaire et universel. Cependant, les sciences cognitives ont montré que les individus présentent et infèrent l'espace de façon majoritairement qualitative [Couclelis, 1992]. Par exemple, un relief, représenté dans un SIG par une fonction mathématique de surface, est perçu par un observateur humain comme un ensemble d'objets catégorisés en relation les uns avec les autres. La description d'un relief associe les objets perçus à des lexèmes géomorphologiques tels que « montagne », « vallée » ou « plateau ». La facilité avec laquelle nous effectuons ce type de tâche est déconcertante au regard des difficultés rencontrées par les cognitivistes et les roboticiens pour les modéliser. La cohérence de la perception entre les individus (tout le monde voit la montagne) est tout aussi déconcertante puisqu'elle suppose un mécanisme commun de perception des formes, constituants fondamentaux de la façon dont le monde extérieur nous apparaît. L'existence de

¹La théorie écologique de la perception [Gibson, 1979] et le réalisme expérientiel approfondissent le rôle des interactions entre agent et environnement dans les processus de perception (cf. section 1.2)

formes consensuelles suppose qu'il existe un processus permettant à la matière de s'organiser et de se structurer qualitativement en formes.

1.2.1 Intellectualisme

La perception du monde qui nous entoure est possible grâce aux différents sens dont est doté notre corps (vue, ouïe, toucher, odorat, goût, ...). Les intellectualistes postulent que, puisque chaque sens est confiné et ne peut pas accéder aux autres, la perception d'un objet et de son unité est nécessairement le résultat d'un examen *par l'âme*² de la mise en commun des sens. Par ailleurs, Descartes dans sa « Méditation Seconde » montre que la persistance de l'objet à travers le mouvement ou les changements d'apparence ne peut se justifier qu'à travers le jugement, compris ici comme un acte d'inspection de l'esprit. Plus tard, Malebranche dans « De la recherche de la Vérité » introduit la notion d'*idée*, selon laquelle nous ne percevons que ce qui existe déjà : « [...] afin que l'esprit aperçoive quelque objet, il est absolument nécessaire que l'idée de cet objet lui soit actuellement présente » [Malebranche, 1842, p. 239]. La perception est donc plus qu'une simple sensation en ce qu'elle organise un ensemble de sensations en un tout signifiant : « la perception est déjà une fonction d'entendement » [Alain, 2002]. Pour les intellectualistes, la perception donne forme aux sensations à travers le jugement et la mémoire.

1.2.2 Comportementalisme

Rompant avec le débat philosophique de la perception, le comportementalisme propose une approche neuropsychologique de la perception fondée sur le concept de couple stimuli-réponses. C'est une approche purement mécaniste qui se borne à étudier scientifiquement et expérimentalement le comportement comme réponse à un stimulus externe et exclut toute référence à la conscience [Watson, 1919]. En accord avec le courant de la psychologie cognitive qui postule que 99% d'une expérience perceptuelle est issue d'un seul sens [Neisser, 1976], le comportementalisme est forcément réducteur en ce qu'il considère les diverses sensations indépendamment alors que, depuis Platon, nous savons que les différentes stimulations en amont de la perception proprement dite sont associées, redondantes et complémentaires. Toutefois, en introduisant un champ expérimental en psychologie³, le comportementalisme a montré que la perception reposait en partie sur une « psychologie objective » dont l'introspection et la conscience sont absentes.

²L'*âme* désigne ici le siège de la raison et de l'intelligence.

³Le comportementalisme a notamment permis le développement des principes élaborés par Pavlov sur l'apprentissage et par Darwin sur l'adaptation à l'environnement.

1.2.3 Gestaltisme

La Gestaltthéorie suggère que la part d'objectivité dans ce que nous percevons est un ensemble spontanément organisé et structuré selon la « *loi de la bonne forme* » [Zusne, 1970] indépendamment de l'observateur, de son savoir ou de son expérience. En posant que le tout est supérieur à la somme de ses parties, la Gestaltthéorie affirme que la perception ne se réduit pas à un ensemble de sensations mais que toute perception est d'emblée la perception d'un ensemble. Ce que l'on perçoit s'organise, non par agrégats de morceaux, mais par ensembles : lorsqu'on reconnaît une forme, c'est l'ensemble de la forme qui a du sens. Ces formes structurées perçues, les *Gestalten*, sont inséparables de la matière et sont données intuitivement avec la matière et en elle. Les actes cognitifs – le jugement et la mémoire des intellectualistes – sont exclus du processus de perception.

1.2.4 Approche écologique et affordances

Pour expliquer la persistance de la perception d'un objet malgré le mouvement ou les changements de perspective, [Gibson, 1966] invoque des propriétés invariantes du monde physique. Dans le cas de la perception visuelle, Gibson prétend que ces invariants sont transmis directement par le nerf optique, sans intervention de la pensée ou d'une quelconque forme de conscience. L'objectivité de l'individuation des formes se déduit alors de la similarité des systèmes individuels : tout individu ayant le même système visuel voit les choses de la même façon. Plus tard, dans sa théorie écologique de la perception [Gibson, 1979], Gibson insiste sur l'importance de l'interaction constante entre l'individu et son environnement. Les propriétés invariantes existent parce qu'elles proposent une opportunité d'action avec l'environnement. Gibson leur a donné le nom d' *affordances*. Une porte, un arbre ou un escalier sont des exemples d'affordances qui renvoient respectivement et non exclusivement aux interactions ouvrir, grimper et monter. La subjectivité de la perception naît de l'intérêt porté à chaque affordance : « *The observer may or may not perceive or attend to the affordance, according to his needs, but the affordance, being invariant, is always there to be perceived.* » [Gibson, 1979, p. 137]⁴. La perception est le résultat d'une interaction physique et directe avec le monde à deux niveaux [Neisser, 1987] :

- perception des affordances qui s'imposent à l'observateur en toute objectivité ;
- interprétation des affordances en fonction des besoins immédiats et des influences socio-culturelles.

1.2.5 Réalisme expérientiel

Le réalisme expérientiel [Lakoff, 1987, Johnson, 1987] se démarque du gestaltisme lorsqu'il émet l'idée que, pour expliquer l'apparente cohérence du monde perçu, il suffit d'admettre que les fonctions cognitives fonctionnent de façon similaire chez tous les individus. L'isomorphisme

⁴Cité par [Peuquet, 2002].

entre la structure de la réalité et les processus sensoriels et cognitifs que reflètent les *Gestalten* n'est alors plus nécessaire même si l'on admet qu'il n'y a pas de connexion directe entre le monde physique et le monde perçu [Mark et Frank, 1996]. Ce discours suppose qu'il existe un monde physique réel dont la plupart des caractéristiques sont mesurables et dont l'expérience fournit à un observateur la matière nécessaire pour que la représentation mentale qu'il se fait du monde soit cohérente avec la réalité. L'influence du réalisme expérientiel en géographie a été étudiée dans [Couclelis, 1988, Mark et Frank, 1996, Meathrel, 2001]. Il est notamment montré que la perception de l'espace repose sur des catégories (cf. 1.3.1) dérivée de la nature physique de l'organisme humain, de l'expérience individuelle et collective et de l'interaction directe avec le monde.

1.2.6 Phénoménologie

La phénoménologie, en refusant d'exclure l'observant de l'observé, propose une position intermédiaire entre réalisme (comportementaliste, expérientiel ou gestaltiste) et idéalisme (intellectualiste). Selon l'approche phénoménologiste, la perception ne dissocie pas l'observant de l'observé. Elle ne se pose pas comme un jugement extérieur au monde, mais comme un rapport intime – le contact avec les objets et le sentiment de leur présence – entre l'observateur et son environnement d'où naît la sensation d'exister. Les phénoménologistes inscrivent la perception d'une forme particulière dans une conception plus générale du monde dont la sensation « d'être au monde » est au centre. Ainsi, la perception n'est plus un mode de connaissance, mais de croyance [Husserl, 1961]. En cela, ils rejoignent l'intellectualisme tout en minimisant la part de raisonnement et d'opérations intellectuelles conscientes : la perception doit rester un acte intuitif.

Il est possible de percevoir un objet à partir du moment où il se distingue de l'homogénéité de la matière, c.-à-d. lorsqu'il est caractérisé par une forme. La phénoménologie s'accorde avec le gestaltisme pour convenir que la perception de formes est rendue possible par l'existence de discontinuités qualitatives dans le champ de perception. Ces discontinuités génèrent une saillance phénoménologique permettant à la forme d'être perçue et reconnue, c.-à-d. au phénomène d'être un phénomène. Notons que, contrairement aux affordances de Gibson, il n'y a pas assimilation entre la forme et la saillance : cette dernière est constitutive et non substantielle.

La subjectivité de la perception naît alors de l'interprétation par l'observant. Dans l'exemple de la figure 1.1, la lettre B et le nombre 13 sont représentés par une même forme, dont la structuration en un tout résulte des lois de la bonne forme mais dont l'interprétation dépend du contexte. Si nous nous replaçons dans un contexte géographique, cela signifie que la forme d'un relief ne suffit pas à le caractériser, c.-à-d. , par exemple, à différencier un tas de sable d'une montagne. Il faut prendre en compte le contexte, c'est-à-dire les formes de relief voisines et l'attendu de l'observateur.

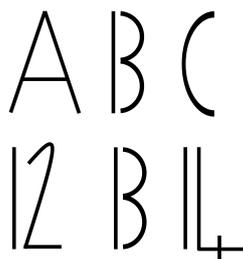


Figure 1.1 — L'interprétation d'une forme dépend du contexte.

1.2.7 Discussion

Rendre compte de ce qui est perçu par un individu n'est pas compatible avec la science qui vise à découvrir la réalité objective : « *La science n'a pas [...] le même sens que le monde perçu pour la simple raison qu'elle n'en est qu'une détermination ou une explication* » [Merleau-Ponty, 1945].

Une vision réaliste (nous pourrions dire physique, mécaniste ou galiléo-newtonienne) de la science nous enseigne que le monde, et en particulier l'espace substrat qui lui donne corps, est un cadre universel dans lequel une forme est une structure qualitative émergeant de l'intériorité substantielle de la matière. La forme perçue a donc un caractère objectif indépendant de l'observateur : elle doit exister pour être perçue. A l'opposée, l'idéalisme pose qu'une forme est une construction de l'esprit (de l'âme ou de la conscience). Il est nécessaire que l'idée de la forme existe pour qu'elle soit perçue, sans qu'il soit nécessaire que la forme existe physiquement. Entre ces deux approches diamétralement opposées que sont le réalisme et l'idéalisme, la phénoménologie propose une position intermédiaire, ce qui nous amène à distinguer trois types de réalité :

- Le réalisme fait appel à une réalité scientifique, démontrable, mesurable et objective qui existe en dehors de tout observateur ;
- L'idéalisme renvoie à l'imaginaire, au fantasme, à la légende et à la mythologie, c.-à-d. à ce qui est pure construction de l'esprit ;
- La phénoménologie conçoit une réalité sensible qui n'existe qu'à travers la relation entre l'observé et l'observant : je perçois les choses telles qu'elles m'apparaissent, « *le monde tel que je suis, non comme il est* ». Nous avons bien là une position intermédiaire puisque ce qu'impose l'espace (e.g., les *Gestalten* et les *affordances*) est perçu avant tout par un individu, sa conscience, son inconscience et ses schémas cognitifs propres.

Une géographie de sens commun doit se poser la question de savoir à quel niveau de réalité se situent les objets géographiques manipulés afin de faire l'interface entre ce qui est perçu par l'observateur (la réalité sensible) et ce qui est calculé par la machine (la réalité physique ou sa représentation virtuelle).

La section suivante aborde cette question pour la classe particulière d'objets géographiques concernée par nos travaux : les formes de relief.

1.3 Considérations ontologiques

L'ontologie est la branche de la philosophie qui répond – ou tente de répondre – à la question de l'être ou de l'existence [Frank, 1997]. Construire une ontologie d'un domaine consiste à décrire systématiquement les composants de la réalité relevant de ce domaine, ainsi que les relations entre ces composants et avec des composants d'autres domaines (donc d'autres ontologies). Parallèlement à cette définition canonique, les systèmes d'information font usage du terme ontologie dans un sens plus pragmatique en tant que « spécification d'une conceptualisation » [Gruber, 1993].

Contrairement à l'ontologie traditionnelle, l'ontologie pragmatique n'aborde pas la question de l'être. Il s'agit plutôt de décrire avec précision les concepts employés et de les formaliser dans un cadre théorique afin de rendre compte d'une certaine logique sémantique et syntaxique propre à un domaine donné. Les SIG sont construits autour de ces ontologies pragmatiques, issues de l'expertise de thématiciens (e.g., cartographes, géomorphologues, urbanistes).

La description d'un relief associe les objets perçus à des lexèmes géomorphologiques tels que « montagne », « vallée » ou « plateau », ce que nous dénommons des formes de relief. Constatant que les lexèmes géomorphologiques associés aux objets perçus par un observateur décrivant un relief renvoient à des concepts du sens commun, il est nécessaire, dans le cadre de la géographie naïve, de chercher à déterminer le niveau de réalité dans lequel les formes de relief s'inscrivent.

Les formes de relief sont présentes dans le discours et renvoient à des concepts évidents et indispensables à l'appréhension de notre environnement naturel au quotidien. Elles apparaissent dans différentes terminologies scientifiques en tant que symboles signifiants alors même que les géomorphologues, les géographes ou les cartographes n'en donnent pas une définition formelle [Frank *et al.*, 1986]. Elles sont réputées exister puisqu'elles participent à la description d'un domaine : les montagnes, par exemple, sont mises en évidence sur les cartes (ombrage et courbes de niveau) et sont citées, en tant que constituant du relief, dans les ouvrages de géographie physique [Strahler et Strahler, 1992, Genest, 2000]. Leur présence dans le discours, malgré les difficultés rencontrées pour en formaliser le concept, laisse entrevoir que la communication entre l'homme – centrée sur la connaissance – et la machine – centrée sur l'information – ne peut pas se concevoir sans une ontologie qui prend en compte le processus de sémantisation de l'information. Les différents processus cognitifs menant de la perception des formes de relief à la description d'un relief, doivent s'articuler autour de notre capacité à réaliser une ontologie des formes de relief [Smith et Mark, 2003].

Notre réflexion se porte sur la façon dont peut-être construite une typologie des formes

de relief et les processus qui guident la réification d'une forme de relief particulière.

1.3.1 La montagne en tant que catégorie

La plupart des formes de relief sont définies dans le langage naturel de telle façon qu'il est très difficile d'en déduire une formalisation immédiate et évidente. D'après le *Petit Robert* (1981), une montagne est une « importante élévation de terrain ». Il s'agit d'une définition satisfaisant le sens commun et dont on peut déduire une formalisation géométrique (par exemple, *montagne* \equiv *forme convexe*). Une colline étant définie comme une « petite élévation de terrain arrondie », elle est aussi de *forme convexe*. La définition du Petit Robert nous amène à distinguer montagnes et collines en comparant les hauteurs et les rayons de courbure, mais aucune règle objective ne s'impose. Quelle est la hauteur maximale d'une colline ? Comment qualifier une petite élévation non arrondie ? Il n'existe pas de réponse objective, ce qui laisse penser que la colline se distingue d'une montagne par une ou plusieurs caractéristiques non géométriques.

Mathématiquement, une catégorie est modélisée par un ensemble [Lakoff, 1987]. Selon cette vision, il est supposé qu'une catégorie dispose de toutes les caractéristiques d'un ensemble mathématique et, notamment :

- il existe un ensemble suffisant de propriétés qui permettent de placer un objet dans une catégorie sans ambiguïté ;
- tous les membres d'une catégorie sont de bons exemples de la catégorie.

Ces deux aspects sont incompatibles avec les résultats expérimentaux obtenus en sciences cognitives [Smith et Medin, 1981, Lakoff, 1987]. D'une part les catégories cognitives sont souvent ambiguës, i.e., il est parfois difficile de statuer si un objet appartient ou pas à une catégorie, et, d'autre part, une fois un objet placé dans une catégorie, il n'est pas certain qu'il en soit un bon exemple [Rosch, 1978]. Lorsqu'on demande à un individu de citer un type d'oiseau, il est fort probable qu'il pensera à un moineau ou un rouge-gorge, plutôt qu'à un pingouin ou une autruche.

Un consensus, compatible avec les résultats expérimentaux, s'est créé autour du principe du bon exemple [Smith et Medin, 1981] ou de prototype, un bon exemple idéal qui ne correspond pas à un exemple réel [Lakoff et Johnson, 1980]. Une catégorie est modélisée par un ensemble de prototypes qui, en quelque sorte, illustrent la catégorie. Deux membres d'une même catégorie peuvent être sensiblement différents et n'avoir rien en commun hormis leur ressemblance à un prototype commun ou à des prototypes différents.

Bien que cette théorie explique de façon satisfaisante les données expérimentales, il est difficilement imaginable que la perception et la reconnaissance d'un objet impose à un individu de le comparer à chacun des prototypes de toutes les classes. Des expériences sur la reconnaissance d'objet [Rosch *et al.*, 1976, Smith *et al.*, 1978, Grill-Spector et Kanwisher, 2005] suggèrent une hiérarchie de catégories, des plus générales aux plus précises. Un objet est

tout d'abord reconnu dans une catégorie de base puis, en faisant appel à un processus cognitif supposant une attention particulière à l'objet, est placé dans une sous-catégorie.

Si nous retenons les définitions du *Petit Robert*, la montagne et la colline sont deux sous-catégories de la catégorie générale « élévation de terrain ». La question de la différenciation entre montagne et colline ne remet pas en question l'individuation d'une entité objective « élévation ». Elle relève de processus cognitifs en aval et fait intervenir des critères subjectifs sociaux et culturels. Par exemple, le *Menez-Hom* est un des plus hauts sommets des *Montagnes Noires* alors que sa forme arrondie laisserait plutôt supposer qu'il s'agit d'une colline.

La montagne est indéniablement une catégorie sémantique. Les difficultés à en formaliser le concept laissent penser qu'elle ne correspond cependant pas à une réalité physique objective : la montagne ne s'impose pas en tant que telle à la perception. Elle serait plutôt l'interprétation d'un ensemble de saillances – qui, elles, s'imposent objectivement à la perception – dont l'organisation spatiale renvoie à une catégorie issue de critères sociaux, culturels ou simplement conventionnels.

1.3.2 La montagne en tant qu'objet

Dire que les montagnes existent ne répond pas à la question de leur nature. La modélisation de la description du relief nécessite de prendre en compte la relation des formes de relief à la réalité physique. En cela, les ontologies pragmatiques, puisqu'elles axiomatisent les formes de reliefs et occultent les relations avec d'autres ontologies, s'avèrent insuffisantes. Il nous faut en effet nous poser la question de l'universalisme – au sens existence objective – des formes de relief. Ce point a déjà été discuté par [Smith et Mark, 2003] à travers la question : « Les montagnes existent-elles ? ». L'interrogation concerne le niveau de réalité auquel est associé une forme de relief, c'est-à-dire l'influence de l'expérience – connaissance et contexte – de l'observateur sur l'observation et, par conséquent, sur la représentation qu'il a de l'observé.

Les formes de relief, lorsqu'elles sont définies, ne le sont qu'à l'intérieur d'un domaine particulier. Cet apparent paradoxe – baser une science explicative et prédictive telle que la géomorphologie sur des concepts dont la réalité n'est pas démontrée – est dû à la nature exclusivement descriptive des concepts associés aux formes de relief. Une théorie scientifique en hydrologie ou en érosion ne nécessite pas le concept de montagne ou de vallée pour être développée. En revanche, l'interprétation de la théorie et la description des phénomènes mis en évidence font usage des formes de relief. Par conséquent, le concept de montagne, s'il a indubitablement sa place dans une ontologie pragmatique du relief, ne relève pas d'une réalité physique objective.

Il est certain qu'en nous préoccupant de la perception de l'espace par un individu donné, nous introduisons la notion de variation culturelle de la conceptualisation de l'espace et que nous ne pouvons plus nous positionner dans un référentiel conceptuel absolu [Levinson, 1998].

En s'interrogeant sur ce qu'était une représentation de l'espace, [Depeau, 2006] pointe l'influence de la psychologie sociale et environnementale dans le rapport de l'individu à son espace environnant. Pour elle, la cognition environnementale, comprise comme la représentation par un individu de son environnement, fait appel à la fois à la cognition spatiale telle qu'elle est étudiée en sciences cognitives, mais aussi à la cognition sociale qui reste encore aujourd'hui le domaine réservé des sciences humaines. Parallèlement, mais indépendamment à notre connaissance, une discipline récente, l'*ethnophysigraphie* ou « *ethnoscience of landforms* » étudie les variations socio-linguistiques des éléments de la géographie physique [Mark et Turk, 2003a]. L'*ethnophysigraphie* cherche à documenter et comparer les termes relatifs aux paysages naturels en usage dans différents contextes culturels et linguistiques.

Cependant, il est difficilement concevable de prétendre que la montagne est un mythe et que son existence purement fortuite n'est que le résultat contextuel d'une évolution culturelle et civilisationnelle particulière. La part d'objectivité contenue dans le concept de montagne a été mise en évidence par [Horton, 1982]. Il a montré que ce concept existe dans toutes les sociétés et toutes les cultures – même s'il n'y a pas une correspondance exacte entre les termes : l'allemand *Berg* ne recouvre pas nécessairement exactement le français *montagne*. Cela signifie que tout individu placé face à une montagne la voit mais que tout observateur ne la perçoit pas de la même façon.

L'identification de certaines formes de relief et leur réification est souvent la conséquence d'une propriété particulière. Ainsi, l'Everest est connu en tant que « plus haute montagne du monde » alors que peu de personnes sont capables de la reconnaître sur une photo (cf. figure 1.2). Le mont Olympus sur Mars se nomme ainsi parce qu'il s'agit de la plus haute montagne connue dans le système solaire. Il existe donc des processus cognitifs de réification et d'identification des formes de relief à travers une catégorisation dans un premier temps, puis une caractérisation des éléments dans chaque catégorie dans un second temps.

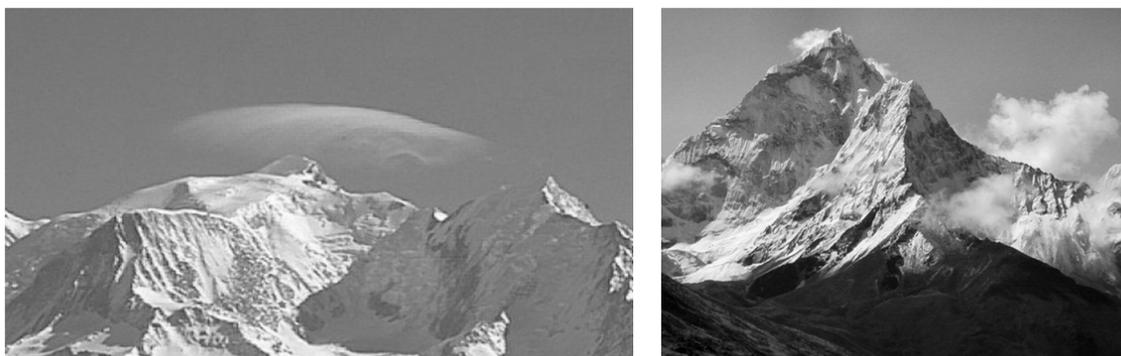


Figure 1.2 — L'Everest est une montagne très connue. Pourtant peu de personnes sont capables de l'identifier d'après sa forme et dire laquelle de ces deux photos en est une représentation.

Selon une approche physique de la perception, la forme n'est pas définie pour ce qu'elle

est, mais à travers un processus mathématique et déductif qui modélise l'objet reconnu en explicitant des contraintes géométriques. La forme identifiée et reconnue est dans ce cas l'aboutissement d'un raisonnement fondé sur la perception et la mesure de différentes grandeurs. Dans une tentative de formalisation du raisonnement spatial qualitatif, [Davis, 1990] pose que tout objet est défini par l'ensemble des points qu'il occupe dans l'espace. Selon ce point de vue, une montagne n'existe pas car elle ne peut pas être caractérisée simplement par l'ensemble des points qui la constituent. Où commence la montagne ? Où finit-elle ? Autant un objet manufacturé a une limite évidente dans l'espace, autant une montagne n'a pas de frontière précise. L'incertitude sur la frontière des objets géographiques est une problématique liée à toute modélisation du relief ou des entités géographiques en général [Frank, 1996a, Smith et Mark, 1998, Montello *et al.*, 2003, Smith et Mark, 2003].

D'un point de vue ontologique, il est important de distinguer entre les frontières *fiat* et les frontières *bona fide* [Smith et Mark, 1998, Smith et Varzi, 1997, Smith et Varzi, 2000]. L'existence d'un objet *bona fide* est avérée par une forme bien délimitée, c.-à-d. par une extension spatiale révélée par des discontinuités qualitatives [Smith, 1995b]. Il est aisé de déterminer où commence une table et où elle finit. En revanche, un objet *fiat* n'est pas une forme d'un point de vue phénoménologique puisque sa frontière arbitraire n'est pas révélée par des discontinuités qualitatives. Par exemple, les frontières administratives d'un état – lorsqu'elles ne sont pas délimitées par une rivière ou un mur – sont *fiat* puisqu'elles ne correspondent pas à une réalité physique. Si on retire les frontières administratives d'une carte, il devient très difficile, voire impossible, de localiser avec précision les états et les régions. Le cas de la montagne est ambiguë car, bien que ses frontières soient manifestement *fiat*, elle s'impose à la perception et peut toujours être localisée : toute personne peut ressentir la présence d'une montagne, soit en observant le paysage, soit en se déplaçant sur ce paysage⁵. L'existence d'une montagne est manifeste dans le sens où elle influence l'action des personnes qui sont en contact avec elle, mais la séparation stricte qui la délimite est un acte arbitraire guidé par des motivations telles que la protection d'une zone de l'invasion des touristes ou de l'exploitation minière [Fisher et Wood, 1998]. [Smith et Mark, 1998] remarquent que la frontière d'une montagne, comme de nombreux autres objets géographiques naturels (rivière, lac, route, état) n'est que partiellement *fiat*. Le sommet de la montagne, par exemple, est une saillance correspondant à une discontinuité des propriétés de l'espace délimitant ce qui est la montagne (la terre) et ce qui n'est pas la montagne (le ciel) autour de ce point. La partie *fiat* de la frontière correspond à la base de la montagne : elle est consensuelle et ne relève pas nécessairement de la perception.

La montagne, en tant qu'objet, est une partie du relief. En raison de ses frontières *fiat*, il n'est pas possible de lui associer une extension spatiale objective. Elle existe cependant de

⁵Précisons ici qu'il y a une différence notable entre observer une montagne et l'escalader. Dans le premier cas, l'observant perçoit la montagne dans sa globalité. Dans le second cas, la montagne est perçue localement, sans vision d'ensemble. Il ne peut savoir qu'il est sur une montagne qu'indirectement, par déduction à partir de sa situation, par exemple : « Je suis sur une falaise, il y a 300m de vide sous moi et je suis entouré de montagnes ».

façon certaine en son sommet qui peut être qualifié de saillance au sens phénoménologique du terme, c.-à-d. de discontinuité des propriétés qualitatives de l'espace en ce point. Cependant, la montagne ne s'étend pas à l'infini dans toutes les directions : en nous éloignant suffisamment, nous sommes certain de ne plus être sur la montagne. Nous conviendrons, toujours en accord avec une perspective phénoménologique, que cette certitude s'appuie sur la perception d'une saillance. Soit qu'elle marque une limite évidente de la montagne, soit qu'elle nous indique que nous nous trouvons sur un autre objet distinct de la montagne.

1.4 Conclusion

La notion d'existence est centrale à notre questionnement. Les ontologistes et les philosophes s'accordent à considérer que l'existence est univoque et que l'outil prédominant pour la formalisation est la logique du premier ordre. Dans un tel langage, l'existence d'un objet est avérée si et seulement si il est nécessaire pour comprendre et expliquer le monde selon une théorie formalisée dans un langage logique du premier ordre. Plus formellement, [Quine, 1980] affirme, en introduisant le « *criterion of ontological commitment* », qu'être (au sens ontologique du terme) c'est être la valeur d'une variable liée dans une formalisation de premier ordre d'une théorie scientifique. [Smith et Mark, 2003] précisent que « *we need only to determine whether quantification over entities of kind K is needed in order to support scientific prediction of some relevant sort* ». Concrètement, il nous est suggéré que, puisque les géomorphologues et les géographes ne formalisent pas les montagnes [Frank *et al.*, 1986], ces dernières n'existent pas, ou du moins sont inutiles dans toute théorie physique du relief. En revanche, la montagne est un concept auquel il est fait appel pour comprendre et prédire le comportement humain [Smith et Mark, 2003]. Nous avons vu que la montagne s'inscrivait dans une théorie primaire⁶ [Horton, 1982] dans le sens où n'importe quel observateur perçoit quelque chose – une montagne dans la plupart des cas, mais parfois tout autre chose en fonction des variations sociaux-linguistiques – là où elle se trouve. L'objectivité de la perception d'un concept *a priori* abstrait laisse penser qu'il existe un ensemble d'éléments *réels* (au sens de Quine) desquels émerge une montagne. Nous désignons par *saillances* ces éléments réels. Nous ne retenons pas la notion d'*affordance* car cela reviendrait à accepter la métaphore « *table-top* » afin de rendre la montagne manipulable et à ignorer les spécificités d'échelle de la montagne. Cette réduction n'est pas souhaitable et, plutôt que les *affordances* et leur rapport fonctionnel à la matière, nous préférons la notion plus visuelle de *saillances*.

Postulat 1 (Nature objective des saillances) *Une saillance est une extension de la réalité physique de l'environnement, elle se déduit des propriétés géométriques de l'espace et s'impose à la perception de tout observateur.*

⁶Pour Horton, une *primary theory* est la partie du sens commun que l'on retrouve dans toute culture et chez tout être humain. Elle s'oppose aux *secondary theories*, les croyances populaires propres aux différents contextes sociaux et économiques [Smith et Mark, 2001].

La perception, en tant que composante de l'acte d'observer, est indubitablement liée à la sensation – la perception dans l'acceptation sensorielle du terme – lorsqu'il s'agit de percevoir une forme de relief. Toutefois, elle ne peut s'y réduire puisque le concept même de forme de relief n'est pas formellement défini et se réfère à un contexte expérimental individuel et collectif. Une forme de relief ne se résume pas seulement à une forme et une taille. Les termes *montagne* et *colline* sont avant tout des catégories sémantiques particulièrement soumises aux variations sociolinguistiques [Mark *et al.*, 1999]. La description d'un relief à un niveau cognitif implique de rendre compte de la perception purement géométrique des formes d'une part et, d'autre part, de la sémantique et de la fonction associées aux formes de relief. Bien que certaines propriétés géométriques du terrain soient perçues (e.g., sommet, point selle), l'observateur identifie une forme de relief particulière (e.g., montagne, vallée) sans nécessairement être capable de préciser où elle commence et où elle termine. Nous devons considérer qu'une forme de relief est avant tout une individuation subjective d'une région approximativement délimitée de la surface de la terre. Nous admettons l'idée que la détection d'une forme de relief particulière peut s'expliquer à partir de caractéristiques locales autres que la forme complète de l'objet.

Le processus de perception qui mène de la sensation à la perception conjugue les formes de relief selon deux aspects. L'aspect physique ne considère que la taille et la forme, c'est-à-dire les propriétés spatiales directement sensibles par un observateur et dont sont directement issues les saillances, tandis que l'aspect cognitif définit une forme de relief en tant qu'objet (c'est-à-dire une réification d'une portion de l'espace) décrit par son intégration dans la culture de l'observateur (sémantique).

Selon le postulat 1, les saillances émergent de l'aspect physique de la forme. La reconnaissance d'un objet en tant que membre d'une catégorie s'appuie donc nécessairement sur les saillances. Sachant que chaque catégorie est modélisée par un ou plusieurs prototypes (les exemples idéaux de [Lakoff et Johnson, 1980]), nous concluons ce chapitre sur une seconde hypothèse qui définit le rôle des saillances comme intermédiaire entre la conceptualisation (la définition des catégories) et la perception (le rattachement d'un objet à une catégorie).

Postulat 2 (Catégories et saillances) *Une catégorie de formes de relief peut-être définie par la spécification d'un ensemble de saillances et leur organisation dans l'espace.*

Une modélisation selon ce postulat induit une certaine ambiguïté et réduit la discrimination des formes. En effet, ce qui se trouve entre deux saillances est simplement ignoré car cela n'influence pas la perception. En ne conservant que les saillances, nous introduisons une abstraction qualitative des formes.

De la cartographie à une géographie de sens commun

« A force de croire dans l'imaginaire, celui-ci devient réel. »

Gary Victor

Depuis une trentaine d'années, les SIG se sont développés à partir d'un paradigme cartographique. Bien que les modèles graphiques et numériques sous-jacents soient adaptés à de nombreuses applications, il n'en reste pas moins que dans de nombreux cas la carte ne correspond pas à la conception que peut avoir un observateur de son environnement [Kuipers, 1978, Mark, 1999].

La cartographie a pour objet la représentation de l'espace sous une forme graphique et géométrique. Selon [Joly, 2000] « *le but essentiel de la cartographie reste [...] la représentation objective, exacte et précise au regard de l'échelle, des formes matérielles et des objets réels qui caractérisent l'espace géographique* ». Ainsi, à travers une volonté manifeste de rationalité, la carte s'affranchit du processus subjectif de perception de son environnement par un observateur particulier.

Aujourd'hui, en grande partie grâce à la diminution du rapport coût/performance des processus informatiques, les SIG évoluent vers une appréhension plus générale de la complexité des phénomènes spatiaux. De nouveaux modèles de représentation de l'espace sont apparus et s'imposent comme une alternative à la cartographie traditionnelle [Hillier et Hanson, 1984, Egenhofer et Mark, 1995, Mark, 1999]. Ils sont fondés sur la perception que l'homme peut avoir de son environnement [Mark et Frank, 1996], c'est-à-dire une vision égocentrique et fonctionnelle de l'espace et du temps ¹. La représentation de l'espace

¹Précisions que la carte représente un instant passé, présent ou futur. Dans cette thèse, notre étude se restreint à ce que perçoit l'observant de l'observé au moment de l'observation. Les phénomènes géographiques dynamiques sont en dehors de notre champ d'investigation. Pour une étude sur le temps et son rapport à l'espace, le lecteur pourra se reporter à [Langran, 1992, Peuquet et Duan, 1995, Claramunt et Thériault, 1995,

selon une perspective proche du sens commun n'a pas pour vocation de remplacer la cartographie classique mais de la compléter là où elle atteint ses limites dans sa capacité à dialoguer avec l'utilisateur, et à traiter une information incomplète [Egenhofer et Mark, 1995].

Nous cherchons dans un premier temps à cerner dans quelle mesure la cartographie traditionnelle ne rend pas forcément compte de la perception humaine de l'espace. Nous évoquons le paradigme cartographique et nous mettons ainsi en lumière le fait que l'objectivité de la carte n'est pas consubstantielle à la géographie mais au paradigme cartographique – c'est-à-dire aux outils, aux représentations formelles et aux objectifs des applications –, ce que tendent à confirmer les formes alternatives de représentation de l'espace. En étant centrées sur l'individu et la perception particulière qu'il a de son environnement, ces représentations tentent d'appréhender les structures cognitives de l'espace en se positionnant du point de vue de l'observateur. Avec les promoteurs de la *géographie naïve* [Egenhofer et Mark, 1995], nous acceptons l'idée selon laquelle il existe une place pour des représentations de l'espace dans lesquelles le sens commun et le raisonnement qualitatif sont essentiels.

2.1 Le paradigme cartographique

L'informatique s'étant imposée en cartographie – comme dans beaucoup de domaine – comme un outil de production, il est donc normal de retrouver les fondements du paradigme cartographique dans les SIG. Mais, bien que la cartographie soit un outil particulièrement efficace, l'espace ne peut pas se résumer à sa représentation cartographique. Les limites du paradigme cartographique apparaissent notamment lorsqu'il s'agit de mettre en relation ce que perçoit l'observateur avec ce qui est représenté sur la carte. En tentant de combler cet écart, les chercheurs en SIG, à la convergence de nombreuses disciplines, ont développé de nouveaux modèles de représentation de l'espace.

2.1.1 Principes

La carte est une simplification de la réalité et supporte en cela une représentation des phénomènes géographiques même s'ils sont inaccessibles à la perception humaine par l'observation directe. Elle porte une information symbolique qui se veut objective, précise et rigoureuse. Le paradigme cartographique s'est construit au fil des siècles autour de cette exigence. Il regroupe les méthodes et les techniques mises en œuvre lors des études et des opérations techniques intervenant dans l'établissement des cartes. Une carte est une représentation schématique et graphique de la surface de la terre et repose sur un ensemble de techniques et de conventions dictées par la nécessité de rendre le document lisible et facilement utilisable. Elle est adaptée à un public déterminé, produite dans un contexte culturel bien défini et limitée par les moyens de diffusion à disposition.

Raper, 2000, Peuquet, 2002].

La carte est un outil de communication reposant sur un langage propre – le langage cartographique – qui, bien que de type pictural, obéit à un certain nombre de règles² dans le choix des informations reproduites, lesquelles reflètent l’usage de destination de la carte et l’environnement de production. L’organisation et la structuration de la carte ont rendu possible l’émergence d’algèbres, c.-à-d. de collections de fonctions pour manipuler les données spatiales afin de modéliser différents phénomènes et d’extraire (ou mettre en évidence) des informations à partir des données disponibles. Cette approche a été initiée par le « *Map Algebra* » de [Tomlin, 1990], puis a été étendue afin de proposer des implantations opérationnelles telles que *MapScript* [Pullar, 2001].

Une carte est une collection de symboles géométriques juxtaposés ou superposés dans un plan référencé selon deux dimensions : longitude et latitude. Chaque symbole de la carte est qualifié par plusieurs variables (la forme, la taille, l’orientation, la couleur, la valeur et le grain), combinaison des trois variables de la sémiologie graphique (la variation des tâches et les deux dimensions du plan) [Bertin, 1973]. La tâche du cartographe consiste à transcrire un ensemble de phénomènes géographiques en jouant sur ces six variables. Les choix, conventionnels ou arbitraires, sont rappelés dans une légende dont la nécessité souligne l’aspect interprétatif de la carte et son rôle informationnel.

Le paradigme cartographique sur lequel repose les SIG s’apparente à un langage et suppose un minimum d’apprentissage pour exploiter pleinement son potentiel. Il fait référence à un ensemble de symboles et de conventions – le langage cartographique – pour représenter les données géographiques d’une part, et interpréter les cartes d’autre part. Une carte ne se réduit pas à la représentation d’une observation : ce n’est pas une photographie. Les objectifs de précision et de rigueur imposent de s’affranchir au maximum de la subjectivité et des limites de la perception humaine.

Une carte permet, entre autres facilités, à un observateur de s’orienter, de retrouver son chemin et de déterminer sa position avec une précision suffisante dans la plupart des cas. En apportant une information globale vue du ciel, elle est notamment un outil de planification très efficace. Une carte vise à présenter une information structurée de la réalité physique d’un espace délimité. Elle peut aussi inclure des informations complémentaires qui ne correspondent pas à une réalité physique observable. C’est le cas, par exemple, des cartes de navigation en mer qui donnent accès à la bathymétrie et aux voies de navigation qui ne sont pas matérialisées physiquement.

Les relations entre les objets, bien que non explicitement représentées, y apparaissent pour certaines aussi lisiblement que les objets eux-mêmes (intersection entre deux routes par exemple). De plus, une carte est nécessairement thématique et simplifie l’espace en le privant d’une partie de sa complexité. En se voulant routière, topographique ou touristique elle se destine explicitement à un usage précis et limité. L’utilisation de couches thématiques est largement répandue, en particulier grâce aux possibilités de calcul et d’affichage des SIG.

²Voir par exemple le serveur éducatif de l’IGN et de l’Education Nationale sur l’information géographique : <http://seig.ensg.ign.fr>.

Elle facilite la gestion, la sélection et la combinaison des informations et aboutit, à partir d'une même source de données, à des cartes différenciées et destinées à des usage spécifiques. A titre d'exemple, la figure 2.1 représente la même région selon trois thématiques différentes.



Figure 2.1 — Cartes thématiques des environs du Menez-Hom en Presqu'île de Crozon :
(de g. à d.) routière, topographique et touristique.



Figure 2.2 — Le Menez-Hom tel qu'il peut être perçu par un observateur au sol.

A l'évidence, la carte ne rend pas compte de ce que perçoit un observateur au sol dont la visibilité est limitée par le relief, le bâti et la végétation. Par exemple, si nous imaginons un promeneur qui observe le paysage de la figure 2.2 et une deuxième personne qui dispose uniquement des trois cartes correspondantes de la figure 2.1, nous convenons aisément qu'ils ne disposent pas de la même information et que leur interprétation de la situation n'est pas la même. La carte ne s'adresse pas à la perception visuelle de l'environnement mais à une représentation mentale déjà structurée par l'intelligence. Il y a donc lieu de considérer que la carte n'englobe pas toutes les interprétations possibles de notre environnement.

2.1.2 Les limites de la carte

[Kuipers, 1978] définit un espace géographique comme un espace qui ne peut pas être appréhendé par un individu depuis un point de vue unique. A cette définition,

[Freundschuh et Egenhofer, 1997] ajoutent qu'un espace géographique est caractérisé par des objets qu'un observateur ne peut pas manipuler, ni tourner autour pour mieux les observer. [Klatzky, 1998] précise que le type d'information accessible varie selon que l'on considère une représentation allocentrique ou égocentrique de l'espace.

La puissance de la carte réside principalement dans sa capacité à projeter dans le plan les objets de l'espace géographique et leurs relations. Cependant, il est réducteur de considérer que l'espace tel qu'il est perçu peut se résumer à une représentation planaire des objets géographiques [Worboys, 1996, Mark, 1999]. Les symboles présents sur une carte rendent compte d'une réalité mesurable ou interprétée mais pas d'une réalité directement observable³. Se positionner sur une carte nécessite alors d'interpréter les symboles et de les rapporter aux objets géographiques observés. Inversement, il est nécessaire de déterminer les symboles à placer sur la carte en fonction de ce qui serait perçu par un observateur. Si l'utilisation d'une carte passe par la maîtrise et la compréhension d'un ensemble de symboles plus ou moins arbitraires, il n'est pas évident que la constitution d'une carte prenne en compte le processus de perception de l'utilisateur final. La reconstitution de paysages en 3D à partir de données cartographiques illustre bien la non-dualité entre la carte et le monde perçu. Par exemple, [Joliveau et Dupuis, 2006] montrent que la visualisation paysagère numérique, « *objet numérique qui vise à reproduire en trois dimensions une portion d'espace visible* », ne peut pas s'affranchir des spécificités culturelles, sociales et cognitives des utilisateurs concernés (urbanistes, paysagistes, élus, ...).

La schématisation – avec ce qu'elle suppose de simplification et d'abstraction – inhérente à la carte relève d'un niveau conceptuel de la connaissance et permet d'embrasser l'ensemble sans s'encombrer d'aspects secondaires [Talmy, 1983, Tversky, 1999, Wolter et Richter, 2004]. La perception de l'espace directement accessible à l'observateur se situe à un niveau beaucoup plus factuel de la connaissance. En proposant une vision allocentrique, globale et métrique de l'espace géographique, la carte se place d'emblée à un niveau de connaissance peu intuitif puisque par nature inaccessible à l'expérience directe de l'individu. Elle répond en effet à la question « Quelle est la réalité objective de l'espace ? » sans considérer comment est perçu – subjectivement et par un observateur particulier – cet espace.

Mieux comprendre la perception d'un observateur humain soumis à la subjectivité de ses observations impose de penser l'information géographique de façon plus intuitive. Si nous considérons la carte et ce qu'elle représente comme des concepts et non des réalités expérimentales du monde [Mark, 1999, Lakoff et Johnson, 1980], il apparaît que l'exploration des processus d'appréhension de son environnement par un humain nécessite le développement de représentations alternatives qui s'affranchissent du cadre trop restrictif de la carte : « *[many phenomena of geographic interest] often go unstudied when they go unrepresented* »

³A cet argument nous pourrions opposer que certaines cartes touristiques sont plus pictographiques que symboliques. La surimpression de l'image d'une figure réelle ou imaginaire, dans une perspective visuelle (i.e., vue de face et non de dessus) à un fond de carte réalisé en accord avec le paradigme cartographique n'affranchit pas l'utilisateur désireux de se positionner avec précision d'appréhender le langage cartographique. Pour se rendre à Notre-Dame, il ne suffit pas de savoir à quoi elle ressemble.

[Raper, 2000, p. 82].

2.2 Représentations cognitives

La géomatique intègre les disciplines et méthodes de représentation et d'analyse des données géographiques par des moyens informatiques. Focalisée sur l'automatisation des traitements, la géomatique et, à travers elle, les paradigmes mis en œuvre dans les SIG font peu de cas des aspects conceptuels de l'information géographique issus des sciences cognitives [Peuquet, 2002, p.273]. Il s'en suit que l'organisation géométrique de l'espace telle qu'elle est représentée dans les cartes est assez éloignée de la cognition spatiale humaine. S'il est évident que les caractéristiques spatiales exploitées et rendues par les cartes participent à la construction d'une connaissance spatiale, il est tout aussi évident que la carte ne peut pas expliciter complètement la perception qu'a un observateur de son environnement.

D'autres représentations sont possibles. En s'éloignant du paradigme cartographique – et de la sémiotique graphique qu'il inclut – elles proposent une alternative à la conceptualisation de l'espace. Dans cette section, nous présentons, à titre d'exemple, deux modèles de représentation cognitive de l'espace puis nous discutons des passerelles nécessaires entre information spatiale géographique et cognition spatiale.

2.2.1 Le modèle pyramidal

Le modèle pyramidal est un modèle de représentation cognitive de l'espace qui intègre les composantes cognitives et informationnelles de l'espace [Mennis *et al.*, 2000, Peuquet, 2002]. La figure 2.3 met en évidence ces deux composantes et leur nécessaire interaction. La composante cognitive (*Knowledge Component*) correspond à ce qu'un individu connaît de son environnement et s'exprime en terme d'objets (e.g., une rue, une maison, une montagne) et de relations entre les objets. La dimension informationnelle (*Data Component*) fournit les données brutes dans une perspective de SIG classique. Les *positions* et les *temps* sont acquis par les capteurs et les senseurs. Il s'agit de l'image brute de la perception [Marr, 1982]. Les *thèmes* correspondent aux *couches thématiques* des SIG.

L'intérêt du modèle tient principalement dans la séparation entre les deux composantes. Un objet, dans sa dimension cognitive, correspond à une entité géographique identifiable. Bien qu'il soit relié à la composante informationnelle afin de répondre aux questions *Où ?* et *Quand ?* à travers une description de ses propriétés spatio-temporelles, l'objet a une représentation cognitive spécifique modélisée par une « *frame* », une structure de données courante en Intelligence Artificielle (IA) pour représenter des objets à un niveau conceptuel [Minsky, 1972]. Dans une « *frame* », un objet, ou une classe d'objets, est décrit tel qu'il est caractérisé par les utilisateurs du SIG, ce qui inclut des informations parfois inexactes, incomplètes ou imprécises ainsi que des règles de comportement⁴.

⁴En évoquant le comportement, nous nous référons à la dynamique des phénomènes géographiques. L'étude

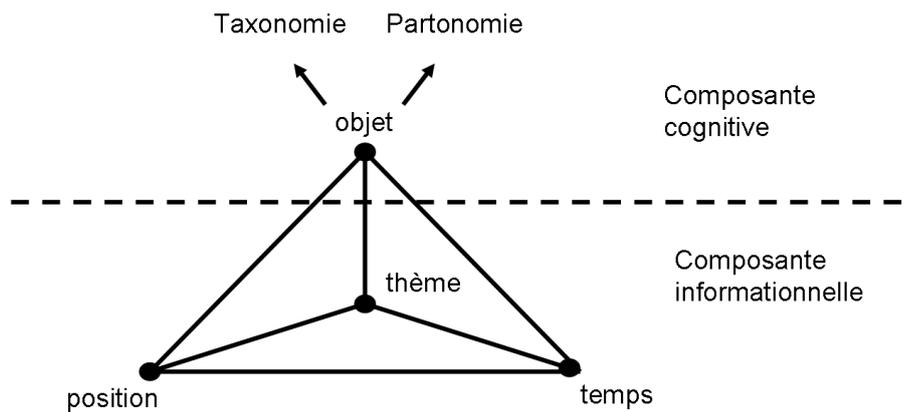


Figure 2.3 — Les composantes cognitive et informationnelle du modèle pyramidal (adapté de [Mennis *et al.*, 2000]).

En isolant l'entité géographique de sa réalité physique, le modèle pyramidal la place à un niveau conceptuel plus propice à la modélisation des processus cognitifs : inférence de phénomènes spatio-temporels, classification (taxonomie/partonomie) et étude des interactions entre les entités observées.

2.2.2 La hiérarchie sémantique spatiale

La hiérarchie sémantique spatiale (SSH pour *Spatial Semantic Hierarchy*) s'inspire des principes de la carte cognitive pour représenter la connaissance spatiale [Kuipers, 1978, Kuipers, 1982, Kuipers, 2000]. L'objectif de cette théorie est de proposer un modèle global pour gérer les différents processus mis en œuvre dans la mise au point de robots autonomes. La SSH considère d'une part les interactions entre un robot et son environnement à travers des contrôles qui expriment une action ou une sensation et, d'autre part, la construction d'une représentation mentale de l'environnement spatial. Chaque processus cognitif est associé à une représentation, soit qualitative, soit quantitative, adaptée à ses caractéristiques propres. La SSH identifie cinq processus cognitifs :

- acquisition des données issues des senseurs (*sensory level*) ;
- expression des « lois » qui régissent le comportement de l'agent (*control level*) ;
- planification des actions (*causal level*) ;
- reconstruction de la topologie des lieux (*topological level*) ;
- connaissance métrique de l'environnement (*metrical level*).

Les différents processus cognitifs sont reliés par des liens de dépendance ou informationnels qui permettent de suivre l'évolution des représentations, de la sensation jusqu'à la reconstruction de la métrique de l'environnement. Lorsque [Kuipers, 1982] évoque « l'œil de l'esprit [consultant] la carte dans la tête »⁵, il pose que la représentation mentale des données

des comportements suppose donc la prise en compte de la dimension temporelle.

⁵*The mind's eye [reading] the map in the head*

géographiques est isomorphe à la représentation graphique. Il est donc légitime pour lui de considérer que le but de la perception est de construire une connaissance métrique complète de l'environnement du robot [Wolter et Richter, 2004] et, ainsi, de promouvoir l'idée selon laquelle la représentation la plus aboutie de l'espace est cartographique.

2.2.3 Discussion

Les modèles SSH et pyramidal sont tous deux motivés par la nécessité de représenter la connaissance spatiale déduite de l'intégration de données directement accessibles aux senseurs ou aux capteurs. Les données brutes, issues des capteurs et des senseurs, sont mises en cohérence avec les entités perçues (modèle pyramidal) ou la connaissance métrique de l'environnement (SSH), offrant ainsi plusieurs représentations applicables en fonction du contexte. En proposant de représenter des éléments accessibles à la perception mais qui n'apparaissent pas explicitement sur les cartes ou d'expliquer comment l'information locale d'un observateur participe à une vision globale d'un espace géographique, ils préfigurent des outils performants pour modéliser le comportement d'un individu dans un environnement donné.

Pourtant, les finalités sont bien différentes et correspondent à deux réponses divergentes au problème de la connexion entre cognition spatiale et représentation des données géographiques dans un SIG. Pour Kuipers, il s'agit de concevoir un système opérationnel à travers une approche de type *bottom-up* : le système est conçu en fonction des systèmes sensitifs, ce qui répond bien aux contraintes opérationnelles propres à la robotique. *A contrario*, Peuquet présente une approche de type *top-down* dans laquelle la connaissance est structurée indépendamment du type de données collectées par les capteurs et les senseurs. Le modèle pyramidal est en cela mieux adapté à la structuration d'une expertise, c.-à-d. à l'implantation d'une ontologie pragmatique d'un domaine particulier.

Le domaine cognitif qui nous concerne dans cette thèse, les formes de relief, fait référence à des entités spatiales qui n'ont pas d'existence physique objective (*cf.* 1.3). Une approche de type SSH est donc manifestement inappropriée. Le modèle pyramidal, dans la mesure où il offre une méthodologie pour la description de concepts objectifs, se rapproche plus de nos préoccupations. Mais la description d'un concept à l'aide de *frames* fait appel quasi-exclusivement à des caractéristiques géométriques et ignore la différenciation entre sensation et perception pourtant fondamentale dans le processus de réification des entités du monde observable (*cf.* 1.2).

Au final, les représentations cognitives que nous avons vu ici, ne répondent pas à la question de la subjectivité de la perception d'un environnement par un observateur. En inscrivant le sens commun et la représentation qualitative au cœur de sa démarche, la géographie naïve introduit une approche plus à même de nous fournir les éléments nécessaires pour répondre à cette question.

2.3 La géographie naïve

La géographie naïve telle qu'elle a été introduite par [Egenhofer et Mark, 1995] s'inspire de la démarche qui a mené à la physique naïve [Hayes, 1978]. Elle propose de faire émerger des modèles formels du sens commun : « *Naive Geography is the body of knowledge that people have about the surrounding geographic world.* » [Egenhofer et Mark, 1995, p.4] et s'appuie pour cela principalement sur le raisonnement spatial qualitatif. L'objectif à terme est de parvenir à développer des SIG qui soient réellement intuitifs et conviviaux [Mark *et al.*, 1997].

2.3.1 Du sens commun comme fondement de la géographie naïve

La raison pour laquelle la géographie naïve n'est pas la physique naïve et, par conséquent, pour laquelle les modèles ne sont pas interopérables, tient principalement en ce que cette dernière étudie l'espace des objets manipulables (*table-top space*) et s'appuie sur un monde physique décrit par les modèles galiléo-newtonien. Un modèle du sens commun doit être réaliste, il doit notamment faire appel à des concepts correspondant à des distinctions du monde réel [Davis, 1990]. Or, l'espace géographique n'est pas l'espace des objets manipulables, il est perçu et conceptualisé différemment [Mark *et al.*, 1999, Couclelis, 1988, Friendschuh et Egenhofer, 1997]. Un objet géographique naturel, et en particulier une forme de relief, se distingue d'un objet manufacturé à la fois en tant que concept et en mode d'interaction. Contrairement à une table ou une voiture dont l'existence est le produit d'une intention, une montagne ne porte pas d'intentionnalité : sa présence physique *précède* le concept de montagne. Nous dirons qu'elle s'impose à la connaissance. Corollairement, la montagne n'a pas de fonction prédéfinie, sinon dans une éventuelle mythologie (e.g., mont Sinaï, mont Olympe).

2.3.2 Le raisonnement spatial qualitatif pour modéliser le sens commun

Selon les principes de la physique naïve, le raisonnement qualitatif a pour but de rendre explicite la connaissance de sens commun de façon à ce qu'une machine puisse prédire, expliquer et diagnostiquer le comportement d'un système physique. Pour atteindre cet objectif⁶, il doit prendre en compte non seulement le sens commun dont nous usons tous les jours pour interagir avec notre environnement, mais aussi les modèles quantitatifs créés par les scientifiques pour expliquer les phénomènes physiques les plus complexes [Weld et DeKleer, 1990]. La substance de l'approche qualitative dans ce cadre est de trouver un moyen de passer des grandeurs quantitatives à des grandeurs qualitatives. Il s'agit donc de remplacer les propriétés exprimées dans l'ensemble des réels \mathbb{R} par des symboles discrets en s'assurant que cette qualification est pertinente vis-à-vis du type de raisonnement mené [Forbus, 1984]. Par exemple, la taille d'une

⁶Manifestement ambitieux, l'ampleur de cet objectif explique en grande partie pourquoi la physique naïve a très tôt donné naissance à des « sous-disciplines » traitant de sujets plus restreints, e.g., topologie, orientation, ordres de magnitude.

montagne peut être représentée par l'un des symboles *petite*, *moyenne* ou *grande*. Il est ainsi possible de concevoir des systèmes autonomes capable d'inférer à partir d'une connaissance incomplète ou imprécise sur leur environnement [Faltings, 1995, Fernyhough *et al.*, 2000].

Il a été suggéré qu'un individu perçoit des objets décrits par des propriétés qualitatives plutôt que des valeurs numériques [Couclelis, 1992]. Le raisonnement spatial de sens commun que nous mettons en œuvre quotidiennement repose, dans la plupart des cas, sur une abstraction qualitative d'informations partielles plutôt que sur une représentation précise et quantitative de notre environnement [Cohn et Hazarika, 2001].

La « *poverty conjecture* » de [Forbus *et al.*, 1987] suggère que les paradigmes calculatoires traditionnels ne sont plus opérants dès lors que l'on tente de manipuler des valeurs qualitatives multidimensionnelles. Cette limitation a favorisé l'émergence d'une approche spécifique au raisonnement spatial qualitatif. Il s'agit de fournir des paradigmes de calcul permettant à une machine de représenter et de raisonner avec des entités spatiales multidimensionnelles sans avoir recours aux techniques quantitatives utilisées en infographie ou en vision par ordinateur, inopérantes dans ce contexte. Le raisonnement spatial qualitatif, tout en conservant les propriétés scalaires (forme, orientation, taille et distance), explore d'autres aspects de l'espace comme la topologie et la méréologie [Cohn et Hazarika, 2001].

Le raisonnement spatial qualitatif tend à explorer des passerelles entre la géométrie et les disciplines concernant le rapport de l'homme à l'espace [Mark et Smith, 2005]. Par exemple, la robotique fait un usage intensif du raisonnement spatial qualitatif pour planifier l'activité de robots autonomes [Tate *et al.*, 1990]. La planification, c'est-à-dire l'ensemble des ordres données *a priori* au robot, s'exprime aisément de manière qualitative. [Kuipers et Byun, 1991] ont montré que la méthode qualitative était très robuste lorsqu'il s'agissait de laisser un robot explorer son environnement de façon autonome dans un espace *large-scale* (i.e., qui ne peut pas être embrassé dans sa globalité en une seule fois depuis un point d'observation unique). La hiérarchie sémantique spatiale de Kuipers illustre l'usage du raisonnement qualitatif pour la reconstruction de son environnement par un robot (*cf.* 2.2.2).

2.4 Vers des SIG intuitifs

Lorsque nous nous interrogeons sur la capacité d'un SIG à communiquer de façon intuitive avec l'utilisateur, nous devons tout d'abord constater que, contrairement au robot qui attend une réponse numérique (activation/désactivation de ses différents moteurs), l'utilisateur humain d'un SIG attend une réponse qu'il puisse comprendre, c'est-à-dire renvoyant au sens commun. Un SIG intuitif et ergonomique ne peut pas se contenter d'implémenter un modèle qualitatif de l'espace et avoir ainsi l'ambition d'imiter un raisonnement de sens commun, il doit aussi produire une réponse adaptée à l'utilisateur, à ses capacités et à son besoin. La réalisation d'un SIG intuitif pose un problème de communication entre l'homme et la machine : soit il est demandé de reconstruire une information intelligible à partir d'un modèle numérique, soit il est demandé d'intégrer une description humaine dans un modèle numérique.

Cependant, comme il a été souligné par [Landragin, 2004], il n'est pas envisageable de concevoir la modélisation d'un dialogue homme-machine sans embrasser la globalité du processus d'appréhension de l'environnement. L'acte de décrire son environnement impose à un observateur de faire intervenir différents processus cognitifs et linguistiques, tels que la perception, la représentation de la connaissance et la génération d'énoncés.

La représentation du monde par un SIG suppose un ensemble de capteurs (e.g., caméra, sonar, altimètre) dont on retrouve généralement l'équivalent dans le monde vivant. Même si les capteurs sont différents et ne recouvrent pas exactement les mêmes sensations, le principe reste le même. La représentation du monde par un SIG, c'est-à-dire la modélisation numérique de ce qui a été acquis par les capteurs, est une simplification de la réalité physique. En revanche, la représentation humaine relie, dans une représentation mentale plutôt qualitative, des concepts de domaines variés (social, culturel, esthétique) avec des sensations. Les divergences entre sensation, perception humaine et modèle numérique soulignent l'importance de la complémentarité entre représentation quantitative et représentation qualitative [Egenhofer et Mark, 1995]. Les modalités de passage de l'une à l'autre et leur interopérabilité dans un modèle unique de représentation de l'espace restent aujourd'hui des problèmes ouverts [Sogo *et al.*, 1999, Fernyhough *et al.*, 2000, Mark et Smith, 2005].

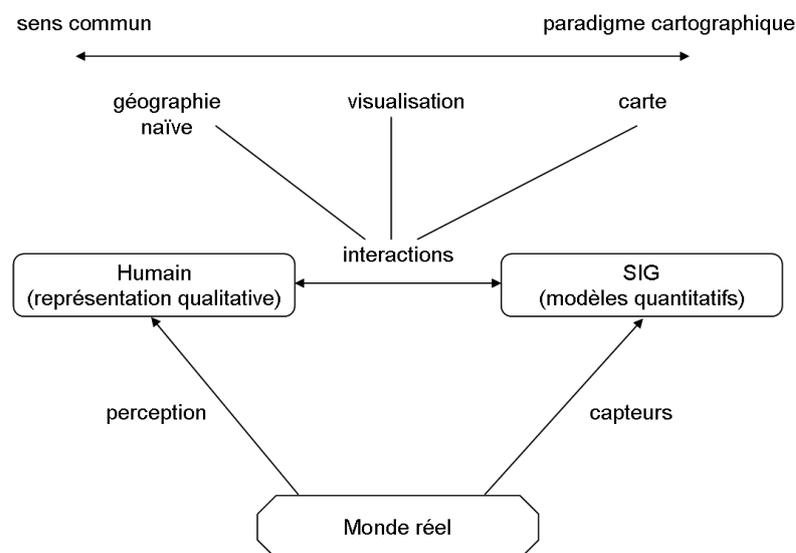


Figure 2.4 — Interaction homme-SIG.

La communication entre la représentation essentiellement qualitative de l'utilisateur et les modèles quantitatifs des SIG passe aujourd'hui par la carte, parfois par la visualisation, i.e., la reconstruction numérique de l'environnement visuel d'une scène. L'interaction homme-machine repose sur le paradigme de la machine. La géographie naïve, en proposant de faire appel à des représentations et des raisonnements qualitatifs, replace l'utilisateur et la perception qu'il a du monde comme référents de l'interaction homme-SIG (*cf.* figure 2.4).

Représentation qualitative de l'espace

« *La qualité, c'est de la quantité assimilée.* »

Léon-Paul Fargue

Notre rapport avec le monde physique est directement conditionné par notre rapport à l'espace. Un geste aussi simple que soulever une tasse de café nécessite la gestion d'un ensemble de connaissances complexes sur les objets et leurs relations. La position de la tasse par rapport à ma main et la forme de la tasse sont des exemples d'informations indispensables. Or, le sens commun appréhende les entités spatiales sans disposer d'une métrique exacte.

Les travaux expérimentaux de [Piaget et Inhelder, 1985] ont montré que les concepts spatiaux de topologie, d'orientation et de distance étaient invariablement acquis dans cet ordre par les enfants. Ce résultat expérimental a incité les psychologues puis la communauté IA à regrouper les relations et propriétés spatiales dans ces trois domaines. La plupart des travaux théoriques relatifs aux représentations qualitatives de l'espace (QSR, *Qualitative Spatial Representation and Reasoning*) font généralement référence à l'un ou plusieurs de ces domaines. Or, comme il a été justement souligné par [Vieu, 1997], d'autres domaines existent et, notamment, la morphologie. L'étude des formes est très souvent abordée, soit par le biais de la topologie [Cohn et Hazarika, 2001], soit à travers la problématique de la vision en sciences cognitives [Hoffman et Singh, 1997].

Partant du principe que la description d'un relief ne fait intervenir que la forme des objets perçus et les relations spatiales qui les lient, nous ne traitons pas de la distance. De plus, bien que l'orientation puisse jouer un rôle important dans la description des relations spatiales, le cas particulier d'un relief réduit cette notion au positionnement à droite ou à gauche d'une forme par rapport à une autre, ce que nous ramenons à un sens de parcours du relief (par convention de gauche à droite). Par conséquent, dans ce chapitre, nous n'abordons que les domaines de la topologie et de la morphologie. La section 3.1 expose la raison d'être d'une topologie de sens commun, la différenciation entre topologie et méréologie puis l'influence des

frontières *fiat* sur les notions de base de la topologie. La section 3.2 souligne l'importance des saillances visuelles et des parties d'un objet dans le processus de reconnaissance des formes puis décline les implications dans un modèle de description de silhouettes.

3.1 Topologie

La topologie peut être considérée comme l'étude abstraite de la notion de point limite dont dépendent en grande partie de nombreux aspects des mathématiques (e.g., fonction continue, connexité d'une figure géométrique) [Hocking et Young, 1988]. Concernant les notions spatiales portées par la topologie, il faut distinguer deux branches [Vieu, 1997]. La topologie générale (ou « *point-set topology* ») étudie les relations spatiales entre différentes entités à travers les notions de frontière et de contact. La seconde, la topologie algébrique a pour objet la caractérisation d'invariants par déformations continues (e.g., translation, rotation, étirement, contraction). Par exemple, dans le plan, un cercle est topologiquement équivalent à un rectangle. Gotts, Gooday et Cohn ont montré que la topologie de sens commun qui nous intéresse ici relève de la topologie générale [Gotts *et al.*, 1996].

Paradoxalement, bien que la topologie soit qualitative par nature, il subsiste des différences épistémologiques majeures justifiant l'existence d'un formalisme particulier à la topologie de sens commun qui s'affranchit du cadre strictement mathématique de la topologie générale. Pour les utilisateurs d'un SIG, il est plus naturel de décrire un espace en explicitant les connexions entre les entités plutôt qu'en précisant des coordonnées géométriques [Zeitouni, 1995]. La sémantique spatiale induite par une topologie de sens commun, ne serait-ce qu'en raison de sa proximité avec le langage naturel, s'impose comme une représentation plus à même de rendre compte de la perception de son environnement par un individu.

Deux voies ont été explorées indépendamment et ont abouti à deux formalismes différents de la topologie de sens commun : RCC (*Region Connection Calculus*) [Randell *et al.*, 1992] et n-intersection [Egenhofer et Franzosa, 1991, Egenhofer et Herring, 1992]. S'ils partagent les principes énoncés ci-dessus et convergent dans le pouvoir d'expression – ils s'accordent sur un ensemble de huit relations topologiques (*cf.* figure 3.1), exhaustives et deux-à-deux disjointes – ils reposent sur des conceptions suffisamment différentes pour que nous les présentions séparément.

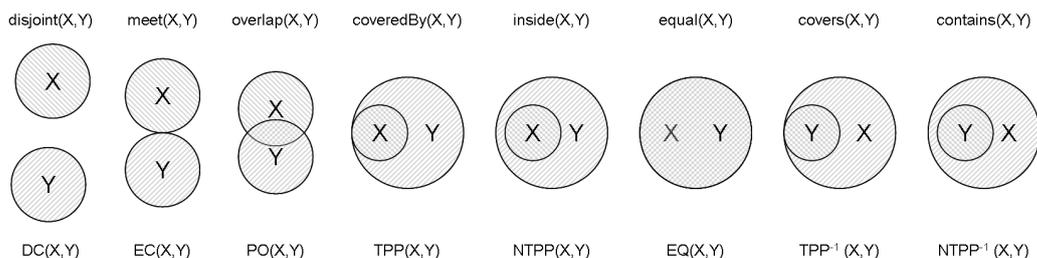


Figure 3.1 — L'ensemble des huit relations topologiques exhaustives et deux-à-deux disjointes. *En haut* : terminologie n-intersection. *En bas* : terminologie RCC.

Dans cette section, après avoir défini les notions élémentaires de la topologie auxquelles nous faisons appel dans cette thèse, nous détaillons les raisons de la séparation épistémologique avant de présenter succinctement les deux principales approches de représentation et de raisonnement qualitatif autour des relations topologiques.

3.1.1 Définitions

Nous introduisons ici les principes élémentaires de la topologie générale auxquels nous faisons appel dans cette thèse. Ils peuvent être retrouvés sous une forme très similaire dans de nombreux ouvrages sur la topologie [Dixmier, 1989, Bourbaki, 1990, Baum, 1991]. Les notations que nous avons adoptées ne correspondent pas à une source particulière. Nous nous sommes inspirés des notations de [Renz, 2002] pour la topologie générale et de [Egenhofer et Herring, 1992] pour les opérateurs topologiques intérieur, frontière et extérieur.

Espace topologique, univers, topologie, points, régions

Un *espace topologique* est une structure $\langle \mathcal{U}, \Omega \rangle$ telle que :

- l'univers \mathcal{U} est un ensemble non vide de points¹ ;
- la *topologie* Ω est un ensemble de parties de \mathcal{U} (les régions) ;

et qui dispose des propriétés suivantes :

- \mathcal{U} et \emptyset appartiennent à Ω ;
- l'union de deux éléments de Ω appartient à Ω : $\forall X, Y \in \Omega, X \cup Y \in \Omega$;
- l'intersection de deux éléments de Ω appartient à Ω : $\forall X, Y \in \Omega, X \cap Y \in \Omega$.

Ouvert, fermé

Soit $\langle \mathcal{U}, \Omega \rangle$ un espace topologique.

- tout élément de Ω est un *ouvert* ;
- une partie X de \mathcal{U} est un *fermé* ssi son complémentaire² est un *ouvert* : $\forall X \subset \mathcal{U}, X^c \in \Omega \Rightarrow X$ est un *fermé*.

Les fermés disposent des propriétés suivantes :

- \mathcal{U} et \emptyset sont des fermés ;
- l'intersection de deux fermés est un fermé ;
- l'union de deux fermés est un fermé.

¹Le terme de point donne une connotation géométrique à la topologie. En réalité, l'univers \mathcal{U} peut-être un ensemble d'entités mathématiques quelconques [Hocking et Young, 1988].

²Le complémentaire d'une région est parfois appelé *extérieur* de la région, par analogie avec l'intérieur et la frontière.

Voisinage

Soient $\langle \mathcal{U}, \Omega \rangle$ un espace topologique et X une partie de \mathcal{U} . Un *voisinage* de X est une partie de \mathcal{U} contenant un ouvert contenant X . Un *voisinage*³ d'un point p est un *voisinage* de $\{p\}$. On note $\mathcal{V}(p)$ l'ensemble des voisinages de p .

Intérieur, adhérence, frontière

La notion de voisinage nous permet de caractériser certains points ou sous-ensembles de points à l'intérieur d'une région. Soient $\langle \mathcal{U}, \Omega \rangle$ un espace topologique, $X \subset \mathcal{U}$ une partie de \mathcal{U} et $p \in \mathcal{U}$ un point de \mathcal{U} .

- l'*intérieur* de X , noté X° , est l'ensemble des points de X dont X est un voisinage. C'est le plus grand ouvert inclut dans X ;

$$X^\circ = \{p \in X \mid X \in \mathcal{V}(p)\}$$

- l'*adhérence* de X , noté \overline{X} est l'ensemble des points de \mathcal{U} dont tout voisinage a une intersection non vide avec X . C'est le plus petit fermé contenant X ;

$$\overline{X} = \{p \in \mathcal{U} \mid \forall V \in \mathcal{V}(p), V \cap X \neq \emptyset\}$$

- la *frontière* de X , notée ∂X est l'ensemble des points de \mathcal{U} adhérents à X et à son complémentaire X^c . C'est la différence entre l'adhérence et l'intérieur de X .

$$\partial X = \{p \in \mathcal{U} \mid p \in \overline{X} \wedge p \in \overline{X^c}\}$$

Contact, recouvrement

Soient $\langle \mathcal{U}, \Omega \rangle$ un espace topologique, X et Y deux régions non vides et distinctes de Ω .

- X et Y sont *en contact* si et seulement si elles partagent tout ou partie de leurs frontières : $EC(X, Y) \equiv_{Def} \partial X \cap \partial Y \neq \emptyset$.
- X et Y *se recouvrent* si et seulement si elles partagent tout ou partie de leurs intérieurs : $O(X, Y) \equiv_{Def} X^\circ \cap Y^\circ \neq \emptyset$.

Ouvert régulier, fermé régulier Soit X une région d'un espace topologique $\langle \mathcal{U}, \Omega \rangle$.

- X est un *ouvert régulier* si X est équivalent à l'intérieur de son adhérence, i.e., $X = \overline{X}^\circ$.
- X est un *fermé régulier* si X est équivalent à l'adhérence de son intérieur, i.e., $X = \overline{X^\circ}$.

Séparation, région connexe Soient X, Y deux régions d'un espace topologique $\langle \mathcal{U}, \Omega \rangle$. Deux régions X et Y d'un espace topologique sont *séparées* si l'adhérence de l'une des régions est disjointe de l'autre région et vice-versa, i.e., $\overline{X} \cap Y = \emptyset$ et $\overline{Y} \cap X = \emptyset$. Une région Z de l'espace topologique est *connexe* si elle ne correspond pas à l'union de deux régions *séparées*.

³Nous pouvons souligner un aspect contre-intuitif de cette définition : le voisinage d'un objet inclut l'objet lui-même.

3.1.2 Considérations épistémologiques

La topologie est un aspect fondamental de la cognition spatiale : les relations topologiques jouent un rôle prédominant dans la perception des objets géographiques bien qu'elles ne soient pas représentées explicitement sur les cartes. La topologie est intrinsèquement qualitative et, par conséquent, bien adaptée au raisonnement spatial qualitatif [Vieu, 1997]. Elle joue un rôle très important dans les représentations et les modèles de raisonnement qualitatifs et ne peut être ignorée lorsqu'il s'agit de traiter des relations spatiales. Cependant, nonobstant une certaine communauté terminologique, l'abstraction mathématique qui sous-tend la topologie générale n'est pas adaptée à la formalisation d'une topologie de sens commun.

Nous reprenons ici les arguments avancés par [Gotts *et al.*, 1996] pour justifier le rejet de la topologie mathématique en tant que formalisme pour la représentation et le raisonnement spatial qualitatif. L'argumentation tient en une différence épistémologique, c.-à-d. en des différences de motivations et d'objectifs. Différence de motivations car la notion de point-limite, trop abstraite, est déconnectée des préoccupations liées à une représentation de sens commun. Différence d'objectifs car une topologie des régions de l'espace visant à reproduire une représentation de sens commun suppose une adéquation avec les termes du langage courant (e.g., disjoint, contient) et, en cela, s'éloigne des modèles mathématiques abstraits.

La motivation de la topologie générale est de disposer d'un outil mathématique commun de très haut niveau à partir duquel il est possible de développer des théories dans des domaines plus restrictifs [Hocking et Young, 1988]. La motivation d'une topologie de sens commun est de représenter et de raisonner sur des relations topologiques telles qu'elles sont appréhendées par un individu dans sa vie de tous les jours [Gotts *et al.*, 1996, Vieu, 1997, Cohn et Hazarika, 2001, Renz, 2002] : décrire les relations topologiques entre les entités de l'espace, en utilisant les prédicats du langage commun et déduire des relations implicites des relations observées (i.e., raisonner).

Certains types de raisonnement de sens commun sont d'un intérêt certain en IA ou dans les SIG, par exemple : « *Étant donné une région X en relation R_1 avec une région Y , et sachant que la région Y est en relation R_2 avec la région Z , quelles sont les relations possibles ou certaines entre X et Z ?* ». La résolution des transitivités, à travers des tables de composition, a été l'un des apports majeurs de la topologie qualitative [Renz, 2002].

A la topologie mathématique en tant que formalisme d'une topologie de sens commun, [Gotts *et al.*, 1996] opposent les quatre critères suivants :

- **cohérence logique** : ne permet évidemment pas de rejeter une vision mathématique de la topologie, assure simplement la cohérence des raisonnements menés (deux régions ne peuvent pas être à la fois disjointes et se recouvrir partiellement) ;
- **expressivité** : il doit être aisé de formaliser les assertions que nous utilisons pour décrire les relations topologiques dans notre environnement quotidien. Un consensus est apparu dans les années 1990 sur ce que devait être un ensemble raisonnable de relations topologiques [Cohn et Hazarika, 2001, Renz, 2002]. Les modèles

topologiques de la littérature font appel à des ensembles de relations exhaustives et deux-à-deux disjointes. La littérature fournit deux taxonomies des relations topologiques que nous nommerons $T1$ (cf. figure 3.2) et $T2$ (cf. figure 3.3). Elles s'accordent à définir trois *niveaux de résolution topologique* (basse, moyenne et haute), mais elles se différencient sur la notion de frontière. Si la frontière est matérialisée et fait partie de la région (i.e., $X = \partial X \cup X^\circ$), alors la relation *meet* de la résolution haute fusionne avec la relation *overlap* à la résolution topologique moyenne. Dans le cas contraire, elle fusionne avec la relation *disjoint*. Aucune taxonomie ne semble s'imposer, y compris pour un même formalisme. Ainsi, dans deux articles traitant de la 9-intersection, [Grigni *et al.*, 1995] retiennent la taxonomie $T1$ tandis que [Egenhofer et Sharma, 1993] retiennent la taxonomie $T2$.

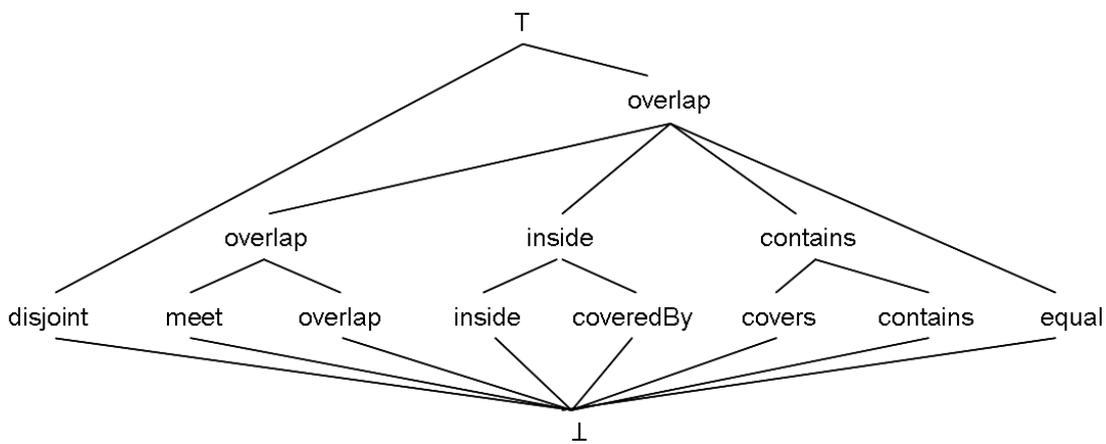


Figure 3.2 — Taxonomie $T1$: la relation *meet* fusionne avec la résolution *overlap* (adapté de [Grigni *et al.*, 1995]).

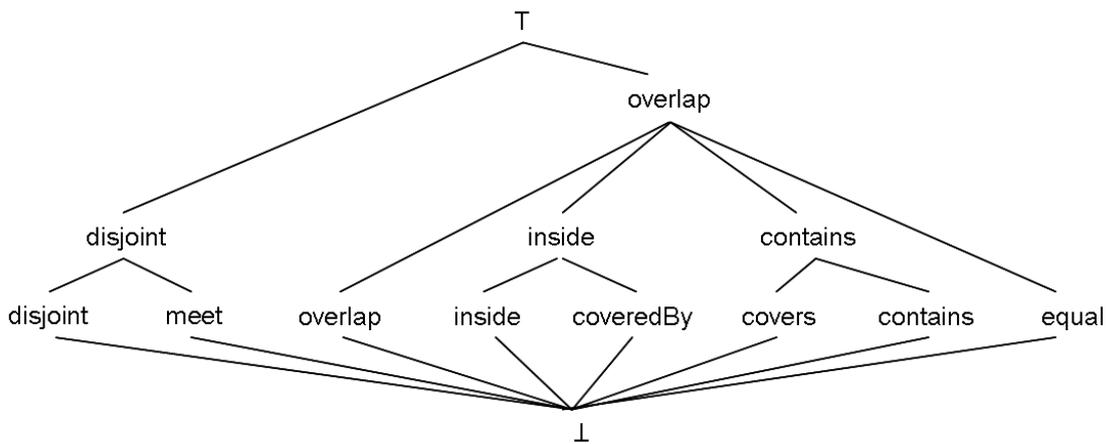


Figure 3.3 — Taxonomie $T2$: la relation *meet* fusionne avec la résolution *disjoint*.

- **calculabilité** : une topologie de sens commun doit pouvoir être implantée dans un

système de calcul ;

- **intelligibilité** : la topologie mathématique produit des résultats anti-intuitifs. Par exemple, découper un ruban de Mœbius selon les pointillés ne produit pas, comme le voudrait le sens commun, deux pièces distinctes mais deux bandes interlacées (cf. figure 3.4) [Gotts *et al.*, 1996, Casati, 2001].

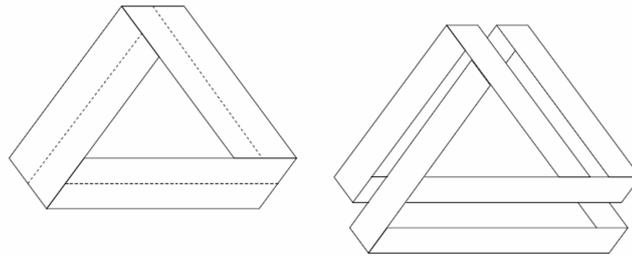


Figure 3.4 — Le ruban de Mœbius [Gotts *et al.*, 1996].

Les notions de la topologie générale doivent donc être passées au filtre du sens commun. En premier lieu, le point limite n'a pas de signification intuitive et doit donc être éliminé de la discussion.

Ensuite, la distinction entre ouvert et fermé doit être rattachée à une réalité du monde perçue. Selon [Asher et Vieu, 1995], il est cognitivement important de distinguer entre la région, son adhérence et son intérieur : les entités perçues sont des fermés tandis que leurs compléments sont des ouverts. Adoptant le point de vue opposé, [Stell et Worboys, 1997] argumentent que la distinction entre une région, son adhérence et son intérieur n'a pas lieu d'être dans les domaines relatifs au QSR puisque le sens commun ne peut pas donner de signification à la distinction entre *ouverts* et *fermés* (si je coupe un objet en deux, je n'obtiens pas un ouvert et un fermé). Nous n'avons pas pour ambition de trancher ce débat. Nous remarquerons simplement que dans tous les cas, la littérature semble s'accorder à admettre qu'une entité perçue (i.e., une région cognitivement significative de l'espace) est un fermé régulier. Précisons que cela n'implique pas nécessairement que la frontière soit objectivement *bona fide* (un fermé peut avoir une frontière *fiat* [Smith et Varzi, 1997]), c.-à-d. qu'elle corresponde à une entité perçue et matérialisée.

Postulat 3 *L'extension spatiale X d'une région cognitivement significative d'un espace topologique est un fermé régulier, i.e., $X = \overline{X^\circ}$.*

Enfin, la topologie générale est un outil de démonstration et d'exploration des propriétés de l'espace. Elle n'a pas pour vocation d'aboutir à un modèle calculable de raisonnement. En quantifiant tout ensemble arbitraire de points, elle rend impossible l'utilisation d'une logique propositionnelle ou du premier ordre [Bennett, 1994, Gotts *et al.*, 1996, Renz, 2002]. Il est possible de contourner ce problème puisque seules certaines régions de l'espace sont perçues comme des entités constituant l'environnement de l'observant. Donc tout fermé régulier ne

correspond pas nécessairement à une région cognitivement significative. Une topologie de sens commun met en relation un ensemble fini et donné de régions. La détermination de cet ensemble ne relève pas de la topologie et nous supposons exister le prédicat $Region(X)$ signifiant « X est une région cognitivement significative » [Eschenbach et Heydrich, 1995].

La littérature propose deux approches pour formaliser la topologie de sens commun. La première [Egenhofer, 1989, Egenhofer et Franzosa, 1991, Egenhofer et Herring, 1990] consiste à adapter le formalisme de la topologie générale. Elle considère un espace constitué de points. Issu de la communauté SIG, ce type d'approche repose en partie sur la nécessité pratique d'imposer un ensemble commun de primitives topologiques pour les langages de requêtes spatiales [Egenhofer et Herring, 1992]. La seconde approche [Randell *et al.*, 1992] propose de construire des théories axiomatiques de l'espace qui soient topologiques par nature.

3.1.3 Méthodes n-intersection

Les méthodes n-intersection considèrent un espace constitué de points, dans lequel sont isolées des régions connexes, et adaptent le formalisme conventionnel (*cf.* 3.1.1) pour étudier les relations topologiques entre ces régions [Egenhofer et Franzosa, 1991, Egenhofer et Herring, 1992].

3.1.3.1 Méthode 4-intersection (4IM)

Une relation topologique entre deux régions X et Y est caractérisée par les quatre intersections entre la frontière et l'intérieur de X et la frontière et l'intérieur de Y formant une matrice nommée 4-intersection [Egenhofer et Franzosa, 1991] :

$$\begin{pmatrix} \partial X \cap \partial Y & \partial X \cap Y^\circ \\ X^\circ \cap \partial Y & X^\circ \cap Y^\circ \end{pmatrix}$$

Chaque intersection peut prendre la valeur \emptyset ou $-\emptyset$, ce qui conduit à différencier 16 relations topologiques différentes. Toutefois, dans un espace $2D$, en prenant en compte la réalité physique et en ne considérant que les régions connexes, régulières et sans trous, il ne reste plus que les huit relations de la table 3.1.

3.1.3.2 Méthode 9-intersection (9IM)

La 9IM [Egenhofer et Herring, 1990] est une extension de la 4IM par ajout des intersections avec l'extérieur des régions. L'extérieur d'une région X est notée X^- et correspond au complémentaire de X dans la théorie des ensembles. La matrice 9-intersection est une matrice 3×3 :

$$\begin{pmatrix} \partial X \cap \partial Y & \partial X \cap Y^\circ & \partial X \cap Y^- \\ X^\circ \cap \partial Y & X^\circ \cap Y^\circ & X^\circ \cap Y^- \\ X^- \cap \partial Y & X^- \cap Y^\circ & X^- \cap Y^- \end{pmatrix}$$

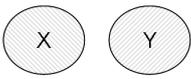
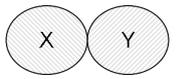
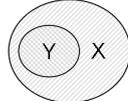
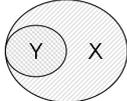
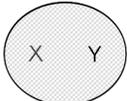
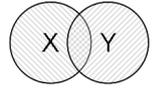
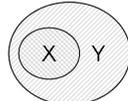
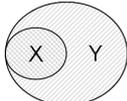
<p>disjoint(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ \\ X^\circ & \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$	<p>meet(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ \\ X^\circ & \begin{pmatrix} -0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$	<p>contains(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ \\ X^\circ & \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -0 & -0 \end{pmatrix} \end{matrix}$	<p>covers(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ \\ X^\circ & \begin{pmatrix} -0 & 0 \\ -0 & -0 \end{pmatrix} \end{matrix}$
<p>equal(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ \\ X^\circ & \begin{pmatrix} -0 & 0 \\ 0 & -0 \end{pmatrix} \end{matrix}$	<p>overlap(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ \\ X^\circ & \begin{pmatrix} -0 & -0 \\ -0 & -0 \end{pmatrix} \end{matrix}$	<p>inside(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ \\ X^\circ & \begin{pmatrix} 0 & -0 \\ 0 & -0 \end{pmatrix} \end{matrix}$	<p>coveredBy(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ \\ X^\circ & \begin{pmatrix} -0 & -0 \\ 0 & -0 \end{pmatrix} \end{matrix}$

Tableau 3.1 — Les huit relations topologiques et les matrices 4-intersections correspondantes.

Les huit relations topologiques *disjoint*, *meet*, *contains*, *covers*, *equal*, *overlap*, *inside* et *coveredBy* sont définies dans la table 3.2.

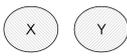
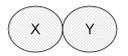
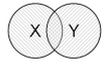
<p>disjoint(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ & Y^- \\ X^\circ & \begin{pmatrix} 0 & 0 & -0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix} \\ X^- & \begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \end{pmatrix} \end{matrix}$	<p>meet(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ & Y^- \\ X^\circ & \begin{pmatrix} -0 & 0 & -0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix} \\ X^- & \begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \end{pmatrix} \end{matrix}$	<p>contains(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ & Y^- \\ X^\circ & \begin{pmatrix} 0 & 0 & -0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix} \\ X^- & \begin{pmatrix} 0 & 0 & -0 \end{pmatrix} \end{matrix}$	<p>covers(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ & Y^- \\ X^\circ & \begin{pmatrix} -0 & 0 & -0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix} \\ X^- & \begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \end{pmatrix} \end{matrix}$
<p>equal(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ & Y^- \\ X^\circ & \begin{pmatrix} -0 & 0 & 0 \\ 0 & -0 & 0 \end{pmatrix} \\ X^- & \begin{pmatrix} 0 & 0 & -0 \end{pmatrix} \end{matrix}$	<p>overlap(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ & Y^- \\ X^\circ & \begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix} \\ X^- & \begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \end{pmatrix} \end{matrix}$	<p>inside(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ & Y^- \\ X^\circ & \begin{pmatrix} 0 & -0 & 0 \\ 0 & -0 & 0 \end{pmatrix} \\ X^- & \begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \end{pmatrix} \end{matrix}$	<p>coveredBy(X,Y)</p>  $\begin{matrix} \partial X & \partial Y & Y^\circ & Y^- \\ X^\circ & \begin{pmatrix} -0 & -0 & 0 \\ 0 & -0 & 0 \end{pmatrix} \\ X^- & \begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \end{pmatrix} \end{matrix}$

Tableau 3.2 — Les huit relations topologiques et les matrices 9-intersections correspondantes.

De nombreux travaux ont étendu le champ d'application des méthodes n-intersection. Par exemple, en appliquant le modèle aux régions avec des trous [Egenhofer *et al.*, 1994] ou en considérant la troisième dimension spatiale [Pigot, 1991, Zlatanova, 2000] et des entités de dimensions différentes (points, lignes, régions et solides) [Clementini *et al.*, 1993, Zlatanova, 2000].

Si nous considérons un espace discret plutôt que continu, les notions de frontière et de voisinage doivent être redéfinies [Egenhofer et Sharma, 1993]. Le 4-voisinage d'un point est constitué des quatre points adjacents verticalement ou horizontalement. En ajoutant les quatre points adjacents diagonalement, nous obtenons le 8-voisinage du point. Incidemment, la frontière d'une région dans \mathbb{Z}^2 a une extension spatiale d'épaisseur un pixel et, de fait, est de la même dimension que la région. Egenhofer et Sharma [1993] ont étudié ce cas et ont obtenu seize relations topologiques *discrètes* à la place des huit relations continues. Il

n'existe, à notre connaissance, aucune topologie de sens commun référençant seize relations distinctes. Egenhofer et Sharma les regroupent de façon à obtenir les cinq relations de la résolution moyenne de la taxonomie *T2* (*disjoint/meet*, *overlap*, *equal*, *inside/coveredBy*, *covers/contains*). Les auteurs admettent que le regroupement qu'ils proposent est discutable en ce qui concerne les relations *disjoint/meet* et *overlap* qui pourraient être remplacées respectivement par *disjoint* et *overlap/meet*, rejoignant ainsi la résolution topologique moyenne de la topologie *T1*.

3.1.4 RCC

La topologie étant par nature qualitative, il est possible de construire des théories axiomatiques de l'espace qui soient topologiques par nature, c'est-à-dire qui décrivent les relations entre les régions de l'espace – i.e., les objets observés par un individu – plutôt qu'entre points – i.e., des primitives géométriques qui n'ont pas de véritable légitimité dans le rapport observant-observé.

Whitehead a, en 1929, remis en question le postulat qui, depuis Euclide, acceptait le point comme la principale primitive géométrique. Avant 1929, il avait déjà tenté de construire une géométrie en prenant comme primitive la relation d'inclusion mais butait sur la difficulté de proposer une définition satisfaisante du point. Constatant que l'idée d'une géométrie fondée sur la relation d'inclusion « *x extends over y* » – la relation inverse de « *x est une partie de y* » – était une approche nécessairement ensembliste et ne rendait pas compte de la nature des relations topologiques, Whitehead, dans son ouvrage "Process Reality" [Whitehead, 1929], reprend l'idée, introduite par de Laguna [de Laguna, 1922], d'une autre primitive pour la topologie : la relation de connexion entre des régions de l'espace (« *regions are the things which are connected* »).

Plus récemment, [Clarke, 1981, Clarke, 1985] a axiomatisé la relation primitive de connexion $C(x, y)$ à partir de laquelle il est possible de définir beaucoup d'autres relations. Notamment, RCC-8 est un langage formé par les huit relations DC , EC , PO , EQ , TPP , $NTPP$, TPP^{-1} et $NTPP^{-1}$ correspondant respectivement aux relations *disjoint*, *meet*, *overlap*, *equal*, *coveredBy*, *inside*, *covers* et *contains* (cf. figure 3.1). Ce langage a été formalisé par [Randell *et al.*, 1992] (cf. équations (3.1) à (3.14)).

$$DC(x, y) \equiv_{Def} \neg C(x, y) \quad (disjoint) \quad (3.1)$$

$$P(x, y) \equiv_{Def} \forall z [C(z, x) \rightarrow C(z, y)] \quad (3.2)$$

$$PP(x, y) \equiv_{Def} P(x, y) \wedge \neg P(y, x) \quad (3.3)$$

$$EQ(x, y) \equiv_{Def} P(x, y) \wedge P(y, x) \quad (equals) \quad (3.4)$$

$$O(x, y) \equiv_{Def} \exists z [P(z, x) \wedge P(z, y)] \quad (3.5)$$

$$PO(x, y) \equiv_{Def} O(x, y) \wedge \neg P(x, y) \wedge \neg P(y, x) \quad (\text{overlap}) \quad (3.6)$$

$$DR(x, y) \equiv_{Def} \neg O(x, y) \quad (3.7)$$

$$EC(x, y) \equiv_{Def} C(x, y) \wedge \neg O(x, y) \quad (\text{meet}) \quad (3.8)$$

$$TPP(x, y) \equiv_{Def} PP(x, y) \wedge \exists z [EC(z, x) \wedge EC(z, y)] \quad (\text{coveredBy}) \quad (3.9)$$

$$NTPP(x, y) \equiv_{Def} PP(x, y) \wedge \neg \exists z [EC(z, x) \wedge EC(z, y)] \quad (\text{inside}) \quad (3.10)$$

$$P^{-1}(x, y) \equiv_{Def} P(y, x) \quad (3.11)$$

$$PP^{-1}(x, y) \equiv_{Def} PP(y, x) \quad (3.12)$$

$$TPP^{-1}(x, y) \equiv_{Def} TPP(y, x) \quad (\text{covers}) \quad (3.13)$$

$$NTPP^{-1}(x, y) \equiv_{Def} NTPP(y, x) \quad (\text{contains}) \quad (3.14)$$

RCC propose un cadre formel de raisonnement qualitatif autour des relations topologiques sans donner, contrairement aux méthodes n-intersection, une interprétation explicite de la relation de connexion. Les notions classiques de la topologie générale qui ne renvoient pas au sens commun ou au langage naturel sont absentes de RCC. Le critère d'expressivité de [Gotts *et al.*, 1996] est ainsi atteint.

Dans une interprétation ensembliste, $C(x, y)$ signifie que l'adhérence des régions x et y partagent un point [Randell *et al.*, 1992]. Cette interprétation renvoie à une géométrie du point, ce qui n'est pas nécessairement incompatible avec RCC. En effet, l'axiomatisation de la relation de connexion offre un moyen de s'affranchir du point dès lors que la connexion entre deux régions est établie mais la notion de point n'est pas inappropriée pour déterminer si deux régions sont connectées. Il est possible, si l'on ne considère que les relations entre des fermés réguliers (*cf.* posutlat 3, page 41), de donner une interprétation ensembliste de la relation de connexion puis des relations topologiques de RCC-8 (*cf.* tableau 3.3) [Renz, 2002].

Relation RCC-8	Contraintes topologiques
$C(x, y)$	$x \cap y \neq \emptyset$
$DC(x, y)$	$x \cap y = \emptyset$
$EC(x, y)$	$x^\circ \cap y^\circ = \emptyset, x \cap y \neq \emptyset$
$PO(x, y)$	$x^\circ \cap y^\circ \neq \emptyset, x \not\subseteq y, y \not\subseteq x$
$TPP(x, y)$	$x \subset y, x \not\subseteq y^\circ$
$TPP^{-1}(x, y)$	$y \subset x, y \not\subseteq x^\circ$
$NTPP(x, y)$	$x \subseteq y^\circ$
$NTPP^{-1}(x, y)$	$y \subseteq x^\circ$
$EQ(x, y)$	$x = y$

Tableau 3.3 — Interprétation ensembliste de RCC-8 (adapté de [Renz, 2002]).

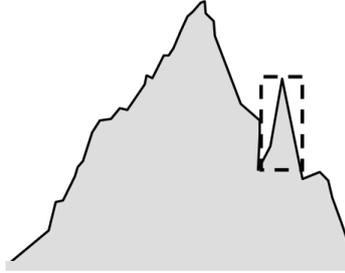


Figure 3.5 — Une montagne composante d'une autre montagne.

3.1.5 Méréologie et méréotopologie

La méréologie est l'étude de la relation du tout à ses parties [Simons, 1987, Varzi, 2006]. Dans le sens ou nous l'entendons, une partie d'un objet x correspond à un *composant* de x . Un composant de x peut-être perçu comme un objet indépendant des autres composants de x et ne peut donc pas être une partie arbitraire de x . Par exemple, sur la figure 3.5, la petite montagne est un composant de la grande montagne.

La méréologie axiomatise la relation $P(x, y)$ « x est un composant de y » avec les propriétés suivantes [Varzi, 2006] :

$$\forall x[P(x, x)] \quad (\text{Reflexivité}) \quad (3.15)$$

$$P(x, y) \wedge P(y, x) \rightarrow x = y \quad (\text{Antisymétrie}) \quad (3.16)$$

$$P(x, y) \wedge P(y, z) \rightarrow P(x, z) \quad (\text{Transitivité}) \quad (3.17)$$

La méréologie est intimement liée à la topologie de sens commun dans le sens ou la relation $P(x, y)$ est aussi une relation topologique⁴. La littérature propose trois approches

⁴La complexité des liens entre méréologie et topologie a été étudiée plus avant par [Varzi, 1994, Varzi, 1996].

pour intégrer méréologie et topologie dans ce qui est nommé une méréotopologie.

- La méréologie peut-être généralisée afin d'inclure la topologie. Pour cela, il est nécessaire d'intégrer la notion de connexion en ajoutant une primitive, par exemple la dyade « *x is a self connected spatial entity* » [Borgo *et al.*, 1996] ou la triade « *x and y are connected parts of z* » [Varzi, 1994]. Il ne s'agit toutefois pas véritablement d'une méréotopologie puisque les relations de connexion et de composition sont définies indépendamment ;
- La méréologie peut être considérée comme une sous-théorie de la topologie. C'est le cas dans la théorie RCC qui définit la primitive P à partir de la primitive de connexion (cf. équation (3.2)) ;
- Une dernière approche définit la topologie comme une sous-théorie de la méréologie. Il s'agit donc de définir la relation C à partir de la relation P axiomatisée. L'équation (3.2) est alors remplacée par l'équation (3.19). Le prédicat *Region*, introduit par [Eschenbach et Heydrich, 1995], qui apparaît ici est un sous-entendu de l'axiomatisation de la relation de connexion. En effet, lorsqu'il est posé que X et Y sont connectés, il est implicitement posé que X et Y sont des entités significatives de l'espace. En revanche, la relation P s'applique à tout sous-ensemble arbitraire de l'espace.

$$O(x, y) \equiv_{Def} \exists z[P(z, x) \wedge P(z, y)] \quad (3.18)$$

$$C(x, y) \equiv_{Def} O(x, y) \wedge Region(x) \wedge Region(y) \quad (3.19)$$

3.1.6 De la nature des frontières

D'un point de vue ensembliste, une frontière est un objet ayant moins de dimensions que l'espace topologique qui la définit⁵. En 3D les frontières sont des surfaces, en 2D ce sont des lignes et en 1D ce sont des points. Nous discutons ici de la nature des frontières à travers deux notions liées que sont la distinction entre ouverts et fermés et la connexion.

La dichotomie fermés/ouverts distingue les objets qui contiennent leurs frontières (e.g., un chat, une maison) et les objets qui ne la contiennent pas (typiquement un trou). Nous excluons volontairement de la discussion les objets dont la frontière est partielle. Dans le cadre de notre étude de tels objets n'existent pas. Les fermés et les ouverts dont il est question ici sont donc implicitement des fermés réguliers et des ouverts réguliers. Or, puisque la distinction entre ouvert et fermé heurte le sens commun, il n'est pas pertinent de traiter les frontières comme des entités à part entière [Brentano, 1988]. Deux postures sont envisageables. Les frontières peuvent être simplement absentes de l'univers du discours. C'est l'approche choisie par [Clarke, 1981, Clarke, 1985] et reprise par [Randell *et al.*, 1992] (cf. 3.1.4) dans le modèle RCC. L'autre posture consiste à dire que les ouverts (donc les trous) n'existent qu'à travers

⁵L'ontologie des frontières a été traitée en détail dans [Smith, 1997, Smith et Varzi, 1997, Smith et Varzi, 2000].

un fermé qui les entoure. La connexion n'est alors possible qu'entre deux fermés comme dans les méthodes n -intersections (cf. 3.1.3). Dans les deux cas, la frontière n'est pas considérée comme une entité à part entière. La conséquence immédiate, cohérente avec l'extensionnalité de la frontière, est qu'une frontière est localisée dans l'espace, mais n'occupe pas cet espace.

La connexion peut alors être définie comme la co-localisation des frontières de deux entités. Cette définition *a priori* simple recèle en fait plusieurs interrogations en rapport avec le sens commun. Considérons les trois énoncés suivants :

1. un livre posé sur une table ;
2. l'équateur sépare la Terre en deux hémisphères ;
3. un chalet construit dans une vallée, sur le flanc d'une montagne.

Le livre et la table sont à l'évidence des fermés et, par définition, contiennent leurs frontières. Le sens commun nous indique qu'ils se touchent et que nous pouvons affirmer vérifiée la relation *meet*(livre, table). Nous en concluons donc que le livre et la table partagent une partie de leur frontière, et en cela une partie de leur matière. La connexion impliquerait-elle une sorte de fusion des entités connectés ? Cette fois-ci le sens commun nous incite à répondre négativement. La sémantique de la connexion ferait plutôt appel à la notion de distance [Stell et Worboys, 1997] : deux entités sont connectées lorsque la distance qui les sépare est suffisamment faible pour que l'on considère qu'elles partagent une frontière. Dans un espace continu, nous pouvons imaginer un seuil à partir duquel l'observateur infère une distance nulle. Dans un espace discret, la distance minimale nous est donnée par la granularité des points⁶.

Le cas de l'équateur nous amène à observer ce qui se passe lorsque deux entités sont séparées par une frontière *fiat*. [Smith, 1997] propose une approche brentanienne et admet que l'équateur est constitué de deux frontières, une par hémisphère, coïncidant parfaitement. Contrairement aux frontières *bona fide* les frontières *fiat* peuvent être co-localisées. Constatant que les théories des frontières sont fondées sur les seules frontières *bona fide*, [Smith, 1997, Smith et Varzi, 2000] ont développé un cadre commun et une théorie méréologique qui prend en compte les deux types de frontière.

Le dernier énoncé est valide selon le sens commun mais contient (volontairement) une ambiguïté. L'expression « à flanc de montagne » est une opposition à « au fond de la vallée » : nous aurions pu choisir l'énoncé équivalent « le chalet est construit dans une vallée, mais pas dans le fond de la vallée ». Toutefois, l'énoncé proposé suppose qu'une partie de la vallée recouvre la base de la montagne. Cela signifierait-il que nous aurions pu dire « le chalet est à la fois sur la montagne et dans la vallée » ? Non, puisque cela choque le sens commun. Nous avons donc là deux entités (la montagne et la vallée) qui ne se recouvrent pas mais qui contiennent un même objet (le chalet). Cet apparent paradoxe s'explique par l'imprécision de la localisation des frontières d'une montagne ou d'une vallée. L'extension

⁶Notons que dans un espace discret, un modèle peut donner une épaisseur aux frontières. [Egenhofer et Sharma, 1993]. Dans ce cas, le partage des frontières correspond à une réalité physique, i.e., à un partage des « points frontières ».

spatiale d'une montagne n'est pas une donnée objective et plusieurs choix sont possibles sans que l'un s'impose comme étant le meilleur (cf. figure 3.6). S'agissant là de frontières *fiat*, nous pouvons admettre que la frontière de la vallée est co-localisée avec la frontière de la montagne, réalisant ainsi la relation *meet(mountain, valley)*. Si nous considérons la frontière qui offre la plus grande extension spatiale à la montagne et, dans le même temps, la frontière qui offre la plus grande extension spatiale à la vallée, nous obtenons une région qui contraint le choix de la frontière effective. Si le chalet est dans cette région, il est à la fois *potentiellement* sur la montagne et *potentiellement* dans la vallée. Le paradoxe s'explique par cette potentialité et provient de ce que le choix de la frontière *fiat* n'est pas arrêté. Il impose ainsi un réexamen de la notion de frontière et rend inopérante la définition topologique standard pour une topologie de sens commun.

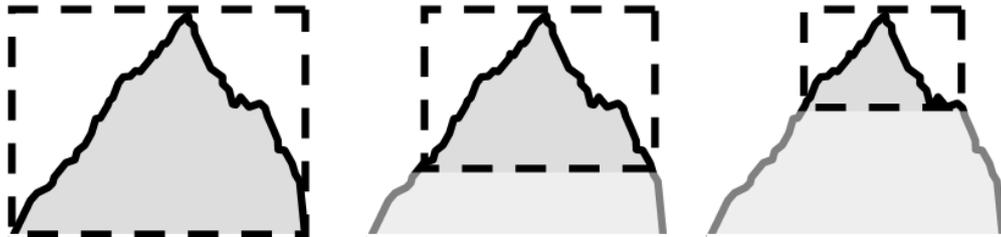


Figure 3.6 — De la difficulté de délimiter une montagne.

Nous avons vu dans le chapitre 1 que la frontière d'une forme de relief était la plupart du temps *fiat*, et donc ne pouvait être déterminée objectivement. L'exemple du chalet que nous venons de voir nous incite à prendre en compte ce paramètre dans toute topologie de sens commun du relief et à accepter d'apparentes incohérences telles que « le chalet est à la fois sur la montagne et dans la vallée ».

3.2 Morphologie

Bien que la forme soit une caractéristique importante d'un objet, ne serait-ce que parce qu'elle suffit à distinguer un objet même en l'absence de couleur ou de texture [Hoffman et Singh, 1997], il est difficile d'en donner une description qualitative [Cohn et Hazarika, 2001]. Les théories de la perception visuelle des formes sont associées à des méthodes de reconnaissance d'objet sur une image 2D en niveaux de gris. Comprendre l'image, c'est-à-dire lui donner un sens, nécessite la détection et la caractérisation des objets présentés. Il s'agit de passer d'une description quantitative à une représentation qualitative tout en conservant les caractéristiques importantes [Loncaric, 1998].

3.2.1 Formes et topologie

Il est possible de décrire une forme en décrivant les formes primitives (e.g., cylindres, cônes, sphères) qui la compose et les relations topologiques entre ces composants. Bien que de tels modèles topologiques soient très utiles en conception assistée par ordinateur, en architecture ou en géographie [Ramos, 2003], il nous semble difficile de les appliquer à la description d'objets naturels. En effet, un modèle topologique suppose des primitives *had hoc*, ce qui est bien adapté aux objets manufacturés ou à l'organisation d'un territoire, c.-à-d. à une configuration pensée par l'homme. En revanche, il nous paraît difficilement concevable de décomposer une forme de relief en des primitives géométriques « standards » telles que des cylindres ou des cubes sans dégrader la forme initiale. De plus, cette voie s'engageant dans une direction opposée au postulat 2, nous ne l'empruntons pas dans le cadre de cette thèse.

3.2.2 Saillances visuelles et partition des formes

Les saillances sont par définition associées à des discontinuités qualitatives de la matière. Dans le cas des formes, nous parlons de saillances visuelles. En effet, une forme est perçue principalement par ce sens. La détection des formes par un autre sens, le toucher par exemple, reste marginal. De plus, les psychologues, les cognitivistes tout comme les spécialistes de la vision par ordinateur partent généralement du principe que la perception visuelle fait appel à la forme des objets [Hoffman et Singh, 1997]. Les autres propriétés comme la couleur, le mouvement ou la texture sont secondaires.

Les psychologues ont constaté qu'un objet pouvait être décomposé en différentes parties de façon objective [Biederman, 1987]. D'ailleurs, la reconnaissance des parties d'un objet précède la reconnaissance de l'objet lui-même [Hoffman et Singh, 1997, Vecera *et al.*, 2001]. Trois arguments rendent nécessaires la décomposition en parties. [Hoffman et Singh, 1997] les ont exposés en s'appuyant sur l'exemple du chat.

1. Le chat étant *opaque* il ne peut pas être observé dans sa globalité. Selon la perspective de l'observateur, certaines parties sont visibles, d'autres sont cachées ;
2. Même si seule la queue dépasse de son panier, le chat est facilement reconnaissable. Le chat peut être en partie masqué par un autre objet ;
3. Le chat n'est pas rigide. La position des différentes parties de son corps les unes par rapport aux autres évoluent constamment. La forme du chat n'est pas constante.

Les saillances visuelles ne définissent donc pas seulement la frontière d'un objet, elles délimitent aussi les parties qui composent un objet. La reconnaissance d'un objet fait appel principalement à la reconnaissance des parties de l'objet et à la compréhension de leur organisation. Il reste à préciser les qualités dont les discontinuités sont révélatrices de saillances.

3.2.3 Séquences de primitives

Il est supposé ici que la forme d'un objet est définie par sa frontière, c.-à-d. par la séparation entre ce qui *est dans l'objet* et ce qui *est en dehors de l'objet*. A titre d'exemple, les objets de la figure 3.7 sont facilement reconnaissables à partir d'une simple silhouette, représentation de leur frontière. Un large consensus interdisciplinaire s'est développé autour de l'idée selon laquelle la forme d'un objet suffisait à le reconnaître dans la majorité des situations [Hoffman et Singh, 1997].

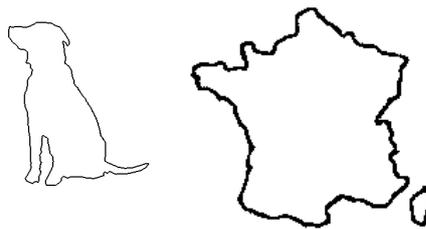


Figure 3.7 — Exemples de silhouettes caractérisant une forme.

Nous nous intéressons dans cette section aux représentations non numériques d'entités spatiales d'après la frontière des formes (en opposition à l'intérieur des formes) et fournissant un résultat non numérique. Un contour étant linéaire, il peut-être décrit de façon qualitative par une séquence de primitives. Pour [Richards et Hoffman, 1985], ces primitives sont délimitées par les points de courbure négative minimale. Dans d'autres approches, les primitives peuvent être des points de courbure particuliers [Leyton, 1988, Mokhtarian *et al.*, 1996, Chang *et al.*, 2002] ou être une combinaison de points particuliers et de segments [Galton et Meathrel, 1999, Cinque et Lombardi, 1995]. Les méthodes d'analyse qualitative des silhouettes sont étudiées plus en détail dans le chapitre 4.

En se fondant sur les délimitations des primitives, ce type d'approche est finalement peu éloigné de la notion de saillance : les délimitations s'apparentent en effet généralement à des discontinuités qualitatives des propriétés de l'espace.

3.2.4 Influence de la résolution

La représentation qualitative d'une forme est influencée par le niveau de résolution qui détermine les primitives géométriques perçues. Par exemple, supposons que la catégorie « montagne » soit modélisée par la séquence des deux segments $\nearrow \searrow$. Selon cette définition, la montagne en haute résolution de la figure 3.8 (droite) est une séquence de très courts segments et, par conséquent, n'est pas perçue comme une montagne. En revanche, la montagne de gauche est à la « bonne résolution » pour être perçue en tant que montagne. Une importante limitation des modèles de description par des séquences de primitives est cette influence directe du niveau de résolution choisi sur l'ensemble des entités perçues. Pour pallier ce défaut, plusieurs méthodes de représentation multi-résolution sont proposées dans la littérature telles que la modélisation hiérarchique [Richards et Hoffman, 1985, Rosin, 1993,

Cinque et Lombardi, 1995], la généralisation qualitative [Kulik et Egenhofer, 2003] ou la hiérarchie méréologique [Chevriaux *et al.*, 2005].

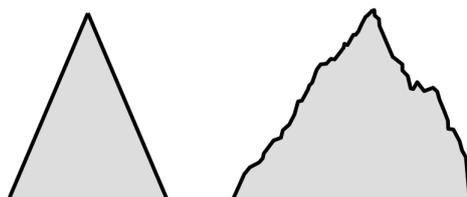


Figure 3.8 — Influence de la résolution sur la détection des formes.

3.3 Discussion

Les formes de relief perçues à l'horizon sont des formes 2D caractérisées par leur contour, i.e., la limite entre le ciel et la terre. La représentation qualitative d'une forme 2D est influencée par le niveau de résolution qui détermine les primitives géométriques et les saillances. Un autre problème concernant l'analyse qualitative d'une forme concerne le fait que de nombreuses formes de relief ont des frontières *fiat*. Nous estimons que ces deux aspects doivent être pris en compte dans une modélisation qualitative des formes de relief. Nous introduisons deux postulats qui reflètent l'influence de ces deux aspects.

Postulat 4 (Influence de la résolution) *Une forme de relief peut être détectée indépendamment du niveau de résolution.*

Postulat 5 (Indétermination de l'extension spatiale) *Une forme de relief peut être associée à plusieurs extensions spatiales en fonction du choix arbitraire de la localisation d'une frontière fiat.*

Comme conséquence de ce postulat, la notion d'*extension spatiale* doit être redéfinie : c'est l'ensemble des extensions spatiales possibles dépendant du choix de la localisation des frontières *fiat*. En termes ensemblistes, nous dirons que l'extension spatiale est l'union de toutes les extensions possibles.

La topologie est concernée par cette redéfinition. En effet, les notions de frontières et d'intérieur tiennent pour des extensions spatiales bien définies : le choix des frontières *fiat* précède la description des relations topologiques entre deux formes de relief. Or, ce choix est arbitraire et ne dépend pas toujours du sens commun. Nous avons vu aussi que la prise en compte des frontières *fiat* menait à des résultats a priori incohérents (*cf.* exemple du chalet, 3.1.6).

Analyse qualitative des silhouettes

« Envoyez l'architecte dans nos montagnes. Qu'il apprenne là ce que la nature entend par arc boutant, ce qu'elle entend par un dôme. »

John Ruskin (1819–1900)

Les principes de perception que nous avons évoqués dans le chapitre 1 et la représentation qualitative de l'espace abordée dans le chapitre 3 nous amènent à penser que, pour rendre compte de la perception du relief, il est nécessaire de proposer une modélisation plus sémantique que numérique, plus qualitative que quantitative.

Le relief perçu par un individu correspond à une simplification du monde réel en une modélisation mentale des objets étudiés et des relations qui les lient [Dehn *et al.*, 2001]. Dans ces modèles mentaux, la sémantique prend une part importante et implique une adaptation de l'interprétation de la réalité physique en fonction des conventions, des habitudes et de la culture associées à une discipline scientifique donnée. Une modélisation scientifique, en tant que simplification du monde, capture l'essentiel des propriétés de l'univers nécessaires à la représentation d'un phénomène. La *modélisation sémantique* relève du même principe mais s'attache au monde mental, c.-à-d. aux conventions et aux définitions qui sous-tendent la signification des idées d'un individu ou d'une communauté [Rishe, 1992, Bishr, 1998].

La littérature propose plusieurs méthodes pour analyser les silhouettes. Elles sont plus ou moins qualitatives et s'adaptent à différents degrés à l'objet de notre étude. Parmi ces méthodes, le langage de [Kulik et Egenhofer, 2003] découle de motivations très proches des nôtres et fait l'objet d'une analyse détaillée. En effet, les auteurs s'appuient sur les principes de la géographie naïve pour proposer une approche entièrement qualitative de description des silhouettes à l'horizon.

La section 4.1 précise ce que nous entendons par silhouette de terrain et en introduit une définition reposant sur la notion de *points de mesure*. La section 4.2 introduit les *codons*,

des primitives géométriques cognitivement valides, et les méthodes associées. Cette section se conclut par le constat que ces approches ne sont pas directement applicables aux silhouettes de terrain. La section 4.3 présente deux langages de représentation des silhouettes reposant non plus sur la description de propriétés locales de la silhouette, mais sur une caractérisation des formes isolées et de leur organisation dans l'espace. Enfin, la section 4.4 conclut ce chapitre en posant les bases de notre modèle à travers une synthèse des trois premiers chapitres.

4.1 Silhouette de terrain

Nous sommes confrontés quotidiennement aux silhouettes dans notre environnement naturel. L'exemple le plus évident est celui du paysage à l'horizon : c'est la projection d'un relief dans le champ visuel d'un observateur (*cf.* figure 4.1). Un observateur décrira la silhouette en utilisant des termes spatiaux *non quantitatifs* tels que montagne, colline ou vallée.

On peut intuitivement considérer qu'une silhouette est la frontière d'une forme 2D. Dans le cas du paysage à l'horizon, il s'agit de la limite entre ciel et terre.



Figure 4.1 — Montagnes d'Amérique du Sud avec, en blanc, la frontière entre ciel et terre.

La perception de l'espace environnant par un système intelligent, qu'il soit humain ou cybernétique, est avant tout une affaire de stimuli. Dans le cas d'un oeil, par exemple, les photorécepteurs de la rétine captent les longueurs d'ondes et les transforment en influx nerveux transmis au nerf optique. Ces stimuli sont traités par le cerveau (thalamus puis cortex) pour former une image. Si nous considérons l'image comme une représentation de l'espace environnant, nous pouvons affirmer que ce qui est perçu au niveau physique du sens (ou du capteur) est un ensemble de points dont la mise en relation est la résultante d'un processus cognitif, *i.e.*, une construction du cerveau.

Par analogie, nous postulons que l'acquisition de données altimétriques ou bathymétriques, *c.-à-d.* une opération consistant à mesurer l'élévation d'un relief en certains

points le long d'un axe, est une forme de perception d'une silhouette à l'horizon. Ces points, nommés *points de mesure*, sont définis par une coordonnée x dans le plan horizontal et une coordonnée z dans le plan vertical. En dehors de toute interprétation, une silhouette n'est rien d'autre qu'une séquence de points de mesure. Afin de mettre en évidence le relief de la silhouette, nous proposons de représenter une séquence par les segments qui relient les points consécutifs (cf. figure 4.2).

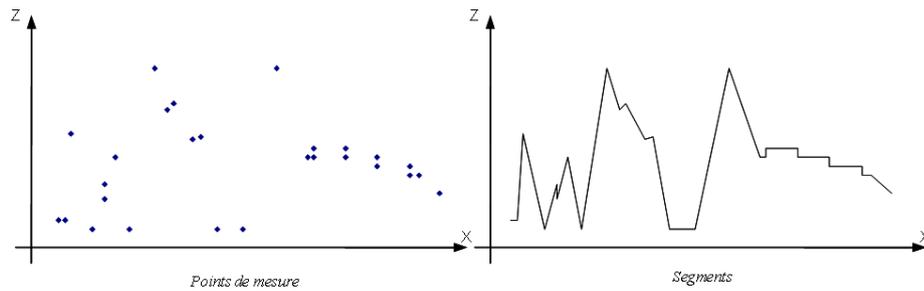


Figure 4.2 — Perception et représentation d'une silhouette. Le relief est mis en évidence en construisant les segments qui relient les points de mesure consécutifs.

Nous choisissons de ne pas « lisser » la polygone ainsi obtenue. Ce choix est motivé par les travaux en psychologie [Attneave et Arnoult, 1966] qui ont montré qu'il est possible d'approcher une forme en n'utilisant que des lignes droites. Pour s'en convaincre, il suffit de penser aux jeux pour enfant dans lesquels il s'agit de relier des points pour reconstruire une forme telle qu'un chat ou une maison.

4.2 Courbures et points particuliers

Le principe commun aux méthodes proposées dans la littérature pour l'analyse de silhouettes est de décomposer une silhouette en éléments géométriques, le plus souvent asémantiques, dont l'organisation selon un sens de parcours prédéfini le long de la silhouette produit une séquence interprétable et génère ainsi une abstraction de la forme.

Acceptant ce principe, il reste à déterminer quelles sont ces primitives et comment elles sont extraites de la silhouette. Les saillances, interprétées comme des discontinuités des propriétés géométriques locales de la silhouette, c.-à-d. des points caractéristiques (e.g., point d'inflexion, de rebroussement, de discontinuité) fournissent une méthode de segmentation d'une silhouette en éléments primitifs. Il ne s'agit donc plus de déterminer *a priori* un ensemble de primitives, mais de déterminer les saillances qui les délimitent.

Dans cette section, nous présentons des approches de description qualitative de silhouettes basées sur la détection de caractéristiques géométriques locales.

4.2.1 Codons de Richards et Hoffman

La *règle des minima* [Hoffman et Richards, 1984] stipule que les différentes parties d'un objet sont délimitées par les points de courbure négative minimale. La courbure en un point d'une courbe est l'inverse du rayon du cercle osculateur, le cercle qui épouse la courbe au plus près du voisinage de ce point et tangent à la courbe en ce point. En donnant un sens de parcours à la courbe, il est possible de différencier les courbures négatives des courbures positives et, ainsi, de distinguer les concavités des convexités. Par convention, le sens de parcours est choisi de façon à ce que l'intérieur de la figure soit à gauche de la silhouette. Les courbures négatives minimales se situent dans les creux concaves.

Cette règle permet d'expliquer certains paradoxes visuels. Par exemple, il semble que les deux côtés du disque d'Attneave [Attneave, 1971] sont très différents, alors que, par construction, leurs frontières sont identiques puisque délimitées par une même courbe (*cf.* figure 4.3). La règle des minima explique ce paradoxe en organisant chacun des deux côtés différemment.

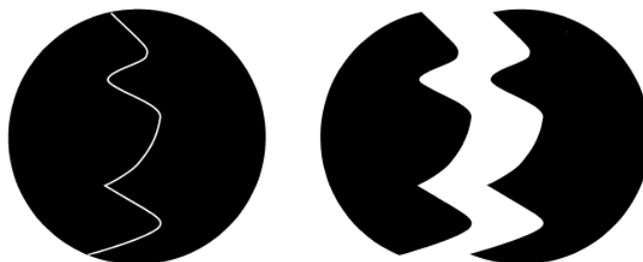


Figure 4.3 — Le paradoxe du disque d'Attneave (extrait de [Hoffman et Singh, 1997]).

La règle des minima a été validée expérimentalement par [Xu et Singh, 2002]. Ils ont mis en évidence, à travers plusieurs expériences, que le système visuel segmente les formes en parties selon la règle des minima et qu'il le fait dès les premières étapes du processus visuel. Lors de ces expériences, il était demandé aux sujets de segmenter des objets en parties. Il est apparu que, lorsque la forme est préalablement segmentée selon la règle des minima, la segmentation est beaucoup plus rapide.

[Richards et Hoffman, 1985] ont exploité la règle des minima pour développer une méthode de description de formes dans laquelle les primitives, nommées « *codons* », sont délimitées par les points de courbure négative minimale (*cf.* figure 4.4). Le fait d'assimiler la silhouette à une courbe impose qu'elle soit lisse, autrement dit qu'elle admette au moins une dérivée première en tout point.

L'ensemble initial des codons a été étendu par [Rosin, 1993] afin de prendre en compte les segments droits¹ et les cassures (points en lesquels la courbe n'est pas dérivable) et de modéliser des silhouettes ouvertes. A partir de cet ensemble étendu, il a développé une approche hiérarchique, les « *codon-tree* », pour relier les représentations d'une même forme à

¹Bien que présent dans l'ensemble initial de [Richards et Hoffman, 1985], le codon ∞ correspondant à un segment droit n'est pas réellement pris en compte avant [Rosin, 1993].

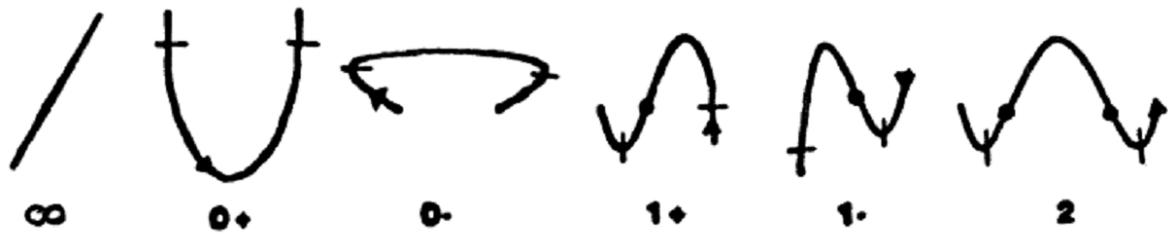


Figure 4.4 — Ensemble initial des codons. Les traits indiquent les courbures négatives minimales et les points les zéros de courbure. Le sens de parcours est matérialisé par les flèches. (extrait de de [Richards et Hoffman, 1985]).

différents niveaux de résolution.

Fondamentalement, les codons délimitent les parties convexes d'une forme. Pour cette raison, ils sont surtout adaptés à l'analyse d'objets manufacturés ou, plus généralement, d'objets construits par assemblage d'éléments [Singh et Hoffman, 2001]. Cela inclut la plupart des être vivants dont la forme est caractérisée par des éléments identifiables (e.g., bras, jambes, torse, tête) dans la mesure où le génotype contraint fortement la morphogénèse. En revanche, pour décrire certaines formes naturelles complexes (e.g., nuages, formes de reliefs) issues d'un processus non intentionnel, la règle des minima ne rend pas correctement compte de l'organisation des formes. Ce qui fait sens n'est plus dans ce cas le reflet de la décomposition objective et intentionnelle de la forme en parties mais, de façon plus générale, l'expression de discontinuités des propriétés qualitatives de l'espace qui émergent spontanément d'une organisation singulière et circonstancielle due à un phénomène dynamique (e.g., formation des nuages, érosion d'un relief).

Dans notre contexte, celui des formes de relief, la règle des minima est insuffisante pour capturer toutes les saillances et, donc, pour isoler tous les objets. Nous pouvons prendre comme exemple le profil de terrain de la figure 4.5 sur lequel l'objet intuitivement le plus marquant est la dépression. La règle des minima segmente la silhouette en trois codons (1-, 1+, 0+) mais aucun ne correspond à la dépression.

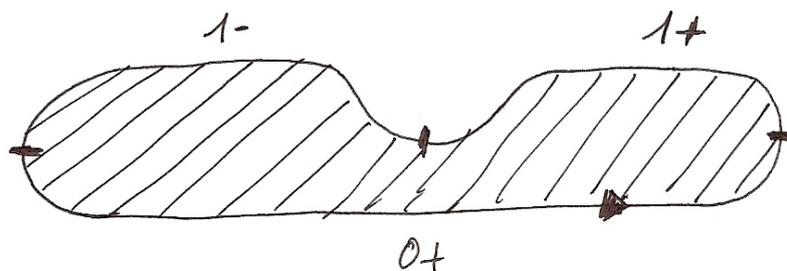


Figure 4.5 — Les codons ne capturent pas une dépression dans un profil de terrain.

D'autres méthodes ont été envisagées [Leyton, 1988, Cinque et Lombardi, 1995, Galton et Meathrel, 1999]. Elles prennent en compte à la fois les convexités et les conca-

vités comme des éléments remarquables des silhouettes, rendant alors possible la capture de dépressions telles celle de la figure 4.5.

4.2.2 L'approche multi-résolution de Cinque et Lombardi

[Cinque et Lombardi, 1995] introduisent un nouvel ensemble de primitives, nommées segments (cf. tableau 4.1), obtenues en simulant un processus de diffusion de chaleur sur la forme. Physiquement, lorsque la frontière d'un objet est chauffée, l'énergie se diffuse vers l'intérieur de cet objet (il est supposé qu'il est thermiquement isolé de son environnement). Par analogie avec le phénomène physique de diffusion qui, dans ces conditions, fait s'accumuler la chaleur dans les convexités locales, [Cinque et Lombardi, 1995] proposent un algorithme itératif. Ainsi, après un nombre suffisant d'itérations, les éléments concaves sont délimités par les points les plus froids et les éléments convexes par les points les plus chauds. C'est une méthode essentiellement quantitative bien que la séquence de symboles obtenue puisse être considérée de nature qualitative.

Segment	Signification
'C'	concavité
'W'	importante concavité
'S'	segment droit
'X'	convexité
'Y'	importante convexité

Tableau 4.1 — Ensemble des segments de l'approche multi-résolution de Cinque et Lombardi.

Le processus est appliqué progressivement afin de produire une suite de séquences caractérisant la forme à différents niveaux de résolution. Sur l'exemple de la figure 4.6, le contour du poisson est divisé en segments menant à la séquence (cyclique) YSCYCSCYCSCYCSCS. Au plus bas niveau de résolution, la séquence devient XSXCXCS.

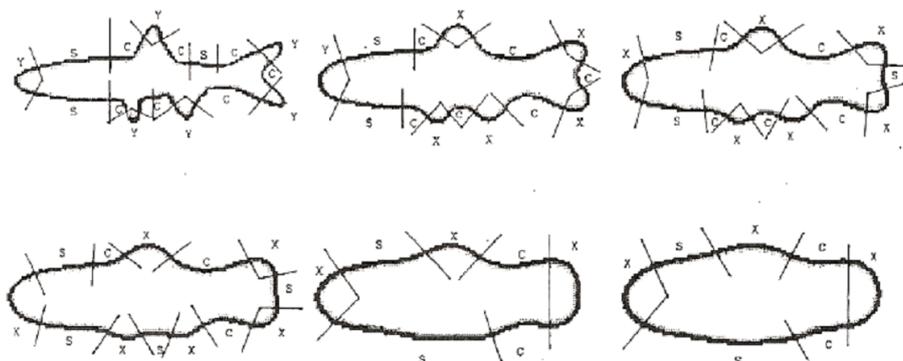


Figure 4.6 — Application de l'approche multi-résolution de Cinque et Lombardi (extrait de [Cinque et Lombardi, 1995]).

Il s'agit d'une analyse multi-résolution dans la mesure où Cinque et Lombardi fournissent une méthode pour passer d'une résolution à une autre. La forme, toutes résolutions confondues, est décrite par un arbre hiérarchique dont chaque nœud correspond à un segment et chaque niveau à une résolution. La racine de l'arbre correspond à une résolution virtuelle la plus basse possible dans laquelle la forme est décrite par un seul segment indéterminé. Partant de la racine, et en développant l'arbre, il est possible de reconstituer la description de la forme à n'importe quelle résolution. Plus on descend dans l'arbre, plus la résolution est fine. Par exemple, la queue du poisson de la figure 4.6 correspond au nœud X aux basses résolutions (les niveaux de l'arbre les plus proches de la racine), à l'ensemble de nœuds XSX aux résolutions intermédiaires, puis à l'ensemble de nœuds YCY à la résolution la plus fine. Ainsi, chaque partie d'une forme est décrite par une hiérarchie de segments rendant compte de son évolution au fur et à mesure de l'affinement de la résolution de représentation.

4.2.3 Approche qualitative de Galton et Meathrel

Dans sa thèse, [Meathrel, 2001] propose un cadre général pour la représentation qualitative des formes. Il introduit en particulier une théorie des contours qualitatifs (*Qualitative Boundary Theory*, QBT), présentée précédemment sous le nom de *Qualitative Outline Theory* [Galton et Meathrel, 1999]. Il s'agit de décrire qualitativement les formes dans un cadre très général. Il ne prend donc pas en compte les particularités des objets géographiques.

Selon cette théorie, les formes des objets sont modélisées par une séquence de symboles qui représentent qualitativement le contour de la forme. Ces symboles sont les symboles terminaux d'une grammaire régulière. Une grammaire G est un quadruplet $G = (N, \Sigma, P, S)$, où N est l'ensemble des symboles non terminaux, Σ est l'ensemble des symboles terminaux (alphabet), P est l'ensemble des règles de production et S est le symbole de départ. Les symboles terminaux correspondent soit à des courbes, soit à des points : $\Sigma = \{/, \supset, \subset, >, <, \succ, \prec\}$.

$$\begin{array}{l} \text{courbes} \\ \text{points} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} / \quad \text{ligne droite} \\ \supset \quad \text{courbe convexe} \\ \subset \quad \text{courbe concave} \\ > \quad \text{angle aigu vers l'extérieur} \\ < \quad \text{angle aigu vers l'intérieur} \\ \succ \quad \text{point de rebroussement vers l'extérieur} \\ \prec \quad \text{point de rebroussement vers l'intérieur} \end{array} \right.$$

Une polyligne ayant par ailleurs la particularité d'être une succession de points ($>$ ou $<$) reliés par des segments de droites, nous pouvons omettre les symboles $/$ dans le langage sans perdre d'informations. Son pouvoir d'expression devient alors très limité et nous permet seulement de distinguer angles concaves et angles convexes. Il est par conséquent très peu

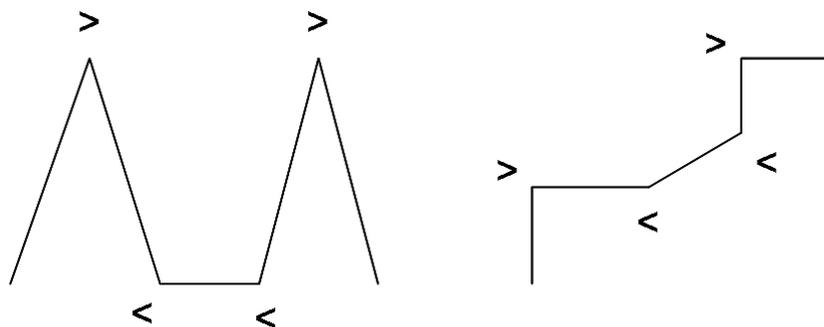


Figure 4.7 — Deux silhouettes différentes décrites par la même séquence.

discriminatoire. Dans l'exemple de la figure 4.7, les deux silhouettes, pourtant manifestement différentes, sont représentées par la même séquence de symboles : $><<>$.

4.2.4 Discussion

L'exemple de la figure 4.8 met en évidence que des saillances émergeant des seules propriétés géométriques locales de la silhouette ne suffisent pas à rendre compte de toutes les nuances d'interprétation d'une forme. Outre leurs capacités à segmenter une silhouette en parties, les saillances permettent de donner un sens à ces parties. L'approche multi-résolution de [Cinque et Lombardi, 1995] va plus ou moins dans ce sens en décrivant, via la représentation hiérarchique, chaque partie indépendamment des autres. Nous posons là une évidence, à savoir qu'une partie d'une silhouette est elle-même une silhouette qui peut éventuellement être décomposée en parties. Cependant, les approches que nous avons vu jusqu'ici imposent de représenter la silhouette à la bonne résolution avant de l'interpréter et ne respectent donc pas le postulat 4 (cf. p.52).

Les saillances ont à la fois pour rôle de délimiter les formes et de les caractériser. Par exemple, ce qui fait du sommet d'une montagne indubitablement une saillance n'est pas uniquement la courbure en ce point mais réside aussi dans le fait qu'il s'agit du point le plus élevé d'une montagne.

Définition 1 (Saillance) *Une saillance est un point caractérisé par une ou plusieurs discontinuités des propriétés qualitatives de l'espace. Une saillance peut être à la fois :*

- une délimitation entre deux formes distinctes à l'intérieur de la silhouette, si la discontinuité marque la séparation entre les deux formes ;
- un point particulier de la forme si la discontinuité concerne les propriétés qualitatives internes de la forme, par exemple un point de courbure négative minimale, positive maximale ou nulle ;
- un point remarquable à l'intérieur d'une forme car correspondant à un maximum/minimum d'une propriété qualitative. Le sommet est donc une saillance puisqu'il est le point ayant la propriété qualitative « altitude maximale ».

La différenciation entre haut et bas, entre gauche et droite prend une grande importance pour la catégorisation des formes de relief. Or, les méthodes décrites dans cette section décrivent des formes invariantes par rotation. Un stylo reste un stylo quelque soit le sens dans lequel on le tourne. Une table à l'envers, i.e., dans une position qui ne rend pas directement compte de sa fonctionnalité, reste une table. En revanche, une montagne est nécessairement orientée vers le haut. Dans l'exemple de la figure 4.8, les deux silhouettes sont équivalentes par rotation. Cependant, pour un géomorphologue, la silhouette de gauche représente deux montagnes séparés par une vallée à fond plat, alors que la silhouette de droite évoque la succession de deux terrasses.

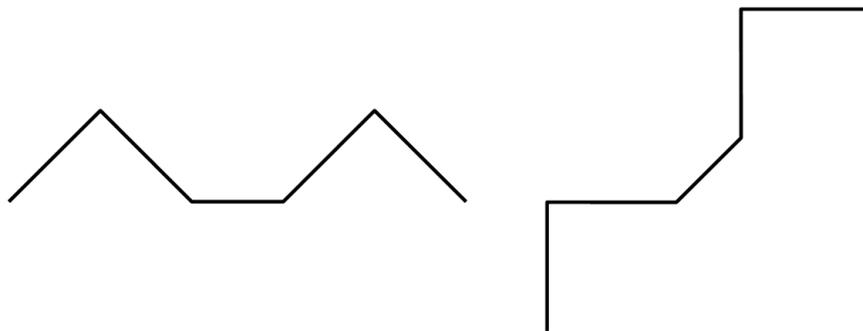


Figure 4.8 — De l'importance de l'orientation dans l'interprétation des formes de relief.

Outre les objets eux-mêmes, une modélisation sémantique vise à représenter les relations entre eux. Les méthodes que nous venons de voir consistent à partitionner la silhouette, c.-à-d. à la segmenter en parties la recouvrant totalement et disjointes deux à deux. Les parties sont, soit au contact (relation *touch*), soit disjointes (relation *disjoint*). Comme le soulignent Cinque et Lombardi, « ...each portion of the boundary space [silhouette] is covered by at most one segment at a given resolution level. » [Cinque et Lombardi, 1995, p. 603]. Il n'est alors pas possible que deux parties de la silhouette se recouvrent même si elles sont capturées à des résolutions différentes. En limitant le pouvoir d'expression des relations topologiques, la segmentation s'avère insuffisante pour rendre compte de toute la complexité d'une silhouette de terrain. Il y a nécessité d'apporter aux approches que nous venons de voir une qualification et une distinction purement sémantique des primitives isolées, ce qui constitue, selon nous, l'apport principal du langage de Kulik et Egenhofer que nous décrivons dans la section suivante.

4.3 Langages de description

Nous présentons dans cette section deux autres approches pour la description de silhouettes à partir de primitives. Elles proposent des méthodes de délimitation des formes qui ne reposent pas sur les propriétés locales de la silhouette mais sur les propriétés des formes qui sont isolées.

4.3.1 Grammaire qualitative de Magee

Parallèlement aux travaux déjà cités, une grammaire qualitative pour la description et l'analyse d'images a été proposée dans la communauté traditionnellement très quantitative de la vision par ordinateur [Magee, 2002]. L'auteur a constaté que les descriptions qualitatives des formes dérivées d'une analyse quantitative introduisaient généralement un biais. Il propose donc de construire une analyse qualitative.

Pour cela, il décrit les frontières d'un objet à l'aide d'un langage construit autour d'une grammaire composée d'un alphabet de 14 symboles (*cf.* figure 4.9).



Figure 4.9 — Les symboles de la grammaire qualitative de Magee (extrait de [Magee, 2002]).

Les symboles rendent compte des intersections entre la frontière de l'objet et des régions carrés (*cf.* figure 4.10). Selon une méthode de type *quadtree*, l'image est initialement décomposée en carrés². Si la portion de la silhouette située dans un carré ne correspond à aucun symbole, le carré est subdivisé en quatre nouveaux carrés. La décomposition récursive continue jusqu'à ce que chaque carré soit associé à un symbole. La grammaire produit ainsi une description à un niveau de détail adapté à la complexité de la forme.

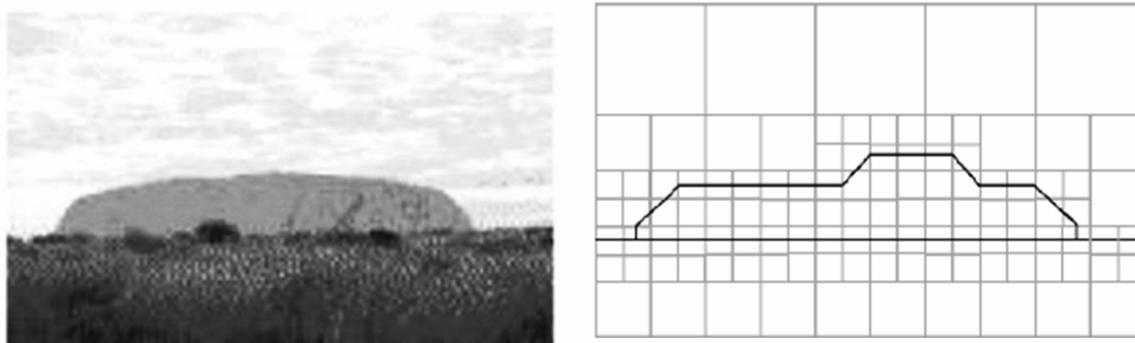


Figure 4.10 — Description d'une vue de Ayers Rock par la grammaire qualitative de Magee (extrait de [Magee, 2002]).

Cette méthode a été implémentée et testée dans le cadre de la reconnaissance d'objets manufacturés (une gomme, des ciseaux, une agrafeuse et une équerre). Les résultats obtenus ouvrent des perspectives applicatives intéressantes, mais, dans le contexte qui est le nôtre, nous pouvons relever deux défauts majeurs. Premièrement, la forme n'est pas décomposée en parties selon des saillances visuelles mais selon un découpage arbitraire. Par conséquent, il

²Notons que Magee ne fait pas explicitement référence à la méthode *quadtree*. On peut d'ailleurs remarquer que le quadrillage 5×3 initial de la figure 4.10 est arbitraire.

s'agit d'une analyse géométrique et non d'une analyse sémantique de la forme. Secondement, le choix d'une résolution influence directement la description de la silhouette ce qui est incompatible avec le postulat 4. De plus, nous ne pouvons pas parler d'une analyse multi-résolution. Bien que la partition de type *quadtree* soit par nature hiérarchique, la subdivision n'intervient que pour les carrés qui ne correspondent pas à un symbole. Il n'est donc pas possible de construire, comme le font [Cinque et Lombardi, 1995], un arbre dans lequel chaque niveau correspond à une résolution.

4.3.2 Langage de Kulik et Egenhofer

[Kulik et Egenhofer, 2003] ont proposé une approche pour identifier des formes de relief (e.g., montagnes, vallées, plateaux) sur une silhouette à différents niveaux de résolution. Une silhouette est représentée par une séquence de lignes primitives (cf. figure 4.2). Les mécanismes d'interprétation (règles de réécritures) peuvent être adaptés en fonction du contexte applicatif (e.g., tourisme, application militaire).

4.3.2.1 Description qualitative des lignes primitives

La description des lignes primitives repose sur trois caractéristiques.

1. **Un type de pente** (*ascendante, horizontale, descendante*) et une direction (*gauche, vertical, droite*). Par souci de simplification, seule les directions *vertical* et *droite* sont retenues. Ainsi, Kulik et Egenhofer isolent cinq types de lignes primitives (cf. figure 4.11) ce qui conduit à limiter l'expressivité de ce langage. D'après les auteurs, l'extension de leur langage par ajout de la direction *gauche* introduit de nouvelles règles mais ne change en rien les principes énoncés.

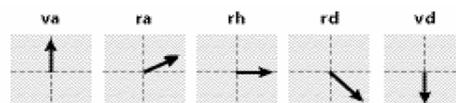


Figure 4.11 — Les cinq types de ligne primitive retenus par Kulik et Egenhofer pour décrire les silhouettes (extrait de [Kulik et Egenhofer, 2003]).

2. **L'ordre de magnitude** correspond à l'importance relative de la taille de la ligne primitive par rapport à l'ensemble de la silhouette. Kulik et Egenhofer ne proposent pas de méthode particulière pour le calcul des ordres de magnitude. Cependant, ils relèvent une difficulté apparaissant lorsqu'une silhouette est représentée à un niveau très fin par des petites lignes primitives, toutes de tailles comparables. Dans ce cas, il est difficile, voire impossible de distinguer des regroupements de valeurs donc des ordres de magnitude clairement distincts. Kulik et Egenhofer contournent ce problème en proposant de réduire le nombre de lignes primitives via un algorithme de simplification numérique

conservant les formes (e.g., [Douglas et Peucker, 1973, Latecki et Lakämper, 2000])³ ;

3. **Une relation d'ordre** $<$ représente la différence en élévation des lignes primitives. Concrètement, cela revient à comparer les hauteurs des lignes primitives. Précisons que la hauteur d'une ligne primitive est comprise ici comme la mesure de sa projection sur l'axe vertical.

Une ligne primitive se note p^o avec $p \in \{va, ra, rh, rd, vd\}$ le type de pente et o l'ordre de magnitude.

Une silhouette est une séquence de lignes primitives. L'analyse que proposent Kulik et Egenhofer repose sur deux mécanismes : la capture des formes de relief et le changement de résolution. Ces deux mécanismes sont tous les deux fondés sur le principe des règles de réécriture.

4.3.2.2 Capture des formes de relief

Les règles d'agrégation identifient les formes de relief telles que des vallées ou des canyons. Une agrégation consiste à substituer à une séquence de lignes primitives successives un motif désignant une forme de relief. En ce sens, les règles d'agrégation peuvent être assimilées à des règles d'interprétation sémantique.

La figure 4.12 illustre, à titre d'exemple, les trois règles identifiant respectivement une montagne (mt), une vallée (vl) et un plateau (pl).

$$\begin{aligned} ra^o rd^o &\rightarrow mt^o \\ rd^o ra^o &\rightarrow vl^o \\ va^\omega rh^o vd^\omega &\rightarrow pl^o \text{ avec } \omega < o \end{aligned}$$


Figure 4.12 — Exemples de règles d'agrégation. De gauche à droite : une montagne (mt), une vallée (vl) et un plateau (pl).

4.3.2.3 Changement de résolution

Chaque ordre de magnitude correspond à une résolution. La description d'une silhouette à une résolution donnée est obtenue en supprimant les lignes primitives d'ordre de magnitude inférieur à cette résolution⁴. La suppression des lignes primitives s'effectue à travers deux

³La simplification quantitative dont il est question ici ne doit pas être confondue avec la simplification qualitative décrite plus loin.

⁴Remarquons qu'une résolution inférieure (i.e., un niveau de détail moins élevé) correspond à un ordre de magnitude supérieur.

mécanismes : la généralisation et la simplification.

Les règles de généralisation sont utilisées pour passer d'une résolution donnée à une résolution inférieure (i.e., à un ordre de magnitude de référence). Tous les couples consécutifs de lignes primitives sont considérés. Lorsque l'ordre de magnitude de l'une des lignes primitives est égale à l'ordre de magnitude de référence et que l'ordre de magnitude de l'autre ligne primitive est inférieur, alors une règle de généralisation s'applique (cf. figure 4.13).

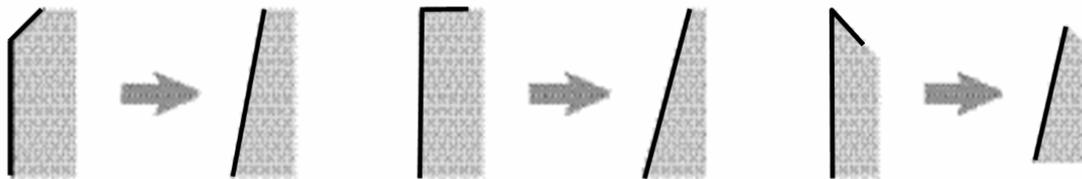


Figure 4.13 — Exemples de généralisation : une ligne verticale ascendante suivie d'une ligne primitive d'un ordre de magnitude inférieur (extrait de [Kulik et Egenhofer, 2003]).

Cette approche qualitative introduit des biais qui, dans certains cas, ne peuvent pas se justifier par l'imprécision du sens commun. Ainsi, la séquence $va^{\circ}rh^{\omega}$ (falaise avec un léger décrochement) se généralise en ra° (pente) (cf. figure 4.14).



Figure 4.14 — Exemple de biais introduit par les règles de généralisation (avec $\omega < \circ$).

Deux principes de simplification sont introduits afin de compléter la généralisation. Lorsque deux lignes primitives consécutives forment, soit une séquence de deux lignes primitives d'ordres de magnitude inférieures à la résolution de référence, soit une séquence de deux lignes primitives de même pente, elles sont agrégées de façon à générer une ligne primitive unique. L'ordre de magnitude de la ligne primitive obtenue, bien que contrainte par l'ordre de magnitude des deux lignes primitives originales, doit être recalculé pour éviter d'introduire une trop grande imprécision au fur et à mesure des étapes de simplification successives.

Après avoir décomposé la silhouette en lignes primitives, déterminé pour chacune d'elle un type et un ordre de magnitude puis défini la relation d'élévation, nous obtenons la plus grande résolution possible : il s'agit du plus petit ordre de magnitude alloué à une ligne primitive. Le passage à une résolution inférieure consiste à « supprimer » les lignes primitives ayant le plus petit ordre de magnitude. Pour ce faire, on applique d'abord les règles de généralisation, puis

les règles de simplification. On obtient ainsi une nouvelle silhouette à un niveau de détail, ou granularité, plus grossier.

4.3.2.4 Schéma général

L'analyse qualitative d'une silhouette par le langage de Kulik et Egenhofer aboutit à une description sémantique (cf. figure 4.15). Cependant, il a été montré, à travers une implémentation de ce langage, que la description sémantique dépendait en grande partie du choix du mode de détermination des ordres de magnitude [Arkwright et Cadoret, 2005]. Kulik et Egenhofer proposent de qualifier la longueur des segments mais ne donnent pas de précision sur le mode de calcul. Plusieurs options ont été explorées sans que l'une d'elles s'impose. Il n'en reste pas moins que le choix du mode de calcul influence significativement la qualité de la description.

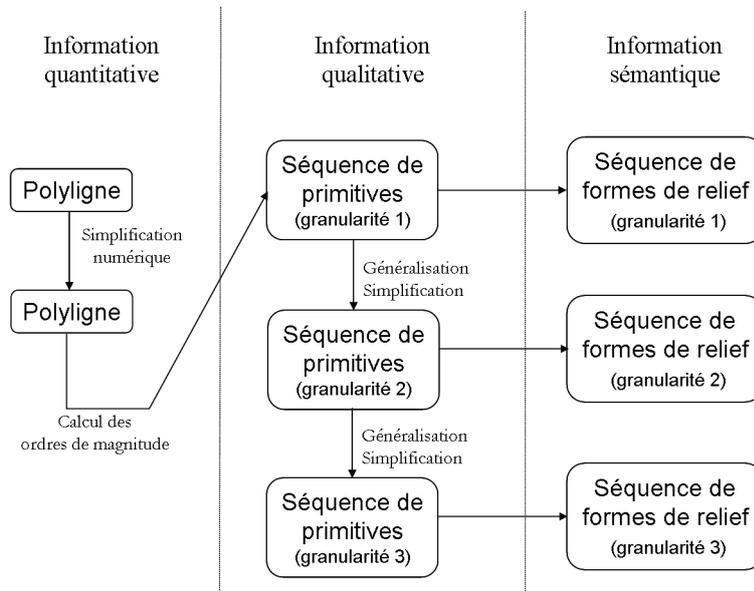


Figure 4.15 — Schéma général de l'analyse qualitative d'une silhouette par le langage de Kulik et Egenhofer.

Considérons, à titre d'exemple, la silhouette de la figure 4.16. Après avoir associé à chaque ligne primitive un ordre de magnitude, c.-à-d. avoir qualifié la longueur des segments, nous décrivons la silhouette à différentes résolutions. Nous restreignons notre vocabulaire aux trois formes de relief montagne (*mt*), vallée (*vl*) et plateau (*pl*).

La silhouette est décrite, au niveau de détail le plus fin (*à gauche*), par la séquence mt^3pl^2 et s'interprète : « une montagne (*mt*), puis un plateau (*pl*) ». Une grande partie de la silhouette est ignorée dans la description parce que, hormis la montagne et le plateau de la description, les autres parties de la silhouette ne correspondent à aucune des trois formes de relief recherchées. Les formes qui apparaissent à cette granularité sont les formes sans détails, c.-à-d. composées des seuls segments *rard* pour la montagne et des seuls segments

varhvd pour le plateau. La vallée centrale est absente de la description car elle est composée de plusieurs segments plus petits, ce qui rend sa capture impossible à ce niveau de détail.

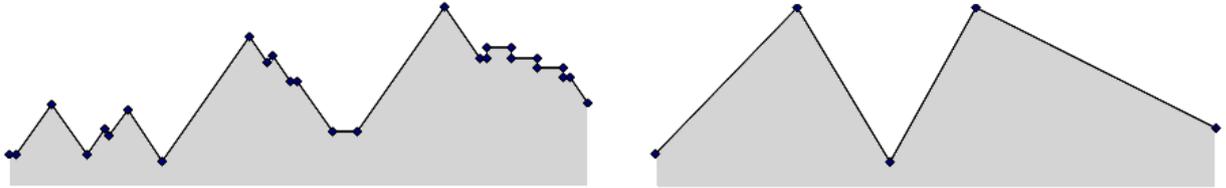


Figure 4.16 — Exemple de silhouette. à gauche : représentation au niveau le plus fin. à droite : représentation au niveau le plus grossier, après application des règles de généralisation et de simplification.

Pour que la vallée apparaisse, il faut appliquer les règles de simplification/généralisation jusqu'à obtenir le niveau de détail le plus grossier (à droite). La silhouette est alors décrite par la séquence $mt_1^3vl_2^3mt_3^3$ et s'interprète : « une vallée entourée de deux montagnes ». Seules les plus grandes formes subsistent et les détails ont disparus.

Cet exemple met en évidence que la gestion des niveaux de détail dans le langage de Kulik et Egenhofer est insatisfaisant au regard de notre postulat 4. Il est en effet nécessaire d'ajuster la résolution (numériquement au début, puis qualitativement ensuite) pour capturer une forme de relief donnée.

4.4 Conclusion

Les différentes approches visant à développer des modèles ou des théories qualitatives de reconnaissance des formes dans une silhouette reposent sur une décomposition des formes en primitives géométriques. Le principe des codons introduit par [Richards et Hoffman, 1985] a été affiné et permet de gérer des représentations à différentes résolutions [Rosin, 1993, Cinque et Lombardi, 1995] mais reste difficilement applicable aux formes de relief dans la mesure où les concavités ne sont pas considérées comme des parties d'une silhouette. D'autres approches ont été proposées, reposant sur la mise en évidence de primitives géométriques et adaptant la description au niveau de détail de la représentation numérique de la silhouette [Magee, 2002, Kulik et Egenhofer, 2003]. L'interprétation de la silhouette – autrement dit, sa description sémantique – repose dans tous les cas sur une méthode de comparaison d'une séquence de primitives représentant tout ou portion de la silhouette avec un modèle prédéfini.

Les approches citées dans ce chapitre respectent le schéma général de la figure 4.17. La détection de saillances conduit à des primitives géométriques (codons, lignes primitives) associées à des symboles (1). Pour détecter une forme dans une silhouette, il faut rechercher une séquence de symboles particulière (2). Par exemple, dans [Kulik et Egenhofer, 2003], une montagne correspond à la séquence $ra^o rd^o$. Afin de rendre accessible les formes, il est

nécessaire de représenter la silhouette à la *bonne résolution*. Pour cela, il est appliqué, soit une méthode numérique (3), soit une méthode qualitative de généralisation/simplification (4). Nous pouvons remarquer que la grammaire qualitative de Magee, dans son approche de type *quadtree*, assimile détection des saillances et recherche de la *bonne résolution*, intégrant ainsi en quelque sorte les étapes (1) et (3).

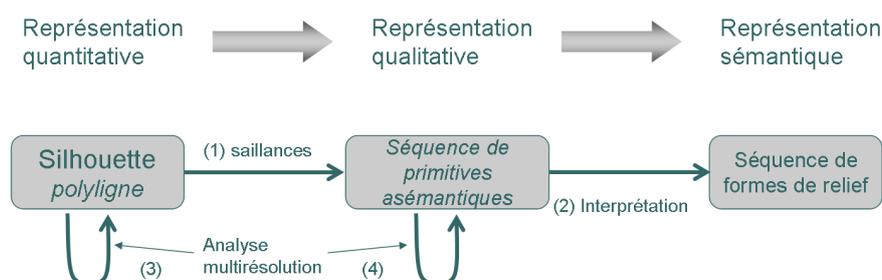


Figure 4.17 — Approche à base de primitives.

4.4.1 Rôle de la topologie et de la nature des frontières *fiat*

Le postulat sous-jacent aux modèles présentés dans ce chapitre est qu'un objet est perçu comme une succession de primitives géométriques délimitées par des saillances perceptives. Cela revient à dire que ce n'est pas l'objet qui est perçu, mais une composition de primitives géométriques. Ce raisonnement est bien adapté à la reconnaissance d'objets manufacturés ou, plus généralement, de tous les objets issus d'un assemblage programmé (ce qui inclut la plupart des formes biologiques). Les différentes parties perçues de l'objet ont un sens (ou une fonction) en elle-même et peuvent être considérées comme des objets indépendants (e.g., la queue du chat, l'anse de la tasse, les roues de la voiture).

Les relations topologiques sont par ailleurs absentes de ces méthodes : les parties d'un objet sont supposées être connectées les unes aux autres, sans recouvrement. Le cas du relief est particulier. Il est en effet un objet en lui-même et est composé d'objets interdépendants qui ne sont pas toujours délimités par des saillances perceptives [Smith et Mark, 2003] et qui peuvent se recouvrir. Par exemple, une montagne peut contenir sur ses flancs, des grottes ou des montagnes plus petites (*cf.* figure 3.5). En plus de la relation topologique « *x est un composant de y* », les relations topologiques permettent de préciser la configuration du terrain en précisant le type de recouvrement (e.g., contact, recouvrement partiel, inclusion). A partir d'une telle information, il est possible d'inférer sur la nature des objets. Par exemple, deux montagnes voisines en contact ont de grandes chances de délimiter une « vallée en *U* » alors que si elles sont disjointes, il s'agira plutôt d'une « vallée à fond plat ».

L'importance de certaines formes n'est pas seulement métrique ou quantitative. Une forme, même petite au regard d'un modèle de description particulier peut être essentielle du point de vue sémantique. Ainsi, l'Ayers Rock en Australie est une forme géologique petite

à l'échelle du continent australien mais dont la signification culturelle et l'attrait touristique rend indispensable sa présence sur la plupart des cartes. Ce qui est important ne saurait être dicté par une perspective asémantique des primitives ; il est donc nécessaire, soit d'envisager une prise en compte de la sémantique dans l'étape (4) de l'approche à base de primitive, soit de remplacer la notion de niveau de détail ou de résolution par celle de niveau d'abstraction. Un niveau d'abstraction prend en compte une taille conceptuelle influencée par la taille métrique de la forme mais aussi par son importance sémantique.

Une autre limitation est relative au fait que les formes de relief ont très souvent des frontières *fiat*. Par exemple, selon le contexte social, juridique, administratif, économique ou applicatif, il est possible de situer les limites d'une montagne à différents endroits [Fisher et Wood, 1998]. Par conséquent, une même forme de relief peut être détectée plusieurs fois puisqu'elle correspond à plusieurs extensions spatiales. La difficulté ici est de déterminer l'ensemble des frontières possibles pour chaque forme de relief afin de réconcilier les différentes extensions spatiales possibles. Cela rend nécessaire une nouvelle définition de la notion de frontière et influence la définition des relations topologiques entre formes de relief (*cf.* 3.1.6).

4.4.2 Influence de la multi-résolution

Les difficultés d'interprétation d'une silhouette de façon cohérente à travers différentes résolutions sont traitées, lorsqu'elles le sont, à travers une approche analytique. Il est donc admis que l'observateur ne voit pas la même chose selon le niveau de détail et il est nécessaire de représenter les formes de relief à la *bonne résolution* en appliquant, soit une méthode de simplification numérique [Rosin, 1993, Cinque et Lombardi, 1995], soit une méthode de généralisation/simplification qualitative [Kulik et Egenhofer, 2003].

La représentation qualitative d'une forme est influencée par le niveau de résolution qui détermine les primitives géométriques saillantes, et, par conséquent, les formes de relief identifiées dans le cas d'une silhouette de terrain. De cette dépendance découle une limitation commune aux méthodes de description qualitative qui s'exprime par la nécessité de trouver la *bonne résolution* pour chaque forme de relief. La méthode de type *quadtree* introduite par [Magee, 2002] s'affranchit de la résolution et détecte des motifs de tailles différentes sans simplifier ou généraliser la silhouette. Cependant, il n'est pas possible de capturer à la fois la montagne et les détails qui la constituent.

4.4.3 De la nécessité d'une nouvelle approche

Il émerge de ces comparaisons que les principes de perception que nous avons identifié dans les chapitres précédents et les postulats que nous en avons déduit ne sont pas tous pris en compte, ou incomplètement, par les méthodes existantes.

Nous pensons que le schéma général (*cf.* figure 4.17) est la cause de l'inadéquation des méthodes d'analyse de silhouette aux principes de la perception. C'est pourquoi nous pro-

posons un autre schéma qui consiste à représenter les formes de relief par des séquences de saillances plutôt que par des séquences de primitives géométriques (cf. figure 4.18).

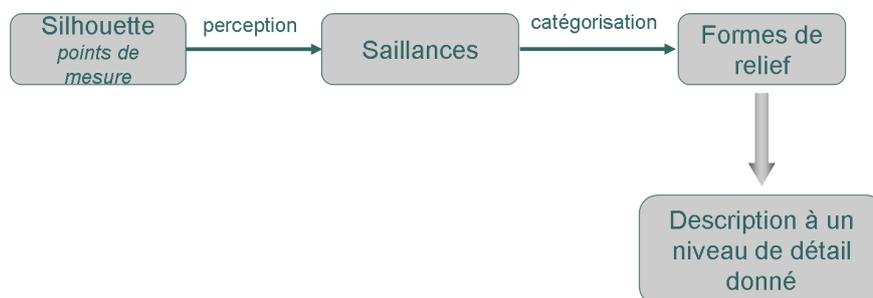


Figure 4.18 — Approche basée sur les formes de relief.

Nous pensons que les primitives géométriques ne sont pas porteuses d'informations pertinentes pour la description sémantique d'une silhouette. En effet, la saillance porte en elle, par définition, les propriétés géométriques qui ont concouru à son émergence. Il est donc inutile de les dupliquer dans des primitives. Dans le processus de perception, le lien entre les saillances et l'objet perçu est immédiat et ne nécessite pas une étape intermédiaire géométrique (cf. chapitre 1). C'est donc en plaçant la saillance au coeur de la relation observant-observé que nous pensons pouvoir rendre compte de la perception des formes de relief. Un objet est détecté à partir du moment où ses saillances sont perceptibles, ce qui ne signifie pas que seules ses saillances soient perceptibles. La montagne de la figure 3.5 est perçue en même temps que la petite élévation qui orne son flanc droit. La perception du détail ne signifie pas que le tout est imperceptible.

La notion de séquence de saillances prend alors une autre dimension. Il ne s'agit pas d'ordonner les saillances dans une grande séquence globale dont nous extrairons les sous-séquences significatives (ce serait revenir à l'approche à base de primitives), mais de repérer un sous-ensemble de la silhouette duquel émerge des saillances dont l'organisation est significative d'une catégorie de forme de relief.

Un modèle qualitatif pour la description sémantique du relief

« Il suffit de garder les yeux ouverts : tout se charge de signification. »

Michelangelo Antonioni

« Le langage, avant de signifier quelque chose, signifie pour quelqu'un. »

Jacques Lacan

Le modèle que nous développons dans ce chapitre introduit une approche qualitative pour la description sémantique des silhouettes et des formes de relief qui les constituent. Il s'inspire du paradigme visuel de perception du relief à l'horizon, la silhouette étant interprétée comme la séparation entre la terre et le ciel. Ce modèle vise avant tout à rendre compte de ce que perçoit un observateur situé au sol, dans la mesure où une telle perspective s'éloigne du paradigme cartographique et appartient au domaine de la géographie naïve. D'un point de vue applicatif, l'objectif est de faciliter les échanges entre un utilisateur et un SIG (*cf.* figure 2.4), d'une part en permettant à l'utilisateur de donner au SIG une description intuitive de son environnement physique et, d'autre part, en fournissant au SIG un moyen de donner à l'utilisateur une description tout aussi intuitive d'un modèle numérique de terrain. Pour cela, le modèle doit être calculable.

La modélisation que nous proposons dans ce chapitre vise à décrire une silhouette, modélisée par une séquence ordonnée de points de mesures, en quatre étapes :

1. définir les catégories ;
2. déterminer dans la silhouette les sous-ensembles de points de mesure (les motifs) qui, isolés, constituent une forme de relief identifiable. Le rôle des saillances est primordial

à ce niveau car ce sont elles qui permettent de distinguer un motif asémantique d'un motif significatif. Il est donc nécessaire de définir les catégories selon l'organisation des saillances (*cf.* postulat 2, p.21);

3. calculer les relations topologiques qui lient les formes de relief;
4. extraire de l'ensemble des formes de relief une description sémantique ne faisant intervenir que des références aux catégories définies et aux relations topologiques qui lient les formes de reliefs.

Dans la section 5.1 nous définissons formellement les points de mesure et la notion de motifs puis, dans la section 5.2, nous introduisons une modélisation des formes de relief fondée sur les saillances. Dans la section 5.3, nous définissons une topologie de sens commun applicable aux motifs puis, en tenant compte de la nature particulière des frontières *fiat*, nous la dérivons pour l'appliquer aux formes de relief. La section 5.4 introduit un modèle pour les catégories puis un algorithme qui, à partir d'une séquence de points de mesure et d'un ensemble de catégories pré-définies, identifie des formes de relief dans une silhouette. Les formes identifiées sont organisées méréologiquement afin de fournir plusieurs descriptions selon le niveau d'abstraction souhaité. La section 5.5 conclut ce chapitre et évoque plusieurs possibilités d'extension du modèle.

5.1 Définitions

Dans cette section, nous introduisons les définitions des notions nécessaires à la modélisation des formes de relief.

5.1.1 Points de mesure

Une silhouette est représentée par une polyligne (*cf.* 4.1). Dans notre analyse, une silhouette est une séquence de points de mesure et les segments qui les relient ne sont rien d'autre que la matérialisation de cette séquence. En définitive, les segments en eux-mêmes ne sont pas nécessaires à l'identification des formes de relief, une relation d'ordre sur les points de mesure suffit.

Les points de mesure sont des points d'un plan (x, z) . Chaque point de mesure $p = (x, z) \in \mathbb{R}^2$ est caractérisé par une abscisse x sur l'axe horizontal et une ordonnée z sur l'axe vertical.

Définition 2 (Modélisation d'une silhouette) *Soit S une silhouette construite d'après une séquence de points de mesures p_1, \dots, p_n . Nous notons $S = (p_t)_{t=1, \dots, n}$.*

Nous faisons le choix de parcourir une silhouette de la gauche vers la droite de façon à ce que la terre (interprétée comme l'intérieur de la silhouette) se situe toujours sur la droite de la silhouette. Le sens de parcours de la silhouette s'apparente à un ordre total sur l'ensemble des points de mesure.

Définition 3 (Relation de précédence entre les points de mesure) Soit une silhouette $S = (p_t)_{t=1,\dots,n}$. Nous introduisons une relation d'ordre $<$ où $p_i < p_j$ signifie que le point de mesure i précède, selon le sens de parcours de la silhouette, le point de mesure p_j :

$$p_i < p_j \equiv_{Def} i < j$$

5.1.2 Motifs

Une forme de relief est une partie de la silhouette. Considérant qu'il n'existe, à notre connaissance, aucune forme de relief composée de deux parties disjointes, de même qu'un point de mesure seul ne saurait être perçu comme une forme de relief, nous supposons qu'une forme de relief est modélisée par un sous-ensemble connexe d'au moins deux points de mesure de la silhouette. Nous nommons motif un tel sous-ensemble.

Définition 4 (Motif) Un motif est un sous-ensemble connexe et ordonné de l'ensemble des points de mesure d'une silhouette $S = (p_t)_{t=1,\dots,n}$. Il est modélisé par une polyligne définie par un ensemble d'au moins deux points de mesures consécutifs de S .

$$M_{i,j} \equiv_{Def} (p_t)_{t=i,\dots,j} \text{ avec } i < j$$

Tout motif $M_{i,j}$ d'une silhouette S présente en outre les deux propriétés triviales suivantes :

1. $M_{i,j} \subseteq S$;
2. Tout point p_k situé entre p_i et p_j selon le sens de parcours de la silhouette est aussi un point de $M_{i,j}$:

$$\forall p_k \in S, p_i < p_k < p_j \rightarrow p_k \in M_{i,j}$$

Pour toute silhouette S , il est possible de construire l'ensemble $\mathcal{M}(S)$ des motifs qu'elle contient. Il suffit pour cela de considérer chaque couple de points de mesure $\{p_i, p_j\}$ avec $i < j$, soit un total de $C_2^n = \frac{n!}{2!(n-2)!}$ motifs.

Définition 5 (Ensemble des motifs d'une silhouette) L'ensemble $\mathcal{M}(S)$ désigne l'ensemble des motifs contenus dans la silhouette $S = (p_t)_{t=1,\dots,n}$.

$$\mathcal{M}(S) = \{M_{i,j} \equiv_{Def} (p_t)_{t=i,\dots,j} \mid 1 \leq i < j \leq n\}$$

Les motifs sont ordonnés par une relation de précédence déduite de la relation de précédence des points (cf. définition 3).

Définition 6 (Relation de précédence entre les motifs) Un motif M précède un motif N ssi le premier point de M précède le premier point de N .

$$\begin{aligned} M_{i,j} < N_{h,k} &\equiv_{Def} p_i < p_h \\ &\equiv_{Def} i < h \end{aligned}$$

5.1.3 Opérateurs ensemblistes sur les motifs

Un motif étant défini par un ensemble ordonné de points, il nous est permis d'user des opérateurs ensemblistes \subset (inclusion), \cup (union) et \cap (intersection). Nous en proposons une interprétation pour le cas de deux motifs appartenant à une même silhouette. Les définitions et les propriétés qui suivent font référence à une silhouette $S = (p_t)_{t=1,\dots,n}$ et à deux motifs $M_{i,j}$ et $N_{h,k}$ de S .

5.1.3.1 Inclusion

Définition 7 (Inclusion) *Le motif $M_{i,j}$ est inclus dans le motif $N_{h,k}$ ssi le premier point de mesure p_h de $N_{h,k}$ est égal ou précède le premier point de mesure p_i de $M_{i,j}$ et que le dernier point de mesure p_j de $M_{i,j}$ est égal ou précède le dernier point de mesure p_k de $N_{h,k}$.*

$$M_{i,j} \subseteq N_{h,k} \Leftrightarrow h \leq i < j \leq k$$

De cette définition, nous déduisons que la relation d'inclusion est une relation d'ordre totale, i.e., réflexive, antisymétrique et transitive.

Propriété 1 (L'inclusion est une relation d'ordre totale) *La relation d'inclusion est réflexive, antisymétrique et transitive.*

$$\begin{aligned} M &\subseteq M \\ M \subseteq N \wedge N \subseteq M &\rightarrow M = N \\ M \subseteq N \wedge N \subseteq L &\rightarrow M \subseteq L \end{aligned}$$

5.1.3.2 Union

L'union de deux motifs est l'ensemble des points de mesure contenus dans l'un ou l'autre des motifs.

$$M_{i,j} \cup N_{h,k} = \{p_i, \dots, p_j\} \cup \{p_h, \dots, p_k\}$$

Cette union peut prendre des formes différentes selon les valeurs de i, j, h et k . Nous avons identifié six cas orthogonaux et complets.

Définition 8 (Union) *L'union de deux motifs est l'ensemble des points des mesure contenu dans l'un ou l'autre des motifs, avec :*

$$\begin{aligned} M_{i,j} \cup N_{h,k} &= \{p_i, \dots, p_j, p_h, \dots, p_k\} && \text{si } j < h - 1 \\ &= \{p_i, \dots, p_k\} && \text{si } h - 1 \leq j, i \leq h, j < k \\ &= \{p_i, \dots, p_j\} && \text{si } i \leq h, k \leq j \\ &= \{p_h, \dots, p_k\} && \text{si } h \leq i, j \leq k \\ &= \{p_h, \dots, p_j\} && \text{si } i - 1 \leq k, h \leq i, k < j \\ &= \{p_h, \dots, p_k, p_i, \dots, p_j\} && \text{si } k < i - 1 \end{aligned}$$

Un ensemble est stable pour une opération binaire si le résultat de l'opération appliquée à deux éléments quelconques appartient à l'ensemble.

Si $j < h-1$ ou $k < i-1$, l'union de $M_{i,j}$ et $N_{h,k}$ n'est pas un ensemble connexe. L'ensemble $\mathcal{M}(S)$ n'est donc pas stable pour l'union telle que nous l'avons définie. Par conséquent, l'union n'est pas associative. En revanche, elle est commutative.

$$M_{i,j} \cup N_{h,k} = N_{h,k} \cup M_{i,j}$$

Le théorème 1 détermine les conditions pour que l'union de deux motifs soit aussi un motif.

Théorème 1 *Soient les deux motifs $M_{i,j}$ et $N_{h,k}$. Leur union est un motif si et seulement si l'une des conditions suivantes est satisfaite.*

- $M_{i,j}$ et $N_{h,k}$ partagent une extrémité ;
- $M_{i,j}$ précède $N_{h,k}$ et $h \leq j + 1$;
- $N_{h,k}$ précède $M_{i,j}$ et $i \leq k + 1$.

Preuve : Considérons deux motifs $M_{i,j}$ et $N_{h,k}$. D'après la définition que nous en avons donné, l'union des motifs $M_{i,j}$ et $N_{h,k}$ est un motif, i.e., un ensemble connexe d'au moins deux points de mesure, si et seulement si $j \geq h-1$ et $k \geq i-1$ (cf. définition 8). Trois cas exhaustifs et orthogonaux sont possibles.

1. Si $i = h$ ou $j = k$, les deux conditions sont satisfaites.
2. Si $M_{i,j}$ précède $N_{h,k}$, on a $i < h < k$ et donc $i \leq k-1$. Il reste la condition $h \leq j+1$ à satisfaire.
3. Si $N_{h,k}$ précède $M_{i,j}$, on a $h < i < j$ et donc $h \leq j-1$. Il reste la condition $i \leq k+1$ à satisfaire.

5.1.3.3 Intersection

L'intersection de deux motifs est l'ensemble des points de mesure qui appartiennent aux deux motifs. Tout comme l'union, l'intersection peut prendre différentes formes en fonction des valeurs de i, j, h et k . Nous avons identifié huit cas orthogonaux et complets.

Définition 9 (Intersection) *L'intersection de deux motifs est l'ensemble des points de mesure qui appartiennent aux deux motifs, avec :*

$$\begin{aligned}
 M_{i,j} \cap N_{h,k} &= \emptyset && \text{si } j < h \\
 &= \{p_j\} && \text{si } j = h \\
 &= \{p_h, \dots, p_j\} && \text{si } i \leq h < j < k \\
 &= \{p_h, \dots, p_k\} && \text{si } i \leq h < k \leq j \\
 &= \{p_i, \dots, p_j\} && \text{si } h \leq i < j \leq k \\
 &= \{p_i, \dots, p_k\} && \text{si } h < i < k \leq j \\
 &= \{p_k\} && \text{si } k = i \\
 &= \emptyset && \text{si } k < i
 \end{aligned}$$

Si $j \leq h$ ou $k \leq i$ l'intersection de $M_{i,j}$ et $N_{h,k}$ comprend moins de deux points de mesure. L'ensemble $\mathcal{M}(S)$ n'est donc pas stable pour l'intersection telle que nous l'avons définie. Par conséquent, l'intersection n'est pas associative. En revanche, elle est commutative.

$$M_{i,j} \cap N_{h,k} = N_{h,k} \cap M_{i,j}$$

Le théorème 2 détermine les conditions pour que l'intersection de deux motifs soit aussi un motif.

Théorème 2 *Soient les deux motifs $M_{i,j}$ et $N_{h,k}$. Leur intersection est un motif si et seulement si l'une des conditions suivantes est satisfaite.*

- $M_{i,j}$ et $N_{h,k}$ partagent une extrémité ;
- $M_{i,j}$ précède $N_{h,k}$ et $h < j$;
- $N_{h,k}$ précède $M_{i,j}$ et $i < k$.

Preuve : Considérons deux motifs $M_{i,j}$ et $N_{h,k}$. D'après la définition que nous en avons donné, l'intersection des motifs M et N est un motif, i.e., un ensemble connexe d'au moins deux points de mesure, si et seulement si $h < j$ et $i < k$. Trois cas exhaustifs et orthogonaux sont possibles.

1. Si $i = h$ ou $j = k$, les deux conditions sont satisfaites.
2. Si $M_{i,j}$ précède $N_{h,k}$, on a $i < h < k$ et donc $i < k$. Il reste la condition $h < j$ à satisfaire.
3. Si $N_{h,k}$ précède $M_{i,j}$, on a $h < i < j$ et donc $h < j$. Il reste la condition $i < k$ à satisfaire.

5.2 Modélisation d'une forme de relief

Une forme de relief est un motif auquel un observateur donne du sens. Pour la modéliser, nous pouvons considérer deux niveaux de représentation.

Le premier niveau correspond à ce qui est sensible à l'observateur puis à l'interprétation qu'il en fait : les saillances et leur organisation dont il déduit la présence d'une forme associée à une catégorie particulière, définie dans une typologie propre à lui-même ou à sa communauté scientifique, culturelle ou linguistique (cf. Postulat 2, page 21). Les saillances et leur organisation sont indépendantes de l'observateur et constituent la part objective de la perception. Une forme de relief ne peut donc être perçue qu'à travers les saillances qui la délimitent ou la caractérisent.

Axiome 1 (Ensemble de saillances) *Toute forme de relief F est décrite par un ensemble non vide de saillances, unique et indépendant de l'observateur, que nous notons $Saillance(F)$.*

Le second niveau, traditionnellement pris en compte en géomatique, est la réalité physique de la présence de la forme de relief. Elle est matérialisée par une région de l'espace et délimite ce qui est la forme de ce qui ne l'est pas. Une forme de relief est donc généralement modélisée par son *extension spatiale*, c.-à-d. l'ensemble des points qu'elle contient.

Axiome 2 (Extension spatiale) *Toute forme de relief F est physiquement définie par son extension spatiale $Extent(F) = \{p_t\}_{t=1,\dots,n}$, c'est-à-dire par l'ensemble des points qu'elle contient.*

Dans cette section, nous introduisons une modélisation des motifs par des séquences de saillances. Nous en déduisons une expression calculable de l'extension spatiale d'une forme de relief tenant compte des frontières *fiat*. Nous montrons que l'extension spatiale d'une forme de relief est un motif, et qu'elle est donc aussi modélisée par une séquence de saillances, ce qui vérifie la cohérence des axiomes 1 et 2 ci-dessus.

5.2.1 Séquence de saillances

Nous avons vu dans le chapitre 4 que les saillances pouvaient être décrites soit par des points caractéristiques [Richards et Hoffman, 1985], soit par des segments caractéristiques [Kulik et Egenhofer, 2003], soit par une combinaison des deux [Galton et Meathrel, 1999]. Cependant, les points caractéristiques sont moins dépendants que les segments du niveau de résolution. Par exemple, le sommet d'une montagne reste le point le plus élevé tandis que la complexité des versants augmente avec le niveau de résolution. Dans la mesure où nous désirons réduire l'influence du niveau de résolution sur la description, les points caractéristiques s'imposent comme seules saillances.

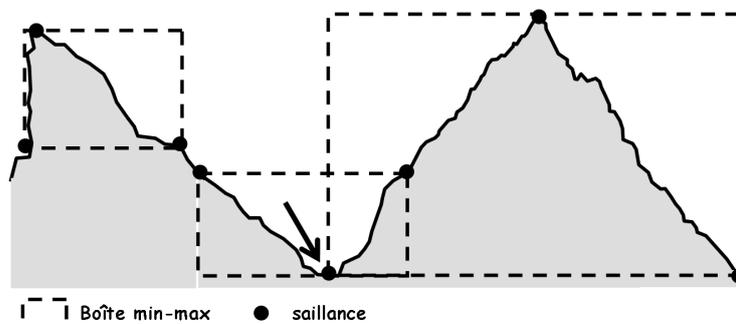


Figure 5.1 — Motifs, boîtes min-max et saillances. La flèche pointe une saillance partagée par deux boîtes min-max.

Il est possible de caractériser, à un haut niveau d'abstraction, une forme à partir de sa *boîte min-max*, définie comme le plus petit rectangle dont les côtés sont parallèles aux axes et qui contienne cette forme [Clementini et Di Felice, 1997]. Afin de caractériser et différencier les motifs, nous retenons une approche dans laquelle les saillances d'un motif donné sont caractérisées par leurs intersections avec la *boîte min-max* du motif (*cf.* figure 5.1).

Chaque motif $M_{i,j}$, i.e., chaque couple de points, (p_i, p_j) avec $i < j$, définit une boîte min-max différente $B_{i,j}$. Il existe une bijection évidente dans une silhouette entre l'ensemble des motifs et l'ensemble des boîtes min-max.

Les intersections sont définies qualitativement par huit nœuds qui matérialisent les quatre bords et les quatre coins de la boîte min-max. Le choix de ces huit nœuds est inspiré de [Freksa, 1992, Zimmerman et Freksa, 1993] d'une part et de [Frank, 1996b, Ligozat, 1998] d'autre part. Les premiers se fondent sur les distinctions usuelles gauche/droite et avant/arrière¹. Les seconds partitionnent l'espace selon les directions cardinales ouest, nord, est, sud et leurs combinaisons deux-à-deux. Dans les deux cas, ils obtiennent huit directions correspondant à nos huit nœuds.

Définition 10 (Boîte min-max) *Soit un motif $M_{i,j} = (p_t)_{t=1,\dots,n}$. La boîte min-max de $M_{i,j}$ est le rectangle défini par les quatre coins $(\min\{x_t\}, \min\{z_t\})$, $(\min\{x_t\}, \max\{z_t\})$, $(\max\{x_t\}, \min\{z_t\})$ et $(\max\{x_t\}, \max\{z_t\})$. L'ensemble des nœuds est noté $\mathcal{V} = \{LT, T, RT, R, RD, D, LD, L\}$ pour respectivement les localisations *Left-Top*, *Top*, *Right-Top*, *Right*, *Right-Down*, *Down*, *Left-Down* et *Left* (cf. figure 5.2).*

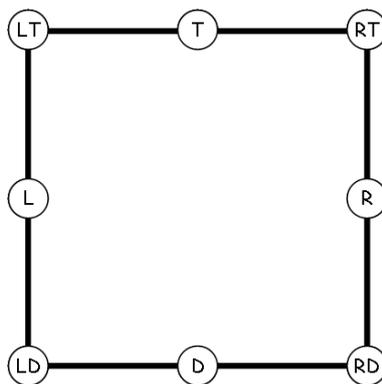


Figure 5.2 — La boîte min-max et ses huit nœuds. Les quatre coins sont LT , RT , RD et LD . Les quatre bords sont T , R , D et L .

Par ailleurs, une saillance s_k a une extension spatiale notée $Loc(s_k)$ pouvant contenir plusieurs points de mesure. En effet, nous admettons que lorsque deux saillances consécutives intersectent la boîte min-max en un même nœud, ils sont confondus en une seule saillance (cf. figure 5.3). L'extension spatiale d'une saillance est une séquence non vide de points de mesure consécutifs.

Nous pouvons maintenant définir formellement une saillance comme l'intersection entre une silhouette et une boîte min-max.

Définition 11 *Une saillance s_k d'un motif $M_{i,j}$ correspond à la fois à une extension spatiale $Loc(s_k)$ et à un nœud $v_k \in \mathcal{V}$ de la boîte min-max $B_{i,j}$.*

$$s_k \equiv_{Def} \langle Loc(s_k), v_k, B_{i,j} \rangle$$

¹Nous avons remplacé avant/arrière dans notre terminologie par haut/bas dans la mesure où nous avons remplacé l'axe horizontal y généralement utilisé pour modéliser un espace 2D par l'axe vertical z .

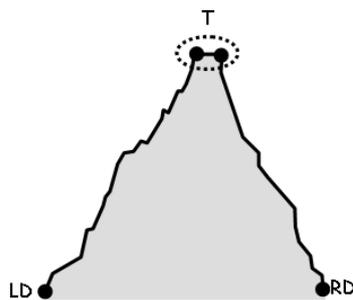


Figure 5.3 — Exemple de saillance dont l'extension spatiale est délimitée par deux points de mesure.

A travers cette définition, nous assumons qu'une saillance est propre à une boîte min-max, c.-à-d. à un motif particulier (puisqu'un motif renvoie à une boîte min-max unique, et vice-versa). En revanche, un point de mesure peut correspondre à plusieurs saillances. Par exemple, sur la figure 5.1, la flèche pointe vers une saillance commune à deux boîtes min-max.

Définition 12 *Un motif M est décrit par une séquence de saillances (s_i, \dots, s_j) correspondant respectivement aux $(j - i + 1)$ intersections de M avec sa boîte min-max ordonnées dans le sens de parcours de la silhouette.*

$$\text{Saillance}(M) = (s_i, \dots, s_j)$$

Chaque saillance étant associée à un nœud de \mathcal{V} , nous dérivons de la séquence de saillances une séquence de nœuds. Cette dernière rend uniquement compte de la morphologie du motif et non plus de sa localisation sur la silhouette. Nous dirons que deux formes de relief, deux motifs ou un motif et une forme de relief sont *morphologiquement équivalents* si et seulement si leurs morphologies sont modélisées par la même séquence de nœuds.

Définition 13 (Morphologie) *Soit un motif M décrit par une séquence de saillances $\text{Saillance}(M) = (s_i, \dots, s_j)$. Sa morphologie est décrite par une séquence de nœuds $S(M) = (v_i, \dots, v_j)$.*

Ainsi, la morphologie de la montagne de la figure 5.4 est décrite par la séquence de nœuds (LD, T, RD) quelle que soit sa position dans la silhouette.

5.2.2 Saillances frontières et saillances intérieures

Selon la définition que nous en proposons (cf. définition 1, p. 60), une saillance remplit deux rôles : délimiter et caractériser les formes. Cela nous amène à distinguer deux types de saillances, les *saillances frontières* et les *saillances intérieures*.

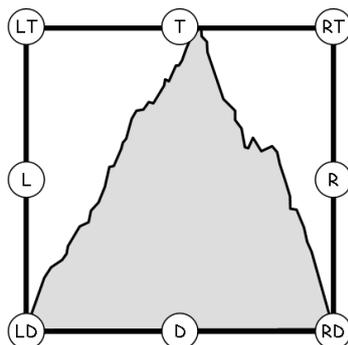


Figure 5.4 — Une montagne modélisée par la séquence (LD, T, RD) .

5.2.2.1 Saillances frontières

Les saillances frontières délimitent l'extension spatiale de la forme de relief. Leur localisation spatiale peut varier selon le choix des frontières *fiat* mais elles correspondent toujours au même type de nœud. Par exemple, la base d'une montagne est représentée par deux saillances frontières correspondant aux nœuds LD et RD , mais le choix des points de mesure associés à ces saillances dépend du choix des frontières *fiat* (cf. figure 5.5). Nous notons $SaillanceFrontiere(M)$ l'ensemble des saillances frontières du motif M . Il s'agit de la première et de la dernière saillance de la séquence de saillances modélisant la forme de relief.

Définition 14 Soit M un motif modélisé par la séquence de saillances $Saillance(M) = (s_i, \dots, s_j)$ avec $i < j$.

$$SaillanceFrontiere(M) = \{s_i, s_j\}$$

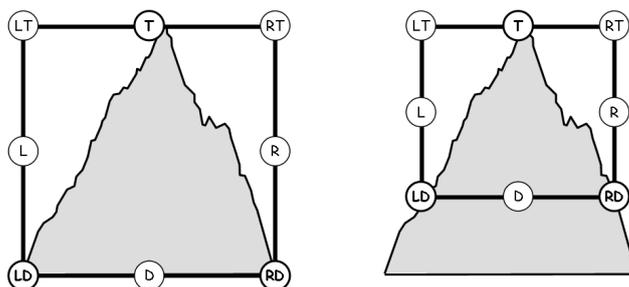


Figure 5.5 — Une montagne modélisée par la séquence (LD, T, RD) . Les deux saillances frontières LD et RD peuvent occuper une position différente en fonction du choix des frontières *fiat*.

Une *saillance frontière* est généralement caractérisée par ses propriétés globales (maximum/minimum d'une propriété qualitative) à l'intérieur d'une forme de relief donnée. Elle émerge de la silhouette après que la forme ait été isolée et dépend par conséquent du choix des frontières *fiat*. Il arrive toutefois qu'une saillance frontière soit aussi caractérisée par une

propriété locale (discontinuité des propriétés qualitatives) de la silhouette et qu'elles délimitent donc objectivement la forme de relief. Dans ce cas, la forme de relief a une frontière *bona fide*.

5.2.2.2 Saillances intérieures

Une *saillance intérieure* est caractérisée à la fois par une propriété locale de la silhouette et par une propriété globale de la forme de relief. Elle émerge dans la silhouette avant que la forme de relief ne soit isolée et concourt à indiquer la présence d'une entité à cet endroit. La localisation des saillances intérieures est invariante, quel que soit le choix des frontières *fiat*. Par exemple, le sommet d'une montagne ou le fond d'une vallée sont autant de saillances intérieures objectivement localisées. Nous notons $SaillanceInterieure(M)$ l'ensemble des saillances intérieures d'un motif M .

Définition 15 Soit M un motif modélisé par la séquence de saillances $Saillance(M) = (s_i, \dots, s_j)$ avec $i < j$.

$$\begin{aligned} SaillanceInterieure(M) &= (s_{i+1}, \dots, s_{j-1}) & \text{si } i < j - 2 \\ SaillanceInterieure(M) &= (s_{i+1}) & \text{si } i = j - 2 \\ SaillanceInterieure(M) &= \emptyset & \text{si } i = j - 1 \end{aligned}$$

Un motif n'a pas nécessairement de saillances intérieures. C'est le cas, par exemple, d'une plaine modélisée par la séquence (L, R) (cf. figure 5.6).

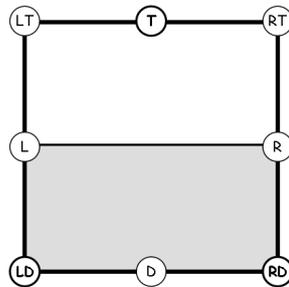


Figure 5.6 — Exemple d'une forme de relief qui ne possède pas de saillance intérieure.

5.2.3 Extension spatiale

La nature des frontières *fiat* (cf. Postulat 5, page 52) implique qu'une forme de relief peut être associée à plusieurs motifs M_1, M_2, \dots sans que l'un d'entre eux ne soit plus pertinent qu'un autre. Concrètement, cela signifie qu'une forme de relief F peut être associée à un ensemble de motifs, noté $\mathcal{M}(F)$, plutôt qu'à un seul motif.

Dans cette section, nous définissons l'ensemble des motifs associés à une même forme de relief, puis nous en déduisons une expression calculable de l'extension spatiale d'une forme de relief.

5.2.3.1 Ensemble des motifs associés à une forme de relief

Soit $\mathcal{M}(F)$ l'ensemble des motifs associés à une forme de relief F . Une conséquence immédiate de l'axiome 1 (page 76) est que tout motif de $\mathcal{M}(F)$ est morphologiquement équivalent à la forme de relief F . Autrement dit tous les motifs de $\mathcal{M}(F)$ sont décrits par une même séquence de nœuds $S(F)$ qui décrit la morphologie de la forme de relief F .

$$\forall M \in \mathcal{M}(F), S(M) = S(F)$$

Nous considérons dans un premier temps une forme de relief ayant au moins une saillance intérieure. Dans ce cas, la nature même des saillances intérieures impose qu'elles soient partagées par tous les motifs associés à la forme de relief.

Définition 16 *L'ensemble des motifs associés à une forme de relief F ayant au moins une saillance intérieure est un ensemble de motifs morphologiquement équivalents à F et partageant les mêmes saillances intérieures.*

$$\mathcal{M}(F) \subseteq \{M \mid S(M) = S(F) \wedge \text{saillanceInterieure}(M) = \text{SaillanceInterieure}(F)\}$$

Étudions maintenant le cas d'une forme de relief n'ayant aucune saillance intérieure. Elle se caractérise par l'absence de tout point remarquable entre ses deux saillances frontières. Sa morphologie est décrite par l'une des huit séquences de nœuds suivantes : (LD) , (LT, RD) , (T, D) , (RT, LD) , (R, L) , (RD, LT) , (D, T) ou (LD, RT) .

Considérons, sans perte de généralité, un motif $M_{i,j}$ dont la morphologie est décrite par la séquence (L, R) . Cela implique que tous les points entre $p_i = (x_i, z_i)$ et $p_j(x_j, z_j)$ sont alignés horizontalement, i.e., $i \leq t \leq j \Rightarrow z_t = z_i = z_j$ ou considérés comme tel. Supposons maintenant un autre motif $N_{h,k}$ morphologiquement équivalent à $M_{i,j}$. Si $N_{h,k}$ intersecte $M_{i,j}$, alors on a $\forall p_t \in M_{i,j} \cup N_{h,k}, z_t = z_i = z_j = z_h = z_k$ dont nous déduisons que $L_{l,m} = M_{i,j} \cup N_{h,k}$ est aussi un motif (L, R) . De même, l'union de $L_{l,m}$ avec un motif morphologiquement équivalent et l'intersectant est aussi un motif (L, R) . Par itération, nous obtenons finalement un motif (L, R) qui contient tous les motifs (L, R) qu'il intersecte. Nous admettons que $L_{l,m}$ et tous les motifs de même morphologie qu'il contient sont associés à une même forme de relief et qu'il n'existe pas d'autres motifs associés à cette forme de relief.

Propriété 2 *Soit une forme de relief F sans saillance intérieure. Il existe un motif M associé à F et contenant tous les motifs qui lui sont morphologiquement équivalents et qu'il intersecte, lesquels constituent, avec M , l'ensemble $\mathcal{M}(F)$ des motifs associés à F .*

$$\begin{aligned} \exists M \in \mathcal{M}(F), (S(N) = S(M) \wedge N \cap M \neq \emptyset) &\rightarrow N \subseteq M \\ \mathcal{M}(F) &= \{N \mid S(N) = S(M) \wedge N \subseteq M\} \end{aligned}$$

5.2.3.2 Expression calculable de l'extension spatiale

Nous déduisons de la définition 16 que deux motifs M et N associés à une même forme de relief et dont l'ensemble des saillances intérieures n'est pas vide ont en commun au moins un point de mesure correspondant à une saillance intérieure. Cela suffit pour que l'union de tous les motifs associés à une même forme de relief ayant au moins une saillance intérieure soit aussi un motif. Dans le cas d'une forme de relief sans saillance intérieure, l'union de tous les motifs associés est par construction aussi un motif.

Définition 17 *Soit une forme de relief F et M_1, M_2, \dots, M_n les motifs correspondant respectivement aux n choix possibles des frontières fiat. L'extension spatiale d'une forme de relief est le motif obtenu par l'union de tous les motifs associés.*

$$Extent(F) = \bigcup_{M_i \in \mathcal{M}(F)} M_i$$

Nous remarquons que l'extension spatiale est un motif nécessairement associé à la forme de relief et, de ce fait, est décrite par la même séquence de nœuds et partage les mêmes saillances intérieures.

Nous disposons ainsi de deux modélisations pour une même forme de relief. La première modélisation, l'extension spatiale, est un ensemble de points renseignant sur l'espace occupé par la forme de relief. La seconde modélisation est une séquence de saillances. Elle rend compte de la morphologie de la forme de relief.

5.3 Topologie

L'extension spatiale d'une forme de relief étant un motif, il convient de s'interroger sur les propriétés topologiques des motifs en tant que régions de l'espace avant de déterminer les relations topologiques qui les lient.

Dans cette section, nous décrivons une topologie de sens commun pour les motifs, puis, après avoir évalué l'influence des frontières fiat sur la définition de la notion de frontières, nous proposons une topologie de sens commun pour les formes de relief.

5.3.1 Caractéristiques topologiques des motifs

Dans notre approche basée sur des ensembles de points, nous donnons une interprétation précise des notions d'ouvert, de fermé, de voisinage, d'intérieur, d'adhérence et de frontière des motifs.

5.3.1.1 Ouverts et fermés

Un motif $M_{i,j} = (p_t)_{t=1,\dots,n}$ est représenté par un ensemble de points de mesure. Un motif étant connexe dans l'espace des points de mesure, nous pouvons aussi le représenter par l'intervalle $[p_i; p_j]$.

Un ouvert est un intervalle ouvert $]p_i; p_j[$ avec $i < j - 2$ et un fermé est un intervalle fermé $[p_i; p_j]$ avec $i < j$. L'ouvert $]p_i; p_j[$ contient tous les points p_t tels que $i < t < j$. Le fermé $[p_i; p_j]$ contient tous les points p_t tels que $i \leq t \leq j$.

Définition 18 *Nous notons $\mathcal{O}(S)$ l'ensemble des ouverts de la silhouette S et $\mathcal{F}(S)$ l'ensemble des fermés de la silhouette.*

En nous plaçant dans un espace discret, il est difficile de donner une interprétation concrète de la différence entre ouvert et fermé. En effet, d'un point de vue ensembliste, le fermé $[p_i; p_j]$ avec $i < j - 2$ est équivalent à l'ouvert $]p_{i-1}; p_{j+1}[$ avec $i - 1 < (j + 1) - 2$. Aux extrémités de la silhouette, les fermés $[p_1; p_j]$ et $[p_i; p_n]$ ne sont équivalents à aucun ouverts. Inversement, l'ouvert $]p_i; p_j[$ avec $i < j - 2$ est équivalent au fermé $[p_{i+1}; p_{j-1}]$ avec $i + 1 < j - 1$. Aux extrémités de la silhouette, les ouverts $]p_1; p_j[$ avec $j > 3$ et $]p_i; p_n[$ avec $i < n - 2$ sont respectivement équivalent aux fermés $[p_2; p_{j-1}]$ avec $j - 1 > 2$ et $[p_{i+1}; p_{n-1}]$ avec $i + 1 < (n - 2) + 1 = n - 1$.

Propriété 3 *Tout ouvert correspond à un fermé mais tout fermé ne correspond pas à un ouvert.*

$$\mathcal{O}(S) \subset \mathcal{F}(S)$$

Cette propriété nous permet par la suite de remplacer un ouvert par son équivalent fermé. Notamment, lorsque nous évoquons une partie quelconque d'une silhouette, sans préciser si elle est ouverte ou fermée, nous désignons toujours un fermé.

L'ensemble des ouverts n'étant pas stable pour l'union, la structure $\langle S, \mathcal{O}(S) \rangle$ n'est pas un espace topologique au sens mathématique du terme (cf. 3.1.1). Toutefois, la topologie que nous décrivons est bien une topologie de sens commun et n'impose pas la même rigueur qu'une topologie mathématique. Néanmoins, afin d'assurer une certaine cohérence dans notre modèle, nous tâchons de rester le plus proche possible des notions données dans le chapitre 3 et nous n'invoquons des preuves intuitives ou « selon le sens commun » que lorsque cela est vraiment nécessaire.

5.3.1.2 Voisinage

Selon la topologie classique, le voisinage d'un point p_t est une partie de l'univers contenant un ouvert contenant p_t . Transposé dans l'espace de la silhouette S , un voisinage d'un point p_t est un intervalle contenant strictement un intervalle ouvert contenant p_t .

Nous relevons qu'un ouvert $]p_h; p_k[$ contient le point de mesure p_t si et seulement si $h < t < k$. Or, un fermé $[p_i; p_j]$ contient strictement l'ouvert $]p_h; p_k[$ ssi $i \leq h$ et $j \geq k$. Donc, $[p_i; p_j]$ est un voisinage de p_t ssi $\exists]p_h; p_k[\in \mathcal{O}(S)$ tel que $i \leq h < t < k \leq j$. Par conséquent, tout voisinage d'un point p_t contient p_t et le plus petit voisinage de p_t est $[p_{t-1}; p_{t+1}]$ si $1 < t < n$. Les points p_1 (respectivement p_n) n'a *a priori* pas de voisinage puisqu'il n'existe aucun ouvert $]p_h; p_k[$ tel que $h < 1$ (resp. $n < k$). Intuitivement, nous admettons que le premier point de la silhouette à un voisinage uniquement sur sa droite, et le dernier point de la silhouette un voisinage uniquement sur sa gauche. Dans le cas où p_t est un point à l'extrémité de la silhouette, c.-à-d. lorsque $p_t = p_1$ (respectivement $p_t = p_n$), p_t admet le voisinage $\{p_1\}$ (resp. $\{p_n\}$).

Définition 19 (Voisinage d'un point de mesure) *Un fermé $[p_i; p_j]$ (avec $i < j$) est un voisinage du point p_t avec $1 < t < n$ si et seulement si $i < t < j$. Nous notons $\mathcal{V}(p_t)$ l'ensemble des voisinages de p_t .*

$$\mathcal{V}(p_t) = \{[p_i; p_j] \mid i < t < j\}$$

5.3.1.3 Intérieur, adhérence, frontière et extérieur d'un motif

D'après la définition de l'intérieur en topologie mathématique (cf. 3.1.1), l'intérieur M° d'un motif $M_{i,j} = (p_t)_{t=i,\dots,j}$ est l'ensemble des points de $M_{i,j}$ dont $[p_i; p_j]$ est un voisinage.

Selon la définition 19, il vient que $[p_i; p_j]$ est un voisinage de tout point p_t tel que $i < t < j$, c.-à-d. de tout point de l'ensemble ouvert $]p_i; p_j[$. Remarquons que si $i = j - 1$, le motif ne contient que deux points et son intérieur $]p_i; p_j[$ est vide.

Définition 20 *Nous notons M° l'intérieur du motif $M_{i,j} = (p_t)_{t=i,\dots,j}$.*

$$\begin{aligned} M^\circ &=]p_i; p_j[&& \text{si } i < j - 2 \\ &= \emptyset && \text{sinon} \end{aligned}$$

D'après la définition de l'adhérence en topologie mathématique (cf. 3.1.1), l'adhérence d'un motif $M_{i,j}$ est l'ensemble des points p_t de la silhouette dont tout voisinage rencontre $[p_i; p_j]$.

$$\overline{M_{i,j}} = \{p_t \mid \forall [p_h; p_k] \in \mathcal{V}(p_t), [p_i; p_j] \cap [p_h; p_k] \neq \emptyset\}$$

Soit un point p_t du motif $M_{i,j}$. Tout voisinage de p_t contenant p_t , il vient que tout voisinage de p_t intersecte $[p_i; p_j]$.

Soit un point p_t en dehors du motif $M_{i,j}$. Pour montrer que p_t n'appartient pas à l'adhérence de $M_{i,j}$, nous distinguons quatre cas et, dans chacun d'eux, nous vérifions qu'il existe un voisinage de p_t qui n'intersecte pas $[p_i; p_j]$.

- Si $1 < t < i$, l'intervalle $[p_{t-1}; p_t]$ est un voisinage de p_t qui n'intersecte pas $[p_i; p_j]$;

- Si $t = 1 < i$, p_1 admet comme voisinage $\{p_1\}$ qui est en dehors de $[p_i; p_j]$;
- Si $j < t < n$, l'intervalle $[p_t; p_{t+1}]$ est un voisinage de p_t qui n'intersecte pas $[p_i; p_j]$;
- Si $j < t = n$, p_n admet comme voisinage $\{p_n\}$ qui est en dehors de $[p_i; p_j]$;

Définition 21 Nous notons $\overline{M_{i,j}}$ l'adhérence du motif $M_{i,j}$.

$$\overline{M_{i,j}} = [p_i; p_j]$$

La frontière est la différence entre l'intérieur et l'adhérence d'un motif. Nous constatons alors qu'un motif admet deux frontières : $\{p_i\}$ et $\{p_j\}$.

Définition 22 Nous notons $\partial M_{i,j}$ l'union des frontières du motif $M_{i,j}$.

$$\partial M_{i,j} = \{p_i, p_j\}$$

Nous distinguons la frontière gauche, $\partial^L M_{i,j}$, de la frontière droite, $\partial^R M_{i,j}$ (cf. figure 5.7).

$$\begin{aligned} \partial^L M_{i,j} &= \{p_i\} \\ \partial^R M_{i,j} &= \{p_j\} \end{aligned}$$

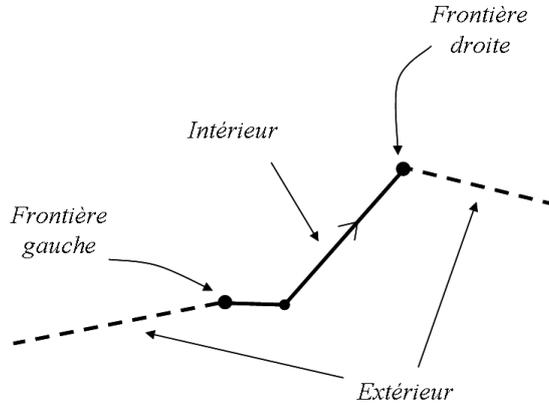


Figure 5.7 — Caractéristiques topologiques d'un motif. La flèche indique le sens de parcours.

L'extérieur d'un motif est l'ensemble des points qui ne sont inclus ni dans l'une de ses frontières, ni dans son intérieur. Afin que même le motif constitué de tous les points de la silhouette ait aussi un extérieur, nous introduisons deux points de mesures supplémentaires, non localisés, p_0 et p_∞ tels que $p_0 < p_1$ et $p_n < p_\infty$.

Définition 23 Nous notons $M_{i,j}^-$ l'extérieur du motif $M_{i,j}$.

$$M_{i,j}^- = [p_0; p_i \cup p_j; p_\infty]$$

5.3.2 Influence des frontières *fiat* sur l'interprétation des relations méréologiques et topologiques

Nous avons vu que l'extension d'une forme de relief était un motif. Cependant, une forme de relief n'est pas assimilable à un motif unique. Un motif associé à une forme de relief correspond à un choix arbitraire des frontières *fiat*, ce qui s'exprime dans le paradoxe du chalet (cf. 3.1.6) : le chalet peut être à la fois sur la montagne et dans la vallée même si la montagne et la vallée ne se recouvrent pas.

Pour expliquer ce paradoxe, appréhendons séparément la méréologie et la topologie.

5.3.2.1 Influence sur la méréologie

Un objet X est contenu dans un objet Y si l'extension spatiale de X est incluse dans l'extension spatiale de Y . Donc, le chalet est sur la montagne (respectivement dans la vallée) si l'espace qu'il occupe est inclus dans l'extension spatiale, i.e., l'union des motifs, de la montagne (resp. de la vallée). Selon cette interprétation, la relation d'inclusion est indépendante du choix des frontières *fiat*, elle n'est donc pas la cause du paradoxe.

5.3.2.2 Influence sur la topologie

L'interprétation des relations topologiques, que ce soit dans une approche de type n -intersection ou RCC, repose sur les frontières et les intérieurs. Contrairement aux méthodes n -intersection, RCC ne donne pas de dimension aux frontières qui n'apparaissent pas explicitement dans le formalisme. La frontière, en tant que différence entre l'intérieur et l'adhérence, intervient cependant implicitement pour différencier les relations de contact EC et de connexion C (cf. tableau 3.3, p.46).

Les relations topologiques dépendent du choix des frontières *fiat*. Sur la figure 5.8, les extensions spatiales de la montagne et la vallée, définies comme l'union des motifs associés à chacune des formes de relief, partagent plusieurs points. La vallée et la montagne devraient donc se recouvrir à partir du moment où elles contiennent toutes les deux le chalet. Cependant, il reste possible de choisir des frontières *fiat* telles que :

- soit la vallée et la montagne se recouvrent (cf. figure 5.8a) ;
- soit la vallée et la montagne se touchent mais ne se recouvrent pas (cf. figure 5.8b) ;
- soit la vallée et la montagne sont disjointes (cf. figure 5.8c) ;

Il y a ici une ambiguïté que nous proposons de lever en donnant une définition ensembliste de l'intérieur et des frontières d'une forme de relief. Nous savons que tous les motifs associés à une forme de relief donnée partagent les mêmes saillances intérieures. Il existe donc un ensemble connexe, éventuellement vide, de points de mesure inclus dans la forme de relief quelque soit le choix des frontières *fiat*. Concernant les autres points, nous constatons que, une fois que la frontière *fiat* est choisie, elle génère une saillance frontière délimitant la forme

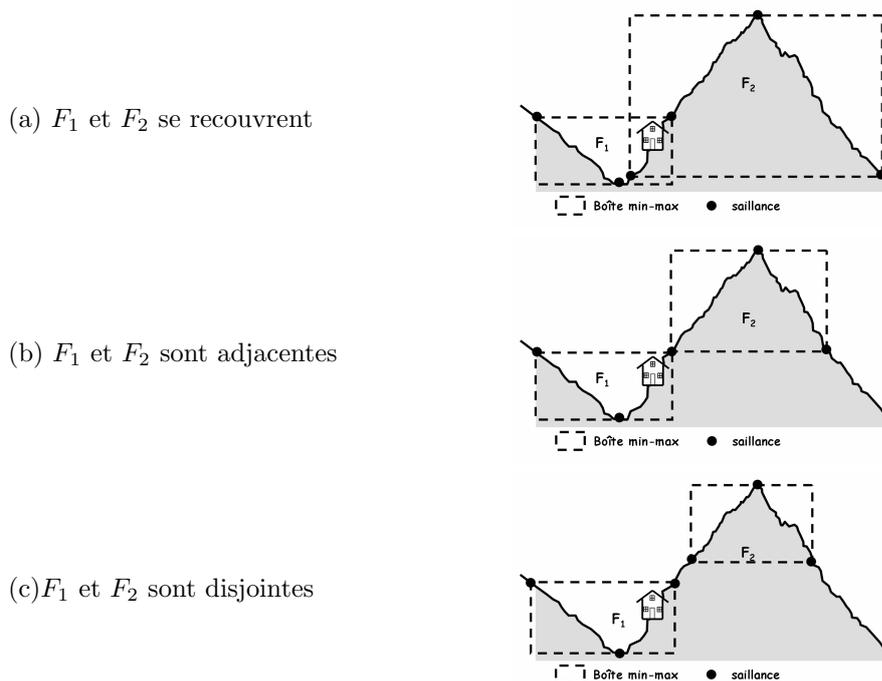


Figure 5.8 — Trois configurations possibles en fonction du choix des frontières *fiat*.

de relief. Dans le cas de la montagne et de la vallée, cette même saillance s'imposera alors comme une délimitation de la vallée.

L'idée que nous retenons dans notre modèle est de retenir les saillances comme éléments délimitant l'intérieur de l'extérieur d'une forme de relief. Nous distinguons deux types de points de mesure, de la même manière que nous avons distingué deux types de saillances. Les *points intérieurs* sont les points de mesure compris entre deux saillances intérieures. Les autres points peuvent, selon le choix de la frontière *fiat*, être ou non compris dans la forme de relief. Ce sont les *points frontières*.

5.3.3 Intérieur, frontière, adhérence et extérieur d'une forme de relief

Soient une silhouette $S = (p_t)_{t=1, \dots, n}$ et une forme de relief F avec $Extent(F) = [p_i; p_j]$ et $i < j$. On note $f_1 = p_i$ le premier² et $f_4 = p_n$ le dernier point de mesure de F , avec $f_1 < f_4$. Si F a au moins une saillance intérieure, on note f_2 le premier point de la première saillance intérieure et f_3 le dernier point de la dernière saillance intérieure, avec $f_1 < f_2 \leq f_3 < f_4$. La forme de relief F est alors représentée par un n-uplet rendant compte à la fois de l'extension spatiale, des frontières et de l'intérieur.

$$\begin{aligned}
 F &\equiv_{Def} \langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle && \text{si } SaillanceInterieure(F) \neq \emptyset \\
 &\equiv_{Def} \langle f_1, f_4 \rangle && \text{sinon}
 \end{aligned}$$

²Le terme *premier* renvoie au sens de parcours de la silhouette et à la relation de précédence entre les points (cf. définition 3, p.73).

L'intérieur d'une forme de relief est l'ensemble des *points intérieurs*, i.e., l'ensemble des points compris entre la première saillance intérieure et la dernière saillance intérieure. Si la forme de relief n'a pas de saillance intérieure, elle n'a pas non plus d'intérieur.

Définition 24 Soit une forme de relief F . On note F° l'intérieur de F .

$$\begin{aligned} F^\circ &= [f_2; f_3] & \text{si } F = \langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle \\ F^\circ &= \emptyset & \text{si } F = \langle f_1, f_4 \rangle \end{aligned}$$

La frontière d'une forme de relief est l'ensemble de ses *points frontières*. Contrairement à l'intérieur, la frontière n'est jamais vide. Si la forme de relief n'a pas de saillance intérieure, alors sa frontière correspond à son extension spatiale. Si la forme de relief a des saillances intérieures, nous distinguons la frontière droite de la frontière gauche.

Définition 25 Soit une forme de relief F .

- Si F a des saillances intérieures ($F = \langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle$), on note $\partial^L F$ la frontière gauche de F , $\partial^R(F)$ sa frontière droite et $\partial F = \partial^L F \cup \partial^R F$ sa frontière.

$$\begin{aligned} \partial^L F &= [f_1; f_2[\\ \partial^R F &=]f_3; f_4] \\ \partial F &= \partial^L F \cup \partial^R F \end{aligned}$$

- Si F n'a pas de saillance intérieure ($F = \langle f_1, f_4 \rangle$), elle a une seule frontière ∂F .

$$\partial F = [f_1; f_4]$$

L'adhérence d'une forme de relief est l'union de son intérieur et de ses frontières.

Définition 26 Soit une forme de relief F . On note \bar{F} l'adhérence de F .

$$\bar{F} = [f_1; f_4]$$

Nous constatons bien que l'extension spatiale d'une forme de relief est égale à son adhérence.

$$F = \text{Extent}(F) = \bar{F}$$

L'extérieur d'une forme de relief est le complémentaire de son adhérence.

Définition 27 Nous notons F^- l'extérieur d'une forme de relief.

$$F^- = [p_0; f_1[\cup]f_4; p_\infty]$$

5.3.4 Calcul des relations topologiques

Nous nous inspirons de la méthode 9-intersections (cf. 3.1.3.2) pour calculer les relations topologiques en fonction des intersections entre intérieur, frontière et extérieur des formes de relief. Nous ne pouvons pas l'appliquer directement puisque, comme nous venons de le voir, un motif peut avoir une frontière non connexe (cf. définition 22) alors que la méthode 9IM considère une frontière unique et connexe. Pour la même raison, l'extension de la méthode 9IM aux espaces discrets [Egenhofer et Sharma, 1993] n'est pas non plus adaptée. Néanmoins, nous développons notre méthode selon une approche analogue en construisant une matrice des intersections.

5.3.4.1 Matrice 9-intersections

Pour chaque forme de relief F nous distinguons trois régions : la frontière $\partial F = \partial^L F \cup \partial^R F$, l'intérieur F° et l'extérieur F^- . La configuration topologique entre deux formes de relief F et G est modélisée par une matrice 3×3 notée $IM(F, G)$ (cf. figure 5.9).

$$IM(F, G) = \begin{pmatrix} \partial F \cap \partial G & \partial F \cap G^\circ & \partial F \cap G^- \\ F^\circ \cap \partial G & F^\circ \cap G^\circ & F^\circ \cap G^- \\ F^- \cap \partial G & F^- \cap G^\circ & F^- \cap G^- \end{pmatrix}$$

Figure 5.9 — La matrice des intersections.

Chaque intersection peut prendre soit la valeur \emptyset , soit la valeur $-\emptyset$. Il y a donc $2^9 = 512$ matrices possibles. Toutefois, toutes ne correspondent pas à des configurations valides. Par exemple, la matrice

$$\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{pmatrix}$$

modélise une configuration invalide. En effet, l'union des trois régions associées à une forme de relief contient tous les points de la silhouette. Donc, l'intérieur de F intersecte soit la frontière, soit l'intérieur, soit l'extérieur de G .

Un *patron* est une matrice 9-intersections qui contient des *jokers*, noté « - », signifiant qu'une intersection peut prendre indifféremment la valeur vide (\emptyset) ou non vide ($-\emptyset$). Par exemple, la relation représentée par le patron

$$\begin{pmatrix} -\emptyset & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix}$$

signifie que $\partial F \cap \partial G \neq \emptyset$, i.e., que les frontières de F et G s'intersectent, mais que les autres intersections peuvent être indifféremment vides ou non vides. Certaines conditions peuvent

êtres obtenues par une conjonction de patrons. Ainsi, la conjonction de patrons

$$IM(F, G) = \begin{pmatrix} - & \neg\emptyset & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & - \\ - & \neg\emptyset & - \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & - \\ - & - & - \\ - & \neg\emptyset & - \end{pmatrix}$$

impose que l'intérieur de G intersecte soit la frontière, soit l'intérieur, soit l'extérieur de F .

Notre méthodologie se développe en trois étapes :

1. identifier les contraintes qui déterminent les configurations impossibles et les modéliser par des patrons ;
2. en déduire l'ensemble des configurations possibles ;
3. associer chaque configuration possible à une relation topologique, i.e., donner un sens aux matrices 9-intersections.

5.3.4.2 Contraintes

Dans cette section, nous exprimons des contraintes sous la forme de conjonctions de patrons 9-intersections. Si une matrice 9-intersections correspond à l'une de ses conjonctions, nous en déduisons qu'elle modélise une configuration impossible. Les contraintes sont inspirées de [Egenhofer et Sharma, 1993] et ont été adaptées aux formes de relief. Il a notamment fallu tenir compte du fait que les frontières ont une dimension et correspondent à des intervalles : une frontière peut contenir une forme de relief.

Contrainte 1 : un point de mesure est contenu par l'une des régions associées à une forme de relief donnée, soit la frontière, soit l'intérieur, soit l'extérieur. Par conséquent, toute partie d'une forme de relief F intersecte soit la frontière, soit l'intérieur, soit l'extérieur de toute forme de relief G et vice versa.

- La frontière de F intersecte au moins une région associée à G , et vice-versa.

$$C1a = \begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ - & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} \emptyset & - & - \\ \emptyset & - & - \\ \emptyset & - & - \end{pmatrix}$$

- L'intérieur de F intersecte au moins une région associée à G , et vice-versa.

$$C1b = \begin{pmatrix} - & - & - \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & \emptyset & - \\ - & \emptyset & - \\ - & \emptyset & - \end{pmatrix}$$

- L'extérieur de F intersecte au moins une région associée à G , et vice-versa.

$$C1c = \begin{pmatrix} - & - & - \\ - & - & - \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & \emptyset \\ - & - & \emptyset \\ - & - & \emptyset \end{pmatrix}$$

Contrainte 2 : la connaissance d'une ou de deux régions d'une forme de relief contraint les autres régions associées à la forme de relief.

- si la frontière d'une forme de relief F coïncide avec la frontière d'une forme de relief G , alors il en va de même pour les intérieurs et les extérieurs. Cela signifie que l'intérieur de F n'intersecte que l'intérieur de G , que l'extérieur de F n'intersecte que l'extérieur de G et vice-versa.

$$C2a = \begin{pmatrix} -\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & - & -\emptyset \\ \emptyset & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} -\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & - & - \\ \emptyset & -\emptyset & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} -\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & - \\ \emptyset & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} -\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & - & - \\ \emptyset & - & \emptyset \end{pmatrix}$$

- si l'intérieur de F coïncide avec l'intérieur de G , alors les frontières de F intersectent les frontières de G et vice-versa.

$$C2b = \begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & -\emptyset & \emptyset \\ - & \emptyset & - \end{pmatrix}$$

- deux formes de relief dont les extérieurs coïncident partagent la même extension spatiale. Donc, elles sont identiques et partagent aussi leur intérieur et leurs frontières.

$$C2c = \begin{pmatrix} - & -\emptyset & \emptyset \\ - & - & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & -\emptyset \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & \emptyset \\ -\emptyset & - & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & -\emptyset \end{pmatrix}$$

Contrainte 3 : une frontière sépare un intérieur d'un extérieur de telle façon que tout ensemble connexe contenant un point de cet intérieur et un point de cet extérieur coupe nécessairement cette frontière.

- si la frontière de F intersecte à la fois l'intérieur et l'extérieur de G , alors la frontière de F intersecte aussi la frontière de G , et vice-versa.

$$C3a = \begin{pmatrix} \emptyset & -\emptyset & -\emptyset \\ - & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} \emptyset & - & - \\ -\emptyset & - & - \\ -\emptyset & - & - \end{pmatrix}$$

- si l'intérieur de F intersecte à la fois l'intérieur et l'extérieur de G , alors l'intérieur de F intersecte aussi la frontière de G , et vice-versa.

$$C3b = \begin{pmatrix} - & - & - \\ \emptyset & -\emptyset & -\emptyset \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & \emptyset & - \\ - & -\emptyset & - \\ - & -\emptyset & - \end{pmatrix}$$

- si l'extérieur de F intersecte à la fois l'intérieur et l'extérieur de G , alors l'extérieur de F intersecte aussi la frontière de F , et vice-versa.

$$C3b = \begin{pmatrix} - & - & - \\ - & - & - \\ \emptyset & -\emptyset & -\emptyset \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & \emptyset \\ - & - & -\emptyset \\ - & - & -\emptyset \end{pmatrix}$$

- si les frontières de F sont incluses dans l'extérieur de G , alors l'intérieur de F est aussi inclus dans l'intérieur de G , et vice-versa.

$$C3b = \begin{pmatrix} \emptyset & -\emptyset & \emptyset \\ -\emptyset & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} \emptyset & -\emptyset & \emptyset \\ - & \emptyset & - \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} \emptyset & -\emptyset & \emptyset \\ - & - & -\emptyset \\ - & - & - \end{pmatrix} \\ \vee \begin{pmatrix} \emptyset & -\emptyset & - \\ -\emptyset & - & - \\ \emptyset & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} \emptyset & - & - \\ -\emptyset & \emptyset & - \\ \emptyset & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} \emptyset & - & - \\ -\emptyset & - & - \\ \emptyset & -\emptyset & - \end{pmatrix}$$

Contrainte 4 : Les extérieurs de deux formes de relief s'intersectent toujours.

$$C4 = \begin{pmatrix} - & - & - \\ - & - & - \\ - & - & -\emptyset \end{pmatrix}$$

5.3.4.3 Configurations valides

L'ensemble des patrons 9-intersections nous sert à déterminer les matrices 9-intersections qui correspondent à des relations topologiques entre deux formes de relief. L'ensemble des patrons n'est pas minimal, mais ce n'est pas gênant dans la mesure où le fait qu'une matrice 9-intersections soit rejetée par plusieurs conditions ne change pas l'ensemble des matrices valides.

Nous avons réalisé un programme en Java qui vérifie pour chacune des 512 matrices 9-intersections possibles si elle correspond à au moins l'un des patrons d'une des conditions. Dans ce cas la matrice est rejetée. Nous obtenons ainsi 42 matrices 9-intersections valides notées r_1 à r_{42} (cf. tableau 5.1) qui correspondent à autant de configurations topologiques distinctes.

Dans l'approche n-intersection, les configurations valides obtenues sont validées à travers une interprétation géométrique. Étant donné le nombre important de configurations que nous obtenons, nous choisissons une méthode différente d'interprétation. Nous partons de l'ensemble des huit relations topologiques *disjoint*, *meet*, *overlap*, *inside*, *coverdBy*, *covers*, *contains* et *equal* communes aux taxonomies $T1$ et $T2$ (cf. p.40). A partir de l'interprétation ensembliste de [Renz, 2002] (cf. tableau 3.3, p.46), chaque relation est associée à une conjonction de patrons 9-intersections. Il nous reste alors à vérifier, tout d'abord que cet ensemble de relations est bien exhaustif et qu'elles sont disjointes deux-à-deux, puis que chaque matrice 9-intersections valide satisfait exactement une relation topologique.

$r_1 =$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -0 \\ 0 & 0 & -0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_2 =$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -0 \\ -0 & -0 & 0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_3 =$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -0 \\ -0 & -0 & -0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$
$r_4 =$	$\begin{pmatrix} 0 & -0 & 0 \\ 0 & -0 & 0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_5 =$	$\begin{pmatrix} 0 & -0 & 0 \\ 0 & -0 & 0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_6 =$	$\begin{pmatrix} -0 & 0 & 0 \\ 0 & -0 & 0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$
$r_7 =$	$\begin{pmatrix} -0 & 0 & 0 \\ 0 & -0 & 0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_8 =$	$\begin{pmatrix} -0 & 0 & 0 \\ -0 & 0 & 0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_9 =$	$\begin{pmatrix} -0 & 0 & 0 \\ -0 & -0 & 0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$
$r_{10} =$	$\begin{pmatrix} -0 & 0 & -0 \\ 0 & 0 & -0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{11} =$	$\begin{pmatrix} -0 & 0 & -0 \\ 0 & -0 & 0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{12} =$	$\begin{pmatrix} -0 & 0 & -0 \\ 0 & -0 & 0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$
$r_{13} =$	$\begin{pmatrix} -0 & 0 & -0 \\ -0 & 0 & 0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{14} =$	$\begin{pmatrix} -0 & 0 & -0 \\ -0 & 0 & -0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{15} =$	$\begin{pmatrix} -0 & 0 & -0 \\ -0 & -0 & 0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$
$r_{16} =$	$\begin{pmatrix} -0 & 0 & -0 \\ -0 & -0 & 0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{17} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ 0 & 0 & -0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{18} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ -0 & -0 & -0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$
$r_{19} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & 0 \\ 0 & -0 & 0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{20} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & 0 \\ 0 & -0 & 0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{21} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & 0 \\ -0 & 0 & 0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$
$r_{22} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & 0 \\ -0 & 0 & 0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{23} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & 0 \\ -0 & -0 & 0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{24} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & 0 \\ -0 & -0 & 0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$
$r_{25} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ 0 & 0 & -0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{26} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ 0 & 0 & -0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{27} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ 0 & 0 & -0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$
$r_{28} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ 0 & -0 & 0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{29} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ 0 & -0 & 0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{30} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ 0 & -0 & 0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$
$r_{31} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ -0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{32} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ -0 & 0 & 0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{33} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ -0 & 0 & 0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$
$r_{34} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ -0 & 0 & -0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{35} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ -0 & 0 & -0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{36} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ -0 & 0 & -0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$
$r_{37} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ -0 & -0 & 0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{38} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & 0 \\ -0 & -0 & 0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{39} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & 0 \\ -0 & -0 & 0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$
$r_{40} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ -0 & -0 & -0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{41} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ -0 & -0 & -0 \\ -0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$	$r_{42} =$	$\begin{pmatrix} -0 & -0 & -0 \\ -0 & -0 & -0 \\ -0 & -0 & -0 \end{pmatrix}$

Tableau 5.1 — Les 42 matrices 9-intersections correspondant aux configurations topologiques valides.

Relation	Interprétation	Patrons 9-intersection
disjoint	$F \cap G \neq \emptyset$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & - \\ 0 & 0 & - \\ - & - & - \end{pmatrix}$
meet	$F^\circ \cap G^\circ = \emptyset$ $\wedge F \cap G \neq \emptyset$ $\wedge F \not\subseteq G$ $\wedge G \not\subseteq F$	$\vee \begin{pmatrix} -0 & - & -0 \\ - & 0 & - \\ -0 & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} -0 & - & -0 \\ - & 0 & - \\ - & -0 & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} -0 & - & - \\ - & 0 & -0 \\ -0 & - & - \end{pmatrix}$ $\vee \begin{pmatrix} -0 & - & -0 \\ - & 0 & - \\ - & -0 & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & -0 & - \\ - & 0 & - \\ -0 & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & -0 & - \\ - & 0 & - \\ -0 & - & - \end{pmatrix}$ $\vee \begin{pmatrix} - & -0 & - \\ - & 0 & - \\ -0 & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & -0 \\ - & -0 & - \\ - & -0 & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & - \\ - & -0 & -0 \\ -0 & - & - \end{pmatrix}$
overlap	$F^\circ \cap G^\circ \neq \emptyset$ $\wedge F \not\subseteq G$ $\wedge G \not\subseteq F$	$\begin{pmatrix} - & - & -0 \\ - & -0 & - \\ -0 & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & -0 \\ - & -0 & - \\ - & -0 & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & - \\ - & -0 & -0 \\ -0 & - & - \end{pmatrix}$ $\vee \begin{pmatrix} - & - & - \\ - & -0 & - \\ - & -0 & - \end{pmatrix}$
coveredBy	$F \subset G$ $\wedge F \not\subseteq G^\circ$	$\begin{pmatrix} -0 & - & 0 \\ - & - & 0 \\ -0 & - & 0 \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & 0 \\ -0 & - & 0 \\ -0 & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} -0 & - & 0 \\ - & - & 0 \\ - & -0 & - \end{pmatrix}$ $\vee \begin{pmatrix} - & - & 0 \\ -0 & - & 0 \\ - & -0 & - \end{pmatrix}$
covers	$G \subset F$ $\wedge G \not\subseteq F^\circ$	$\begin{pmatrix} -0 & - & -0 \\ - & - & - \\ 0 & 0 & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & -0 & -0 \\ - & - & - \\ 0 & 0 & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} -0 & - & - \\ - & - & -0 \\ 0 & 0 & - \end{pmatrix}$ $\vee \begin{pmatrix} - & -0 & - \\ - & - & - \\ 0 & 0 & - \end{pmatrix}$
inside	$F \subseteq G^\circ$	$\begin{pmatrix} 0 & -0 & 0 \\ 0 & -0 & 0 \\ - & - & - \end{pmatrix}$
contains	$G \subseteq F^\circ$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & - \\ -0 & -0 & - \\ 0 & 0 & - \end{pmatrix}$
equal	$x = y$	$\begin{pmatrix} -0 & 0 & 0 \\ 0 & -0 & 0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$

Tableau 5.2 — Expression des relations topologiques par des patrons 9-intersections.

	<i>disjoint</i>	<i>meet</i>	<i>overlap</i>	<i>coveredBy</i>	<i>covers</i>	<i>inside</i>	<i>contains</i>	<i>equal</i>
<i>r</i> ₁	×							
<i>r</i> ₂							×	
<i>r</i> ₃							×	
<i>r</i> ₄						×		
<i>r</i> ₅						×		
<i>r</i> ₆								×
<i>r</i> ₇				×				
<i>r</i> ₈				×				
<i>r</i> ₉				×				
<i>r</i> ₁₀		×						
<i>r</i> ₁₁					×			
<i>r</i> ₁₂			×					
<i>r</i> ₁₃		×						
<i>r</i> ₁₄		×						
<i>r</i> ₁₅					×			
<i>r</i> ₁₆			×					
<i>r</i> ₁₇					×			
<i>r</i> ₁₈			×					
<i>r</i> ₁₉				×				
<i>r</i> ₂₀				×				
<i>r</i> ₂₁				×				
<i>r</i> ₂₂				×				
<i>r</i> ₂₃				×				
<i>r</i> ₂₄				×				
<i>r</i> ₂₅					×			
<i>r</i> ₂₆		×						
<i>r</i> ₂₇		×						
<i>r</i> ₂₈					×			
<i>r</i> ₂₉			×					
<i>r</i> ₃₀			×					
<i>r</i> ₃₁					×			
<i>r</i> ₃₂		×						
<i>r</i> ₃₃		×						
<i>r</i> ₃₄					×			
<i>r</i> ₃₅		×						
<i>r</i> ₃₆		×						
<i>r</i> ₃₇					×			
<i>r</i> ₃₈			×					
<i>r</i> ₃₉			×					
<i>r</i> ₄₀					×			
<i>r</i> ₄₁			×					
<i>r</i> ₄₂			×					

Tableau 5.3 — Interprétation des 42 configurations valides.

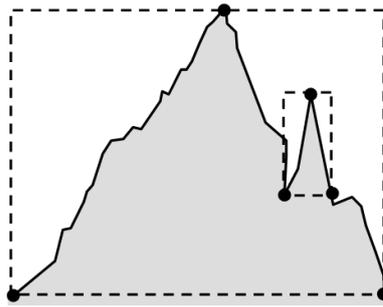


Figure 5.10 — Exemple d’une montagne contenant une autre montagne sans que les intérieurs s’intersectent.

L’interprétation ensembliste proposée par [Renz, 2002] n’est pas directement utilisable en raison de la définition que nous avons donné des frontières. La seule adaptation qui nous soit apparue nécessaire concerne la relation *meet*, les autres restant inchangées. Il faut en effet tenir compte du fait qu’une forme de relief puisse être incluse dans une autre forme de relief sans que les intérieurs s’intersectent. C’est le cas, par exemple, d’une montagne à l’intérieur d’une autre montagne (cf. figure 5.10). Les interprétations ensemblistes ainsi que les conjonctions de patrons 9-intersections correspondantes sont données dans le tableau 5.2. Il est à noter que les formes de relief qui n’ont pas d’intérieur ne peuvent être liées que par les relations *disjoint* ou *equal*, c’est-à-dire les deux relations dont l’interprétation ensembliste ne fait pas intervenir les intérieurs.

Notre programme a identifié, pour chaque matrice 9-intersections valide, les relations topologiques satisfaites. Le résultat, présenté dans le tableau 5.3, montre que chaque configuration valide satisfait exactement une relation topologique, ce qui vérifie que les relations topologiques ainsi modélisées sont disjointes deux-à-deux, et que chaque relation topologique est satisfaite par au moins une configuration valide, ce qui vérifie que l’ensemble des relations topologiques est exhaustif.

5.3.5 Méréologie et méréotopologie

Selon la définition que nous retenons de la méréologie (cf. 3.1.5), un composant d’une forme de relief ne peut pas être une partie arbitraire mais doit être une autre forme de relief. L’extension spatiale nous suffit pour définir la relation $P(F, G)$, « F est un composant de G ».

Définition 28 Soient F et G deux formes de relief. F est un composant de G si et seulement si l’extension spatiale de F est incluse ou égale à celle G .

$$P(F, G) \equiv \text{Extent}(F) \subseteq \text{Extent}(G)$$

Nous notons $CNT(F)$ l’ensemble des composants de F .

$$CNT(F) \equiv_{Def} \{P(F_i, F)\}$$

Nous vérifions que la relation P est bien réflexive, antisymétrique et transitive.

$$\begin{aligned}
 \text{Réflexivité :} \quad & \forall F, \text{Extent}(F) \subseteq \text{Extent}(F) \\
 \text{Antisymétrie :} \quad & P(F, G) \wedge P(G, F) \Rightarrow \text{Extent}(F) \subseteq \text{Extent}(G) \wedge \text{Extent}(G) \subseteq \text{Extent}(F) \\
 & \Rightarrow \text{Extent}(F) = \text{Extent}(G) \\
 & \Rightarrow F = G \\
 \text{Transitivité :} \quad & P(F, G) \wedge P(G, H) \Rightarrow \text{Extent}(F) \subseteq \text{Extent}(G) \subseteq \text{Extent}(H) \\
 & \Rightarrow P(F, H)
 \end{aligned}$$

La relation « F est un composant de G », que nous avons interprété comme « l'extension spatiale de F est un sous-ensemble de l'extension spatiale de G », peut s'interpréter de façon équivalente comme « tout point de mesure de l'extension spatiale de F est un point de mesure de l'extension spatiale de G ».

Si nous acceptons l'interprétation ensembliste de la relation P proposée par [Randell *et al.*, 1992], la relation de connexion entre deux formes de relief ne fait intervenir que les extensions spatiales.

$$C(F, G) \equiv \text{Extent}(F) \cap \text{Extent}(G) \neq \emptyset$$

et nous pouvons redéfinir la relation P à partir de la relation C .

$$P(F, G) \equiv \forall H, C(H, F) \rightarrow C(H, G)$$

La méréologie des formes de relief est alors bien une sous-théorie de la topologie (*cf.* 3.1.5), ce qui nous assure que notre système de relations a la cohérence d'une méréotopologie.

5.4 Modélisation des catégories

Étant donné que les formes de relief sont caractérisées par une séquence de nœuds, il est légitime que les catégories de forme de relief soient aussi dérivées des séquences de nœuds. La table 5.4 présente quelques exemples de catégories, les séquences et les représentations schématiques qui leur sont associées. Nous assumons qu'une même séquence ne peut pas modéliser plus d'une catégorie. En revanche, une catégorie peut être modélisée par plusieurs séquences, du fait qu'elle peut avoir plusieurs représentations schématiques. Par exemple, les formes de relief correspondant à la catégorie *terrasse* sont modélisées, soit par la séquence (LT, RT, RD) , soit par la séquence (LD, LT, RT) .

Définition 29 Une catégorie C est modélisée par un ensemble de $n \geq 1$ séquences de nœuds de longueurs variables.

$$C \equiv_{def} \{(v_{1,1}, \dots, v_{1,m_1}), \dots, (v_{n,1}, \dots, v_{n,m_n})\}$$

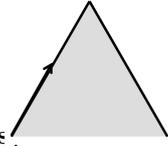
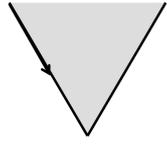
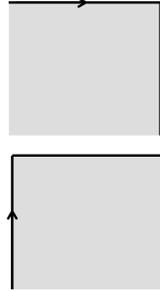
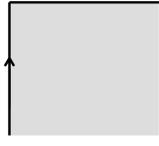
Catégorie	montagne	vallée	terrasse	plateau
Représentation(s), schématique(s)				
Séquence(s)	(LD, T, RT)	(LT, D, RT)	(LT, RT, RD) (LD, LT, RT)	(LD, LT, RT, RD)

Tableau 5.4 — Quelques exemples de catégories de forme de relief. Les silhouettes sont parcourues de gauche à droite de façon à ce que la terre soit toujours sur la droite.

5.4.1 Séquences régulières

Parmi toutes les séquences pouvant être construites à partir des huit nœuds de la boîte min-max, certaines ne modélisent pas des formes de relief mais des formes incohérentes, soit vis-à-vis de la boîte min-max, soit parce qu'elles correspondent à des aberrations physiques. Nous désignons par *séquences irrégulières* de telles séquences. Les *séquences régulières* sont celles susceptibles de modéliser une forme de relief.

Définition 30 Une séquence régulière renvoie à une forme de relief physiquement cohérente et observable. Elle remplit les conditions suivantes :

1. Un motif modélisé par une séquence régulière n'a pas d'auto-intersection (cf. figure 5.11). En effet, une silhouette représente la limite entre le ciel et la terre et n'admet donc pas de cycle. Cette propriété inclut le fait qu'un même nœud ne peut pas être présent plus d'une fois dans une séquence régulière ;

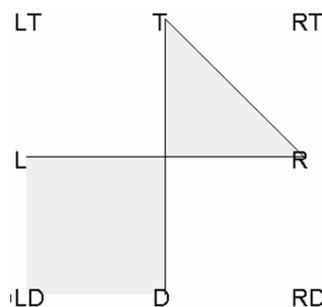


Figure 5.11 — Exemple d'auto-intersection dans une séquence irrégulière.

2. Afin d'être cohérent avec la boîte min-max, une séquence régulière inclut au moins un nœud de chacun des quatre côtés (cf. figure 5.12). En effet, par construction, un motif contient pour le côté gauche (respectivement droit, haut, bas) au moins un point de mesure tel qu'aucun autre point de mesure plus à gauche, (resp. droite, haut, bas).

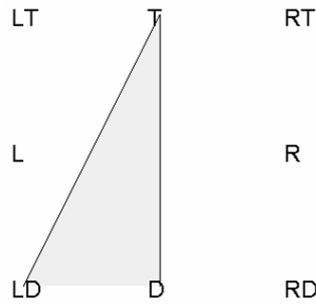


Figure 5.12 — Exemple de séquence irrégulière qui n'inclut pas au moins un nœud du côté droit de la boîte min-max.

Nous déterminons le nombre de séquences régulières par un algorithme récursif qui identifie les séquences sans intersection, i.e., qui remplissent le premier critère ci-dessus, et qui retire les séquences qui ne respectent pas le second critère.

Construisons une séquence de nœuds parmi $\mathcal{V} = \{LT, T, RT, R, RD, D, LD, L\}$. Le choix du premier nœud restreint le choix du deuxième nœud parmi P_1 , l'ensemble des sept nœuds restants (cf. figure 5.13, gauche). Par exemple, une séquence dont le premier nœud est LT restreint le choix du suivant parmi T, RT, R, RD, D, LD ou L .

Il faut considérer, pour le choix du troisième nœud, deux sous-ensembles différents de nœuds connectés et ordonnés P_2 et Q_2 (cf. figure 5.13, droite). Afin de respecter le critère de non auto-intersection de la séquence, le choix du troisième nœud dans P_2 ou Q_2 restreint le choix du quatrième nœud dans le sous-ensemble choisi. Cette restriction s'applique récursivement pour le choix des nœuds restant. Ainsi, le nombre de séquences qui peuvent être construites une fois effectué le choix du second nœud est égal au nombre de séquences qui peuvent être construites si le troisième nœud est choisi dans P_2 plus le nombre de séquences qui peuvent être construites si le troisième nœud est choisi dans Q_2 .

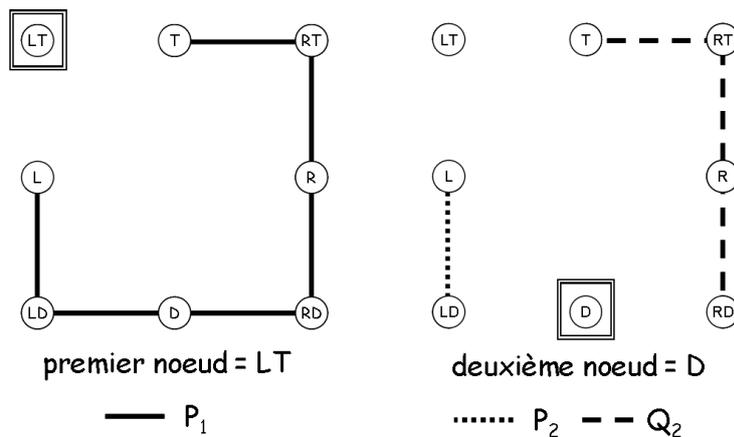


Figure 5.13 — Choix du premier et du deuxième nœud.

Considérons le cas où le troisième nœud est choisi dans P_2 . Puisque P_2 est ordonné, ses nœuds sont énumérés de v_1 à v_n avec n la cardinalité de P_2 . Notons k le rang du troisième

nœud dans P_2 . Alors, P_2 est à son tour séparé en deux sous-ensembles connectés et ordonnés P_3 et Q_3 dont les cardinalités respectives sont $k - 1$ et $n - k$ avec $1 \leq k \leq n$. La figure 5.14 illustre ce mécanisme dans le cas où $n = 6$ et $k = 3$.

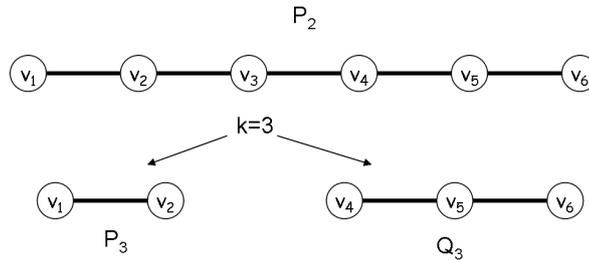


Figure 5.14 — Choix du nœud v_k et dérivation de deux nouveaux sous-ensembles connectés et ordonnés, pour $n = 6$ et $k = 3$.

Ainsi, le nombre noté μ_n de séquences sans auto-intersections que nous pouvons construire en choisissant le $i^{\text{ème}}$ nœud parmi les n nœuds restant est la somme de trois termes, issue du constat suivant :

1. nous pouvons construire n séquences si on décide de s'arrêter au $i^{\text{ème}}$ nœud ;
2. nous pouvons construire μ_{k-1} séquences en choisissant le $(i + 1)^{\text{ème}}$ dans P_n , k variant de 1 à n ;
3. nous pouvons construire μ_{n-k} séquences en choisissant le $(i + 1)^{\text{ème}}$ dans Q_n , k variant de 1 à n .

Appliqué récursivement, cela nous donne l'expression suivante de μ_n .

$$\mu_n = n + \sum_{k=1}^n (\mu_{k-1} + \mu_{n-k})$$

Avec $\mu_0 = 0$, μ_n est obtenu par itération pour $0 \leq n \leq 7$.

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 0 \\ \mu_1 &= 1 \\ \mu_2 &= 4 \\ \mu_3 &= 13 \\ \mu_4 &= 40 \\ \mu_5 &= 121 \\ \mu_6 &= 364 \\ \mu_7 &= 1093 \end{aligned}$$

Le premier nœud est choisi librement parmi les huit nœuds de la boîte min-max, puis le deuxième est choisi dans le sous-ensemble connecté et ordonné de sept nœuds. Par conséquent, nous pouvons construire $8 \cdot (1 + \mu_7) = 8752$ séquences sans auto-intersection.

Nous avons implémenté (en Java) le mécanisme décrit dans cette section pour identifier chacune des séquences sans auto-intersection. Parmi les 8752 séquences identifiées, nous avons

vérifié que 756 n'avaient pas d'intersection avec au moins un des côtés de la boîte min-max, i.e., elles n'incluaient pas un nœud dans chacun des sous-ensembles $\{LT, L, LD\}$, $\{LT, T, RT\}$, $\{RT, R, RD\}$ et $\{LD, D, RD\}$ (cf. figure 5.15).

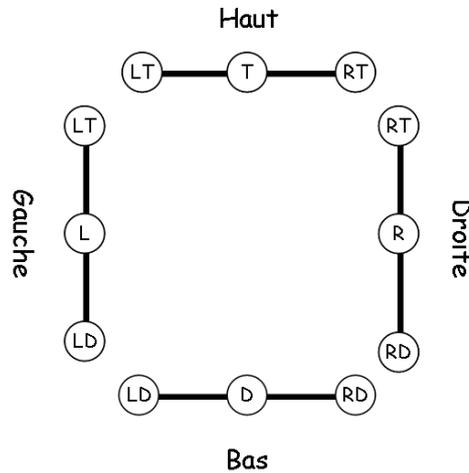


Figure 5.15 — Les quatres côtés de la boîte min-max et les nœuds correspondants.

Nous avons conservé quatre séquences particulières que nous considérons comme régulières bien que notre programme nous ait indiqué qu'elles n'intersectaient pas les quatre côtés de la boîte min-max. Il s'agit des quatre séquences représentant un segment vertical (du haut vers le bas ou du bas vers le haut) ou horizontal (de la gauche vers la droite ou de la droite vers la gauche). Par convention, nous choisissons de modéliser les deux segments verticaux par les deux séquences (T, D) et (D, T) et les segments horizontaux par les séquences (L, R) et (R, L) . Les différentes séquences modélisant les segments verticaux ou horizontaux sont listées dans le tableau 5.5.

Segment	Vertical, de haut en bas	Vertical, de bas en haut	Horizontal, de la gauche vers la droite	Horizontal, de la droite vers la gauche
représentation schématique				
séquences possibles	(T, D) (LT, LD) (RT, RD)	(D, T) (LD, LT) (RD, RT)	(L, R) (LD, RD) (LT, RT)	(R, L) (RD, LD) (RT, LT)

Tableau 5.5 — Les différentes séquences modélisant les segments verticaux et horizontaux. La première séquence (en gras) correspond à la modélisation que nous privilégions par convention. Les flèches représentent le sens de parcours de la silhouette de façon à ce que la terre soit toujours à droite.

Nous pouvons remarquer que, lorsque dans une séquence un segment relie deux coins non diagonalement opposés, il passe nécessairement par un nœud intermédiaire. Les séquences (LT, RT) , (RT, RD) , (RD, LD) , (LD, LT) , (LT, LD) , (LD, RD) , (RD, RT) et (RT, LT) passent respectivement par le nœud T , R , D , L , L , D , R et T . A notre sens, les séquences (LT, T, RT) et (LT, RT) sont équivalentes. Nous considérons en effet que ce qui différencie les segments de la figure 5.16 relève des détails morphologiques et ne saurait donc être mis en évidence par des saillances qui visent à rendre compte de la forme dans sa globalité. Par conséquent, nous ne conservons pas dans l'ensemble des séquences régulières, les séquences qui contiennent les sous-séquences (LT, T, RT) , (RT, R, RD) , (RD, D, LD) , (LD, L, LT) , (LT, L, LD) , (LD, D, RD) , (RD, R, RT) et (RT, T, LT) .

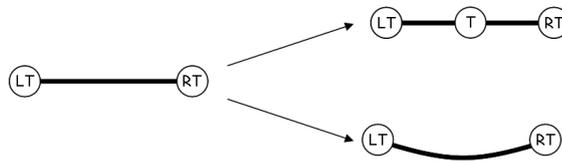


Figure 5.16 — Ambiguïté de l'interprétation de la séquence (LT, RT) .

En prenant en compte ce dernier critère, nous obtenons 5400 séquences régulières. Ce nombre peut paraître excessif mais il a l'avantage de rendre compte de la complexité et de la variété des reliefs. Les séquences régulières sont les primitives de notre modèle, au sens où nous l'avons évoqué dans le chapitre 4 (p. 69). Il est donc légitime de construire les catégories, et à travers elles, le processus de catégorisation, autour des séquences régulières.

5.4.2 Construction d'une catégorie

Disposant maintenant d'un ensemble de primitives, les séquences régulières, pour la description des catégories des formes de relief, il nous reste à envisager les méthodes de construction des catégories. Pour des raisons évidentes d'applicabilité, nous évinçons la méthode énumératives consistant à évaluer chaque séquence au regard de la catégorie que nous souhaitons construire. Nous introduisons ici deux méthodes utilisables en fonction du contexte applicatif.

5.4.2.1 Méthode explicite

Nous proposons, à titre d'exemple, de nous inspirer du postulat 2 « Une catégorie de formes de relief peut-être définie par la spécification d'un ensemble de saillances et leur organisation dans l'espace » (cf. p.21) pour tenter de définir la catégorie *montagne*. Une montagne n'est alors plus définie comme une « élévation de terrain » mais est caractérisée par le « sommet de la montagne » et les « flancs de la montagne ». Dans notre modèle, le flanc gauche correspond à une séquence menant du nœud LD au nœud T , le flanc droit à une séquence

menant du nœud T au nœud RD et le sommet au nœud T . La modélisation de la catégorie *montagne* par la séquence (LD, T, RD) est une réponse intuitive à la question « quelle est la forme d'une montagne ? ».

Nous pouvons donc modéliser la catégorie $C_{montagne}$ sans avoir à parcourir les 5400 séquences régulières.

$$C_{montagne} := \{(LD, T, RD)\}$$

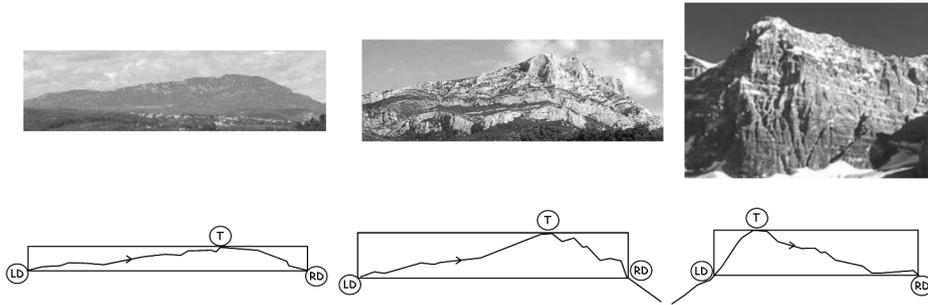


Figure 5.17 — Exemples de montagnes dont la silhouette est modélisée par la séquence (LD, T, RD) . Les flèches indiquent le sens de parcours de la silhouette.

Notre modèle ayant la capacité de s'affranchir des détails pour rendre compte de la globalité d'une forme, cette modélisation reconnaît comme montagne des formes de relief aux morphologies qui se différencient (cf. figure 5.17) :

- par la pente plus ou moins prononcée et asymétrique des flancs ;
- la position plus ou moins axiale du sommet.

5.4.2.2 Méthode par filtrage

Prenons l'exemple d'un utilisateur qui désire définir différentes catégories d'élévation (montagne, crête, plateau ...). La méthode par filtrage consiste à définir explicitement une super-catégorie *élévation* puis de distribuer les séquences qui la modélisent dans les différentes sous-catégories.

Pour définir la catégorie *élévation*, nous supposons que toute élévation commence et se termine toujours en son altitude minimale. Entre les deux extrémités, une élévation se situe toujours au dessus de cette altitude minimale (sinon, nous aurions une composition de deux élévations). Les élévations sont alors modélisées par les 13 séquences commençant par LD , se terminant par RD et ne comprenant pas le nœud D (cf. figure 5.18)



Figure 5.18 — Schématisation des 13 séquences régulières commençant par le nœud LD , se terminant par le nœud RD et ne comprenant pas le nœud D .

Il est ensuite possible pour l'utilisateur de distribuer ces séquences dans les catégories spécifiques. A titre d'exemple, choisissons dans l'ensemble des séquences modélisant la super-catégorie *élévation* les séquences modélisant les trois sous-catégories *montagne*, *plateau* et *crête* (cf. tableau 5.6). Nous pouvons remarquer que certaines élévations ne rentrent dans aucune de ces trois catégories.

Catégorie	Représentations schématiques
montagne	\wedge
plateau	\square
crête	$\searrow \swarrow$

Tableau 5.6 — Distribution des séquences de la super-catégorie *élévation* dans les sous-catégories *montagne*, *plateau* et *crête*.

Pour la construction par filtrage, nous avons introduit neuf filtres prédéfinis. Bien que cet ensemble ne soit pas exhaustif, il a suffi à nos expérimentations. Le filtrage consiste à associer un ou plusieurs filtres dont la conjonction pré-sélectionne un sous ensemble des 5400 séquences régulières. L'utilisateur sélectionne alors les séquences satisfaisantes dans cette pré-sélection. Il peut ensuite générer une autre pré-sélection à partir d'une autre conjonction de filtres et l'ajouter à sa sélection (ce qui est un moyen détourné d'effectuer une disjonction).

No overhang

Les séquences $seq = (v_1, \dots, v_n)$ qui ne contiennent aucun segment orienté de la droite vers la gauche.

$$\forall v_i \in seq \begin{cases} v_i \in \{RT, R, RD\} & \Rightarrow i = n \vee v_{i+1} \in \{RT, R, RD\} \\ v_i \in \{T, D\} & \Rightarrow i = n \vee v_{i+1} \in \{T, RT, R, RD, D\} \end{cases}$$

Overhang only

Les séquences $seq = (v_1, \dots, v_n)$ contenant uniquement des segments orientés de la droite vers la gauche.

$$\forall v_i \in seq \begin{cases} v_i \in \{LT, LD, L\} & \Rightarrow i = n \vee v_{i+1} \in \{LT, LD, L\} \\ v_i \in \{T, D\} & \Rightarrow i = n \vee v_{i+1} \in \{LT, T, D, LD, L\} \end{cases}$$

Ascending

Les séquences $seq = (v_1, \dots, v_n)$ contenant uniquement des segments orientés du bas vers le haut.

$$\forall v_i \in seq \begin{cases} v_i \in \{LT, T, RT\} & \rightarrow i = n \vee v_{i+1} \in \{LT, T, RT\} \\ v_i \in \{L, R\} & \rightarrow i = n \vee v_{i+1} \in \{LT, T, RT, R, L\} \end{cases}$$

Descending

Les séquences $seq = (v_1, \dots, v_n)$ contenant uniquement des segments orientés du haut vers le bas.

$$\forall v_i \in seq \begin{cases} v_i \in \{LT, D, RD\} & \rightarrow i = n \vee v_{i+1} \in \{LD, D, RD\} \\ v_i \in \{L, R\} & \rightarrow i = n \vee v_{i+1} \in \{R, RD, D, LD, L\} \end{cases}$$

Start with v

Les séquences $seq = (v_1, \dots, v_n)$ commençant par le nœud v

$$v_1 = v$$

End with v

Les séquences finissant par le nœud v

$$v_n = v$$

Contain v

Les séquences qui contiennent le nœud v

$$v \in \{v_1, \dots, v_n\}$$

Exclude v

Les séquences qui ne contiennent pas le nœud v

$$v \notin \{v_1, \dots, v_n\}$$

At least min vertices

Les segments comprenant au moins min nœuds.

$$n \geq min$$

At most min vertices

Les segments comprenant au plus min nœuds.

$$n \leq min$$

5.5 Conclusion

Ce chapitre a introduit une approche qualitative pour la description sémantique de reliefs, applicable aux silhouettes à l'horizon mais aussi à d'autres formes de séparation entre terre et ciel – ou terre et eau comme nous le verrons dans le chapitre suivant – telles que des profils de terrain.

Les formes de relief sont modélisées, soit par une extension spatiale, soit par l'organisation des saillances qui les imposent à la perception. La prise en compte des frontières *fiat* nous a amené à développer une topologie de sens commun propre aux formes de relief en nous inspirant de la méthode 9-intersections. Nous avons montré que cette topologie restait cohérente, y compris dans le cadre d'une méréotopologie. La méréologie organise les formes de relief selon différents niveaux d'abstraction, alors que la topologie les organise selon leur disposition dans la silhouette. Les catégories sont modélisées par des séquences de nœuds, c.-à-d. des séquences de saillances génériques et non localisées. Ces nœuds sont définis comme

étant l'intersection entre une forme de relief et sa boîte min-max. Ce type d'approche apporte une grande flexibilité pour l'analyse du relief dans des contextes et des applications variées.

Le modèle présenté ici est une première étape vers un modèle plus général. Nous avons en effet volontairement occulté certains aspects. Par exemple, bien que nous nous placions dans un contexte purement qualitatif, nous ne pouvons pas nous affranchir complètement de la différence de tailles entre les formes de relief. Ainsi, les notions de *grande montagne*, de *formes d'une taille comparable* mériteraient d'être approfondies dans la mesure où elles sont intimement liées au sens commun dont il est question lorsqu'il s'agit de décrire une silhouette.

Afin d'illustrer la portée de notre modèle, mais aussi de pointer les notions supplémentaires qu'il faudrait prendre en compte, nous avons développé un prototype que nous présentons dans le chapitre suivant et que nous mettons en œuvre dans le contexte de la description de dunes sous-marines.

Prototype et exemple d'application

« J'ai toujours rêvé d'un ordinateur qui soit aussi facile à utiliser qu'un téléphone. Mon rêve s'est réalisé : je ne sais plus comment utiliser mon téléphone. »

Bjarne Stroustrup

Afin d'expérimenter notre approche et notre modèle sur des données réelles, nous avons développé un prototype en Java. L'objectif est d'évaluer expérimentalement la qualité des descriptions obtenues et de mieux délimiter la portée d'une description méréotopologique. Nous cherchons à mettre en évidence les apports d'une approche sémantique par rapport à une approche à base de primitives géométriques.

Nous décrivons, dans la section 6.1, le prototype développé à travers son application à la silhouette de test de [Kulik et Egenhofer, 2003]. La section 6.3 présente l'application de notre modèle à la description d'un type d'objets particuliers, les dunes sous-marines.

6.1 Prototype

Nous avons développé un prototype en Java (SDK 1.4.1) dans lequel sont implémentés les principes de la modélisation que nous avons présenté dans le chapitre 5. Le prototype comprend une interface graphique grâce à laquelle un utilisateur peut importer des silhouettes, définir ses propres catégories de formes de relief et lancer une analyse.

6.1.1 Silhouette de test

Nous illustrons le potentiel de notre prototype à travers l'analyse d'une silhouette extraite de [Kulik et Egenhofer, 2003] dans laquelle nous isolons des montagnes, des vallées, des terrasses et des plateaux. Cette silhouette particulière a été choisie parce qu'elle contient une

variété représentative de formes de relief. De plus, les formes recherchées apparaissent sans ambiguïté, ce qui permet de vérifier aisément le résultat de l'analyse.

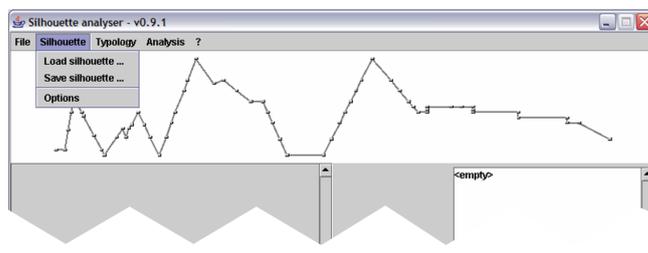


Figure 6.1 — Affichage de la silhouette de test dans l'interface.

La silhouette est stockée dans un fichier ASCII. Elle est décrite par les coordonnées des points de mesure ordonnées selon le sens de parcours de la silhouette de la gauche vers la droite. Après chargement du fichier, l'interface présente l'aspect de la figure 6.1.

6.1.2 Description de la silhouette

La description d'une silhouette selon le sens commun, c.-à-d. telle qu'elle peut être perçue par un observateur, nécessite quatre étapes.

1. construire les catégories dont l'ensemble forme la typologie de référence pour l'analyse de la silhouette ;
2. isoler les formes de relief qui font sens dans le contexte spécifique (socio-culturel ou applicatif). Nous proposons un algorithme qui capture dans une silhouette les formes de relief correspondant à l'une des catégories de la typologie de référence ;
3. organiser les formes de relief isolées en niveaux d'abstraction. Dans une approche purement qualitative, nous proposons une définition métréologique des niveaux d'abstraction ;
4. rendre compte de l'organisation spatiale de la silhouette à travers les relations topologiques qui lient les formes de relief.

Nous traitons ces quatre points dans les quatre sections suivantes et nous les illustrons à travers la description de notre silhouette de test.

6.1.2.1 Construction des catégories

Les catégories peuvent être construites selon l'une des méthodes introduites en 5.4.2. A chacune d'elles correspond une interface spécifique.

Dans notre exemple d'application, nous désirons isoler les montagnes, les vallées, les terrasses et les plateaux.

La construction explicite consiste à spécifier une à une les séquences qui modélisent la forme de relief en reliant les nœuds de la boîte min-max. L'utilisateur édite ainsi une

représentation schématique en essayant de s'approcher de la forme canonique associée à la catégorie. Avec cette méthode, nous construisons les catégories montagne, plateau et vallée décrites par les séquences respectives (LD, T, RD) , (LD, LT, T, RT, RD) et (LT, D, RT) (cf. figure 6.2).

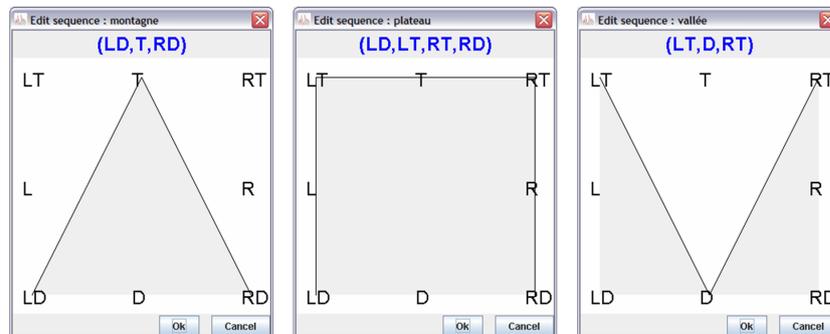


Figure 6.2 — Edition d'une séquence.

Il est aussi possible d'utiliser la méthode par filtrage pour construire les catégories montagne et plateau comme nous l'avons fait en 5.4.2. La figure 6.3 illustre l'utilisation de l'interface graphique pour construire la catégorie montagne avec la méthode par filtrage.

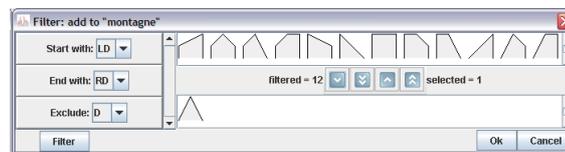


Figure 6.3 — Application de la conjonction de trois filtres pour générer l'ensemble des séquences modélisant une élévation et sélection de la séquence modélisant la catégorie montagne.

Il reste la catégorie *terrasse* pour laquelle nous utilisons la méthode par filtrage. L'association des filtres *start with LD*, *end with RT*, *contains LT*, *Ascending* et *No overhang* pré-sélectionne une séquence modélisant une terrasse dont la partie ascendante précède la partie horizontale (cf. figure 6.4, gauche). L'association des filtres *start with LT*, *end with RD*, *contains RT*, *Descending* et *No overhang* pré-sélectionne une séquence modélisant une terrasse dont la partie horizontale précède la partie descendante (cf. figure 6.4, droite).

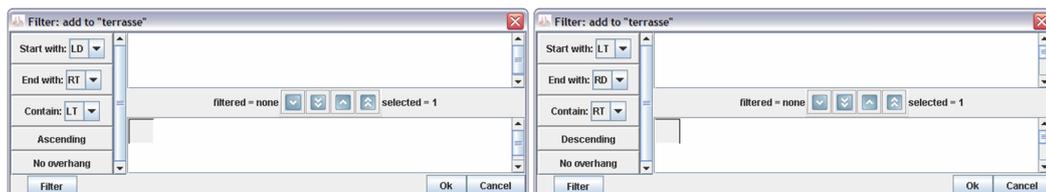


Figure 6.4 — Filtres utilisés pour définir la catégorie terrasse. A gauche : terrasse dont la partie ascendante précède la partie horizontale. A droite : terrasse dont la partie horizontale précède la partie descendante.

6.1.2.2 Capture des formes de relief

Deux étapes sont nécessaires pour capturer les formes de relief d'une silhouette représentée par une séquence de points.

Nous avons vu que les formes de relief étaient associées à un ensemble de motifs. La première étape consiste donc à extraire les motifs qui ont un sens, i.e., qui correspondent à l'une des catégories recherchées. Si la séquence modélisant la morphologie d'un motif appartient à la liste des séquences qui définit une catégorie, alors ce motif rentre dans cette catégorie. Si la séquence de nœuds n'est dans aucune définition de catégorie, alors ce motif n'a pas de sens.

La seconde étape regroupe les motifs retenus afin d'isoler les formes de relief. Deux motifs qui sont modélisés par la même séquence de nœuds et, soit partagent les mêmes saillances intérieures, soit n'ont pas de saillances intérieures mais partagent au moins un point, sont regroupés. L'ensemble des groupes ainsi obtenus nous donne directement l'ensemble $\Lambda_S(SC) = \{F_1, \dots, F_n\}$ des formes de relief perceptibles dans la silhouette (cf. Annexe B.2).

En pratique, le regroupement n'est pas effectué dans le cas où l'un des motifs est un composant non unique de l'autre (cf. algorithme 4). La figure 6.5 illustre cette configuration. Elle représente une montagne dont l'un des flancs comprend une petite montagne. A un niveau d'abstraction moindre, i.e., si nous désirons décrire la montagne elle-même, la même montagne apparaît toujours (même morphologie et même intérieur) mais avec une taille réduite et ne contient plus la petite montagne. Plutôt que de considérer qu'il s'agit de la même montagne et de la faire apparaître à différents niveaux d'abstraction, nous préférons distinguer deux entités distinctes.

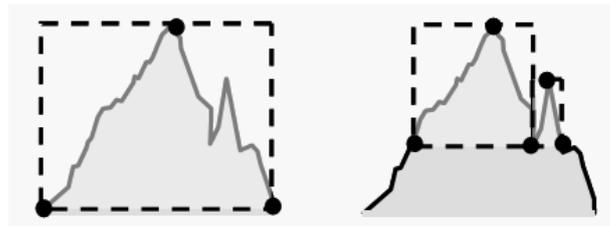
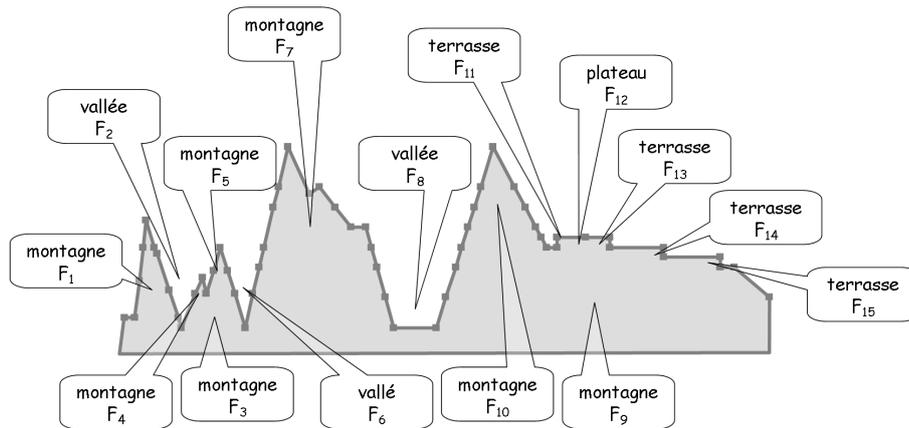


Figure 6.5 — Une même forme de relief peut apparaître à deux niveaux d'abstractions différents.

La silhouette comprend 57 points de mesure (p_1, \dots, p_{57}) à partir desquels nous construisons 1596 motifs. Parmi eux, 32 sont modélisés par une séquence correspondant à l'une des catégories recherchées. La table 6.6 présente les 15 formes de relief résultant du regroupement des motifs (cf. Annexe B.2).

On pourrait nous faire remarquer que la petite vallée et la petite montagne qui la suit sur le flanc droit de la montagne F_7 devraient apparaître dans la liste des formes de relief capturées. Effectivement, leur morphologie correspond respectivement aux catégories « vallée » et « montagne ». Leur absence des formes de relief capturées est une conséquence du faible



F_i	Extension	Séquence	Catégorie	Composants
F_1	$\langle 2, 5, 5, 9 \rangle$	(LD, T, RD)	montagne	
F_2	$\langle 6, 10, 10, 15 \rangle$	(LT, D, RT)	vallée	F_4
F_3	$\langle 10, 15, 15, 18 \rangle$	(LD, T, RD)	montagne	F_5, F_4
F_4	$\langle 11, 12, 12, 13 \rangle$	(LD, T, RD)	montagne	
F_5	$\langle 13, 15, 15, 17 \rangle$	(LD, T, RD)	montagne	
F_6	$\langle 15, 18, 18, 21 \rangle$	(LT, D, RT)	vallée	
F_7	$\langle 18, 24, 24, 33 \rangle$	(LD, T, RD)	montagne	
F_8	$\langle 24, 33, 34, 41 \rangle$	(LT, D, RT)	vallée	
F_9	$\langle 35, 41, 41, 57 \rangle$	(LD, T, RD)	montagne	$F_{13}, F_{12}, F_{14}, F_{11}, F_{10}, F_{15}$
F_{10}	$\langle 37, 41, 41, 46 \rangle$	(LD, T, RD)	montagne	
F_{11}	$\langle 47, 48, 48, 50 \rangle$	(LD, LT, RT)	terrasse	
F_{12}	$\langle 47, 48, 50, 51 \rangle$	(LD, LT, RT, RD)	plateau	F_{13}, F_{11}
F_{13}	$\langle 48, 50, 50, 51 \rangle$	(LT, RT, RD)	terrasse	
F_{14}	$\langle 51, 52, 52, 53 \rangle$	(LT, RT, RD)	terrasse	
F_{15}	$\langle 53, 54, 54, 55 \rangle$	(LT, RT, RD)	terrasse	

Figure 6.6 — Formes de relief capturées

échantillonnage des points de mesure de la silhouette. En effet, pour capturer une montagne, c.-à-d. en l'occurrence détecter un motif dont la morphologie est décrite par la séquence de nœuds (LD, T, RD) , il faut que les points de mesure associés à LD et RD choisis pour former la base, respectivement p_i et p_j , soient parfaitement alignés horizontalement, i.e., $z_i = z_j$. Par exemple, sur la figure 6.6, la forme de relief F_1 ne peut être décrite par la séquence (LD, T, RD) que si les points p_2 et p_9 sont parfaitement alignés.

Cette remarque nous a amené à conserver un maximum de points de mesure et non pas seulement ceux qui correspondent à des propriétés locales de la silhouette, c.-à-d. à des frontières *bona fide*. Cependant, il arrive que les points ne soient pas parfaitement alignés, en raison par exemple de l'imprécision des capteurs. Plutôt que de proposer une approche fondée sur un calcul approximatif ou une méthode numérique, nous avons préféré instancier

des points de mesure implicites.

Considérons un point de mesure $p_i = (x_i, z_i)$ et le segment reliant les points de mesure $p_k = (x_k, z_k)$ et $p_h = (x_h, z_h)$. Si l'horizontale passant par p_i intersecte le segment $[p_k, p_h]$, alors il existe un point de mesure implicite $p_j = (x_j, z_j)$ horizontalement aligné avec p_i , avec $x_j = x_k + (x_h - x_k) \frac{z_i - z_k}{z_h - z_k}$ et $z_j = z_i$ (cf. figure 6.7).

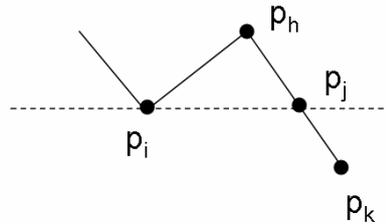


Figure 6.7 — Instanciation d'un point implicite.

L'intérêt de l'instanciation des points de mesure implicite dépend du type de données en entrée. Si nous nous plaçons dans le contexte visuel de perception d'un relief à l'horizon, la silhouette est obtenue à travers une image construite par un observateur situé au sol. Dans la mesure où les points de mesure correspondent à la présence de la silhouette dans la zone recouverte par un pixel donné, ils sont naturellement alignés et il n'est pas nécessaire de rajouter des points implicites.



Figure 6.8 — Principales formes capturées en ajoutant les points implicites.

A titre d'exemple, la description obtenue en incluant 49 points implicites est illustrée par la figure 6.8. Au plus haut niveau d'abstraction, la silhouette est décrite par la séquence « montagne, vallée, montagne, vallée, montagne ». Nous pouvons noter que le résultat diffère de celui obtenu par [Kulik et Egenhofer, 2003] qui décrivent cette silhouette par la séquence « montagne, vallée, montagne ». Nous pouvons isoler deux causes principales à cette différence :

1. Dans notre modèle, les niveaux d'abstractions sont dérivés des relations topologiques tandis que, dans le langage de Kulik et Egenhofer, ils sont définis selon un critère de taille. Par conséquent, il est normal que la petite montagne de gauche subsiste dans notre modèle mais qu'elle disparaisse chez Kulik et Egenhofer ;
2. Le langage de Kulik et Egenhofer est construit selon une approche *bottom-up* : les formes de relief sont construites par agrégation d'éléments plus petits. La description à un haut niveau d'abstraction est donc susceptible de dépendre du niveau de détails de la silhouette, d'autant plus que la méthode de simplification/généralisation qualitative introduit des biais (cf. 4.3.2). Dans notre modèle, chaque forme est capturée indépendamment des autres et le niveau de détails de la silhouette influence le nombre de formes détectées

mais ni leur qualité, ni leurs caractéristiques.

Notre modèle présente l'avantage, par rapport à ce qui est proposé dans d'autres approches (cf. 4.3), de ne pas nécessiter de méthode numérique de simplification pour obtenir une « bonne résolution » pour laquelle les objets recherchés ressortent le mieux. L'abondance d'informations, et par la même, la présence de bruit aux niveaux de résolution les plus fins, n'est pas perturbant.

Nous devons aussi prendre en compte une autre source de données, courante pour le relief. Les données d'altimétrie et de bathymétrie sont construites selon une perspective cartographique : le relief est vu du ciel. Les points de mesure ne sont généralement pas alignés horizontalement et notre modèle est amené à instancier de nombreux points de mesure implicites. A nouveau, il nous est permis d'insister sur le fait que cela ne perturbe pas notre modèle, puisque la forme de la silhouette n'est en rien altérée.

6.1.2.3 Représentation hiérarchique

La méréologie nous permet de décrire la silhouette à différents niveaux d'abstraction si nous considérons qu'une forme de relief composante d'une autre forme de relief est un « détail » de la silhouette et n'apparaît donc pas au plus haut niveau d'abstraction.

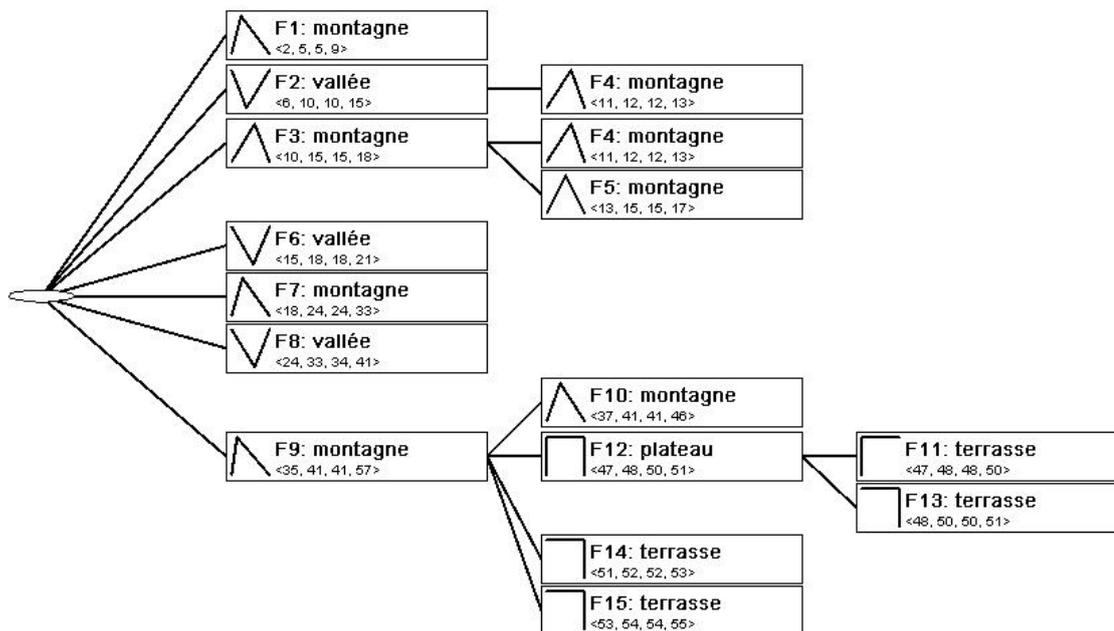


Figure 6.9 — Méréologie des formes de relief capturées.

Nous construisons une représentation hiérarchique de la silhouette fondée sur la relation $P(F, G)$ « F est un composant de G ». Concrètement, cette représentation est mise en œuvre à travers un arbre n-aire (cf. figure 6.9). Chaque forme de relief y est caractérisée par un numéro unique, la catégorie à laquelle elle appartient, une représentation schématique et le n-uplet correspondant à son extension spatiale. La racine de l'arbre est une forme de

relief virtuelle représentant l'ensemble de la silhouette. Elle se subdivise en une ou plusieurs branches menant aux formes de relief qui ne sont composantes d'aucune autre forme de relief que la silhouette. A leur tour, ces formes de relief sont subdivisées en autant de branches qu'elles ont de composant. Et ainsi de suite jusqu'à aboutir à des formes de relief qui n'ont pas de composants.

Le prototype offre la possibilité de naviguer entre les niveaux d'abstraction (cf. figure 6.10). Par exemple, la montagne F_9 peut être décrite avec plus de détails comme une montagne dont la pente droite contient un plateau et se termine par une série de terrasses. Il est à noter que la montagne F_{10} est une représentation de la montagne F_9 à un niveau d'abstraction moindre.

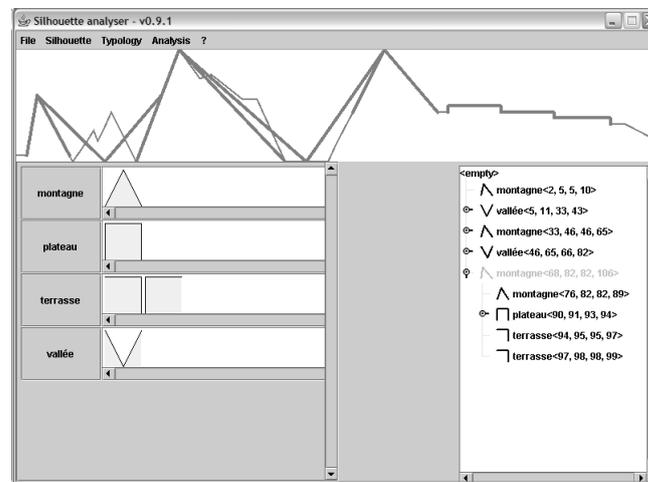


Figure 6.10 — Résultat de l'analyse. L'utilisateur peut naviguer dans les différents niveaux d'abstraction (cadre en bas à droite).

6.1.2.4 Relations topologiques

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}
F_1	EQ	EC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC
F_2	EC	EQ	EC	TPP ⁻¹	EC	EC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC
F_3	DC	EC	EQ	TPP ⁻¹	TPP ⁻¹	EC	EC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC
F_4	DC	TPP	TPP	EQ	EC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC
F_5	DC	EC	TPP	EC	EQ	EC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC
F_6	DC	EC	EC	DC	EC	EQ	EC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC
F_7	DC	DC	EC	DC	DC	EC	EQ	EC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC
F_8	DC	DC	DC	DC	DC	DC	EC	EQ	EC	EC	DC	DC	DC	DC	DC
F_9	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	EC	EQ	TPP ⁻¹					
F_{10}	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	EC	TPP	EQ	DC	DC	DC	DC	DC
F_{11}	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	TPP	DC	EQ	TPP	EC	DC	DC
F_{12}	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	TPP	DC	TPP ⁻¹	EQ	TPP ⁻¹	EC	DC
F_{13}	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	TPP	DC	EC	TPP	EQ	EC	DC
F_{14}	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	TPP	DC	DC	EC	EC	EQ	EC
F_{15}	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	TPP	DC	DC	DC	DC	EC	EQ

Tableau 6.1 — Relations topologiques entre les formes de relief capturées.

Le tableau 6.1 donne les relations topologiques qui lient les formes de reliefs capturées dans la silhouette.

La montagne F_4 illustre le paradoxe du chalet. En effet, bien que la vallée F_2 et la montagne F_3 ne se recouvrent pas, F_4 est composant à la fois de F_2 et F_3 .

6.2 Calculabilité

Dans cette section, nous évaluons la complexité du problème de la description sémantique d'une silhouette par notre modèle. Les algorithmes sont décrits dans l'annexe B.

La détection des reliefs nécessite les étapes suivantes :

1. Construction de tous les motifs possibles ;
2. Pour chaque motif, déterminer les points de mesure intersectant sa boîte min-max.

Considérons une silhouette contenant n points de mesure. Nous constatons que deux points de mesure quelconques définissent une boîte min-max unique et différente. Une méthode simple pour construire l'ensemble des motifs consiste donc à prendre le premier point p_1 et à l'associer successivement à chacun des autres points p_2, p_3, \dots, p_n . Nous obtenons ainsi $n - 1$ motifs notés $M_{1,2}, M_{1,3}, \dots, M_{1,n}$ et contenant respectivement $2, 3, \dots, n$ points de mesure. Nous opérons de la même façon en prenant le point de mesure p_2 que nous associons successivement au $n - 2$ points de mesure p_3, p_4, \dots, p_n pour obtenir les $n - 2$ motifs notés $M_{2,3}, M_{2,4}, \dots, M_{2,n}$ qui contiennent respectivement $2, 3, \dots, (n - 1)$ points de mesure. Plus généralement, en associant le points p_t successivement au $n - t$ points de mesure p_{t+1}, \dots, p_n , nous obtenons $n - t$ motifs contenant respectivement $2, \dots, (n - t + 1)$ points de mesure.

La construction de la boîte min-max nécessite de parcourir deux fois l'ensemble des points de mesure du motif. La première fois afin de calculer les limites de la boîtes min-max et la seconde pour tester l'intersection de chaque point de mesure avec la boîte min-max. Ces deux opérations nécessitent un temps constant pour un motif et un point de mesure donnés.

Le temps nécessaire à la détection des formes de relief dans une silhouette S ne dépend donc que du nombre de points de mesure et est proportionnel à $\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^n j$, la somme du nombre de points de mesure contenus dans chaque motif de cette silhouette.

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^n j &= \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{j=1}^n j - \sum_{k=1}^{i-1} k \right) \\
&= \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{n(n+1)}{2} - \frac{i(i-1)}{2} \right) \\
&= \frac{n(n-1)(n+1)}{2} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} i \\
&= \frac{n(n-1)(n+1)}{2} - \frac{n(n-1)(n-\frac{1}{2})}{6} + \frac{n(n-1)}{4} \\
&\approx \frac{n^3}{2} + o(n^2) - \frac{n^3}{6} + o(n^2) + o(n^2) \\
&\approx o(n^3)
\end{aligned}$$

Ce processus s'exécute donc en un temps polynomial $o(n^3)$.

En ce qui concerne la mémoire nécessaire, la silhouette nécessite le stockage de n points de mesure de tailles constantes. Chaque forme de relief est associée à un motif pour son extension spatiale et sa morphologie est décrite par une séquence d'au plus huit noeuds. Sachant que tout motif est entièrement défini par ses deux points extrêmes, la mémoire nécessaire à la détection des formes de relief est donc proportionnelle au nombre de motifs, d'ordre $o(n^2)$.

Le calcul de la relation topologique entre deux formes de relief données se déroule en trois étapes :

1. calculer la matrice 9-intersections (*cf.* Annexe A) ;
2. retrouver la référence de cette matrice dans la table 5.1 ;
3. retrouver la relation topologique correspondante dans la table 5.3.

Ce calcul s'exécute en un temps constant indépendamment de la taille des formes de relief considérées et nécessite une mémoire de taille constante pour stocker les deux tables de référence. Le temps nécessaire au calcul des relations topologiques dans l'ensemble de la silhouette ne dépend donc que du nombre de couples de formes de reliefs dans la silhouette. Comme il ne peut y avoir plus de formes de relief que de motifs, le calcul des relations topologiques s'exécute en un temps polynomial $o(n^4)$. Toutefois, le nombre de formes de relief détectées est, dans la plupart des cas, très inférieur au nombre de motifs, ce qui rend dans la pratique le calcul des relations topologiques moins long que la détection des formes de reliefs.

6.3 Description de dunes sous-marines

Nous prenons comme exemple un ensemble de dunes sous-marines situées dans le chenal menant à l'embouchure de la rivière Trieux dans les Côtes d'Armor (*cf.* figure 6.11). La



Figure 6.11 — Situation géographique des dunes de sables sous-marines aux abords de la rivière Trieux.

structure du relief sous-marin reflète l’action conjuguée de deux facteurs : la sédimentation à l’embouchure de la rivière, d’une part, et les courants sous-marins d’autre part. Ce relief présente le double avantage d’être assez symétrique et simple – l’interprétation selon le sens commun est peu ambiguë – tout en présentant une structure hiérarchique complexe dont l’analyse quantitative n’est pas évidente.

6.3.1 Contexte

La sédimentation et les courants marins n’influencent pas la formation des dunes à la même échelle. Nous pouvons en effet observer à grande échelle une série de dunes et à plus petite échelle les rides qui se développent sur le dos des dunes (*cf.* figure 6.12).

La distinction entre dunes et rides est rendu difficile par leur similarité morphologique. Il est néanmoins possible de faire la différence en considérant leur taille. Mais cette approche suppose que nous définissions plus ou moins arbitrairement une taille au-delà de laquelle nous reconnaissons une dune et en-deçà de laquelle il s’agit d’une ride.

Pour éviter de faire intervenir une constante numérique arbitraire, nous partons du principe qu’un observateur distingue aisément les dunes des rides. Par exemple, la silhouette 1 de la figure 6.13 présente à l’évidence¹ une série de quatre dunes à la surface desquelles se sont développées des rides. L’analyse de cette silhouette par notre modèle – dans la mesure où il a pour ambition de rendre compte de la perception des silhouettes par un observateur – devrait donc mettre en évidence ces quatre dunes.

¹Évidence limitée au contexte de cet exemple. Il n’est pas exclu que, dans un autre contexte, la même silhouette prenne une signification toute autre.

6.3.2 Analyse

Les données que nous utilisons dans cet exemple sont extraites du levé des abords de la rivière du Trieux effectué par la vedette Guillemot en mai 2005. Elles ont servi à la création d'un modèle numérique de terrain d'une résolution de 4 mètres (*cf.* figure 6.12). Les silhouettes 1 et 2 qui nous ont servis dans cet exemple ont été générées à l'aide du logiciel MicroDEM [Guth, 2005].

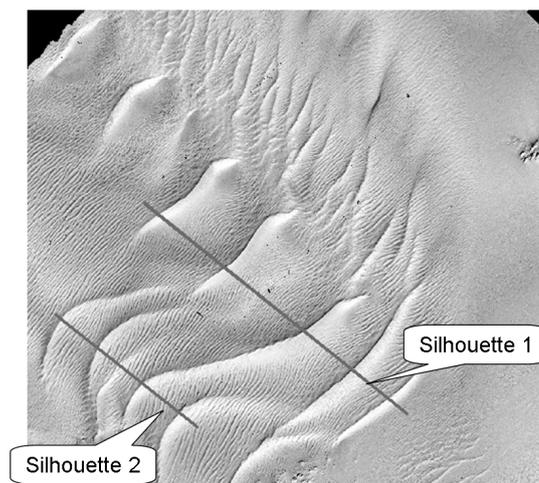


Figure 6.12 — Modèle numérique de terrain des dunes de sables sous-marines et localisation des silhouettes analysées.

6.3.2.1 Construction des catégories

Les dunes et les rides sont morphologiquement équivalentes et leur morphologie est correctement décrite par la séquence (LD, T, RD) . En effet, dans le contexte de cet exemple, toute élévation est, soit une dune, soit une ride. Par conséquent nous définissons une seule catégorie « dune/ride ».

6.3.2.2 Silhouette 1

L'analyse de la *silhouette 1* met en évidence les quatre dunes malgré leur morphologie irrégulière (*cf.* figure 6.13).

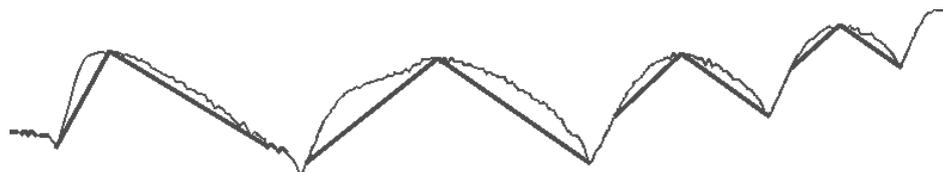


Figure 6.13 — Résultat de l'analyse de la silhouette 1. Les quatre dunes sont mises en évidence.

La description hiérarchique² des formes de reliefs capturées est présentée dans la figure 6.14, que nous proposons d'interpréter à l'aide des deux règles suivantes :

Règle 1 : Une dune contient des rides.

Règle 2 : Une ride est contenue dans une dune.

Il est à noter que, du fait que les dunes aux extrémités gauche et droite de la silhouette sont incomplètes, certaines rides apparaissent au même niveau hiérarchique que les dunes. Nous les ignorons donc en tant qu'informations issues de données incomplètes. Nous retenons néanmoins que la présence de ce type de « bruit » ne perturbe pas l'analyse sur la partie centrale et significative de la silhouette.

Si nous nous concentrons sur la partie significative de la silhouette, nous obtenons, au niveau hiérarchique le plus élevé, quatre formes de relief ayant des composants. Elles correspondent aux quatre dunes que nous souhaitions mettre en évidence. Les autres formes de relief sont des rides isolées et peuvent être ignorées. La figure 6.14 présente l'ensemble des formes de relief capturées et leur organisation mérologique.

Si nous développons la hiérarchie de la dune F_5 (la plus à gauche de la silhouette), nous nous apercevons qu'elle est composée de neuf niveaux hiérarchiques (*cf.* figure 6.15) alors qu'intuitivement nous nous serions attendu à trouver un seul niveau incluant toutes les rides de la dune. En fait, la dune est instanciée à tous les niveaux d'abstraction et, bien que nous ayons fait le choix de considérer chacune de ses instances indépendamment, il s'agit bien de la même entité. Or, à chaque niveau, seules les instances de la dune F_5 ont des composants. Les autres formes de relief sont donc bien des rides selon notre règle.

Il peut arriver cependant qu'une ride contienne elle-même des rides. C'est le cas par exemple de la ride F_{37} sur la dune F_{26} (*cf.* figure 6.14). Elle contient F_{38} et F_{39} . Selon notre définition, nous n'avons pas prévu qu'une ride puisse contenir une autre ride. Cependant, les plus petits détails d'une dune peuvent avoir une morphologie équivalente à une ride. Puisque nous visons à décrire uniquement les dunes et les rides qui les composent, les formes de relief composants les rides sont simplement ignorées, considérant qu'il s'agit de détails non significatifs.

L'extension spatiale de la dune F_5 contient 139 points de mesure, ce qui correspond à une longueur de 556 mètres. A titre de comparaison, les rides détectées ne dépassent pas une longueur de 64 mètres. Ainsi, notre approche qualitative rend compte de la structure multi-échelle d'un ensemble de dunes et distingue des objets de taille différente uniquement selon des critères mérologiques et, donc, sans qu'il soit nécessaire de faire appel à une analyse quantitative de la silhouette.

²Par souci de lisibilité, les extensions et les représentations schématiques sont absentes de cette représentation.

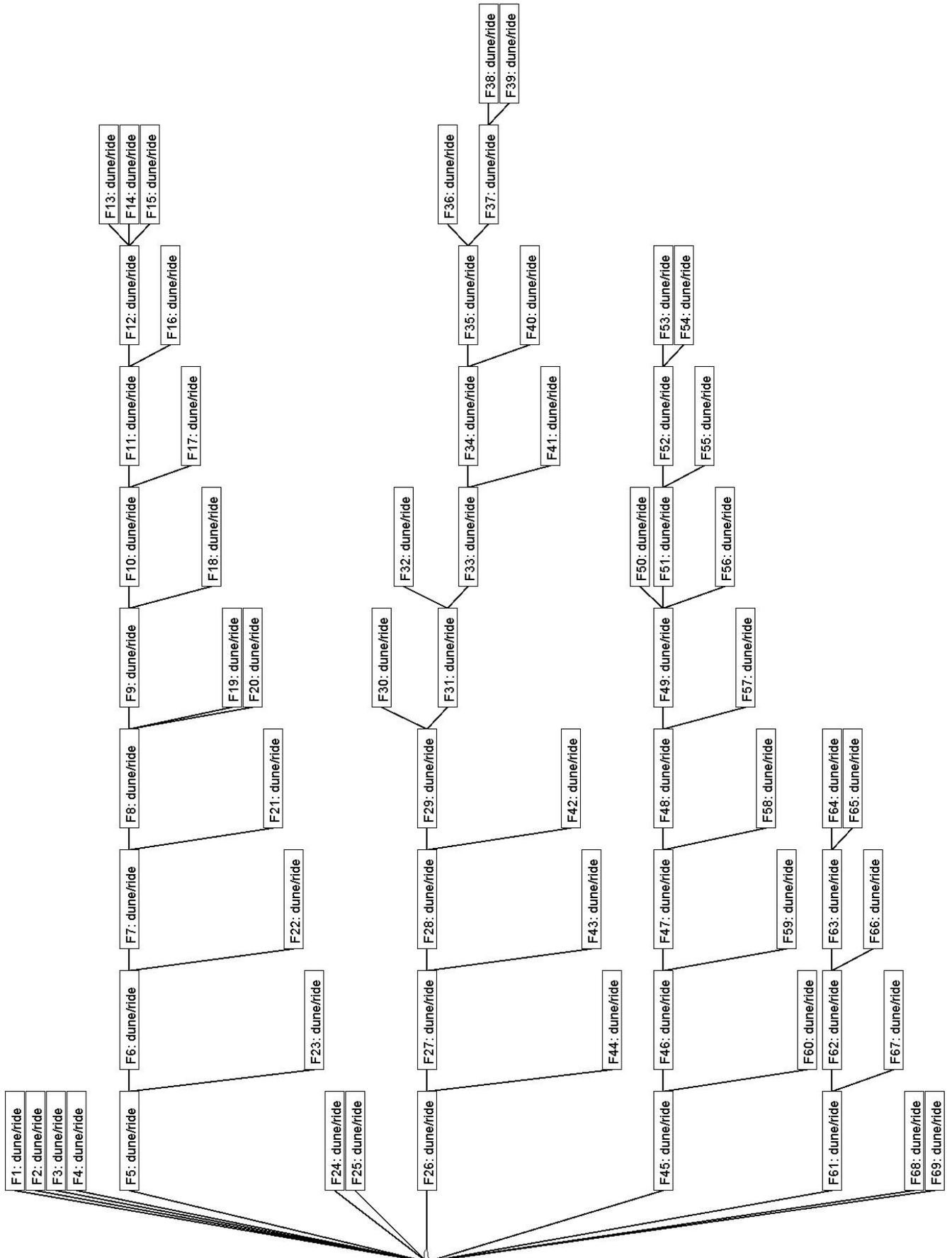
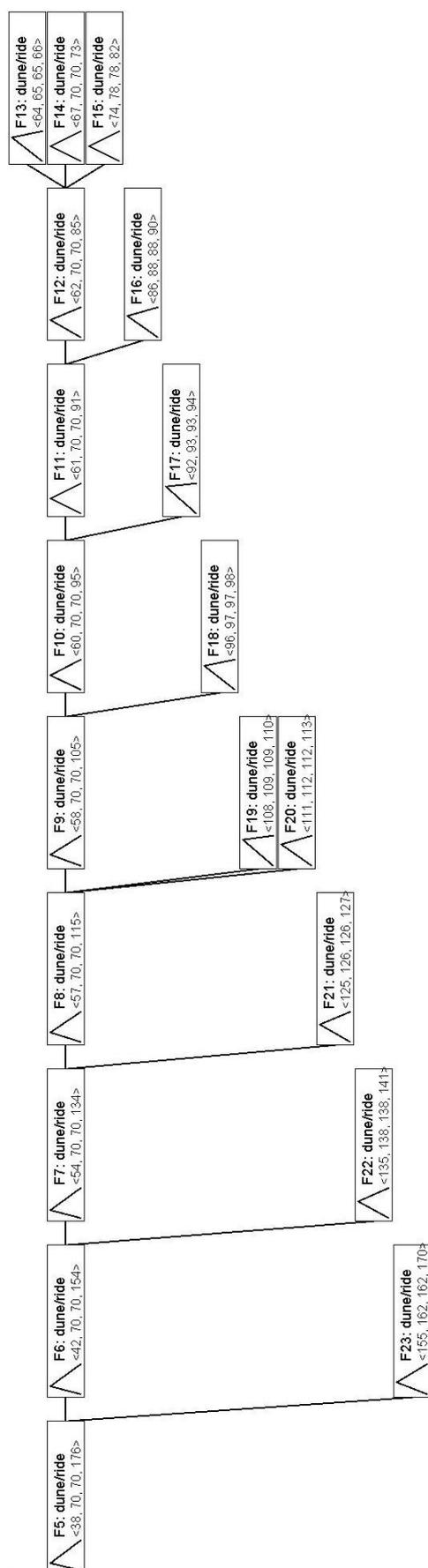


Figure 6.14 — Description hiérarchique de la silhouette 1.

Figure 6.15 — Hiérarchie de la dune F_5

6.3.2.3 Silhouette 2

L'analyse de *la silhouette 2* nous permet de préciser la portée d'une description purement méréotopologique d'une silhouette.

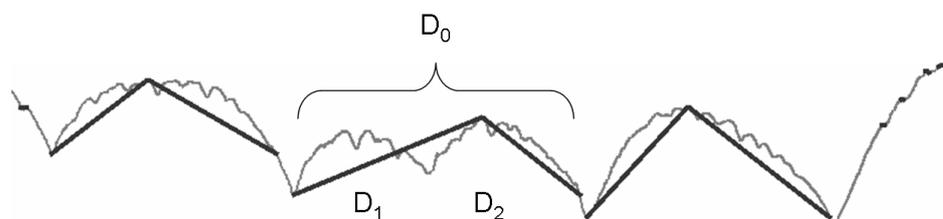


Figure 6.16 — Description de la silhouette 2 dans laquelle trois dunes sont détectées.

Selon les règles que nous avons énoncées pour interpréter la description de la silhouette 1, la forme de relief D_1 n'est pas une dune car elle est contenue par la dune D_0 avec laquelle elle ne peut-être confondue. Cependant, il est intuitivement difficile d'accepter l'idée selon laquelle il s'agit d'une ride.

La notion de taille de forme de relief, que nous avons utilisée pour vérifier quantitativement la cohérence de la description qualitative de la silhouette 1, nous est ici nécessaire. D'un point de vue qualitatif et sémantique, nous sommes amenés à distinguer les petites formes des grandes formes. Il ne s'agit toutefois pas de faire reposer notre modèle sur les ordres de magnitude à l'instar du langage de [Kulik et Egenhofer, 2003] (cf. 4.3.2). Dans notre approche, les formes et leur organisation sont détectées indépendamment de tout critère de taille. Néanmoins, lors de l'interprétation de la description sémantique, certaines distinctions font intervenir un critère de taille. C'est le cas ici où il peut être argumenté que la forme de relief D_1 est du même ordre de grandeur que la dune D_0 et que, par conséquent, D_1 est aussi une dune. Dans ce cas, la forme D_0 contient une dune et ne peut donc pas être elle-même une dune. Elle doit être remplacée dans la description par D_2 , sa représentation au même niveau d'abstraction que D_1 (cf. figure 6.17).

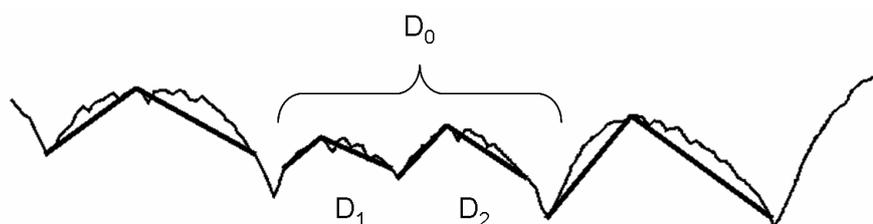


Figure 6.17 — Description de la silhouette une fois l'ambiguïté de la nature de D_1 levée.

6.4 Bilan

Le prototype que nous avons développé nous a permis de mettre en œuvre notre modèle sur des exemples simples. Bien que dans sa version actuelle il illustre bien l'intérêt de notre approche, il n'offre pas des performances suffisantes pour intégrer de grandes quantités de données. Dans cette perspective, il serait nécessaire de reprendre le développement du prototype et d'optimiser les algorithmes actuellement implémentés. Au langage Java, très efficace dans une phase de prototypage, pourrait être substitué le langage C++, plus performant, du moins en ce qui concerne la partie calcul et analyse.

Le premier exemple sur la silhouette de test issue de [Kulik et Egenhofer, 2003] met en avant la facilité avec laquelle un utilisateur peut définir ses propres catégories selon une approche générique. De plus, le choix d'une résolution plus ou moins fine n'influence pas la description aux plus hauts niveaux d'abstraction, ce qui n'est pas le cas des approches que nous avons décrites dans la section 4.3. Notre approche sémantique permet donc, contrairement aux approches à base de primitives, de se rapprocher du raisonnement mené par un utilisateur et de s'affranchir du modèle de représentation des données. En terme applicatif, il devient possible de comparer des données issues de sources différentes sans avoir à mettre les résolutions en cohérence, ce qui est parfois relativement complexe à mettre en œuvre [Ardron, 2002].

L'exemple des dunes sous-marines illustre l'intérêt et la portée de la description mérologique d'une silhouette. En effet, la détection des formes de relief ne fait intervenir aucune autre notion que la morphologie et la relation « est un composant de ». D'autres notions qualitatives, comme la taille, n'interviennent que dans une phase postérieure d'interprétation de la description.

Néanmoins, notre modèle ne se substitue pas aux modèles quantitatifs d'analyse du relief. Conformément aux préconisations de la géographie naïve, il vient compléter les outils d'analyse de relief quantitatifs en proposant un modèle générique pour extraire les formes significatives et leur organisation mérotopologique. Dans ce cadre, il présente l'intérêt de ne pas nécessiter de paramètres de réglage. La silhouette et les catégories définies par l'utilisateur déterminent complètement la description. En ce sens, notre modèle est particulièrement bien adapté pour être intégré dans un modèle plus général d'analyse du relief, incluant éventuellement d'autres méthodes qualitatives ou quantitatives.

Conclusion et perspectives

Nous avons introduit dans cette thèse une nouvelle approche pour la description des reliefs. En nous inscrivant dans le cadre de la géographie naïve et en nous inspirant des principes de perception associés à la notion de sens commun, nous avons développé un modèle qualitatif de description sémantique des reliefs.

Contribution

Les représentations et les raisonnements qualitatifs, largement utilisés en géographie naïve en raison de leur adéquation avec les modes de raisonnement principalement symbolique des individus, permettent de construire des modèles plus tolérants quant à la qualité ou la précision des données que la plupart des modèles quantitatifs. Plusieurs modèles de description qualitative des formes et des silhouettes ont déjà été proposés depuis les codons de [Richards et Hoffman, 1985]. Cependant, l'approche globale reste la même et implique des aller-retours constants entre les représentations quantitatives et qualitatives, ce qui nuit à la capacité de ces modèles à raisonner à un niveau purement symbolique. Nous avons émis l'idée que le problème venait de la nature des primitives considérées, à l'origine des symboles autour desquels s'organise la représentation de la silhouette. Dans les modèles qui nous précèdent, ces primitives sont géométriques, autrement dit, elles sont reliées à une représentation numérique et ne peuvent que difficilement s'en affranchir. C'est pourquoi nous proposons une approche différente, construite autour de primitives sémantiques. Dès lors, il ne s'agit plus de manipuler des primitives géométriques dans un environnement qualitatif mais de passer d'une représentation numérique à une représentation qualitative reposant sur des primitives sémantiques. Pour cela nous nous appuyons sur la notion de saillances, définies comme des discontinuités qualitatives de l'espace qui s'imposent à la perception et comme étant la seule information à partir de laquelle un observateur délimite et caractérise les objets de son environnement.

Primitives sémantiques

Le sens commun ne respecte pas nécessairement les lois physiques et ne s'accorde donc pas toujours avec les prédictions des modèles numériques basés sur ces mêmes lois. De plus, des travaux récents sur les ontologies géographiques ont mis en évidence la nature très subjective des formes de relief. Une montagne, par exemple, n'est pas le produit intentionnel d'un phénomène géographique mais l'interprétation que nous faisons, à un instant donné, d'un élément partiel du relief que nous percevons dans un contexte particulier. Cette part de subjectivité dans la perception s'exprime notamment par des variations importantes entre les corpus sémantiques en usage dans différentes communautés scientifiques ou à travers les divers environnements socio-culturels à travers le monde. L'ensemble des primitives que nous manipulons dans notre modèle ne saurait donc être immuable. Par exemple, selon le contexte, une primitive pourra être une montagne ou une dune. Nous avons même vu qu'à l'intérieur d'un même contexte, une primitive pouvait être soit une dune soit une ride à la surface de cette dune (*cf.* chapitre 6).

Modèle

La possibilité qu'a un utilisateur de décrire des catégories de forme de relief sans faire intervenir un modèle mathématique est l'un des principaux apports de notre approche. En effet, à partir d'une approximation graphique d'une forme, traduite dans notre modèle en une séquence d'intersection (les noeuds) avec la boîte min-max associée à cette forme, un utilisateur peut définir une catégorie comme un plateau ou une vallée. Il lui est possible aussi de construire une catégorie à partir de contraintes simples (les filtres) sur la présence, l'absence ou l'organisation des noeuds, aboutissant ainsi à un ensemble de séquences de noeuds associées à la catégorie.

Topologie

Les relations topologiques qui relient les formes perçues sont des éléments importants de la description d'une silhouette. Cependant, l'imprécision des limites des objets géographiques se traduit par la présence de frontières *fiat*, difficilement interprétables dans le cadre d'une topologie classique. Conjointement à notre modèle, nous proposons une extension de la méthode 9-intersection de [Egenhofer et Herring, 1990] prenant en compte les spécificités des frontières *fiat*. Nous nous apercevons que, d'une part cette topologie est tout à fait cohérente et que, d'autre part, elle rend compte de l'indétermination de relations topologiques entre des objets *fiat*. Elle nous a permis aussi d'enrichir la notion de saillance en distinguant les saillances intérieures – ce qui caractérise la forme – des saillances frontières – ce qui délimite la forme.

Méréologie

Nous nous sommes aussi intéressé à l'aspect méréologique des relations spatiales. Notre réflexion a porté sur la capacité de notre modèle à rendre compte d'une structure hiérarchique d'un relief. Pour cela, nous avons défini notre méréologie comme une sous-théorie de notre topologie et le résultat qu'affiche notre modèle est une représentation méréologique de l'organisation des formes perçues dans la silhouette. L'application de notre modèle à la description de dunes sous-marines a souligné l'intérêt d'une telle représentation pour la mise en évidence de structures multi-échelles.

Perspectives

Le modèle que nous avons développé montre bien l'adéquation de notre approche fondée, non plus sur des primitives géométriques mais sur des primitives sémantiques, à la description de silhouettes. Le résultat de l'analyse d'une silhouette est une structure méréotopologique dans laquelle on retrouve les formes de relief significatives, leur organisation méréologique et les relations topologiques qui les lient.

Les exemples du chapitre 6 montrent, d'une part qu'une telle structure permet une description à différents niveaux d'abstraction et, d'autre part, que la morphologie et la méréotopologie suffisent souvent à l'extraire. Ainsi, notre modèle s'affranchit d'éventuels approximations ou de biais numériques induits par des notions non plus sémantiques mais métriques (e.g., taille, distance).

Néanmoins, le raisonnement qualitatif ne se réduit pas à la morphologie et la méréotopologie. La perception d'une silhouette par un observateur, et la description qu'il en fait, font intervenir des modificateurs linguistiques : une petite montagne, une profonde vallée. Ces modificateurs, associés en première analyse à des grandeurs métriques permettent d'affiner considérablement les descriptions. Toutefois, nous avons vu dans le chapitre 6 que la notion de taille, par exemple, n'intervenait que postérieurement à la description sémantique. Le rayon d'action de notre modèle est alors clairement délimité. Il s'inscrit dans un modèle plus large, dans lequel la description qualitative d'un relief exploite l'ensemble des formes significatives et la structure méréologique.

La problématique des interactions entre un utilisateur et un SIG est une piste applicative pertinente pour notre modèle. En effet, si nous supposons accessible des informations sur le contexte dans lequel évolue l'observateur, il est envisageable de localiser un relief dans un modèle numérique de terrain à partir d'une description verbale et, inversement, de donner à l'utilisateur une description sémantique d'un relief à partir d'un modèle numérique de terrain. Cette piste présente à première vue deux défis majeurs. Tout d'abord, il faut disposer d'un analyseur lexico-sémantique pour extraire d'un énoncé en langage naturel une description sémantique avec notre modèle. Inversement, nous devons être capable de générer un énoncé à partir de l'ensemble des formes détectées et de la méréotopologie. Une collaboration avec

des spécialistes du traitement automatique du langage naturel est pour cela nécessaire.

Un SIG devient intuitif lorsque l'effort d'apprentissage préalable à son utilisation devient négligeable. C'est à cette condition que les systèmes d'aide à la conduite et les logiciels de calcul d'itinéraire routier conquièrent un public de plus en plus large. Néanmoins, il est remarquable que l'« information intuitive » accessible au plus grand nombre est essentiellement cartographique et repose sur une structure urbaine ou routière. La localisation de l'utilisateur et, ce faisant, la détermination de son environnement immédiat repose sur la technologie GPS. Or, dans certains cas, cette information n'est pas disponible, par exemple lorsqu'une scène doit être localisée à partir d'une image, d'une description ou tout simplement lorsque l'utilisateur n'est pas équipé d'un GPS en état de marche. Il est alors nécessaire de faire appel à des points de repère correspondant à des objets connus préalablement géolocalisés, e.g., une rue, un immeuble, un lac. L'exemple de la figure 3 nous montre toutefois que, dans certains cas, cela n'est pas suffisant. La capacité à interpréter la description de son environnement en utilisant des termes du langage courant et à la faire correspondre aux informations stockées dans des bases de données géographiques est un facteur caractéristique d'un SIG intuitif. Notre modèle, bien que sa portée se réduise à la description du relief, participe en ce sens à l'évolution des SIG vers des interfaces de plus en plus intuitives.

Une seconde classe d'applications envisageable concerne les nombreuses communautés scientifiques qui sont amenées à décrire des silhouettes de terrain, e.g., géomorphologie, géologie, vulcanologie, océanographie physique. D'une part, nous proposons un outil simple et intuitif pour la description du relief et la capture de structures perceptibles (*cf.* 6.3). D'autre part, en introduisant un modèle générique pour la description des reliefs, nous pensons qu'il est possible de faciliter l'interopérabilité entre disciplines. C'est pourquoi nous pensons que le développement de notre approche passe par la collaboration avec des thématiciens concernés par l'étude du relief.

Un autre défi concerne la généralisation de notre approche. En nous restreignant à la description du relief, nous faisons abstraction d'autres éléments remarquables de l'environnement : la couverture végétale, le bâti, les routes, etc.. D'autres modèles de description sémantiques sont nécessaires pour prendre en compte les différents aspects de l'espace qui nous entoure. L'ambition de cette thèse est d'avoir ouvert une voie vers une approche essentiellement sémantique de la description de l'ensemble des aspects de la perception visuelle d'un individu.

A

Calcul des relations topologiques

Cette annexe présente les tableaux des conditions d'intersection nécessaires à la construction de la table de référence 5.2 utilisée pour le calcul des relations topologiques.

Selon que les deux formes de relief considérées ont ou n'ont pas de saillances intérieures, nous distinguons trois cas.

1. **Les deux formes de relief ont un intérieur :** soient deux formes de relief $F \equiv \langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle$ et $G \equiv \langle g_1, g_2, g_3, g_4 \rangle$ de la silhouette $S = (p_t)_{t=1, \dots, n}$. Les conditions d'intersection sont données dans le tableau suivant. L'intersection $F^- \cap G^- \neq \emptyset$ est une tautologie (T).

	∂G	G°	G^-
∂F	$(g_1 < f_2 \wedge f_1 < g_2)$ $\vee (g_3 < f_2 - 1 \wedge f_1 \leq g_4)$ $\vee (g_1 \leq f_4 \wedge f_3 < g_2 - 1)$ $\vee (g_3 < f_4 \wedge f_3 < g_4)$	$(g_2 < f_2 \wedge f_1 \leq g_3)$ $\vee (g_2 \leq f_4 \wedge f_3 < g_3)$	$f_1 < g_1$ $\vee g_4 < f_4$
F°	$(f_2 < g_2 \wedge g_1 \leq f_3)$ $\vee (f_2 \leq g_4 \wedge g_3 < f_3)$	$(f_2 \leq g_3 \wedge g_2 \leq f_3)$	$f_2 < g_1$ $\vee g_4 < f_3$
F^-	$g_1 < f_1$ $\vee f_4 < g_4$	$g_2 < f_1$ $\vee f_4 < g_3$	T

2. **Une seule des deux formes de relief a un intérieur :** soient deux formes de relief $F \equiv \langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle$ et $G \equiv \langle g_1, g_4 \rangle$ de la silhouette $S = (p_t)_{t=1, \dots, n}$. Les conditions d'intersection sont données dans le tableau suivant. L'intersection $F^- \cap G^- \neq \emptyset$ est une tautologie (T). Toute intersection avec l'intérieur de G est impossible (\perp).

	∂G	G°	G^-
∂F	$(f_1 \leq g_4 \wedge g_1 < f_2)$ $\vee (f_3 < g_4 \wedge g_1 \leq f_4)$	\perp	$f_1 < g_1$ $\vee g_4 < f_4$
F°	$f_2 \leq g_4 \wedge g_1 \leq f_3$	\perp	$f_2 < g_1 \vee g_4 < f_3$
F^-	$g_1 < f_1 \vee f_4 < g_4$	\perp	T

3. **Aucune des deux formes de relief n'a intérieur :** soient deux formes de relief sans intérieur $F \equiv \langle f_1, f_4 \rangle$ et $G \equiv \langle g_1, g_4 \rangle$ de la silhouette $S = (p_t)_{t=1, \dots, n}$. Les conditions

d'intersection sont données dans le tableau suivant. L'intersection $F^- \cap G^- \neq \emptyset$ est une tautologie (T). Toute intersection avec un intérieur est impossible (\perp).

	$\partial \mathbf{G}$	\mathbf{G}°	\mathbf{G}^-
$\partial \mathbf{F}$	$f_1 \leq g_4 \wedge g_1 \leq f_4$	\perp	$f_1 < g_1 \vee g_4 < f_4$
\mathbf{F}°	\perp	\perp	\perp
\mathbf{F}^-	$g_1 < f_1 \vee f_4 < g_4$	\perp	T

Détail des calculs

Le calcul des conditions d'intersection se ramène à comparer les bornes des intervalles de points de mesure sachant que $[a; b] \cap [c; d] \neq \emptyset \Leftrightarrow a \leq d \wedge c \leq b$.

1. **Les deux formes de relief ont un intérieur :** soient deux formes de relief $F \equiv \langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle$ et $G \equiv \langle g_1, g_2, g_3, g_4 \rangle$ de la silhouette $S = (p_t)_{t=1, \dots, n}$.

$$\begin{aligned}
 \partial^L F &= [f_1; f_2[= [f_1; f_2 - 1] & \partial^L G &= [g_1; g_2[= [g_1; g_2 - 1] \\
 \partial^R F &=]f_3; f_4] = [f_3 + 1; f_4] & \partial^R G &=]g_3; g_4] = [g_3 + 1; g_4] \\
 F^\circ &= [f_2; f_3] & G^\circ &= [g_2; g_3] \\
 F^- &= [p_0; f_1[\cup]f_4; p_\infty] & G^- &= [p_0; g_1[\cup]g_4; p_\infty] \\
 &= [p_0; f_1 - 1] \cup [f_4 + 1; p_\infty] & &= [p_0; g_1 - 1] \cup [g_4 + 1; p_\infty]
 \end{aligned}$$

(a) $\underline{\partial \mathbf{F} \cap \partial \mathbf{G}} \neq \emptyset \Leftrightarrow \partial^L F \cap \partial^L G \neq \emptyset \vee \partial^L F \cap \partial^R G \neq \emptyset \vee \partial^R F \cap \partial^L G \neq \emptyset \vee \partial^R F \cap \partial^R G \neq \emptyset$

$$\begin{aligned}
 \partial^L F \cap \partial^L G \neq \emptyset &\Leftrightarrow f_1 < g_2 \wedge g_1 < f_2 \\
 \partial^L F \cap \partial^R G \neq \emptyset &\Leftrightarrow g_3 < f_2 - 1 \wedge f_1 \leq g_4 \\
 \partial^R F \cap \partial^L G \neq \emptyset &\Leftrightarrow g_1 \leq f_4 \wedge f_3 < g_2 - 1 \\
 \partial^R F \cap \partial^R G \neq \emptyset &\Leftrightarrow g_3 < f_4 \wedge f_3 < g_4
 \end{aligned}$$

(b) $\underline{\partial \mathbf{F} \cap \mathbf{G}^\circ} \neq \emptyset \Leftrightarrow \partial^L F \cap G^\circ \neq \emptyset \vee \partial^R F \cap G^\circ \neq \emptyset$

$$\begin{aligned}
 \partial^L F \cap G^\circ \neq \emptyset &\Leftrightarrow g_2 < f_2 \wedge f_1 \leq g_3 \\
 \partial^R F \cap G^\circ \neq \emptyset &\Leftrightarrow g_2 \leq f_4 \wedge f_3 < g_3
 \end{aligned}$$

(c) $\underline{\partial \mathbf{F} \cap \mathbf{G}^-} \neq \emptyset \Leftrightarrow \partial^L F \cap G^- \neq \emptyset \vee \partial^R F \cap G^- \neq \emptyset$

$$\begin{aligned}
 \partial^L F \cap G^- \neq \emptyset &\Leftrightarrow f_1 < g_1 \vee g_4 < f_2 - 1 \\
 \partial^R F \cap G^- \neq \emptyset &\Leftrightarrow g_4 < f_4 \vee f_3 < g_1 - 1
 \end{aligned}$$

or, $f_3 < g_1 - 1 \Rightarrow f_1 < g_1$ et $g_4 < f_2 - 1 \Rightarrow g_4 < f_4$

donc $\partial F \cap G^- \neq \emptyset \Leftrightarrow f_1 < g_1 \vee g_4 < f_4$

(d) $\underline{\mathbf{F}^\circ \cap \partial \mathbf{G}} \neq \emptyset \Leftrightarrow F^\circ \cap \partial^L G \neq \emptyset \vee F^\circ \cap \partial^R G \neq \emptyset$

$$\begin{aligned}
 F^\circ \cap \partial^L G \neq \emptyset &\Leftrightarrow f_2 < g_2 \wedge g_1 \leq f_3 \\
 F^\circ \cap \partial^R G \neq \emptyset &\Leftrightarrow f_2 \leq g_4 \wedge g_3 < f_3
 \end{aligned}$$

(e) $\underline{\mathbf{F}^\circ \cap \mathbf{G}^\circ} \neq \emptyset \Leftrightarrow f_2 \leq g_3 \wedge g_2 \leq f_3$

(f) $\underline{\mathbf{F}^\circ \cap \mathbf{G}^-} \neq \emptyset \Leftrightarrow f_2 < g_1 \vee g_4 < f_3$

- (g) $\underline{\mathbf{F}^- \cap \partial \mathbf{G}} \neq \emptyset \Leftrightarrow F^- \cap \partial^L G \neq \emptyset \vee F^- \cap \partial^R G \neq \emptyset$
 $F^- \cap \partial^L G \neq \emptyset \Leftrightarrow g_1 < f_1 \vee f_4 < g_2 - 1$
 $F^- \cap \partial^R G \neq \emptyset \Leftrightarrow f_4 < g_4 \vee g_3 < f_1 - 1$
- (h) $\underline{\mathbf{F}^- \cap \mathbf{G}^\circ} \neq \emptyset \Leftrightarrow g_2 < f_1 \vee f_4 < g_3$
- (i) $\underline{\mathbf{F}^- \cap \mathbf{G}^-} \neq \emptyset \Leftrightarrow \top$

2. **Une seule des deux formes de relief a un intérieur :** soient deux formes de relief $F \equiv \langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle$ et $G \equiv \langle g_1, g_4 \rangle$ de la silhouette $S = (p_t)_{t=1, \dots, n}$.

$$\begin{array}{ll}
 \partial^L F & = [f_1; f_4[= [f_1; f_2 - 1] \\
 \partial^R F & =]f_3; f_4] = [f_3 + 1; f_4] \\
 F^\circ & = [f_2; f_3] \\
 F^- & = [p_0; f_1[\cup]f_4; p_\infty] \\
 & = [p_0; f_1 - 1] \cup [f_4 + 1; p_\infty]
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ll}
 \partial G & = [g_1; g_4] \\
 G^\circ & = \emptyset \\
 G^- & = [p_0; g_1[\cup]g_4; p_\infty] \\
 & = [p_0; g_1 - 1] \cup [g_4 + 1; p_\infty]
 \end{array}$$

- (a) $\underline{\partial \mathbf{F} \cap \partial \mathbf{G}} \neq \emptyset \Leftrightarrow \partial^L F \cap \partial G \neq \emptyset \vee \partial^R F \cap \partial G \neq \emptyset$
 $\partial^L F \cap \partial G \neq \emptyset \Leftrightarrow f_1 \leq g_4 \wedge g_1 < f_2$
 $\partial^R F \cap \partial G \neq \emptyset \Leftrightarrow f_3 < g_4 \wedge g_1 \leq f_4$
- (b) $\underline{\partial \mathbf{F} \cap \mathbf{G}^-} \neq \emptyset \Leftrightarrow \partial^L F \cap G^- \neq \emptyset \vee \partial^R F \cap G^- \neq \emptyset$
 $\partial^L F \cap G^- \neq \emptyset \Leftrightarrow f_1 < g_1 \vee g_4 < f_2 - 1$
 $\partial^R F \cap G^- \neq \emptyset \Leftrightarrow g_4 < f_4 \vee f_3 < g_1 - 1$
- (c) $\underline{\mathbf{F}^\circ \cap \partial \mathbf{G}} \neq \emptyset \Leftrightarrow f_2 \leq g_4 \wedge g_1 \leq f_3$
- (d) $\underline{\mathbf{F}^\circ \cap \mathbf{G}^-} \neq \emptyset \Leftrightarrow f_2 < g_1 \vee g_4 < f_3$
- (e) $\underline{\mathbf{F}^- \cap \partial \mathbf{G}} \neq \emptyset \Leftrightarrow g_1 < f_1 \vee f_4 < g_4$
- (f) $\underline{\mathbf{F}^- \cap \mathbf{G}^-} \neq \emptyset \Leftrightarrow \top$

3. **Aucune des deux formes de relief n'a intérieur :** soient deux formes de relief $F \equiv \langle f_1, f_4 \rangle$ et $G \equiv \langle g_1, g_4 \rangle$ de la silhouette $S = (p_t)_{t=1, \dots, n}$.

$$\begin{array}{ll}
 \partial F & = [f_1; f_4] \\
 F^\circ & = \emptyset \\
 F^- & = [p_0; f_1[\cup]f_4; p_\infty] \\
 & = [p_0; f_1 - 1] \cup [f_4 + 1; p_\infty]
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ll}
 \partial G & = [g_1; g_4] \\
 G^\circ & = \emptyset \\
 G^- & = [p_0; g_1[\cup]g_4; p_\infty] \\
 & = [p_0; g_1 - 1] \cup [g_4 + 1; p_\infty]
 \end{array}$$

- (a) $\underline{\partial \mathbf{F} \cap \partial \mathbf{G}} \neq \emptyset \Leftrightarrow f_1 \leq g_4 \wedge g_1 \leq f_4$
- (b) $\underline{\partial \mathbf{F} \cap \mathbf{G}^-} \neq \emptyset \Leftrightarrow f_1 < g_1 \vee g_4 < f_4$
- (c) $\underline{\mathbf{F}^- \cap \partial \mathbf{G}} \neq \emptyset \Leftrightarrow g_1 < f_1 \vee f_4 < g_4$
- (d) $\underline{\mathbf{F}^- \cap \mathbf{G}^-} \neq \emptyset \Leftrightarrow \top$

Nous présentons dans cette annexe les principaux algorithmes sur lesquels repose l'implantation du prototype.

B.1 Séquence de saillances

Chaque motif d'une silhouette est décrit par une séquence de saillances. Elles sont calculées à partir des intersections du motif avec sa boîte min-max.

B.1.1 Construction de la boîte min-max

Étant donné un motif, l'algorithme 1 calcule sa boîte min-max.

Algorithme 1 *construitBoite*($M_{i,j} = (p_t)_{t=i,\dots,j}$: motif)

```
{
  // calcul de la boîte min-max
  soit  $x_{min} := \min\{x_t\}_{p_t=(x_t,z_t)\in M_{i,j}}$ 
  soit  $x_{max} := \max\{x_t\}_{p_t=(x_t,z_t)\in M_{i,j}}$ 
  soit  $z_{min} := \min\{z_t\}_{p_t=(x_t,z_t)\in M_{i,j}}$ 
  soit  $z_{max} := \max\{z_t\}_{p_t=(x_t,z_t)\in M_{i,j}}$ 
  soit  $B_{i,j} := (x_{min}, z_{min}, x_{max}, z_{max})$ 
  retourne  $B_{i,j}$ 
}
```

B.1.2 Calcul des intersections

L'algorithme 2 associe à un point de mesure du motif :

- un nœud $v \in \mathcal{V}$ si le point de mesure intersecte la boîte min-max ;
- la valeur \emptyset sinon.

Algorithme 2 *intersection*($p_k = (x_k, z_k)$: point de mesure, $B = (x_{min}, z_{min}, x_{max}, y_{max})$: boîte min-max)

```
{
```

```

// Calcul v, le noeud associé au point de mesure p_k dans B
si x_k = x_min et z_k = z_max alors v ← LT
sinon si x_min < x_k < x_max et z_k = z_max alors v ← T
sinon si x_k = x_max et z_k = z_max alors v ← RT
sinon si x_k = x_max et z_min < z_k < z_max alors v ← R
sinon si x_k = x_max et z_k = z_min alors v ← RD
sinon si x_min < x_k < x_max et z_k = z_min alors v ← D
sinon si x_k = x_min et z_k = z_min alors v ← LD
sinon si x_min < x_k < x_max et z_min < z_k < z_max alors v ← L
sinon v ← ∅
retourne v
}

```

B.1.3 Calcul des séquences de saillances

L'algorithme 3 construit la séquence de saillances associée à un motif.

Algorithme 3 Saillances($M_{i,j}$: motif)

```

{
  // construit la boîte min-max
  B_{i,j} ← construitBoite(M_{i,j})

  // calcul des intersections et des saillances
  pour p_k = (x_k, z_k) de p_i à p_j faire
  {
    v_k ← intersection(p_k, B_{i,j})
    s_k ← ⟨{p_k}, v_k, B_{i,j}⟩
  }

  // Initie la séquence de saillances avec toutes les intersections
  soit Saillance(M_{i,j}) := (s_i, ..., s_j)

  // Si deux saillances consécutives sont décrites par le même noeud
  // alors il s'agit d'une seule et même saillance
  pour tout v_k de v_{i+1} à v_j faire
  {
    si v_k = v_{k-1} alors
    {
      Saillance(M_{i,j}) ← Saillance(M_{i,j}) - {v_k}
      Loc(s_{k-1}) ← Loc(s_{k-1}) ∪ {p_k}
    }
  }
}

// si une série de trois saillances consécutives
// forme un raccourci, la saillance du milieu est supprimée

```

```

pour tout  $s_k \in \text{Saillance}(M_{i,j})$  faire
    si la séquence  $(s_{k-1}, s_k, s_{k+1})$  est un raccourci alors
         $\text{Saillance}(M_{i,j}) \leftarrow \text{Saillance}(M_{i,j}) - \{s_k\}$ 
    retourne  $\text{Saillance}(M_{i,j})$ 
}

```

B.2 Capture des formes de relief

Étant donné une silhouette et un ensemble de catégories, l'algorithme 4 fournit un ensemble de formes de relief. La silhouette est décrite par un ensemble ordonné de points de mesure. Une catégorie est définie par un ensemble de séquences de nœuds. Chaque forme de relief capturée est décrite par une extension spatiale et une morphologie. Le résultat de l'algorithme est une liste Λ_S de formes de relief.

Algorithme 4 *captureFormesDeRelief*(S : silhouette, SC : ensemble de catégories)

```

{
    soit  $\Omega := \emptyset$ 
    // extraire les motifs qui ont un sens
    pour chaque point de mesure  $p_i$  de  $S$  faire
    {
        si  $\exists C \in SC$  tel que  $S(M_{i,j}) \in C$  alors
        {
             $\Omega \leftarrow \Omega \cup M_{i,j}$ 
        }
    }

    // initie un groupe par motif
    pour chaque motif  $M$  de  $\Omega$  faire
    {
         $\mathcal{M}(M) \leftarrow \{M\}$ 
    }

    // Calcule les composants directs de chaque motif
    pour chaque motif  $M$  de  $\Omega$  faire
    {
         $CD(M) \leftarrow \{N \mid \text{Extent}(N) \subseteq \text{Extent}(M) \wedge \nexists L, N \subset L \subset M\}$ 
    }

    // regroupe les motifs
    // si deux motifs sont associés à une même forme de relief
    // sans que l'un soit composant directe de l'autre
    // ils sont remplacés dans  $\Omega$  par leur union
    pour chaque couple  $M \neq N$  de  $\Omega$  faire
    {

```

```

// si M et N sont morphologiquement équivalents
si ( $S(M) = S(N)$ )
// et, soit partagent leurs saillances intérieures
// sans que l'un soit composant directe de l'autre
et ( $SaillanceInterieure(M) = SaillanceInterieure(N) \neq \emptyset$ 
et  $N \notin CD(M)$  et  $M \notin CD(N)$ )
// soit n'ont pas de saillances intérieurs mais partagent au moins un point
ou ( $SaillanceInterieure(M) = SaillanceInterieure(N) = \emptyset$  et  $M \cap N \neq \emptyset$ ) alors
{
    // M et N sont remplacés par leur union
     $\mathcal{M}(M) \leftarrow \mathcal{M}(M) \cup \mathcal{M}(N)$ 
    // on retire de  $\Omega$  les motifs qui ont été déposés dans le groupe d'un autre motif
     $\Omega \leftarrow \Omega - \{N\}$ 
}
}

// construit l'ensemble  $\Lambda_S$  des formes de relief
soit  $\Lambda_S := \emptyset$ 
// les formes de relief sont numérotées  $F_1, F_2, \dots$ 
soit  $i := 1$ 
pour chaque motif  $M$  de  $\Omega$  faire
{
    //  $F_i$  la forme de relief associée à l'ensemble de motifs  $\mathcal{M}(M)$ 
    Soit  $F_i$  une forme de relief
     $Extent(F_i) \leftarrow \bigcup_{N \in \mathcal{M}(M)} N$ 
     $Saillance(F) \leftarrow Saillance(M)$ 
     $\Lambda_S \leftarrow \Lambda_S \cup \{F_i\}$ 
     $i \leftarrow i + 1$ 
}
retourne  $\Lambda_S$ 
}

```

Bibliographie

- [Alain, 2002] Alain (2002). *Les Passions et la Sagesse*. Bibliothèque de la Pléiade. Gallimard.
- [Ardron, 2002] Ardron, J. (2002). A GIS recipe for determining benthic complexity. In Breman, J., éditeur, *Marine Geography, GIS for the Oceans and Seas*, pp 169–175. ESRI Press.
- [Arkwright et Cadoret, 2005] Arkwright, A. et Cadoret, A. (2005). *Analyse qualitative des fonds marins*. Rapport de projet d’élèves ingénieurs, École navale, Lanvéoc-Poulmic, France.
- [Asher et Vieu, 1995] Asher, N. et Vieu, L. (1995). Toward a Geometry of Common Sense : A Semantics and a Complete Axiomatization of Mereotopology. In *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-95)*, Montreal, Canada.
- [Attneave, 1971] Attneave, F. (1971). Multistability in perception. *Scientific American*, 225(6) :63–71.
- [Attneave et Arnoult, 1966] Attneave, F. et Arnoult, M. (1966). The quantitative study of shape and pattern perception. In Uhr, L., éditeur, *Pattern Recognition*, pp 123–141. John Wiley.
- [Baum, 1991] Baum, J. D. (1991). *Elements of Point Set Topology*. Dover Publications.
- [Bennett, 1994] Bennett, B. (1994). Spatial Reasoning with Propositional Logics. In *Proceedings of the 4th International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR’94)*, pp 51–62, San Francisco, CA, USA. Morgan Kaufmann.
- [Bertin, 1973] Bertin, J. (1973). *Sémiologie graphique*. Gauthier-Villars.
- [Biederman, 1987] Biederman, I. (1987). Recognition-by-components : A theory of human image understanding. *Psychological Review*, 84 :115–147.
- [Bishr, 1998] Bishr, Y. (1998). Overcoming the semantic and other barriers to GIS interoperability. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(4) :299–314.
- [Borgo et al., 1996] Borgo, S., Guarino, N., et Masolo, C. (1996). A pointless theory of space based on strong connection and congruence. In *Proceedings of the 5th International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR’96)*, pp 220–229.
- [Bourbaki, 1990] Bourbaki, N. (1990). *Topologie générale*. Masson.

- [Brentano, 1988] Brentano, F. C. (1988). *Philosophical Investigations on Space, Time, and the Continuum*. Croom Helm.
- [Casati, 2001] Casati, R. (2001). Intuitive topology. In Chadha, M. et Raina, A. K., éditeurs, *Basic Objects : Case Studies in Theoretical Primitives*. Indian Institute of Advanced Studies Press, Shimla, India.
- [Chang *et al.*, 2002] Chang, C. C., Chen, I. Y., et Huang, Y. S. (2002). Hand pose recognition using curvature scale space. In *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition*, volume 2, pp 386–389, Quebec, Canada.
- [Chevriaux *et al.*, 2005] Chevriaux, Y., Saux, E., et Claramunt, C. (2005). A landform-based approach for the representation of terrain silhouettes. In *Proceedings of the 13th ACM International Symposium on Advances in Geographical Information Systems*, pp 260–266, Bremen.
- [Chorowicz et Deroin, 2003] Chorowicz, J. et Deroin, J.-P. (2003). *La télédétection et la cartographie géomorphologique et géologique*. Collection Géoscience.
- [Cinque et Lombardi, 1995] Cinque, L. et Lombardi, L. (1995). Shape description and recognition by a multiresolution approach. *Image and Vision Computing*, 13(8) :599–607.
- [Claramunt et Thériault, 1995] Claramunt, C. et Thériault, M. (1995). Managing Time in GIS : An Event-Oriented Approach. In *Proceedings of the International Workshop on Temporal Databases : Recent Advances in Temporal Databases*, pp 23–42. Springer-Verlag London, UK.
- [Clarke, 1981] Clarke, B. L. (1981). A calculus of individuals based on “connection”. *Notre Dame Journal of Formal Logic*, 22(3) :204–218.
- [Clarke, 1985] Clarke, B. L. (1985). Individual and points. *Notre Dame Journal of Formal Logic*, 26(1) :61–75.
- [Clementini et Di Felice, 1997] Clementini, E. et Di Felice, P. (1997). A global framework for qualitative shape description. *Geoinformatica*, 1(1) :11–27.
- [Clementini *et al.*, 1993] Clementini, E., Di Felice, P., et van Oosterom, P. (1993). A small set of formal topological relationships for end-user interaction. In Abel, D. et Ooi, B., éditeurs, *Proceedings of the Third International Symposium on Advances in Spatial Databases (SSD'93)*, volume 692 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp 277–295, Singapore. Springer-Verlag.
- [Cohn et Hazarika, 2001] Cohn, A. G. et Hazarika, S. M. (2001). Qualitative spatial representation and reasoning : An overview. *Fundamenta Informaticae*, 43 :2–32.
- [Combaluzier, 1961] Combaluzier, C. (1961). *Introduction à la Géologie*. Éditions du Seuil.
- [Couclelis, 1988] Couclelis, H. (1988). The truth seekers : geographers in search of the human world. In Golledge, R., Couclelis, H., et Gould, P., éditeurs, *A Ground for Common Search*, pp 148–155. The Santa Barbara Geographical Press, Santa Barbara.

- [Couclelis, 1992] Couclelis, H. (1992). People manipulate objects (but cultivate fields) : Beyond the raster-vector debate in gis. In Frank, A. U., Campari, I., et Formentini, U., éditeurs, *Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space*, Lecture Notes in Computer Sciences, pp 67–77. Springer-Verlag, New-York.
- [Davis, 1990] Davis, E. (1990). *Representations of Commonsense Knowledge*. Morgan Kaufmann Publisher, San Mateo, California.
- [de Laguna, 1922] de Laguna, T. (1922). Point, line, and surface, as sets of solids. *The Journal of Philosophy*, 19(17) :449–461.
- [Dehn et al., 2001] Dehn, M., Gärtner, H., et Dikau, R. (2001). Principles of semantic modeling of landform structures. *Computers & Geosciences*, 8 :1005–1010.
- [Depeau, 2006] Depeau, S. (2006). De la représentation sociale à la cognition spatiale et environnementale : La notion de « représentation » en psychologie sociale et environnementale. *ESO*, 25 :7–17.
- [Dixmier, 1989] Dixmier, J. (1989). *Topologie générale*. PUF.
- [Douglas et Peucker, 1973] Douglas, D. et Peucker, T. (1973). Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *The Canadian Cartographer*, 10(2) :112–122.
- [Egenhofer, 1989] Egenhofer, M. J. (1989). A formal definition of binary topological relationships. *Lecture Notes in Computer Science*, 367 :457–472.
- [Egenhofer et al., 1994] Egenhofer, M. J., Clementini, E., et Di Felice, P. (1994). Topological relations between regions with holes. *International Journal of Geographical Information Systems*, 8(2) :129–142.
- [Egenhofer et Franzosa, 1991] Egenhofer, M. J. et Franzosa, R. D. (1991). Point-set topological spatial relations. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(2) :161–174.
- [Egenhofer et Herring, 1990] Egenhofer, M. J. et Herring, J. (1990). A mathematical framework for the definition of topological relationships. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Data Handling (SDH'90)*, pp 803–813.
- [Egenhofer et Herring, 1992] Egenhofer, M. J. et Herring, J. (1992). *Categorizing Binary Topological Relations Between Regions, Lines, and Points in Geographic Databases*. Rapport technique, Department of Surveying Engineering, University of Maine, USA.
- [Egenhofer et Mark, 1995] Egenhofer, M. J. et Mark, D. M. (1995). Naive geography. In Frank, A. U. et Kuhn, W., éditeurs, *COSIT'95*, volume 988 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp 1–15. Springer-Verlag, Semmering, Autriche.
- [Egenhofer et Sharma, 1993] Egenhofer, M. J. et Sharma, J. (1993). Topological relations between regions in \mathbb{R}^2 and \mathbb{Z}^2 . In Abel, D. et Ooi, B., éditeurs, *Advances on Spatial Databases – Proceedings of the Third International Symposium on Large Spatial Databases (SSD'93)*, volume 693 of *Lecture Notes in Computer Sciences*, pp 316–336, Singapour. Springer-Verlag.

- [Eschenbach et Heydrich, 1995] Eschenbach, C. et Heydrich, W. (1995). Classical mereology and restricted domains. *International Journal of Human-Computer Studies*, 43(5-6) :723–740.
- [Faltings, 1995] Faltings, B. (1995). Qualitative spatial reasoning using algebraic topology. In Frank, A. U. et Kuhn, W., éditeurs, *COSIT'95*, volume 988 of *Lecture Notes in Computer Sciences*, pp 17–30. Springer-Verlag.
- [Fernyhough *et al.*, 2000] Fernyhough, J., Cohn, A. G., et Hogg, D. (2000). Constructing qualitative event models automatically from video input. *Image and Vision Computing*, 18 :91–103.
- [Figuier, 1884] Figuier, L. (1884). *La Terre et les Mers, ou description physique du globe*. Librairie Hachette, Paris.
- [Fisher et Wood, 1998] Fisher, P. et Wood, J. (1998). What is a mountain? or the englishman who went up a boolean geographical concept but realised it was fuzzy. *Geography*, 83(3) :247–256.
- [Forbus, 1984] Forbus, K. (1984). Qualitative process theory. *Artificial Intelligence*, 24 :85–168.
- [Forbus *et al.*, 1987] Forbus, K., Nielsen, P., et Faltings, B. (1987). Qualitative kinematics : A framework. In *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-87)*, pp 430–486, Milan, Italie.
- [Frank, 1996a] Frank, A. U. (1996a). The prevalence of objects with sharp boundaries in GIS. In Burrough, P. A. et Frank, A. U., éditeurs, *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*, pp 29–40. Taylor & Francis, Bristol, UK.
- [Frank, 1996b] Frank, A. U. (1996b). Qualitative spatial reasoning : Cardinal directions as an example. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(3) :269–290.
- [Frank, 1997] Frank, A. U. (1997). Spatial ontology : A geographical point of view. In Stock, O., éditeur, *Spatial and Temporal Reasoning*, chapter 8, pp 135–153. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas.
- [Frank *et al.*, 1986] Frank, A. U., Palmer, B., et Robinson, V. (1986). Formal methods for accurate definition of some fundamentals terms in physical geography. In *Proceedings of the Second International Symposium on Spatial Data Handling*, pp 583–599, Seattle, Washington, USA.
- [Freksa, 1992] Freksa, C. (1992). Using orientation information for qualitative spatial reasoning. In Frank, A. U., Campari, I., et Formentini, U., éditeurs, *Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space, Proceedings of the International Conference on GIS - From Space to Territory*, number 639 in *Lecture Notes in Computer Sciences*, pp 162–178. Springer-Verlag.
- [Freundschuh et Egenhofer, 1997] Freundschuh, S. M. et Egenhofer, M. J. (1997). Human conceptions of spaces : Implications for geographic information systems. *Transactions in GIS*, 2(4) :361–375.

- [Galton et Meathrel, 1999] Galton, A. P. et Meathrel, R. C. (1999). Qualitative outline theory. In Dean, T., éditeur, *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI 99*, volume 2, pp 1061–1066, Stockholm, Suède. Morgan Kaufman.
- [Genest, 2000] Genest, C. G. (2000). *Dictionnaire de géomorphologie*. Société de Géographie de la Mauricie Inc., Trois-Rivières, Canada.
- [Gibson, 1966] Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Houghton Mifflin.
- [Gibson, 1979] Gibson, J. J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin, Boston, USA.
- [Gotts *et al.*, 1996] Gotts, N. M., Gooday, J. M., et Cohn, A. G. (1996). A connection based approach to commonsense topological description and reasoning. *The Monist*, 79(1) :51–75.
- [Grigni *et al.*, 1995] Grigni, M., Papadias, D., et Papadimitriou, C. (1995). Topological inference. In *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp 901–906, Montreal, Canada.
- [Grill-Spector et Kanwisher, 2005] Grill-Spector, K. et Kanwisher, N. (2005). Visual recognition : as soon as you see it, you know what it is. *Psychological Science*, 16(2) :152–160.
- [Gruber, 1993] Gruber, T. R. (1993). A translation approach to portable ontologies. *Knowledge Acquisition*, 5(2) :199–220.
- [Guth, 2005] Guth, P. (2005). MICRODEM. <http://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/website/microdem.htm>.
- [Hayes, 1978] Hayes, P. (1978). The naive physics manifesto. In Michie, D., éditeur, *Expert Systems in the Microelectronic Age*, pp 242–270. Edinburgh University Press, Edinburgh, Ecosse.
- [Hillier et Hanson, 1984] Hillier, B. et Hanson, J. (1984). *The Social Logic of Space*. Cambridge University Press.
- [Hocking et Young, 1988] Hocking, J. G. et Young, G. S. (1988). *Topology*. Courier Dover Publications.
- [Hoffman et Richards, 1984] Hoffman, D. D. et Richards, W. (1984). Parts of recognition. *Cognition*, 18 :65–96.
- [Hoffman et Singh, 1997] Hoffman, D. D. et Singh, M. (1997). Saliency of visual parts. *Cognition*, 63 :29–78.
- [Horton, 1982] Horton, R. (1982). Tradition and modernity revisited. In Hollis, M. et Luke, S., éditeurs, *Rationality and Relativism*, pp 201–60. Oxford : Blackwell.
- [Husserl, 1961] Husserl, E. (1961). *Recherches logiques*. Presses Universitaires de France.
- [Johnson, 1987] Johnson, M. (1987). *The Body in the Mind : The Bodily Basis of Meaning, Imagination, and Reason*. University of Chicago Press, Chicago, Illinois, USA.

- [Joliveau et Dupuis, 2006] Joliveau, T. et Dupuis, B. (2006). Conception et utilisation de visualisations numériques pour la gestion paysagère. *Revue Internationale de Géomatique : Information géographique tridimensionnelle*, 16(1) :115–134.
- [Joly, 2000] Joly, F. (2000). Cartographie. In *Encyclopædia Universalis 6*. Encyclopædia Universalis, France.
- [Klatzky, 1998] Klatzky, R. L. (1998). Allocentric and egocentric spatial representations : Definitions, distinctions, and interconnections. In *Spatial cognition. An interdisciplinary approach to representing and processing spatial knowledge*, volume 1404 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp 107–127. Springer.
- [Kowalski et al., 2007] Kowalski, J.-M., Claramunt, C., et Zucker, A. (2007). Thalassographēin : Representing Maritime Spaces in Ancient Greece. In *Proceedings of the 8th International Conference on Spatial Information Theory, COSIT 2007*, volume 4736 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp 47–60, Melbourne, Australie. Springer Berlin / Heidelberg.
- [Kuhn, 2005] Kuhn, W. (2005). Geospatial Semantics : Why, of What, and How. *Journal on Data Semantics*, Special Issue on Semantic-based Geographical Information Systems *Lecture Notes in Computer Science*, 3534 :1–24.
- [Kuipers, 1978] Kuipers, B. (1978). Modeling spatial knowledge. *Cognitive Science*, 2 :129–153.
- [Kuipers, 1982] Kuipers, B. (1982). The ‘map in the head’ metaphor. *Environment and Behavior*, 14 :202–202.
- [Kuipers, 2000] Kuipers, B. (2000). The spatial semantic hierarchy. *Artificial Intelligence*, 119 :191–233.
- [Kuipers et Byun, 1991] Kuipers, B. et Byun, Y.-T. (1991). A robot exploration and mapping strategy based on a semantic hierarchy of spatial representations. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 8 :47–63.
- [Kulik et Egenhofer, 2003] Kulik, L. et Egenhofer, M. J. (2003). Linearized terrain : Languages for silhouette representations. In Kuhn, W., Worboys, M. F., et Timpf, S., éditeurs, *Spatial Information Theory : Foundations of Geographic Information Science*, volume 2825 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp 128–145. Springer-Verlag, Berlin.
- [Lakoff, 1987] Lakoff, G. (1987). *Women, Fire and Dangerous Things : What Categories Reveal About the Mind*. University of Chicago Press, Chicago.
- [Lakoff et Johnson, 1980] Lakoff, G. et Johnson, M. (1980). *Metaphors We Live By*. University of Chicago Press, Chicago.
- [Lalande, 1926] Lalande, A. (1926). *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*. Quadrige. Presse Universitaire de France. (réédité en 1999).
- [Landragin, 2004] Landragin, F. (2004). *Dialogue homme-machine multimodal*. Hermès-Lavoisier.

- [Langran, 1992] Langran, G. (1992). *Time in Geographic Information Systems*. Taylor & Francis.
- [Latecki et Lakämper, 2000] Latecki, L. J. et Lakämper, R. (2000). Shape similarity measure based on correspondence of visual parts. *IEEE Transaction Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(10) :1185–1190.
- [Levinson, 1998] Levinson, S. C. (1998). Studying spatial conceptualization across cultures. *Language, Space, and Culture. Special issue of Ethos : Journal of the Society for Psychological Anthropology*, 26(1) :7–24.
- [Leyton, 1988] Leyton, M. (1988). A process-grammar for shape. *Artificial Intelligence*, 34 :213–247.
- [Ligozat, 1998] Ligozat, G. (1998). Reasoning about cardinal directions. *Journal of Visual Languages and Computing*, 9 :23–24.
- [Loncaric, 1998] Loncaric, S. (1998). A survey of shape analysis techniques. *Pattern Recognition*, 31(8) :983–1001.
- [Magee, 2002] Magee, D. (2002). A qualitative, multi-scale grammar for image description and analysis. In Marshall, D. et Rosin, P. L., éditeurs, *British Machine Vision Conference 2002*, University of Cardiff. <http://www.bmva.ac.uk/bmvc/2002/>.
- [Malebranche, 1842] Malebranche, N. (1842). *Recherche de la vérité*, volume 2 of *Œuvres de Malebranche*. Charpentier, Paris.
- [Mark, 1999] Mark, D. M. (1999). Spatial representation : A cognitive view. In Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., et Rhind, D. W., éditeurs, *Geographical Information Systems : Principles, Techniques, Management and Applications*, volume 1, pp 81–89. John Wiley, 2nde édition.
- [Mark et al., 1997] Mark, D. M., Egenhofer, M. J., et Hornsby, K. (1997). *Formal Models of Commonsense Geographic Worlds*. NCGIA Technical Report 97-2, National Center for Geographic Information and Analysis.
- [Mark et Frank, 1996] Mark, D. M. et Frank, A. U. (1996). Experiential and Formal Models of Geographic Space. *Environment and Planning B*, 23 :3–24.
- [Mark et Smith, 2005] Mark, D. M. et Smith, B. (2005). A science of topography : Bridging the quantitative-quantitative divide. In Bishop, M. P. et Shroder, J. F., éditeurs, *Geographic Information Science and Mountain Geomorphology*, chapter 3. Springer-Praxis, Chichester, Angleterre.
- [Mark et al., 1999] Mark, D. M., Smith, B., et Tversky, B. (1999). Ontology and geographic objects : An empirical study of cognitive categorization. In Freksa, C. et Mark, D. M., éditeurs, *Spatial Information Theory : A Theoretical Basis for GIS*, Lecture Notes in Computer Science, pp 283–298. Springer-Verlag, Berlin.
- [Mark et Turk, 2003a] Mark, D. M. et Turk, A. G. (2003a). Ethnophysiography. pre-COSIT'03 workshop.

- [Mark et Turk, 2003b] Mark, D. M. et Turk, A. G. (2003b). Landscape categories in yind-jibarndi : Ontology, environment, and language. In *International Conference on Spatial Information Theory. Foundations of Geographic Information Science (COSIT'03)*, Lecture Notes in Computer Science No. 2825, pp 31–49, Ittingen, Switzerland.
- [Marr, 1982] Marr, D. (1982). *Vision : a Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. WH Freeman, San Fransisco.
- [Meathrel, 2001] Meathrel, R. C. (2001). *A General Theory of Boundary-based Qualitative Representation of Two-dimensional Shape*. Rapport de thèse de doctorat, University of Exeter, UK.
- [Mennis et al., 2000] Mennis, J. L., Peuquet, D. J., et Qian, L. (2000). A Conceptual Framework For Representing Complex And Dynamic Phenomena In Geographic Information Systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(6) :501–520.
- [Merleau-Ponty, 1945] Merleau-Ponty, M. (1945). *Phénoménologie de la perception*. Gallimard.
- [Minsky, 1972] Minsky, M. (1972). A framework for representing knowledge. In Winston, P., éditeur, *The Psychology of Computer Vision*. McGraw-Hill.
- [Mokhtarian et al., 1996] Mokhtarian, F., Abbasi, S., et Kittler, J. (1996). Robust and efficient shape indexing through curvature scale space. In *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, pp 53–62.
- [Montello et al., 2003] Montello, D. R., Goodchild, M. F., Gottesegeen, J., et Fohl, P. (2003). Where's downtown? : Behavioral methods for determining referents of vague spatial queries. *Spatial Cognition and Computation*, 3(2&3) :185–204.
- [Neisser, 1976] Neisser, U. (1976). *Cognition and Reality : Principles and Implications of Cognitive Psychology*. WH Freeman.
- [Neisser, 1987] Neisser, U. (1987). From direct perception to conceptual structure. In Neisser, U., éditeur, *Concepts and conceptual development : Ecological and intellectual factors in categorization*, pp 11–24. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [Peuquet, 2002] Peuquet, D. J. (2002). *Representations of Space and Time*. The Guilford Press, New York, NY, USA.
- [Peuquet et Duan, 1995] Peuquet, D. J. et Duan, N. (1995). An Event-Based Spatiotemporal Data Model (ESTDM) for Temporal Analysis of Geographical Data. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(1) :7–24.
- [Piaget et Inhelder, 1985] Piaget, J. et Inhelder, B. (1985). *La représentation de l'espace chez l'enfant*. Bibliothèque de philosophie contemporaine. PUF, Paris, 4^{ème} édition.
- [Pigot, 1991] Pigot, S. (1991). Topological models for 3D spatial information systems. In Mark, D. M. et White, D., éditeurs, *Autocarto 10*, pp 368–392, Baltimore, MD, USA.
- [Pullar, 2001] Pullar, D. (2001). MapScript : A Map Algebra Programming Language Incorporating Neighborhood Analysis. *Geoinformatica*, 5(2) :145–163.

- [Quine, 1980] Quine, W. V. (1980). On what there is. In *From a Logical Point of View : Nine Logico-Philosophical Essays*. Havard, 2nde edition.
- [Ramos, 2003] Ramos, F. (2003). *Modélisation et Validation d'un Système d'Information Géographique 3D Opérationnel*. Thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée.
- [Randell et al., 1992] Randell, D. A., Cui, Z., et Cohn, A. G. (1992). A spatial logic based on regions and connection. In *Proceedings of the Third International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'92)*, pp 165–176. Morgan Kaufmann.
- [Raper, 2000] Raper, J. (2000). *Multidimensional Geographic Information Science*. Taylor&Francis, Londres, UK.
- [Renz, 2002] Renz, J. (2002). *Qualitative Spatial Reasoning with Topological Information*. Springer-Verlag, Berlin.
- [Richards et Hoffman, 1985] Richards, W. et Hoffman, D. D. (1985). Codon constraints on closed 2D shapes. *Computer Vision, Graphic and Image Processing*, 31 :265–281.
- [Rishe, 1992] Rishe, N. (1992). *Database design : the semantic modeling approach*. MacGraw-Hill.
- [Rosch, 1978] Rosch, E. (1978). Principles of categorization. In Rosch, E. et Lloyd, B. B., éditeurs, *Cognition and Categorization*, pp 27–47. Erlbaum, Hillsdale, NJ, USA. réédité dans « Readings in Cognitive Science, a Perspective from Psychology and Artificial Intelligence, Allan Collins & Edward E. Smith, Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, Californie, USA, 1988, pp 312-322 ».
- [Rosch et al., 1976] Rosch, E., Mervis, C. B., Gray, W. D., Johnson, D. M., et Boyes-Braem, P. (1976). Basic objects in natural categories. *Cognitive Psychology*, 8 :382–439.
- [Rosin, 1993] Rosin, P. L. (1993). Multiscale representation and matching of curves using codons. *Graphical Models and Image Processing*, 55 :286–310.
- [Simons, 1987] Simons, P. M. (1987). *Parts. A Study in Ontology*. Clarendon Press, Oxford.
- [Singh et Hoffman, 2001] Singh, M. et Hoffman, D. D. (2001). Part-based representations of visual shape and implications for visual cognition. In Shipley, T. F. et Kellman, P. J., éditeurs, *From fragments to objects : Segmentation and grouping in vision.*, Advances in Psychology, chapter 9, pp 401–459. Elsevier Science, North Holland Press.
- [Smith, 1995a] Smith, B. (1995a). Formal ontology, common sense, and cognitive science. *International Journal of Human-Computer Studies*, 43 :641–657.
- [Smith, 1995b] Smith, B. (1995b). On Drawing Lines on a Map. In Frank, A. U. et Kuhn, W., éditeurs, *Spatial Information Theory. A Theoretical basis for GIS (COSIT'95)*, Lecture Notes in Computer Science, pp 475–784. Springer.
- [Smith, 1995c] Smith, B. (1995c). The structures of the common-sense world. *Acta Philosophica Fennica*, 58 :290–317.
- [Smith, 1997] Smith, B. (1997). Boundaries : An essay in mereotopology. In Hahn, L., éditeur, *The Philosophy of Roderick Chisholm*, volume 25 of *Library of Living Philosophers*, pp 534–561. Open Court, LaSalle.

- [Smith et Casati, 1993] Smith, B. et Casati, R. (1993). La physique naïve : un essai d'ontologie. *Intellectica*, 17(2) :173–197.
- [Smith et Mark, 1998] Smith, B. et Mark, D. M. (1998). Ontology and geographic kinds. In *International Symposium on Spatial Data Handling (SDH'98)*, pp 308–320, Vancouver, Canada.
- [Smith et Mark, 2001] Smith, B. et Mark, D. M. (2001). Geographic categories : An ontological investigation. *International Journal of Geographical Information Science*, 15(7) :591–612.
- [Smith et Mark, 2003] Smith, B. et Mark, D. M. (2003). Do mountains exist ? towards an ontology of landforms. *Environment & Planning B : Planning and Design*, 30(3) :411–427.
- [Smith et Varzi, 1997] Smith, B. et Varzi, A. C. (1997). The formal ontology of boundaries. *Electronic Journal of Analytic Philosophy*, 5(5) :<http://ejap.louisiana.edu/>.
- [Smith et Varzi, 2000] Smith, B. et Varzi, A. C. (2000). Fiat and bona fide boundaries. *Philosophy and Phenomenological Research*, 60(2) :401–420.
- [Smith et al., 1978] Smith, E. E., Balzano, G. J., et Walker, J. H. (1978). Nominal, perceptual, and semantic codes in picture categorization. In Klatzky, J. C. . R., éditeur, *Semantic factors in cognition*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, N.J., USA.
- [Smith et Medin, 1981] Smith, E. E. et Medin, D. L. (1981). *Categories and concepts*. Harvard University Press.
- [Sogo et al., 1999] Sogo, T., Ishiguro, H., et Ishida, T. (1999). Acquisition of qualitative spatial representation by visual observation. In *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*.
- [Stell et Worboys, 1997] Stell, J. G. et Worboys, M. F. (1997). The algebraic structure of sets of regions. In *Proceedings of the International Conference on Spatial Information Theory (COSIT'97)*, pp 163–174, Londres, UK. Springer-Verlag.
- [Strahler et Strahler, 1992] Strahler, A. et Strahler, A. (1992). *Modern physical geography*. John Wiley & Sons, New York, USA.
- [Talmy, 1983] Talmy, L. (1983). How language structures space. In Palmer, B. et Acredolo, L., éditeurs, *Spatial orientation : Theory, research, and application*, pp 225–282. Plenum Press, New York, USA.
- [Tardieu, 1867] Tardieu, A. (1867). *Géographie de Strabon*. Librairie Hachette, Paris. <http://www.mediterranees.net/geographie/strabon/>.
- [Tate et al., 1990] Tate, A., Hendler, J., et Drummond, M. (1990). A review of ai planning techniques. In *Readings in Planning*. Morgan Kaufman, San Mateo, Californie, USA.
- [Tomlin, 1990] Tomlin, C. D. (1990). *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Prentice-Hall.
- [Tversky, 1999] Tversky, B. (1999). What does drawing reveal about thinking. In Gero, J. et Tversky, B., éditeurs, *Visual and spatial reasoning in design*, pp 93–101. Key Centre of Design Computing and Cognition, University of Sidney, Sidney, Australie.

- [Vance et Van Hamme, 1985] Vance, W. et Van Hamme, J. (1985). *Là où va l'indien*. Dargaud Benelux.
- [Varzi, 1994] Varzi, A. C. (1994). On the boundary between mereology and topology. In Casati, R., Smith, B., et White, G., éditeurs, *Philosophy and the Cognitive Sciences. Proceedings of the 16th International Wittgenstein Symposium*, Vienna. Hölder- Pichler-Tempsky.
- [Varzi, 1996] Varzi, A. C. (1996). Parts, wholes, and part-whole relations : The prospects of mereotopology. *Data & Knowledge Engineering*, 20(3) :259–286.
- [Varzi, 2006] Varzi, A. C. (2006). Mereology. In Zalta, E. N., éditeur, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Stanford University, California, USA, winter 2006 edition. <http://plato.stanford.edu/entries/mereology/>.
- [Vecera et al., 2001] Vecera, S. P., Behrmann, M., et Filapek, J. C. (2001). Attending to the parts of a single object : Part-based selection limitations. *Perception & Psychophysics*, 63(2) :308–321.
- [Vieu, 1997] Vieu, L. (1997). Spatial representation and reasoning in artificial intelligence. In Stock, O., éditeur, *Spatial and Temporal Reasoning*, pp 5–41. Kluwer.
- [Watson, 1919] Watson, J. (1919). *Psychology from the standpoint of a behaviorist*. Lippincott.
- [Weld et DeKleer, 1990] Weld, D. et DeKleer, J., éditeurs (1990). *Readings in Qualitative Reasoning About Physical Systems*. Morgan Kaufman, San Mateo, Californie, USA.
- [Wilson, 1992] Wilson, E. (1992). *The Diversity of Life*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, USA.
- [Withehead, 1929] Withehead, A. N. (1929). *Process and Reality*. MacMillan, New York. corrected edition by same publisher in 1978.
- [Wolter et Richter, 2004] Wolter, D. et Richter, K.-F. (2004). Schematized aspect maps for robot guidance. In *Proceedings of the The Fourth International Cognitive Robotics Workshop (CogRob2004)*.
- [Worboys, 1996] Worboys, M. F. (1996). Metrics and topologies for geographic space. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Spatial Data Handling*, Delft, Pays-Bas.
- [Xu et Singh, 2002] Xu, Y. et Singh, M. (2002). Early computation of part structure : Evidence from visual search. *Perception & Psychophysics*, 64(7) :1039–1054.
- [Zeitouni, 1995] Zeitouni, K. (1995). Topological modelling for 3D GIS. In *Proceedings of the 4th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management*, Melbourne, Australie.
- [Zimmerman et Freksa, 1993] Zimmerman, K. et Freksa, C. (1993). Qualitative spatial reasoning using orientation, distance, and path knowledge. In *IJCAI-93 Workshop on Spatial and Temporal Reasoning*, Chambery.

- [Zlatanova, 2000] Zlatanova, S. (2000). On 3D topological relationships. In *Proceedings of the 11th International Workshop on Database and Expert Systems Applications*, pp 913–919.
- [Zusne, 1970] Zusne, L. (1970). *Visual Perception of Form*. Academic Press.

VU :

VU :

Le Directeur de Thèse

Le Responsable de l'École Doctorale

VU pour autorisation de soutenance

Rennes, le

Le Président de l'Université de Rennes I

VU après soutenance pour autorisation de publication :

Le Président de Jury,