



Titre: Modélisation générique d'objets et application aux mines
Title:

Auteur: Frédéric Labrosse
Author:

Date: 1998

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Labrosse, F. (1998). Modélisation générique d'objets et application aux mines
Citation: [Ph.D. thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/6784/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/6784/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Paul Cohen, & Jean-Yves Hervé
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

INFORMATION TO USERS

This manuscript has been reproduced from the microfilm master. UMI films the text directly from the original or copy submitted. Thus, some thesis and dissertation copies are in typewriter face, while others may be from any type of computer printer.

The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted. Broken or indistinct print, colored or poor quality illustrations and photographs, print bleedthrough, substandard margins, and improper alignment can adversely affect reproduction.

In the unlikely event that the author did not send UMI a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if unauthorized copyright material had to be removed, a note will indicate the deletion.

Oversize materials (e.g., maps, drawings, charts) are reproduced by sectioning the original, beginning at the upper left-hand corner and continuing from left to right in equal sections with small overlaps. Each original is also photographed in one exposure and is included in reduced form at the back of the book.

Photographs included in the original manuscript have been reproduced xerographically in this copy. Higher quality 6" x 9" black and white photographic prints are available for any photographs or illustrations appearing in this copy for an additional charge. Contact UMI directly to order.

UMI[®]

Bell & Howell Information and Learning
300 North Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106-1346 USA
800-521-0600

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION GÉNÉRIQUE D'OBJETS ET
APPLICATION AUX MINES

FRÉDÉRIC LABROSSE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIÆ DOCTOR (Ph.D.)
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
DÉCEMBRE 1998



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-38721-6

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

MODÉLISATION GÉNÉRIQUE D'OBJETS ET
APPLICATION AUX MINES

présentée par: LABROSSE Frédéric

en vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiæ Doctor (Ph.D.)

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. GAMACHE Michel, Ph.D., président

M. COHEN Paul, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. HERVÉ Jean-Yves, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. HOULE Jean-Louis, Ph.D., membre

M. PICHÉ André, Ph.D., membre

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier M. Paul Cohen pour m'avoir accueilli dans son groupe (le GRPR) et pour m'avoir encadré tout au long de ma thèse. Je remercie également M. Jean-Yves Hervé pour m'avoir lui aussi encadré dans le long travail qu'est une thèse et, en particulier, pour toutes les discussions, souvent animées et souvent tardives, que nous avons eues. Je remercie également les membres du jury pour le temps qu'ils auront pris à lire cette thèse ainsi que pour leur évaluation de ce travail.

Je remercie Benjamin et Sophie, mon fils et ma femme, pour leur patience avec moi et pour avoir supporté mes absences physiques et de la pensée ainsi que mes (trop) fréquents retours tardifs.

Bien entendu, je remercie aussi toutes les personnes du GRPR pour leur aide directe ou indirecte, volontaire ou involontaire. Je ne nommerai personne (la liste étant trop longue et de peur d'oublier quelqu'un), mais ils se reconnaîtront : ce sont des chercheurs, des étudiants, des stagiaires, des secrétaires qui sont restés parfois peu de temps au GRPR, souvent longtemps ou qui sont encore là (certains sont même revenus!).

Résumé

Dans cette thèse, nous proposons GNOME, un modèle générique d'objets (« GeNeric Object ModEl »), c'est-à-dire un modèle ne faisant pas de supposition quant aux objets auxquels il s'applique ou aux tâches utilisant le modèle. À titre d'exemple d'utilisation, GNOME est appliqué au domaine des mines souterraines.

Dans un premier temps, nous décrivons des modèles importants de la littérature. Ces modèles sont importants par ce qu'ils impliquent, notamment au niveau des critères que doit satisfaire un modèle d'objets. Nous introduisons ensuite de tels critères pour un modèle *générique* d'objets et nous évaluons les modèles précédents à l'aide de ces critères. STEP, un modèle générique, norme émergente de l'industrie manufacturière, est ensuite décrit et ses limitations et inconvénients montrés.

Dans un second temps, notre modèle générique est présenté. Le formalisme utilisé pour en décrire les différents aspects est proposé. Ceci nous permet de définir différentes notions. La première est celle d'*attribut* : un attribut est une caractéristique de l'objet qui est incluse dans le modèle. La seconde notion est celle d'*objet-attribut* qui est une primitive définie dans l'espace de représentation d'un attribut. Enfin, des notions concernant la structure (c'est-à-dire l'*arbre de décomposition* et le *graphe des relations* pour chaque attribut ainsi que le *graphe des relations inter-attributs*) et la *quantification* du modèle sont présentées.

La troisième partie de la thèse concerne l'application de GNOME au domaine des mines souterraines. GNOMine, une instance de GNOME pour les mines, est présenté. Chaque attribut est décrit, d'une part, à l'aide du formalisme de GNOME et, d'autre

part, à l'aide d'EXPRESS-G, le langage de description de STEP. Les attributs de GNOMine sont la *géométrie des excavations*, l'*utilisation des excavations*, l'*équipement* et les *structures rocheuses*. Ces attributs sont utiles à des opérations que l'industrie minière est intéressée à automatiser. L'une de ces opérations est l'arpentage automatique des mines et la construction automatique de représentations des excavations à partir des mesures de l'arpentage. Dans cette thèse, nous proposons une méthode de construction pour générer des représentations d'excavations conformes à GNOMine.

Abstract

This thesis proposes GNOME, a GeNeric Object Model, *i.e.* a model that makes no assumptions about the represented objects nor about the tasks using the model. GNOME is also applied to a concrete case: the modeling of underground mines.

In a first part, we describe several important models given in the literature. What make these models important are the criteria they introduce, criteria that a model must follow. We then give our set of criteria that a generic object model must follow and we evaluate the preceding models with respect to these criteria. We then present and evaluate STEP, a generic model that is an emerging standard of the manufacturing industry.

A second part is devoted to GNOME. We present its formalism, which is used to describe the different parts of GNOME. This allows us to define various notions. An *attribute* is an object characteristic that is included in its model. An *attribute-object* is a primitive defined in an attribute representation space. Finally, some notions concern the structural aspects (*i.e.* the *decomposition tree* and the *relation graph* for each attribute and the *inter-attribute relation graph*) and the *quantification* of GNOME.

A third part is the application of GNOME to underground mines. We present GNOMine, a GNOME instance for mines. Each attribute is described using GNOME's formalism on the one hand and using EXPRESS-G, the STEP graphical description language, on the other hand. The currently modeled attributes are the *excavations geometry*, the *excavations use*, the *equipment*, and the *rock structures*. These attributes

are used in various operations that the mining industry is interested in automating. Amongst them is the automatic surveying and the automatic creation of representations from the surveying output. Here, we propose a way of constructing excavation representations based on GNOMine.

Table des matières

Remerciements	iv
Résumé	v
Abstract	vii
Table des matières	ix
Liste des tableaux	xiv
Liste des figures	xvi
Liste des symboles	xxii
Liste des annexes	xxiv
Introduction	1
1 Modélisation	4
1.1 Définitions	5
1.2 Un modèle : pour quoi faire ?	5
1.3 Revue des modèles existants	7
1.3.1 Modèles généraux	8
1.3.2 Modèles spécifiques	10
1.4 Les critères que doit satisfaire un modèle	14

1.4.1	Modélisation multi-attributs	14
1.4.2	Modélisation hiérarchique	15
1.4.3	Modélisation modulaire	19
1.4.4	Modélisation à différents niveaux de quantification	21
1.4.5	Modélisation à partir de primitives différentes	22
1.4.6	Récapitulation	23
1.5	STEP : une norme ISO pour la représentation de produits manufacturiers	25
1.5.1	Un modèle pour les gammes d'usinage	25
1.5.2	Le GPM	29
1.5.3	La norme ISO 10303	31
1.5.4	STEP et les critères	36
1.6	Un nouveau modèle : GNOME	38
2	GNOME : un modèle générique d'objets	40
2.1	Introduction à GNOME	41
2.2	Notations	42
2.3	Le modèle	45
2.3.1	Structure	47
2.3.2	Quantification	56
2.3.3	Relations inter-attributs	60
2.4	Quelques capacités et limitations de GNOME	62
2.5	GNOME et STEP	65
2.5.1	Différences de représentation	65
2.5.2	Relations entre STEP et GNOME	67
2.5.3	Différents buts de la modélisation	68
2.6	Récapitulation	71
3	Modélisation des mines	72
3.1	Différentes opérations minières	72

3.1.1	Arpentage et cartographie	73
3.1.2	Planification des mines	75
3.1.3	Gestion de la ventilation	76
3.1.4	Gestion du trafic des véhicules miniers	77
3.1.5	Navigation autonome	78
3.1.6	Gestion des activités minières	79
3.2	Une certaine intégration de l'information	79
3.3	GNOMine : un modèle de mine souterraine	81
3.4	La géométrie des excavations	85
3.4.1	L'arbre de décomposition	86
3.4.2	Les relations entre objets-attributs de la géométrie	92
3.4.3	La quantification des objets-attributs	98
3.4.4	La quantification des relations	107
3.4.5	Les diagrammes en EXPRESS-G représentant l'attribut <i>géométrie des excavations</i>	108
3.5	L'utilisation des excavations	108
3.6	L'équipement	113
3.7	Les structures rocheuses	116
3.8	Les relations inter-attributs	122
3.8.1	Utilisation des excavations et géométrie des excavations	123
3.8.2	Équipement et excavations	125
3.8.3	Excavations et structures rocheuses	127
3.9	Récapitulation	131
4	Arpentage des mines, traitement et interprétation des données d'arpentage	133
4.1	Techniques traditionnelles	134
4.1.1	Généralités	134
4.1.2	Mesure des hauteurs	135

4.1.3	Calcul des positions horizontales	136
4.1.4	L'arpentage dans son ensemble	138
4.1.5	Utilisation et interprétation des données d'arpentage	139
4.2	Automatisation	142
4.2.1	Informatisation des calculs faits sur les données d'arpentage	143
4.2.2	Automatisation de la saisie des données	144
4.2.3	Exploration et arpentage automatique	145
4.3	Génération de données artificielles	147
4.3.1	Synthèse de mesures	148
4.3.2	Exploration de mines virtuelles	150
5	Construction de représentations d'excavations minières	156
5.1	Les méthodes générales de reconstruction basée sur les modèles	157
5.2	Minimisation	160
5.3	Reconstruction des galeries	161
5.3.1	Rappel du modèle de galerie	162
5.3.2	Paramètres de la reconstruction des galeries	163
5.3.3	Pré-segmentation d'une galerie : estimation initiale de ses pa- ramètres	168
5.3.4	Post-traitement	175
5.3.5	Critères de qualité de la reconstruction des galeries	175
5.3.6	Résultats	178
5.4	La reconstruction des intersections	212
5.4.1	Rappel du modèle d'intersection	213
5.4.2	Paramètres de la reconstruction d'un mur	214
5.4.3	Pré-segmentation d'un mur : estimation initiale de ses paramètres	215
5.4.4	Critères de qualité de la reconstruction des murs	219
5.4.5	Résultats	220
5.5	Un exemple de mine complète	230

5.5.1	Reconstruction de galeries dont la courbure n'est pas continue	232
5.5.2	Reconstruction à partir de données incomplètes	236
5.5.3	Raccordement des galeries aux intersections	237
5.5.4	Construction des graphes de la géométrie des excavations . . .	241
5.6	Récapitulation	244
Conclusion		245
Bibliographie		250

Liste des tableaux

1.1	Les modèles présentés et les critères que nous avons énoncés	24
3.1	La quantification des galeries de la figure 3.4	100
3.2	La quantification des tronçons de mur des intersections	104
3.3	Les quantifications de quelques objets-attributs de l'attribut <i>équipement</i>	116
3.4	Les codes des teintes de la figure 3.27	121
3.5	La quantification de quelques cellules des structures rocheuses	122
3.6	La relation de positionnement des pièces d'équipement dans les excavations à l'instant où la vue de la figure 3.3 a été prise	128
3.7	Quelques exemple de couples du graphe de la relation entre les structures rocheuses et la géométrie des excavations	132
5.1	Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 1 : les critères globaux	180
5.2	Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 1 : les critères par tronçon	180
5.3	Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 2 : les critères globaux	187
5.4	Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 2 : les critères par tronçon	188
5.5	Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 3 : les critères globaux	190

5.6	Les tronçons détectés par la pré-segmentation de la galerie 3	191
5.7	Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 3 : les critères par tronçon	192
5.8	Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 4 : les critères globaux	195
5.9	Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 4 : les critères par tronçon	196
5.10	Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 5 : les critères globaux	197
5.11	Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 5 : les critères par tronçon	199
5.12	Les différents paramètres du relief utilisés dans la seconde expérience	201
5.13	Nombre de tronçons de galerie donnés par la pré-segmentation en fonc- tion des paramètres du relief	203
5.14	Position des débuts de tronçons de galerie en fonction des paramètres du relief	204
5.15	Les différentes densités de mesures utilisées dans la troisième expéri- ence sur la reconstruction des galeries	206
5.16	Nombre de tronçons de galerie donnés par la pré-segmentation en fonc- tion de la densité des mesures	208
5.17	Comparaison de l'original de la galerie 1 avec vingt reconstructions à partir de vingt reliefs différents	211
5.18	L'évaluation de la reconstruction de l'intersection 1	220
5.19	L'évaluation de la reconstruction de l'intersection 2	222
5.20	L'évaluation de la reconstruction de l'intersection 3	223
5.21	Les différentes densités de mesures utilisées dans la troisième expéri- ence sur la reconstruction des intersections	227
5.22	Les arcs de raccordement et leur quantification	243

Liste des figures

1.1	Une partie de la représentation en EXPRESS-G de l'usinage d'une clavette	28
1.2	Une représentation EXPRESS-G simplifiée d'une automobile et de son moteur suivant le modèle GPM	32
1.2	Une représentation EXPRESS-G simplifiée d'une automobile et de son moteur suivant le modèle GPM (suite)	33
1.3	Les relations entre les différentes séries de STEP	35
2.1	Graphes sur un (a) ou deux (b) ensembles	43
2.2	Graphe d'une application	44
2.3	Un arbre de décomposition et un graphe de relation	49
2.4	La structure de l'automobile	50
2.5	Propagation (vers le bas) de la relation de connexion	55
2.6	Les relations entre STEP et GNOME	68
2.7	Différents buts de la modélisation	70
3.1	Différentes opérations minières et leurs échanges d'information	80
3.2	Les attributs de la mine et leurs relations	84
3.3	Un exemple de mine	85
3.4	Un exemple d'excavations de mine	86
3.5	Avec ou sans intersection ?	88
3.6	Une ou deux intersections ?	89

3.7	L'arbre générique de décomposition pour la géométrie des excavations	91
3.8	Une représentation graphique 3D des excavations	92
3.9	L'arbre de décomposition de la géométrie des excavations et le graphe des relations	93
3.9	L'arbre de décomposition de la géométrie des excavations ($\Theta(\Omega_1)$) et le graphe des relations ($\Gamma(\Omega_1)$) (suite)	94
3.10	Les référentiels associés à un tronçon de galerie	95
3.11	Les référentiels associés à une intersection et correspondant aux tron- çons de galerie	96
3.12	Les spécifications initiale et finale d'un tronçon de mur	102
3.13	Des clothoïdes pour différentes valeurs de κ_0 et k et pour $L = 35$ m .	106
3.14	La quantification d'une intersection	107
3.15	Description en EXPRESS-G des objets-attributs de l'attribut <i>géomé- trie des excavations</i> , de leur décomposition et d'une partie de leur quan- tification	109
3.16	La quantification commune à certains objets-attributs de l'attribut <i>géo- métrie des excavations</i>	110
3.17	Quelques types en EXPRESS-G nécessaires à la quantification des objets-attributs de l'attribut <i>géométrie des excavations</i>	110
3.18	La représentation explicite de la décomposition	111
3.19	Les diagrammes EXPRESS-G décrivant les relations de l'attribut <i>géo- métrie des excavations</i>	111
3.20	La hiérarchie des utilisations d'excavations	112
3.21	L'arbre de décomposition de l'attribut <i>équipement</i>	114
3.22	Les schémas en EXPRESS-G décrivant l'attribut <i>équipement</i> (1) . . .	117
3.23	Les schémas en EXPRESS-G décrivant l'attribut <i>équipement</i> (2) . . .	118
3.24	Les schémas en EXPRESS-G décrivant l'attribut <i>équipement</i> (3) . . .	119
3.25	Un arbre octal	120

3.26	Le référentiel et la numérotation des descendants d'une cellule de l'arbre octal représentant les structures rocheuses	120
3.27	Une représentation graphique 3D des structures rocheuses	122
3.28	La décomposition de l'attribut <i>structures rocheuses</i>	123
3.29	Les structures rocheuses en EXPRESS-G	124
3.30	La description en EXPRESS-G de la relation entre l'utilisation des excavations et la géométrie des excavations	125
3.31	La description en EXPRESS-G des relations entre l'équipement et les excavations	128
3.32	Les points d'entrée et de sortie des excavations dans les cellules de roches	129
3.33	Une représentation graphique de l'intersection de la veine et des excavations	131
3.34	La description en EXPRESS-G de la relation entre les attributs <i>structures rocheuses</i> et <i>géométrie des excavations</i>	131
4.1	La technique de mesure des hauteurs	136
4.2	Les différentes méthodes de mesure des angles	137
4.3	Un exemple de mesures latérales le long d'une ligne joignant deux références	140
4.4	Un exemple du document fourni par l'arpenteur	141
4.5	Un exemple de mesures de points saillants dans une intersection	142
4.6	Un véhicule d'arpentage et ses senseurs	146
4.7	Des profils extraits lors de l'exploration d'une mine	147
4.8	Le processus de génération des mesures	150
4.9	Les mesures d'une galerie faite de trois tronçons	151
4.10	Les mesures d'une intersection faite de trois murs	152
4.11	Quelques vues de mines virtuelles avec différents attributs	153
4.11	Quelques vues de mines virtuelles avec différents attributs (suite) . . .	154
4.11	Quelques vues de mines virtuelles avec différents attributs (suite) . . .	155

5.1	Un point de l'axe de la galerie ainsi que les points des murs droit et gauche correspondant	164
5.2	L'abscisse d'une mesure est déterminée par rapport à l'axe et non pas par rapport au mur	165
5.3	Le processus complet de la reconstruction d'une galerie	167
5.4	La forme d'une galerie	169
5.5	La forme de la figure 5.4 après érosion et dilatation	169
5.6	L'effet du filtrage de la forme de la galerie sur l'axe médian extrait : exemple 1	170
5.7	L'effet du filtrage de la forme de la galerie sur l'axe médian extrait : exemple 2	170
5.8	Prolongement de l'axe médian	171
5.9	Les différents cas de valeurs du seuil pour la détection des débuts de tronçons	173
5.10	La fusion d'un tronçon court avec le suivant	173
5.11	Les mesures et la reconstruction de la galerie 1	179
5.12	Les distances latérales à droite et à gauche pour chaque tronçon de la galerie 1 ainsi que leur régression linéaire	181
5.13	Les axes des tronçons de la galerie 1 reconstruite et originale	184
5.14	Les mesures et la reconstruction de la galerie 2	186
5.15	Les axes des tronçons de la galerie 2 reconstruite et originale	189
5.16	Les distances latérales à droite et à gauche pour chaque tronçon de la galerie 2 ainsi que leur régression linéaire	190
5.17	La reconstruction de la galerie 3	191
5.18	Les axes des tronçons de la galerie 3 reconstruite et originale	193
5.19	La reconstruction de la galerie 4	194
5.20	Les distances latérales à droite et à gauche pour chaque tronçon de la galerie 4 ainsi que leur régression linéaire	197

5.21	La reconstruction de la galerie 5	198
5.22	La reconstruction de la galerie 5 avec seulement deux tronçons	200
5.23	Les galeries reconstruites en fonction des paramètres du relief	202
5.24	Les distances globales entre mesures et galeries en fonction des paramètres du relief	205
5.25	Les reconstructions de galeries en fonction de la densités des mesures	207
5.26	Une forme de galerie dans un cas de données éparses et mal disposées	209
5.27	Les distances globales entre mesures et galeries originale et reconstruites en fonction de la densités des données	210
5.28	Le processus de reconstruction d'un mur d'intersection	213
5.29	Distance de filtrage et seuil de détection d'un angle	217
5.30	Deux problèmes liés à de mauvaises valeurs du maximum de r_l	218
5.31	L'intersection 1 : les mesures et les murs reconstruits	220
5.32	L'intersection 2 : les mesures et les murs reconstruits	221
5.33	L'intersection 3 : les mesures et les murs reconstruites	223
5.34	Les reconstructions d'un mur en fonction des paramètres du relief	225
5.35	Les distances globales entre mesures et mur en fonction des paramètres du relief	226
5.36	Les reconstructions et les mesures en fonction de la densité de mesures	228
5.37	Les distances globales entre mesures et mur reconstruit et original en fonction de la densité des mesures	229
5.38	Les mesures extraites des profils	231
5.39	La reconstruction de la mine dans son ensemble	233
5.40	Mesures et reconstruction de la galerie G_5	234
5.41	Mesures et reconstruction de la galerie G_7	235
5.42	Les mesures et la reconstruction de la galerie G_2	237
5.43	Le raccordement entre l'intersection I_1 et les galeries qui y sont connectées	238
5.44	Le raccordement entre l'intersection I_2 et les galeries qui y sont connectées	239

- 5.45 Le raccordement entre l'intersection I_3 et les galeries qui y sont connectées 240
- 5.46 Le raccordement entre l'intersection I_4 et les galeries qui y sont connectées 241
- 5.47 La transformation du graphe de l'arpentage en le graphe des connexions 242

Liste des symboles

$\Delta^i(\mathbf{A})$	L'ensemble des descendants de \mathbf{A} à la i -ème génération, page 53
$\Delta_k(\mathbf{A})$	L'ensemble des descendants de l'objet-attribut \mathbf{A} de l'attribut A_k , page 48
$\Gamma(A)$	Un graphe dont les arcs sont des éléments de $A \times A$, page 42
$\Gamma(A, B)$	Un graphe (bipartite) dont les arcs sont des éléments de $A \times B$, page 42
$\Gamma(A_1, \dots, A_n)$	Un graphe n -partite dont les arcs sont des éléments de $A_1 \times \dots \times A_n$, page 42
$\Gamma(\Omega_k)$	Le graphe représentant les relations entre les objets-attributs de l'attribut A_k , page 51
$\Gamma_r(A)$	Un graphe dont les arcs sont des éléments de $A \times A$ et qui représente une relation r , page 42
$\Gamma_{i,j}$	Le graphe des relations inter-attributs entre les deux attributs A_i et A_j , page 61
Ω_k	L'ensemble des objets-attributs qui sont les nœuds de l'arbre de décomposition pour l'attribut A_k , page 48
$\Pi(\Gamma)$	Un chemin dans le graphe Γ , page 43
$\Theta(A)$	Un arbre dont les nœuds sont des éléments de A , page 43

$\Theta(\Omega_k)$	L'arbre de décomposition des objets-attributs de l'attribut A_k . page 48
A_k	Le k -ième attribut. page 45
A	Un objet-attribut générique. page 46
a	Un sous-objet-attribut générique. page 48
F	La fonction d'étiquetage du graphe des relations (inter-attributs) entre tous les attributs. page 62
F_k	La fonction d'étiquetage du graphe des relations entre objets-attributs de l'attribut A_k . page 59
F_{ij}	La fonction d'étiquetage du graphe des relations (inter-attributs) entre les attributs A_i et A_j . page 61
${}^{\mathcal{R}}\mathcal{I}(\mathbf{O})$	Le graphe des relations inter-attributs de l'objet \mathbf{O} dans la représentation \mathcal{R} . page 62
$\text{Im}f$	L'image d'une application f . page 44
\mathbf{O}	L'objet physique représenté. page 47
$\mathbf{P}^i(\mathbf{A})$	Le i -ième parent de l'objet-attribut \mathbf{A} . page 54
$\mathbf{P}^i(\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2)$	Le i -ième parent commun à \mathbf{A}_1 et \mathbf{A}_2 . page 54
$\mathcal{P}(E)$	L'ensemble des parties (ou sous-ensembles) de l'ensemble E . page 43
${}^{\mathcal{R}}\mathcal{Q}(\mathbf{O})$	La quantification de l'objet \mathbf{O} dans la représentation \mathcal{R} . page 60
$Q_k(\mathbf{A})$	La quantification de l'objet-attribut \mathbf{A} de l'attribut A_k . page 56
\mathcal{R}	Une représentation d'un objet physique. page 47
${}^{\mathcal{R}}\mathcal{S}(\mathbf{O})$	La structure de l'objet \mathbf{O} dans la représentation \mathcal{R} . page 56

Liste des annexes

A	L'équation paramétrique d'une clothoïde	264
A.1	La détermination de l'équation	264
A.2	Le changement de sens de parcours	266

Introduction

Dans le domaine de la robotique, nous sommes amenés à considérer des objets de natures très différentes. Ces objets sont d'abord, par exemple, des pièces à assembler dans une chaîne de montage, des outils ou, plus généralement, toute entité à manipuler. Mais les objets sont aussi les robots eux-mêmes ou encore leur environnement. Afin de programmer les tâches des robots, nous devons disposer d'un modèle des objets impliqués dans les tâches. La modélisation des objets est donc une part importante de la robotique, mais aussi de toute tâche automatique.

Tous les objets que nous avons mentionnés plus haut sont principalement caractérisés par leur géométrie. Toutefois, ils disposent généralement d'autres caractéristiques, telles que la couleur, la densité, la température, qui peuvent être intéressantes à modéliser selon la tâche à exécuter. Nous appellerons ces caractéristiques des *attributs*. La géométrie peut être un attribut prépondérant mais peut aussi ne pas être plus important que d'autres attributs, voire même être inexistant.

Bien que le contexte initial de ce travail soit la robotique et, plus particulièrement, la modélisation des environnements de robots, nous nous intéressons dans cette thèse à la modélisation des objets en général. Notamment, les domaines manufacturier et minier sont d'un intérêt certain par leurs besoins en modélisation d'objets très variés possédant de nombreux attributs (section 1.5 et chapitre 3).

Les besoins industriels actuels montrent clairement un besoin d'intégration de toutes les informations relatives aux objets, quel que soit le type des informations. De plus, afin d'uniformiser, et donc de simplifier, les opérations liées aux données

utilisées (échange de données, création de bases de données, saisie des données, etc.), un modèle unique permettant de représenter tous les objets est recherché. C'est ce que nous appellerons un *modèle générique d'objets*. La partie « Modélisation de l'Objet » du titre de cette thèse fait référence à cette modélisation générique. D'autre part, le titre contient les mots « modélisation » et « représentation ». Ces deux mots désignent respectivement une description d'une classe d'objets et une description d'un objet particulier. Une représentation est donc une instance d'un modèle décrivant un objet qui est une instance d'une classe d'objets (la section 1.1 donne plus de détails ainsi que d'autres définitions).

Dans cette thèse, nous allons présenter un modèle générique d'objets : GNOME (« GeNeric Object ModEl »). Ce modèle a été développé en ayant pour but le respect de critères que nous estimons importants pour un modèle générique d'objets. Ces critères proviennent d'une part de modèles existant et d'autre part de besoins exprimés dans l'industrie. Nous verrons que les modèles présentés dans la littérature ne satisfont généralement pas tous les critères (section 1.4). En particulier, les modèles que nous présenterons ne sont pas génériques, à l'exception d'un modèle qui est une norme émergente de l'industrie manufacturière : STEP. GNOME a été conçu de façon à ne pas spécifier de méthode d'implantation tout en imposant des structures de représentation qui sont des graphes. Toutefois, une implantation d'une représentation suivant GNOME est directe, comme nous le verrons avec l'écriture en EXPRESS-G (le langage de description de STEP) de deux exemples : un exemple simple d'automobile lors de la description de GNOME et un exemple complet de mine au chapitre 3. Cet exemple de modèle de mine, GNOMine, a été développé pour répondre à un besoin actuel d'intégration des informations utilisées dans l'industrie minière. GNOMine est une instance de GNOME tout en étant un modèle générique de mine souterraine⁽¹⁾.

⁽¹⁾Le modèle, tel qu'il est, s'applique aux mines souterraines uniquement car il modélise les excavations minières souterraines. Les autres parties de GNOMine ne sont toutefois pas propres aux mines souterraines et l'ajout d'une partie décrivant des excavations à ciel ouvert permettrait d'étendre le modèle à ce type de mine.

La partie de GNOMine modélisant les excavations minières a été implantée et nous avons développé une application permettant la construction de représentations des excavations à partir de données d'arpentage. Ces données d'arpentage proviennent d'un système d'arpentage automatique des galeries de mine auquel travaille le Groupe de Recherche en Perception et Robotique de l'École Polytechnique de Montréal. Nous verrons que ces données d'arpentage diffèrent des données traditionnelles mais que des données traditionnelles déjà existantes peuvent aussi être utilisées ce qui est intéressant car les compagnies minières disposent d'une très grande quantité de telles données. Le but poursuivi lors du développement de cette application n'est pas de fournir un système final et commercial mais plutôt de montrer que la construction de telles représentations peut être faite et quelles en sont les difficultés.

Le plan de la thèse est le suivant. Le chapitre 1 donne quelques définitions de termes que nous utiliserons (section 1.1) et décrit les buts de la modélisation en général (section 1.2). Des modèles de la littérature sont ensuite décrits (section 1.3) puis évalués selon les critères que nous estimons importants pour un modèle générique d'objets (section 1.4). Enfin, STEP est décrit et évalué selon les critères (section 1.5). Le chapitre 2 est consacré à la description de GNOME, description qui sera faite en présentant le formalisme de GNOME. Mais auparavant (section 2.2), quelques notations mathématiques seront rappelées. Nous allons ensuite entrer dans le domaine des mines avec le chapitre 3. Diverses opérations minières ainsi que les informations qu'elles échangent y sont décrites (section 3.1). GNOMine, notre solution à l'intégration de ces informations, est ensuite présenté (sections 3.3 à 3.8). Cette présentation sera faite en utilisant le formalisme de GNOME ainsi qu'EXPRESS-G, l'expression graphique du langage de description de STEP. Les méthodes d'arpentage et l'automatisation de divers traitements des données d'arpentage telles qu'elles sont actuellement pratiquées sont présentées au chapitre 4. Le chapitre 5, quant à lui, décrit notre méthode de construction de représentations d'excavations minières (une partie de GNOMine) à partir de données d'arpentage.

Chapitre 1

Modélisation

Dans ce chapitre, nous exposons comment, selon nous, la modélisation doit être faite. Pour cela, nous commençons par présenter des modèles décrits dans la littérature (section 1.3). Nous exposons ensuite les critères qu'un modèle générique d'objets devrait respecter (section 1.4). Comme nous le verrons, ces critères proviennent de modèles fondamentaux existants et de besoins peu ou pas encore satisfaits. Les modèles décrits à la section 1.3 sont évalués suivant les différents critères présentés. Nous verrons que ces modèles ne présentent pas le caractère générique voulu et nous présenterons donc la norme émergente de l'industrie en termes de modélisation d'objets : STEP (section 1.5). Notamment, nous allons présenter deux exemples d'applications conformes à STEP et les expliquer à l'aide d'un exemple concret. Nous verrons que STEP n'est toujours pas satisfaisant du point de vue du caractère générique et nous proposerons donc notre modèle : GNOME (chapitre 2). Celui-ci sera comparé à STEP. Mais tout d'abord, il nous faut définir quelques termes (section 1.1) et discuter du rôle de la modélisation (section 1.2).

1.1 Définitions

Dans ce chapitre, ainsi que dans le chapitre 2, nous allons exposer notre vision de la modélisation des *objets* et la comparer avec des modèles existants. Dans tout ce travail, le terme *objet* fait référence à un système complexe tel qu'il en existe dans l'industrie : objet manufacturier, environnement de robot, milieu naturel, etc.

Ici, un *modèle d'objet* désigne une description d'une classe d'objets. Une *représentation* désigne une instance d'un modèle, c'est-à-dire une description d'un élément d'une classe d'objets. Par exemple, l'automobile d'une personne particulière est une instance de la classe « automobile ». Une description de cette automobile particulière est donc une *représentation* de cette automobile et est une instance d'un *modèle* d'automobile. Notons qu'une instance d'un modèle peut aussi être un modèle. Par exemple, un modèle d'automobile de type berline peut être une instance d'un modèle d'automobile plus général.

Remarquons que jusqu'à présent, nous n'avons utilisé que les expressions « *un* modèle » ou « *une* représentation » — par opposition aux expressions « *le* modèle » ou « *la* représentation ». En effet, *le* modèle d'un type d'objet dépend de l'utilisation qui est faite du modèle ainsi que de l'utilisateur du modèle et ne peut donc être défini que si l'utilisation et l'utilisateur sont spécifiés. Il en est évidemment de même pour la représentation. Par exemple, une automobile n'est pas vue de la même manière par un mécanicien ou par une vache (qui regarde passer l'automobile). De même, une personne ne considère pas son automobile de la même manière quand elle la conduit ou quand elle paye son assurance.

1.2 Un modèle : pour quoi faire ?

Depuis que l'Homme existe, il a cherché à comprendre le monde dans lequel il vit. Pour cela, il a fait entrer les objets qui l'entourent ainsi que les phénomènes qu'il percevait dans divers cadres. Cela a commencé par des représentations graphiques.

dont la complexité a évolué au cours du temps pour passer des dessins préhistoriques aux plans très précis actuels, puis a continué avec des modèles mathématiques. De nos jours, ces modèles sont concrétisés par des programmes ou des données informatiques.

Les buts de la modélisation sont multiples. Historiquement, comme nous l'avons déjà écrit, le but était d'étudier et de décrire des systèmes existants. Ces systèmes sont généralement extrêmement complexes (par exemple l'écoulement de l'air autour d'un avion ou l'évolution du cosmos). Ils peuvent aussi être trop grands (le cosmos), trop éloignés (un autre système solaire que le notre), trop dangereux (l'intérieur d'un réacteur nucléaire) ou tout simplement inaccessibles (les couches internes de la Terre). La modélisation tente alors de décrire de façon la plus fidèle possible de tels systèmes grâce à leurs manifestations extérieures (notre vue des étoiles, les éruptions volcaniques) et en se basant sur des lois préétablies (les lois de la mécanique par exemple).

La conception d'un nouveau système (un produit manufacturier par exemple) ou l'amélioration d'un système existant commence par la création d'un modèle de ce système. Dans ce cas, le modèle représente fidèlement le système à créer ou améliorer. Le modèle, une fois créé, permet de simuler le comportement de ce que sera le système et donc éventuellement de corriger la conception du système.

La modélisation peut aussi servir à décrire nos connaissances afin de les utiliser dans des tâches d'automatisation⁽¹⁾. Ces tâches sont par exemple la reconnaissance d'objets dans des images ou la navigation autonome. Dans le premier cas, une représentation des objets à reconnaître doit être disponible. Dans le second cas, nous devons posséder une représentation du véhicule, de ses senseurs et, éventuellement, de son environnement.

Enfin, un dernier rôle auquel nous pouvons penser est la description de systèmes virtuels. Une application de cette modélisation est l'apprentissage, par exemple, de

⁽¹⁾Notons que nous avons progressivement glissé dans des domaines où l'ordinateur devient un outil indispensable associé à la modélisation.

la conduite d'un véhicule ou encore de la manipulation d'un robot. Une autre application possible est l'interaction avec des systèmes éloignés ou inaccessibles physiquement, par exemple la téléopération à partir de la terre d'un bras robotique attaché à une navette spatiale. Enfin, toute une gamme d'applications concerne les jeux sur ordinateur utilisant la réalité virtuelle ou encore les interactions entre personnes virtuelles représentant des personnes physiques éloignées mais regroupées dans des mondes virtuels (application dont l'« ancêtre » est la téléconférence).

Nous nous intéressons dans ce travail à la modélisation générique des objets. De nombreux modèles spécifiques à des domaines, applications ou objets ont déjà été créés. Mais ces modèles ne permettent pas l'intégration de représentations provenant de différentes sources car ces modèles ne sont généralement pas compatibles. Or cette intégration est actuellement recherchée dans l'industrie en général (d'où l'émergence de STEP (section 1.5) par exemple) et dans l'industrie minière en particulier (chapitre 3). Un moyen de permettre cette intégration est de n'utiliser qu'un seul modèle qui doit donc être suffisamment générique pour permettre la représentation de tous les objets voulus.

1.3 Revue des modèles existants

Dans cette section, nous présentons quelques modèles de la littérature. Le but n'est pas de présenter une liste exhaustive de modèles ni de donner une description détaillée des modèles présentés. Le but est plutôt d'introduire des modèles importants par ce qu'ils apportent au domaine. Ceci permettra d'introduire les critères que doivent, selon nous, suivre un modèle générique d'objets (section 1.4).

Les modèles sont classés en deux catégories : la première contient des modèles généraux, la seconde contient des modèles spécifiques à certains types d'objets/applications. Les modèles généraux que nous décrivons sont fréquemment décrits dans la littérature et sont généralement admis dans l'industrie. Nous avons retenus les

modèles spécifiques pour plusieurs raisons. Certains sont importants historiquement (c'est par exemple le cas des modèles de Marr (1982) ou de Brooks (1981)) — ils sont les premiers étant reconnus pour introduire une idée ou un concept particuliers. D'autres développent des idées à la fois originales et importantes tandis que d'autres utilisent des modèles généraux éventuellement adaptés. De façon générale, nous avons tenté de couvrir un large éventail de ce qui est décrit dans la littérature tant au niveau des idées qu'au niveau des applications.

La plupart des modèles présentés sont clairement dédiés à des applications ou des objets particuliers. Notamment, ils s'intéressent principalement à la géométrie des objets qu'ils modélisent. À ce titre, ils ne répondent pas à nos exigences. Toutefois, l'intérêt de ces modèles est qu'ils exposent des idées qui, d'une part, sont à la base de la modélisation et, d'autre part, peuvent être extrapolées à d'autres applications.

Nous entrerons vraiment dans la modélisation générique avec la présentation d'une norme émergeante de l'industrie manufacturière (STEP) et avec le modèle que nous proposons : GNOME (GeNeric Object ModEl). Ce dernier sera comparé avec le premier et positionné par rapport à celui-ci.

D'autres modèles seront présentés plus loin (chapitre 4). Ces modèles servent à représenter différents types d'information reliés au domaine minier.

1.3.1 Modèles généraux

Les modèles par géométrie constructive solide (CSG : « Constructive Solid Geometry ») ont pour but de représenter uniquement la géométrie des objets (Requicha 1980, Meagher 1995, Gu et Norrie 1995). Les objets sont ici représentés comme les résultats d'opérations booliennes (union, intersection, soustraction) sur des primitives géométriques simples (sphères, cylindres, cubes, etc.). Ceci est généralement exprimé sous la forme d'un arbre dont les feuilles représentent les primitives géométriques et dont les nœuds non terminaux représentent les opérateurs booliens. Un tel modèle représente donc les objets par leur volume.

Les représentations par décomposition en cellules permettent de décrire la géométrie des objets sous la forme d'une partition de cellules (Requicha 1980, Meagher 1995, Gu et Norrie 1995). Chaque cellule peut éventuellement elle-même être décomposée en d'autres cellules. Les cellules sont généralement de formes simples. Une version 2D est aussi possible. Par exemple Mitchell (1989) décrit des environnements 2D à l'aide d'une telle représentation, notamment avec des cellules disposées sur une grille régulière (« bitmap »). Une telle représentation est aussi utilisée à un niveau du modèle d'environnement extérieur décrit dans (Lacroix et al. 1994) où chaque cellule possède un indice caractéristique de la région correspondant à la cellule : plat, obstacle, irrégulier, inconnu.

Les représentations par des arbres octaux servent à décrire la géométrie d'un objet et de son environnement immédiat. Un arbre octal décompose récursivement l'espace contenant l'objet en huit cellules parallélépipédiques rectangles. Chaque cellule est marquée comme vide (blanche), pleine (noire) ou étant sur la frontière de l'objet (grise). Les cellules grises sont décomposées jusqu'à ce que les cellules soient toutes noires ou blanches ou jusqu'à un degré de qualité voulu. Par opposition aux représentations par décomposition en cellules, les cellules d'un arbre octal sont toutes identiques à un facteur d'échelle près et disposées sur une grille régulière. De plus, seul l'objet (sans son environnement immédiat) est décrit dans les représentations par décomposition en cellules. Mitchell (1989) décrit des représentations d'environnements 2D avec des arbres quaternaires (la version 2D de l'arbre octal).

Les représentations par les frontières (B-Rep : « Boundary Representation ») décrivent les objets par leurs faces (Requicha 1980, Meagher 1995, Gu et Norrie 1995). Les faces sont elles-mêmes représentées par leurs côtés, ceux-ci étant caractérisés par leurs extrémités (qui forment les sommets de l'objet). Les faces, côtés et sommets sont des primitives topologiques. Elles sont quantifiées par des surfaces, courbes et points respectivement qui constituent les primitives géométriques. Différents graphes expriment des relations de connexion entre faces — les arcs représentant les côtés

— et d'adjacence entre sommets — les arcs représentant les côtés et les boucles représentant les faces. Notons qu'une version simplifiée des B-Rep, qui correspond aux représentations CAD traditionnelles, est souvent employée. Ce modèle représente simplement les objets par leurs surfaces (généralement planes ou en tous cas très simples). Dans ce cas, aucune notion de topologie et de hiérarchie n'est présente. Le modèle développé pour le système MOSAIC par Herman et Kanade (1984) est un modèle B-Rep. Mitchell (1989) décrit des représentations d'environnement suivant ce modèle : les obstacles ou des régions particulières de l'environnement sont modélisés par des polygones (donc une forme 2D dans un environnement 2D). Le modèle décrit dans (Lacroix et al. 1994) procède de la même manière. Dans ces deux exemples, une représentation par décomposition en cellules est modifiée par regroupement des cellules identiques pour créer un modèle CAD de l'environnement. Des graphes sont ensuite construits à partir des polygones. Les nœuds de ces graphes peuvent être les régions définies et les arcs les changements de régions (Mitchell 1989) — ce qui constitue donc une représentation B-Rep. Les nœuds peuvent aussi être les milieux des frontières entre régions et les arcs correspondre à la traversée d'une région (Lacroix et al. 1994).

1.3.2 Modèles spécifiques

Marr et Nishihara (1978) proposent un modèle pour représenter des objets pour leur reconnaissance (Nishihara 1981). Ce modèle utilise des cylindres généralisés pour représenter différents niveaux de détail de la géométrie des objets. La représentation d'un objet est constituée d'un cylindre généralisé qui décrit les dimensions et l'orientation grossières de l'objet. Le niveau suivant est constitué de plusieurs cylindres généralisés, chacun décrivant les dimensions et orientations des principales parties de l'objet, appelées *sous-objets* dans (Marr 1982). Une seconde partie du modèle décrit les positions et orientations des cylindres décrivant les sous-objets par rapport au cylindre décrivant l'objet. De plus, un sous-objet est en fait lui-même un objet, ce

qui conduit à une description en un nombre quelconque de niveaux de détails.

Dans le système ACRONYM (Brooks 1981, Brooks 1983a), un modèle d'objets est constitué de deux graphes : le *graphe des objets* et le *graphe des restrictions*. Le graphe des objets est constitué d'un arbre CSG pour décrire les différentes parties d'un objet (c'est le graphe des sous-parties) et d'un graphe exprimant des positions relatives entre les sous-parties attachées. L'arbre CSG n'est constitué que d'un seul opérateur — la réunion — et d'un type de primitive — des cylindres généralisés. Aussi bien les cylindres que les relations sont quantifiés à l'aide de contraintes (représentées sous la forme d'inégalités). Le graphe des restrictions est un graphe orienté dont les nœuds sont des ensembles de contraintes. Les arcs indiquent un ajout de contraintes. Ce graphe permet de définir des classes d'objets en contraignant plus ou moins leur quantification.

Brooks (1983b) propose une structure de graphe pour représenter l'espace libre de l'environnement 2D d'un robot. Pour cela, l'espace libre est décrit par un ensemble de cônes généralisés 2D. Ceux-ci peuvent éventuellement se recouvrir mais forment une couverture complète de l'espace libre. Les intersections des axes des cônes sont déterminées et constituent les nœuds du graphe : chaque intersection est présente deux fois (un fois pour chaque axe). Les arcs représentent soit un parcours le long d'un axe (entre deux sommets appartenant au même axe) soit un changement d'axe (entre deux sommets n'appartenant pas au même axe). Chaque nœud du graphe est quantifié par les intervalles d'orientation valide du robot à l'endroit correspondant.

Chatila et Laumond (1985) représentent l'environnement intérieur d'un robot à l'aide d'un modèle en trois parties. La première est géométrique et représente de façon détaillée les limites de l'environnement à l'aide de segments de droite. La seconde partie est topologique et hiérarchique : un graphe dont les nœuds sont des lieux fonctionnels de l'environnement (par exemple les stations de travail ou les points de recharge des batteries du robot) et dont les arcs indiquent les connexions entre ces lieux est construit à partir de la partie géométrique. Ce graphe constitue le

niveau le plus détaillé de cette partie et est transformé en regroupant des lieux et des connecteurs en un graphe moins détaillé qui sert à déduire la dernière partie qui est sémantique et décrit l'environnement en termes de salles, couloirs, portes, etc.

Connell et Brady (1987) proposent un modèle très similaire à celui d'ACRONYM (Brooks 1981). La différence se trouve au niveau de la quantification des objets et des relations. En effet, celle-ci n'est que sémantique. Les objets et les relations peuvent avoir un certain nombre de qualificatifs parmi des ensembles donnés. Chaque ensemble doit recouvrir tous les cas possibles de son espace de définition (par exemple un axe de cylindre généralisé est soit droit, soit courbé à droite, soit courbé à gauche) et le nombre des éléments des ensembles peut varier (grâce à une astucieuse utilisation du code Gray) afin de faire varier le niveau de quantification.

Kuipers et Byun (1987) proposent un modèle qualitatif dans lequel l'environnement est représenté par un graphe dont les nœuds sont des lieux et les arcs sont des déplacements entre lieux. Les lieux sont spécifiés par une signature sensorielle qualitative (lieu symétrique, lieu le plus étroit localement, lieu changeant brusquement de dimension, etc.) tandis que les déplacements le sont par une stratégie de contrôle elle aussi qualitative (rester au milieu, suivre la paroi, etc.).

Le modèle d'Allen (1988) décompose les objets en composantes (les parties pleines des objets) et caractéristiques (les trous et les cavités). Les composantes sont décomposées en surfaces qui sont elles-mêmes décomposées en pièces bi-cubiques. Les différents éléments du modèle sont quantifiés géométriquement (par exemple par la spécification des paramètres de l'équation des pièces bi-cubiques, de la boîte englobante et des moments de la section des composantes ou encore de l'aire des surfaces). Ils sont aussi quantifiés par des indices qui sont caractéristiques de leur importance (en taille, en fonction ou dans le processus de reconnaissance qui est l'utilisation qui est faite du modèle). Une relation d'adjacence est représentée entre les différents éléments.

Binford et al. (1989) proposent un modèle dont la base est le modèle de Brooks (1981). Ils ont ajouté la possibilité de spécifier des attributs relatifs à la surface des

objets tels que la couleur, le fini ou la texture. Mais leur principal ajout tient dans les relations d'attachement qui permettent d'exprimer, par exemple, par quelles faces les deux objets en relation sont attachés.

Kosaka et Kak (1992) proposent un modèle hiérarchique de corridors de bâtiments. Le premier niveau est constitué d'un graphe dont les nœuds sont les faces de murs composants le corridor et dont les arcs décrivent les connexions entre les faces. Les faces ne sont décrites à ce niveau que par leur projection sur le sol. Le niveau suivant associe à chaque face une liste de caractéristiques importantes de la face (des segments décrivant la présence de fenêtres, de cadres, etc.).

Bergevin et Levine (1993) proposent un modèle basé sur les travaux de Biederman (1985) sur la reconnaissance immédiate d'objets. Dans ce modèle, les objets sont décrits par un graphe dont les nœuds sont des geons — des primitives décrivant de façon qualitative la forme des parties de l'objet — et dont les arcs décrivent les connexions et positionnements relatifs qualitatifs des parties de l'objet.

Rivlin et al. (1994) proposent un modèle d'objet incluant la géométrie de l'objet ainsi que sa fonction. La géométrie et la fonction ont chacune leur propre représentation indépendante (très similaire à celle de Bergevin et Levine (1993)). Les primitives géométriques et fonctionnelles sont ensuite reliées par des relations fonctionnelles qui indiquent comment les fonctions doivent interagir pour exécuter la tâche.

Nashashibi et al. (1994) ainsi que Lacroix et al. (1994) proposent un modèle d'environnement extérieur en plusieurs parties. Au niveau le plus grossier de ce modèle, il y a une grille d'élévation : chaque cellule d'une grille régulière possède une hauteur. Cette grille est ensuite approchée par un ensemble de B-splines. Celles qui sont trop loin de la grille d'élévation — c'est à dire dont l'erreur quadratique totale est trop importante — sont décomposées (récursivement) en B-splines plus petites construites sur une grille plus dense.

1.4 Les critères que doit satisfaire un modèle

Cette section présente notre point de vue sur la modélisation des objets — rappelons que le terme *objet* désigne en fait un système complexe (section 1.1). Ce point de vue est évidemment largement dépendant de notre intérêt initial qui a été à l'origine de ce travail : la représentation de scènes tridimensionnelles (Laganière et al. 1992). Par la suite, nos intérêts ont plus particulièrement portés sur la représentation d'environnements de robots mobiles. Ce point de vue est aussi guidé par la littérature qui présente de nombreux critères que devrait satisfaire un modèle (Peterson 1981, Marr 1982, Binford 1982, Brady 1983, Connell et Brady 1987, Meagher 1995). Ces critères sont généralement très orientés vers un type de tâche et un type d'objet. Parmi ces critères, nous allons présenter et expliquer ceux qui nous semblent essentiels dans le cadre d'un modèle générique de systèmes complexes et en ajouter d'autres.

Nous constaterons que tous les critères énoncés sont respectés par au moins un modèle décrit à la section 1.3 mais qu'aucun de ces modèles ne respecte tous les critères. Un tableau final récapitule la satisfaction ou non des différents critères par les différents modèles présentés (tableau 1.1, page 24).

1.4.1 Modélisation multi-attributs

Les systèmes complexes comprennent généralement de nombreux aspects — *aspects* que nous appellerons *attributs* par la suite. Ces attributs peuvent être, par exemple, la géométrie, la couleur, la texture, le matériau, la fonction ou encore le processus de fabrication.

Il est fréquent que certains attributs jouent un rôle central dans l'objet. Dans ce cas, souvent les autres attributs ne sont que localement appliqués aux attributs centraux. Par exemple, pour de nombreux modèles que nous avons présentés, la géométrie est l'attribut central et des propriétés non géométriques telles que les matériaux constituant l'objet sont simplement associées aux parties géométriques correspon-

dantes. Ces différences de rôles doivent évidemment être préservées par la représentation de l'objet tout en conservant aux attributs « secondaires » leur identité, voire indépendance (voir la section 1.4.3).

Les modèles CSG, les modèles par décomposition en cellules et les modèles par arbres octaux permettent d'associer des attributs non géométriques (couleur, masse, matériau, etc.) aux primitives géométriques utilisées, mais il ne s'agit que d'une association ponctuelle. Par exemple, dans la représentation d'environnements extérieurs, un indice caractéristique des régions représentées est associé aux cellules correspondantes des bitmaps de Mitchell (1989) ou de Lacroix et al. (1994). Binford et al. (1989) associent de la même manière divers attributs non géométriques à leurs éléments géométriques. Nous ne pouvons donc pas dire que ces modèles soient multi-attributs.

Le modèle qu'Allen (1988) propose introduit localement des attributs qui ne sont pas géométriques mais fonctionnels. Ils ne sont toutefois pas représentés explicitement mais uniquement à travers des indices associés aux primitives géométriques et dont la valeur est fonction des ces attributs.

Le modèle que Rivlin et al. (1994) proposent est le seul parmi ceux que nous avons présentés à la section 1.3 qui soit multi-attributs au sens où nous l'entendons : deux attributs, la géométrie et la fonction, sont représentés indépendamment. Il semble donc que le caractère multi-attributs n'en est pas un qui soit important. Pourtant, l'industrie manufacturière a besoin de modèles multi-attributs (Chan et Gu 1993). Comme nous le verrons au chapitre 4, l'industrie minière se tourne aussi vers ce concept.

1.4.2 Modélisation hiérarchique

Tout objet peut généralement être considéré à différents niveaux :

Différents niveaux de détail. Certaines tâches, comme la reconnaissance d'objets, peuvent utiliser une description des objets qui soit grossière à certaines étapes et détaillée à d'autres. Une description grossière est un niveau avec peu de

détails, c'est-à-dire ne contenant que les principaux éléments de l'objet. Par exemple, la boîte englobante des objets, qui est une forme grossière des objets, permet de faire une première discrimination suivant les dimensions générales des objets et permet de distinguer les camions des automobiles. Une description détaillée contient des éléments qui permettent de raffiner le résultat de la tâche. Par exemple, la présence de un, deux ou trois blocs de carrosserie dans une automobile ainsi que leur dimensions relatives permet de déterminer s'il s'agit d'une fourgonnette, d'une familiale, d'une berline ou d'une berline avec haillon. Un niveau plus détaillé encore donnerait une forme précise des différents blocs ainsi que des détails de la carrosserie et permettrait de déterminer la marque du véhicule.

Différents niveaux sémantiques. Des informations qualitatives des objets peuvent être décrites de façon sémantique. C'est par exemple le cas de la fonction d'un lieu dans un bâtiment qui peut être décrit à un premier niveau sémantique comme étant une pièce ou un corridor. Une pièce peut être décrite comme un bureau, une salle de repos, une salle de bain, un réfectoire, etc. Un bureau peut être décrit comme un bureau d'étudiants ou un bureau de professeur.

Différentes échelles de représentation/résolution. Un objet peut être décrit à plusieurs échelles. Par exemple, il existe des cartes géographiques d'une même région à différentes échelles. Notons qu'un changement d'échelle implique souvent un changement de niveau de détail. Ce n'est toutefois pas nécessaire et la distinction peut simplement se produire dans la précision des données numériques.

Cette liste n'est pas exhaustive.

Un modèle doit donc permettre de représenter hiérarchiquement chaque attribut. La hiérarchie est créée par les différents niveaux ce qui correspond à une décomposition récursive dans l'espace de représentation de l'attribut. Notamment, l'information à un niveau particulier doit être une synthèse de l'information au niveau inférieur car

sinon il s'agit plutôt de représentations parallèles. Par *synthèse*, nous entendons *moyens de réduire la quantité d'information*. C'est par exemple la suppression de détails peu importants, l'augmentation du pas d'échantillonnage des données numériques, le regroupement de spécifications sémantiques, l'utilisation d'un modèle géométrique plus grossier, etc. La décomposition dans l'espace de représentation de l'attribut peut être basée sur différents critères, soit à un niveau donné — par exemple un critère basé sur la géométrie et sur la couleur — soit entre les différents niveaux — par exemple un critère fonctionnel à un premier niveau et géométrique à un second. Les critères peuvent différer par leur nature ou par leur sensibilité. La nature d'un critère caractérise ce sur quoi porte le critère : la couleur, la courbure d'une courbe 2D, la continuité d'une fonction, etc. La sensibilité d'un critère quantitatif caractérise les valeurs qui font que le critère est satisfait, typiquement des seuils ou pas d'échantillonnage.

Les modèles CSG ne sont pas hiérarchiques : chaque niveau correspond à une étape de la construction de l'objet et non pas à un niveau de détail différent. Les primitives d'un arbre CSG peuvent d'ailleurs ne correspondre à rien dans l'objet lorsqu'elles sont considérées individuellement. Par opposition, les modèles par décomposition en cellules, incluant les représentations par arbres octaux, sont hiérarchiques puisque chaque élément fait effectivement partie de l'objet et que les différents niveaux correspondent bien à des niveaux de détails différents.

Les B-Rep présentent une hiérarchie figée puisque dans un tel modèle, les objets sont représentés par leurs faces qui sont elles-mêmes représentées par leurs côtés, eux-mêmes représentés par leurs extrémités. Toutefois, chaque niveau n'est pas une synthèse du niveau inférieur. Par exemple, une face est géométriquement spécifiée par une surface et quatre courbes. Cette face est décomposée en quatre côtés chacun étant géométriquement spécifiés par une courbe et deux points. Une partie de l'information géométrique (la surface) a donc disparu lors du changement de niveau vers le bas. Ceci est contraire à ce que nous préconisons plus haut. Il en est de même pour le modèle de corridors de bâtiments de Kosaka et Kak (1992) qui présente une hiérarchie

de niveaux de détail. Mais il ne s'agit pas, dans ce cas, d'une décomposition mais d'un ajout de détails.

Brooks (1981) affirme que son modèle présente une hiérarchie de détail des objets représentés — cette hiérarchie est aussi utilisée par Connell et Brady (1987) et Binford et al. (1989). Toutefois, aucune décomposition n'est représentée dans son arbre des sous-parties. Cet arbre représente en fait des connexions⁽²⁾ entre parties géométriques importantes et moins importantes (de taille inférieure et fournissant donc plus de détails à la représentation). Ceci correspond effectivement à des niveaux de détails différents dans les exemples que Brooks donne. Par exemple, les moteurs d'un avion sont plus petits que les ailes et le fuselage de l'avion et aussi moins importants du point de vue de la reconnaissance de l'avion (la reconnaissance des objets étant le but du système). Mais prenons le cas d'une automobile. Les roues sont beaucoup plus petites que le reste de l'automobile. Toutefois, quand nous nous intéressons à la fonction, il faut les représenter au même niveau que le « corps » de l'automobile car, d'un point de vue fonctionnel, une automobile n'en est pas une si elle n'a pas de roues. Ceci semble être impossible avec ACRONYM. Ce modèle présente donc une certaine hiérarchie mais qui n'est pas une hiérarchie de décomposition.

Le modèle de Bergevin et Levine (1993) n'est pas hiérarchique, les objets étant simplement constitués d'éléments liés entre eux. Il en est de même pour les parties géométrique et fonctionnelle du modèle de Rivlin et al. (1994) qui sont très semblables au modèle de Bergevin et Levine (1993).

Par contre, les modèles de Marr et Nishihara (1978) et Allen (1988) présentent évidemment une hiérarchie de décomposition conforme à notre critère. Les modèles de Chatila et Laumond (1985) et de Nashashibi et al. (1994) décrivent des environnements de façon hiérarchique puisque à différents niveaux de détail (d'une représentation géométrique éventuellement sur plusieurs niveaux à une représentation topologique).

⁽²⁾ Il s'agit d'un arbre CSG ne représentant que la réunion des primitives.

1.4.3 Modélisation modulaire

Dans une entreprise, la représentation d'un objet est souvent utilisée par de nombreuses applications qui n'ont besoin que d'informations relatives à des parties de l'objet, ces parties étant elles-mêmes des objets. La représentation d'un objet doit donc explicitement décrire les parties de l'objet. La description de chaque partie doit de plus constituer une représentation valide.

D'autre part, afin de permettre l'ajout de nouveaux attributs ou le retrait d'attributs déjà inclus dans la représentation, il faut que chaque attribut soit représenté séparément. Les liens entre les divers attributs doivent ensuite être explicités, ces liens pouvant être variables et amovibles — ce qui est évidemment plus difficile à réaliser si les liens ne sont pas explicites. De la même manière, des liens intra-attributs doivent être explicités.

La modularité est renforcée si les données d'un type particulier ne sont présentes qu'à un endroit dans la représentation. Par exemple, la géométrie de l'objet ne doit pas être présente en divers endroits sous diverses formes. Le but est de permettre le maintien de la cohérence de la représentation, ce qui n'est pas aisé si la même information est présente dans diverses parties de la représentation.

La modularité s'obtient donc en séparant les différents attributs, en préservant les notions de parties dans les différents attributs et en explicitant les relations inter-attributs ainsi qu'intra-attribut.

Des exemples typiques de modèles modulaires sont les modèles CSG ainsi que les modèles de Marr et Nishihara (1978), Brooks (1981), Connell et Brady (1987), Binford et al. (1989), Bergevin et Levine (1993) et Rivlin et al. (1994). En effet, dans tous ces modèles, une représentation peut être coupée à un endroit pour ne considérer que la partie correspondante de l'objet. La structure de représentation utilisée (des graphes) facilite d'autant plus la modularité. Ceci est d'autant plus vrai dans le modèle de Rivlin et al. (1994) où la géométrie des objets est séparée de la fonction des objets. Les B-Rep, quant à elles, séparent la topologie des objets de la géométrie

quantifiée des objets. Des relations sont exprimées entre ces deux parties. Toutefois, un retrait ou un ajout d'un élément doit être fait avec attention car ce modèle doit préserver la validité topologique des représentations.

Les modèles par décomposition en cellules paraissent modulaires. Toutefois, la décomposition est faite suivant les primitives disponibles de façon à représenter l'objet avec une bonne fidélité. Une partie de la représentation ne correspond donc pas nécessairement à une partie remarquable de l'objet. Il en est évidemment de même pour les bitmaps. Les arbres octaux, même s'ils sont assez semblables à la décomposition en cellules, présentent une meilleure modularité. En effet, pour n'utiliser qu'une partie de l'espace, il suffit de ne considérer qu'une partie de l'arbre octal. Toutefois, la décomposition n'étant basée que sur la disposition d'une grille régulière et non pas sur une réalité physique, il faut en général considérer une partie de l'arbre octal plus grande que nécessaire pour inclure la partie voulue. L'utilisation de graphes dans le modèle ne rend donc pas nécessairement le modèle modulaire. La méthode de décomposition est aussi importante et doit se baser sur l'objet représenté et non sur un critère inhérent au modèle. Par exemple, le modèle de Allen (1988) pourrait être modulaire et ce grâce à ses structures de représentation. Toutefois, la décomposition est très rigide et ne permet donc pas de modification de la structure d'une représentation.

Divers modèles d'environnement présentent une modularité qui est due à la localité des informations et de leur représentation. Par exemple, le modèle d'espace libre de Brooks (1983*b*) est facilement mis à jour quand il faut insérer de nouveaux obstacles (ou en supprimer). Chatila et Laumond (1985) et Kuipers et Byun (1987) utilisent la modularité de leur modèle en mettant à jour la représentation au fur et à mesure que l'exploration de l'environnement progresse. Notons qu'il pourrait en être de même dans le modèle de Kosaka et Kak (1992) mais ceci n'est pas fait.

1.4.4 Modélisation à différents niveaux de quantification

La hiérarchie (section 1.4.2) conduit généralement à différents niveaux de quantification : les niveaux élevés correspondent souvent à une quantification grossière alors que les niveaux bas correspondent généralement à une quantification fine. À l'extrême, une représentation stable est une représentation purement qualitative. Mais il faut toutefois pouvoir quantifier la représentation, une représentation purement qualitative étant généralement insuffisante (Weinshall 1993). D'autre part, il est intéressant de permettre plusieurs degrés de quantification. Par exemple, une quantité peut être spécifiée comme une valeur exacte, comme appartenant à un intervalle, comme une probabilité ou encore relativement à d'autres quantités.

Ici, nous parlerons de *qualitatif* quand aucune quantité n'est spécifiée. Lorsqu'une quantité est associée à une partie de la représentation, nous parlerons alors de *quantification*. Notons que la quantité peut être un sous-ensemble d'un ensemble fini dont chaque élément peut exprimer une quantité ou une qualité⁽³⁾. Nous pensons qu'un modèle doit au moins comporter une partie purement qualitative qui forme la structure stable de l'objet. Cette partie peut éventuellement être quantifiée. La quantification doit pouvoir être aussi précise que la spécification d'une valeur exacte. Elle doit aussi pouvoir être imprécise, par exemple par la spécification d'un intervalle de valeurs ou d'une distribution de probabilité. Ceci permet de représenter des classes d'objets ou encore des objets variables, non rigides par exemple.

Les nœuds représentant les transformations d'un arbre CSG sont généralement exactement quantifiés, le but d'un tel modèle étant généralement de représenter un objet précis et non pas une classe d'objets. Mais rien n'empêche une quantification non exacte. C'est ce qui est d'ailleurs fait par Brooks (1981). Une B-Rep contient une partie topologique (donc qualitative) et une partie quantitative dont les valeurs sont exactes. De par sa construction, un modèle par décomposition en cellules est toujours quantifié, chaque cellule ayant une forme et une taille précisément spécifiée.

⁽³⁾Une quantité échantillonnée est parfois considérée comme qualitative dans la littérature.

De nombreux modèles présentés dans la littérature possèdent une partie qualitative (décomposition et relations) et une partie quantitative imprécise (avec éventuellement plusieurs niveaux d'imprécision) afin de permettre une géométrie variable. C'est le cas de Marr et Nishihara (1978), Brooks (1981), Binford et al. (1989). Le modèle de Brooks (1981) contient en plus une hiérarchie explicite de niveaux de quantification permettant la représentation explicite d'une hiérarchie de classes d'objets.

D'autres modèles possèdent une partie qualitative ainsi qu'une partie quantitative exacte. C'est par exemple le cas dans (Allen 1988) où chaque élément de la hiérarchie est quantifié par différents quantificateurs de différents niveaux : boîte englobante, aire, forme qualitative, indicateur de fermeture, etc. C'est aussi le cas dans les modèles d'environnement de Brooks (1983*b*), Chatila et Laumond (1985), Kosaka et Kak (1992) et Lacroix et al. (1994).

Enfin, certains modèles ne sont que qualitatifs : Connell et Brady (1987), Bergevin et Levine (1993), Rivlin et al. (1994) et Kuipers et Byun (1987).

Nous pouvons donc constater que tous les modèles décrits ici présentent une composante qualitative car celle-ci représente les caractéristiques stables des objets. Ensuite, suivant les besoins des applications, une composante quantitative éventuellement à plusieurs niveaux est ajoutée.

1.4.5 Modélisation à partir de primitives différentes

Le choix des primitives de représentation a été longuement discuté dans la littérature (Marr 1982, Brady 1983, Biederman 1985). Mais ces discussions se tiennent généralement dans un cadre particulier et leurs résultats, certainement très valides dans leur cadre respectif, ne peuvent être généralisés.

En fait, chaque attribut possède ses primitives particulières définies dans son espace de représentation et pouvant être de différents niveaux. De plus pour un même attribut, la meilleure primitive dépend de l'application, du système représenté, du niveau dans la hiérarchie, etc. Par exemple, des cylindres généralisés ou des super-

quadriques peuvent être utilisés comme primitives géométriques de bas niveau. Mais des chaises et des tables peuvent aussi être des primitives géométriques s'il s'agit de représenter un bâtiment. Par contre, il est clair que ces primitives ne s'appliquent pas du tout à d'autres attributs comme la couleur ou la température. Des primitives de ces deux attributs seront par exemple des points, des régions ou seront sémantiques.

Les primitives géométriques du modèle CSG sont a priori quelconques, bien que généralement simples. Notamment, elles ne sont que très peu dépendantes des objets modélisés puisqu'elles ne correspondent pas nécessairement à des parties de ces objets. Les primitives des modèles B-Rep sont des surfaces, des courbes et des points. Les surfaces et les courbes sont a priori quelconques mais en général simples. Les primitives d'un modèle par décomposition en cellules sont quelconques mais encore une fois généralement simples. Ceci n'est pas le cas pour un arbre octal où il n'y a qu'une primitive : le parallélépipède rectangle.

Les modèles présentés à la section 1.3.2, par leur caractère spécifique, n'utilisent individuellement que peu de primitives. Mais globalement, de nombreuses primitives sont utilisées : cylindres généralisés (Marr et Nishihara 1978), cônes généralisés (Brooks 1981, Binford et al. 1989), rubans (Brooks 1983*b*, Brady 1983, Connell et Brady 1987), segments (Chatila et Laumond 1985, Kosaka et Kak 1992), etc. Des primitives géométriques qualitatives (Biederman 1985, Bergevin et Levine 1993, Rivlin et al. 1994), topologiques (Chatila et Laumond 1985, Kuipers et Byun 1987) et sémantiques (Chatila et Laumond 1985, Rivlin et al. 1994) sont aussi utilisées.

Il est donc important que, dans le cadre d'un modèle générique, des primitives de types différents — dans un attribut donné ou entre les différents attributs — puissent cohabiter.

1.4.6 Récapitulation

Le tableau 1.1 récapitule la satisfaction ou non des différents critères par les modèles de la littérature que nous avons présentés. Comme nous pouvons le constater, aucun

Tableau 1.1 : Les modèles présentés et les critères que nous avons énoncés. Un « x » signifie que le critère est satisfait, un « ? » signifie que le critère est satisfait — ou pourrait l'être — dans une certaine mesure et une case blanche indique que le critère n'est pas satisfait. Pour ce qui est de la quantification, nous n'avons mis un « x » que pour les modèles présentant effectivement plusieurs niveaux de quantification et un « ? » pour les modèles n'étant que qualitatifs.

	Attr.	Hiérar.	Modul.	Quantif.	Primit.
CSG	?	?	x		x
B-Rep		?	x	x	x
Cellules	?	?			x
Arbre octal	?	?	?		
(Marr et Nishihara 1978)		x	x	x	
(Brooks 1981)		?	x	x	
(Brooks 1983b)			x	x	
(Chatila et Laumond 1985)		x	x	x	x
(Connell et Brady 1987)		?	x	?	
(Kuipers et Byun 1987)			x	?	x
(Allen 1988)	?	x		x	x
(Binford et al. 1989)	?	?	x	x	
(Kosaka et Kak 1992)		?	x	x	
(Bergevin et Levine 1993)			x	?	?
(Rivlin et al. 1994)	x		x	?	x
(Lacroix et al. 1994)	?	x	?		

modèle ne satisfait tous les critères. Ceci provient du fait que ces modèles ont été développés dans le cadre d'applications particulières ne nécessitant donc pas le caractère générique que nous recherchons. Nous allons maintenant décrire STEP, une norme émergente de l'industrie pour représenter des produits manufacturiers. Nous allons voir que la généricité apportée par STEP n'est pas conforme à ce que nous attendons.

1.5 STEP : une norme ISO pour la représentation de produits manufacturiers

Dans cette section, nous entrons vraiment dans le domaine de la modélisation générique. Le domaine manufacturier fait de plus en plus appel à l'ingénierie concertée (« concurrent engineering ») (Chan et Gu 1993). Cette méthode nécessite de nombreux échanges de la description complète d'un produit lors de sa conception et réalisation. D'autre part, les compagnies échangent de plus en plus souvent de l'information sur les produits qu'elles utilisent ou produisent. Une nécessité apparaît donc : celle d'un modèle qui d'une part soit une norme — afin de faciliter l'échange d'information — et d'autre part soit capable de représenter tous les aspects d'un produit — c'est à dire ses spécifications, ses divers attributs, sa fabrication, etc. C'est ainsi que STEP (« STandard for the Exchange of Product model data », aussi connu sous le doux nom de ISO 10303) est apparu (Chan et al. 1993). STEP est en fait en cours de développement et le sera même probablement toujours. STEP, actuellement, semble s'affirmer comme une norme reconnue de l'industrie, d'où son importance.

Dans cette section, nous allons d'abord présenter deux applications conformes à la norme puis décrire brièvement la norme elle-même. La première application (section 1.5.1) concerne la représentation des gammes d'usinage. Le second exemple (section 1.5.2) est un modèle générique de produit. Un exemple d'objet — une automobile — sera utilisé pour expliquer les deux applications. Ce même exemple sera utilisé lors de la description du modèle que nous proposons (section 2.1) ce qui permettra une comparaison entre STEP et notre modèle (section 2.5.1).

1.5.1 Un modèle pour les gammes d'usinage

Marchand et Rivière (1996) proposent un modèle pour représenter les gammes d'usinage. Ce modèle permet tout d'abord de représenter une partie administrative qui concerne le produit à usiner ainsi que des parties qui permettent de spécifier les

machines, outils et matériaux utilisés. Trois autres parties sont aussi incluses : les activités de fabrication, la géométrie de conception et la géométrie de fabrication. Chacune des parties est appelée *Unité de Fonctionnalité*. La géométrie de conception fait référence à la géométrie de la pièce avant l'usinage (état brut) et après (état final), notamment par la spécification des dimensions et tolérances. La géométrie de fabrication n'existe que lors de la fabrication. Elle englobe la géométrie des surfaces fugitives qui apparaissent ainsi que la géométrie de ce qui entoure la pièce. La géométrie est spécifiée à l'aide du modèle de Surfaces Associées Technologiquement et Topologiquement (SAT)⁽⁴⁾.

Seules les activités de fabrication sont détaillées dans (Marchand et Rivière 1996). Une activité est une tâche effectuée lors de la fabrication d'un produit. Plusieurs activités peuvent être regroupées en groupes d'activités. Un groupe d'activités peut être une phase, une sous-phase, un processus, une séquence ou une opération⁽⁵⁾. Une phase est définie par une cellule de production, concerne le transport de la pièce et a pour composantes une liste ordonnée de sous-phases. Une sous-phase est définie par la mise en position de la pièce dans le porte-pièce et a pour composantes une liste ordonnée — qui définit donc implicitement l'ordonnement des tâches — de

⁽⁴⁾ Une SAT (Clement et Rivière 1993, Clement et al. 1995, Salomons 1995), ou encore TTRS (« Technologically and Topologically Related Surface »), est une paire de surfaces (ou de SAT) qui appartiennent à un même solide et qui sont associées pour des raisons fonctionnelles. Sept types de surfaces élémentaires sont définis. Ils sont caractéristiques de sept types de déplacement qui laissent ces surfaces invariantes. Les surfaces formant une SAT sont prises parmi ces types. L'association de la SAT consiste en la spécification des paramètres nécessaires et suffisants pour positionner une surface par rapport à l'autre. Le résultat de cette association est une surface parmi les mêmes sept types. Une SAT peut donc être construite à partir de SAT. Vingt huit associations différentes sont possibles à partir des sept types de surfaces considérées. Notons que quand les deux surfaces n'appartiennent pas au même solide, une pseudo-SAT peut alors être définie. Ce modèle est aussi utilisé pour spécifier les tolérances géométriques de pièces — en plus de leurs dimensions. Notamment, Clement et al. (1995) proposent un modèle pour représenter les tolérances en se basant sur la fonction des pièces (par exemple le rôle des différentes surfaces dans une tâche d'assemblage). Ce modèle est décrit à l'aide d'EXPRESSIONS, le langage de description de STEP.

⁽⁵⁾ Cette décomposition est proposée dans les travaux sur la conception automatique de gammes qui donnent des définitions précises de ces divers éléments composant un groupe d'activité. Cette décomposition est fonctionnelle et peut aussi être basée sur le lieu (la cellule de production) pour la phase, ou sur l'outil pour la séquence.

séquences. Une séquence est définie par l'outil utilisé et a pour composants une liste d'opérations qui peuvent être la mise en place de la pièce, un enlèvement de matière ou encore un contrôle, c'est à dire une palpation ou un calcul. Un ensemble de séquences constitue un processus. Chacune des entités introduites est quantifiée par des identificateurs, types, critères, contraintes, descriptions, etc. Par exemple, une sous-phase est quantifiée par les paramètres nécessaires à l'installation de la pièce dans le porte-pièce et à la fixation de ce dernier — ceci étant spécifié à l'aide de SATT. Un enlèvement de matière est quantifié par la géométrie après l'enlèvement de matière.

Des relations entre les différentes unités de fonctionnalité existent. Par exemple, les activités de fabrications sont liées aux outils (l'enlèvement de matière est lié à un outil, le contrôle à un programme de machine à contrôle numérique — considéré ici comme un outil) ou aux géométries.

L'usinage apparaît très tôt dans la fabrication d'un produit puisque cette opération permet la création de pièces qui seront par la suite assemblées. Dans une automobile, comme dans la plupart des produits manufacturiers, de nombreuses pièces sont usinées. Marchand et Rivière (1996) donnent comme exemple l'usinage d'une rainure dans une clavette. Dans ce cas, la pièce est initialement un cylindre métallique dans lequel une rainure de section rectangulaire sera fraisée parallèlement à l'axe du cylindre. Toute l'opération est effectuée avec un seul outil. Il n'y a donc qu'une phase et qu'une sous-phase. La sous-phase est composée de trois séquences qui sont la mise en place de la pièce, l'ébauche de la rainure et la finition. L'ébauche consiste en la spécification de l'outil (une fraise) et de divers paramètres le concernant (vitesse de rotation, vitesse de déplacement, etc.) et surtout de la géométrie du fraisage, à savoir trois plans spécifiés à l'aide de SATT. S'il avait fallu fabriquer le cylindre initial par exemple en tournant un bloc métallique, nous aurions dû introduire une sous-phase supplémentaire — en supposant qu'un tour était disponible dans la même unité de production — exécutée avant la précédente. Cette sous-phase aurait été constituée

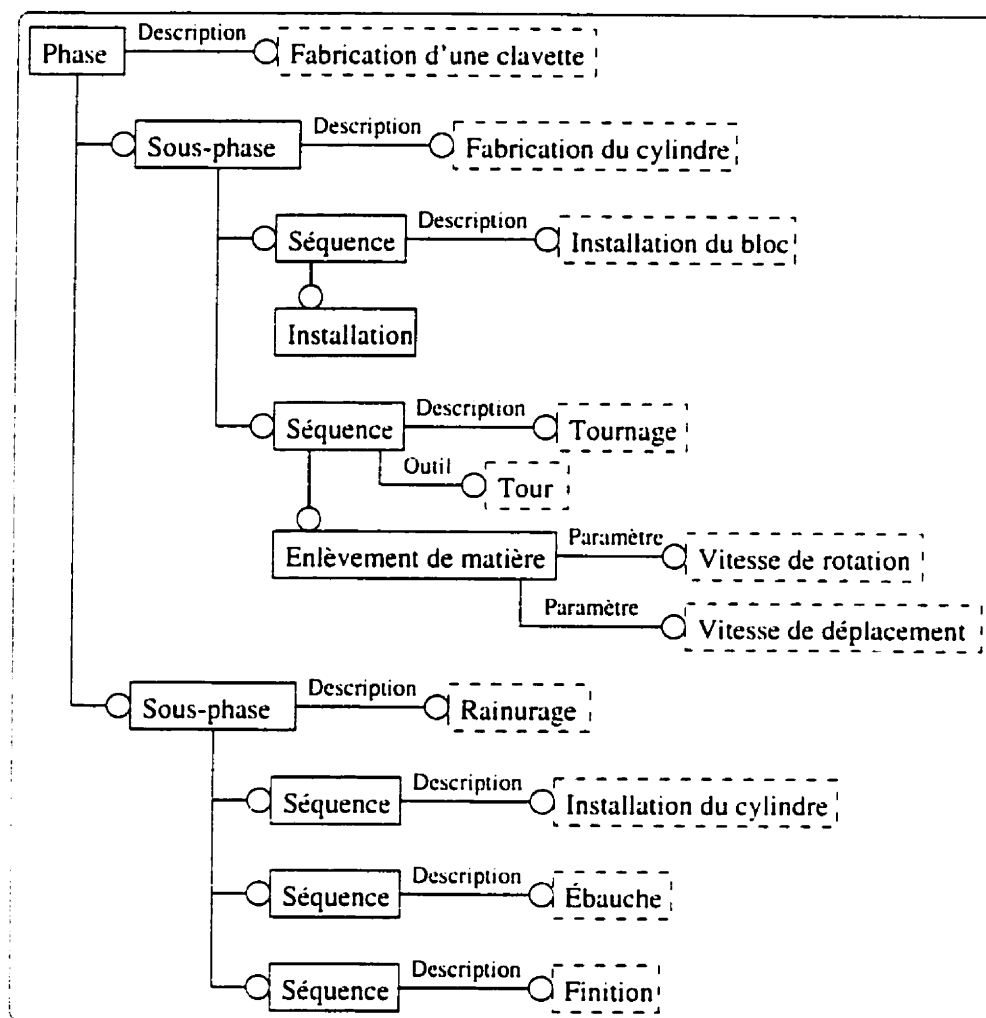


Figure 1.1 : Une partie de la représentation en EXPRESS-G — la représentation graphique d'EXPRESS, le langage de description de STEP — de l'usinage d'une clavette. La sous-phase de rainurage est plus détaillée dans (Marchand et Rivière 1996).

de plusieurs séquences dont la mise en place du bloc sur le porte pièce et le tournage de la pièce. La représentation — non complètement détaillée — est montrée à la figure 1.1.

1.5.2 Le GPM

Chan et Gu (1993) présentent un modèle générique de produits (« Generic Product Model » : GPM) qui a été conçu et implanté en utilisant les ressources intégrées de STEP (section 1.5.3). Il fournit une structure complète pour la description des données du produit. Cette structure dépend de l'application et de la connaissance disponible de l'application.

Le modèle utilise cinq bibliothèques qui vont contenir tous les objets nécessaires à la description du produit⁽⁶⁾.

La bibliothèque « ProductAndVersion » est constituée de deux classes : la classe « Product » sert à décrire le produit (identificateur, nom, description, cadre) : la classe « ProductVersion » sert à spécifier la version du produit (identificateur, description, fabriqué ou acheté, produit dont c'est une version). Notons que la définition de produit est très vaste. Ce qui est un produit pour une compagnie peut être un composant d'un produit pour une autre. Dans le produit *automobile*, nous trouvons par exemple les produits *roue*, *moteur* et *carrosserie*. La roue est constituée des produits *pneu* et *jante*. Ces deux derniers produits sont faits, entre autre, de caoutchouc et de métal respectivement. Le moteur est constitué, entre autre, des produits *bloc-moteur*, *culasse*, *vilebrequin*, *bielle* et *piston*.

La bibliothèque « ProductDefnRelation » contient deux hiérarchies de classes. La première, dont la base est la classe « ProductDefinition », sert à définir le produit (version, description, documentation, cadre). La seconde, dont la classe de base est « ProductDefinitionRelation », sert à définir les relations entre les produits. Les relations finalement disponibles⁽⁷⁾ permettent de spécifier :

- qu'un produit est créé à partir d'un autre produit par un processus spécifié

⁽⁶⁾Le terme « objet » utilisé ici n'a pas la même signification que dans la terminologie utilisée jusqu'à présent. Ici, il fait référence à la terminologie utilisée dans les langages orientés objets — EXPRESS, le langage de description de STEP, en étant un. Un objet est donc une instance d'une classe décrite dans une librairie.

⁽⁷⁾La bibliothèque contient de nombreuses classes, mais seules celles qui sont au bas de la hiérarchie d'héritage sont effectivement utilisées pour décrire les relations entre produits.

(classe `< MakeFromUsageOption >`) : par exemple, un pneu est fabriqué à partir de caoutchouc par moulage :

- qu'un produit est construit par l'assemblage d'un certain nombre d'autres produits (classe `< ComponentUsageQuantifiedAssembly >`) : par exemple, une automobile est constituée, entre autre, de quatre roues ;
- qu'un produit est directement constitué par assemblage d'un produit spécifié (classe `< NextAssemblyUsage >`) : par exemple, la culasse et le bloc-moteur sont assemblés, avec d'autres produits, pour former le moteur ;
- qu'un produit intervient dans l'assemblage d'un produit par le biais d'un autre produit, c'est à dire qu'un produit est un composant d'un produit lui-même composant d'un produit (classe `< SpecifiedHigherUsage >`) : par exemple, une culasse entre dans la composition d'une automobile parce qu'elle est un composant du moteur, celui-ci étant un composant de l'automobile ;
- qu'un produit entre dans la composition d'un produit sans spécifier ni comment ni où (classe `< PromissoryUsage >`) : par exemple, l'automobile va comprendre un moteur — d'un type déjà spécifié — sans pour autant connaître sa position dans celle-ci⁽⁸⁾.

La bibliothèque `< ShapeDefnRep >` contient les classes qui permettent de faire le lien entre la définition d'un produit et sa forme (sa représentation géométrique). Plus précisément, la classe `< ShapeRep >` permet de spécifier une liste d'éléments de représentation géométrique (classe `< GeoRepItem >`, voir plus loin la bibliothèque `< GeometricItem >`). La classe `< ShapeDefnRep >` associe un modèle de représentation (une instance de la classe `< ShapeRep >`) à la définition d'un produit ou d'une relation (instance des classes `< ProductDefinition >` et `< ProductDefinitionRelation >`

⁽⁸⁾Cette relation est utilisée lors de la conception du produit.

respectivement)⁽⁹⁾. Avec cette façon de procéder, un modèle de représentation peut décrire différents produits ou relation. Un produit ou une relation peut aussi être décrit par plusieurs modèles de représentation (CSG, B-Rep, etc.). Toutes les relations « Next.AssemblyUsage » sont associées à des éléments géométriques définissant des positions et orientations (relatives ou absolues).

La bibliothèque « GeometricItem » a pour rôle de représenter les éléments géométriques nécessaires à la construction des modèles de représentation. Des classes permettent de définir des points, des axes, des directions, des vecteurs, des primitives CSG et des résultats d'opérateurs booliens : ces deux derniers sont des modèles solides (classe « SolidModel »). Rappelons qu'une liste de ces éléments est associée aux définitions de produits ou de relation dans la bibliothèque « ShapeDefnRep ». Actuellement, un « SolidModel » ne peut être qu'un solide CSG, c'est à dire une primitive CSG ou le résultat d'une opération boolienne sur des solides CSG.

La bibliothèque « Material » permet la spécification des matériaux utilisés dans le produit. Un matériau est aussi considéré comme un produit. Cette bibliothèque contient donc la classe « MaterialProduct » qui hérite de la classe « Product » de la bibliothèque « ProductAndVersion ». La classe « MaterialProduct » permet de spécifier, à travers d'autres classes, une description du matériau, sa composition, sa source, sa structure spatiale, etc. Le matériau intervient dans la description du produit quand un composant du produit est fabriqué à partir d'un produit (matériau brut) par la classe « MakeFromUsageOption ».

La figure 1.2 montre une représentation simplifiée en EXPRESS-G d'une automobile selon le modèle GPM.

1.5.3 La norme ISO 10303

Après avoir proposé deux exemples d'applications conformes à STEP, nous allons maintenant décrire la norme elle-même. Une description plus détaillée de STEP peut

⁽⁹⁾Ceci est en fait fait par l'intermédiaire de la classe « ProductDefnShape ».

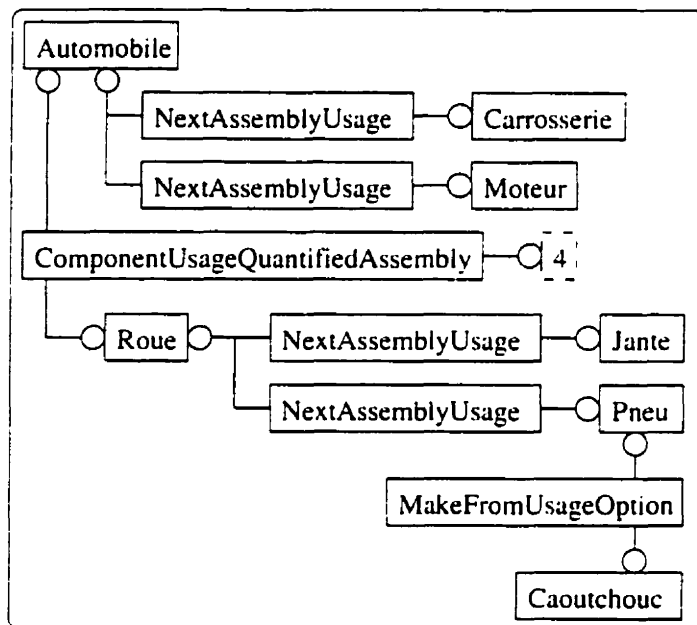


Figure 1.2 : Une représentation EXPRESS-G simplifiée d'une automobile et de son moteur suivant le modèle GPM. Notamment, les noms des arcs ne sont pas montrés, les liens entre les produits et leur représentation géométrique ne sont représentés qu'à travers une seule classe et, évidemment, tous les produits constituant l'automobile ne sont pas montrés. (Suite page 33)

être trouvée dans (Owen 1993, Chan et al. 1993).

STEP est une norme pour représenter et échanger des informations sur un produit manufacturier. À ce titre, tout ce qui est pertinent au produit peut être inclus : la géométrie, les étapes de la conception, l'historique, les matériaux, etc. La norme est composée d'un certain nombre de parties qui sont regroupées en séries. À chaque partie correspond un document de la norme.

La première série correspond aux parties 1 à 9 et est une introduction à STEP.

La seconde série (parties 11 à 19) contient les méthodes de description. Ceci comprend la spécification d'un langage descriptif orienté objet (EXPRESS), sa représentation graphique (EXPRESS-G), dont nous avons déjà montré quelques exemples (figures 1.1 et 1.2), et son instantiation (EXPRESS-I).

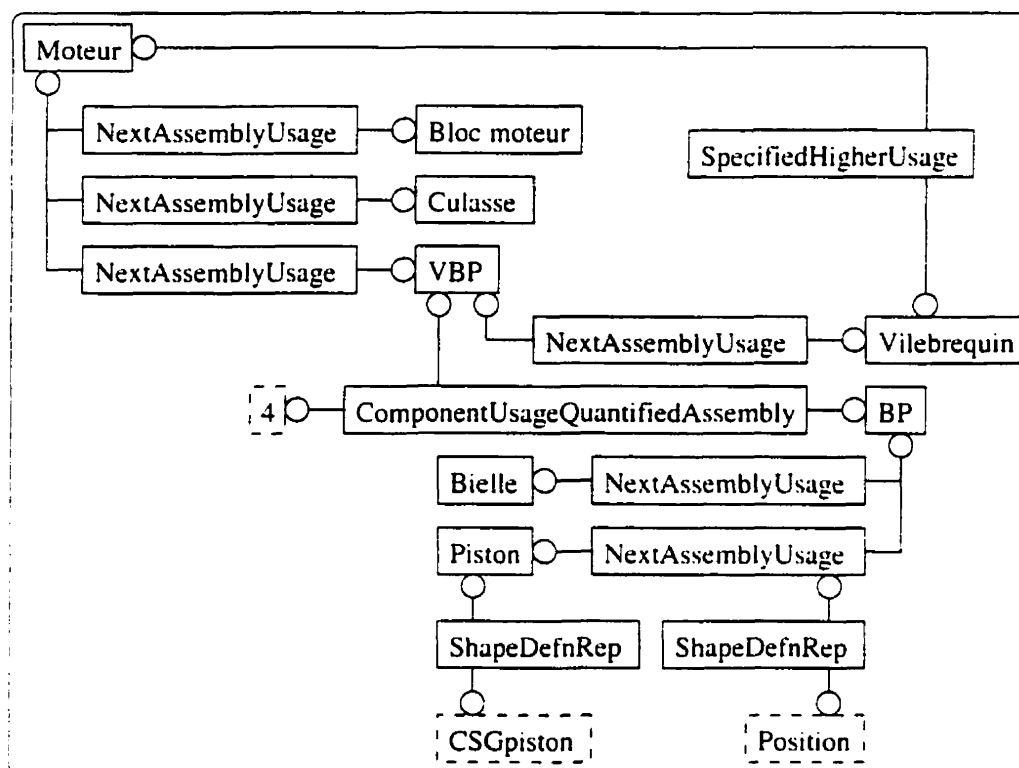


Figure 1.2 : (suite)

Les parties 21 à 29 forment la série décrivant les méthodes d'implantation. Actuellement, deux méthodes existent : l'encodage en texte lisible par un humain et par un ordinateur des structures d'échange écrites en EXPRESS et une interface d'accès aux données.

Une série décrit la méthodologie et le cadre de tests de conformité (parties 31 à 39). Ces tests sont à faire subir à toute implantation logicielle utilisant des applications décrites dans STEP (dans les séries 201 à 1199).

Les ressources intégrées (parties 41 à 99 et 101 à 199) décrivent la base de toute représentation suivant STEP. Certaines parties sont génériques (parties 41 à 99), indépendantes de tout contexte, d'autres sont particulières à des types d'applications (parties 101 à 199). Les parties génériques spécifient, par exemple, comment la des-

cription littérale du produit doit être faite, quelles sont les primitives géométriques et topologiques, les modèles géométriques et les structures de représentation qui peuvent être utilisées, comment les matériaux sont représentés, comment les tolérances de forme sont explicitées, etc. Les parties propres aux applications contiennent tout ce qui est nécessaire au dessin, aux applications électriques, à l'analyse par éléments finis, etc. Les ressources sont *intégrées* car elles proviennent de modèles existants qui ont été regroupés et épurés — par élimination des entités dupliquées. Les relations entre les différentes parties ont aussi été explicitées — par exemple, le modèle géométrique B-Rep utilise des primitives topologiques particulières.

Les parties 201 à 1199 forment les protocoles d'application. Ceux-ci décrivent des applications particulières en exprimant leur portée, leurs exigences, le modèle interprété de l'application (« Application Interpreted Model », AIM) et des exigences de conformité. L'AIM est l'interprétation des ressources intégrées pour les utiliser dans le contexte de l'application en spécifiant éventuellement de nouveaux attributs, contraintes ou relations. Les descriptions des deux exemples que nous avons donnés (sections 1.5.1 et 1.5.2) pourraient être une de ces parties.

Une dernière série (parties 1201 à 2199) contient une description des tests à faire et des résultats à obtenir pour chacune des parties des protocoles d'application.

Les séries ne sont pas indépendantes — à l'exception de la série d'introduction. La figure 1.3 montre qualitativement les relations entre les différentes séries. Chaque indice réfère à la relation suivante (Owen 1993) :

- 1 Le modèle normatif d'information des protocoles d'application est écrit en EXPRESS.
- 2 Les tests abstraits sont écrits en EXPRESS-I. Ils reflètent la structure et les options des modèles d'information écrits en EXPRESS.
- 3 Chaque méthode d'implantation fournit des exigences qui sont utilisées durant les tests de conformité.

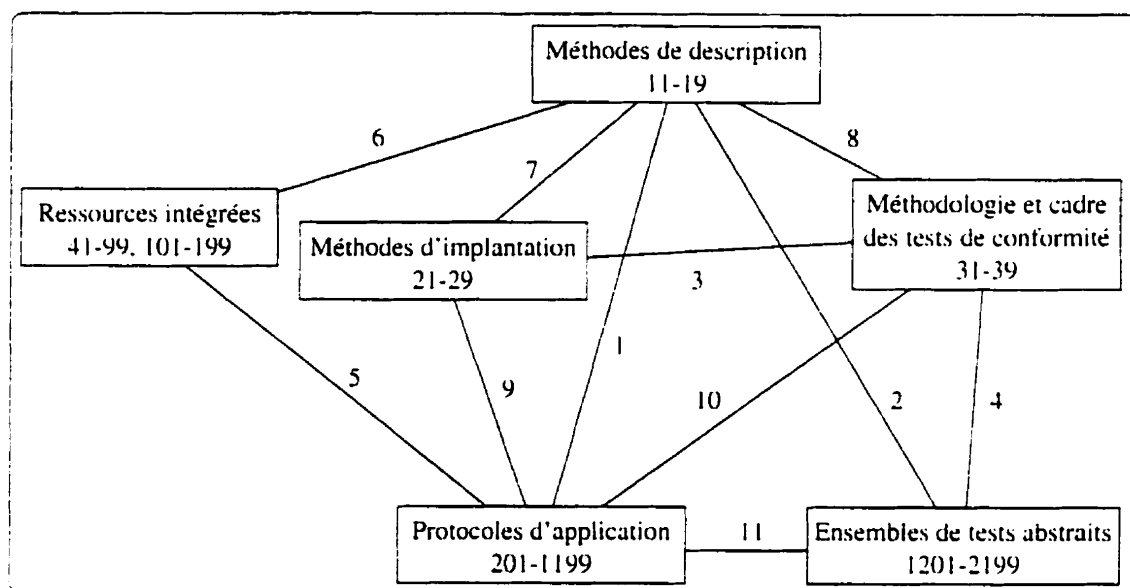


Figure 1.3 : Les relations entre les différentes séries de STEP (voir le texte pour l'explication des relations)

- 4 La structure et l'utilisation des ensembles de tests abstraits sont spécifiées par la méthodologie des tests de conformité.
- 5 Les ressources intégrées sont interprétées pour produire les protocoles d'application.
- 6 Le modèle normatif d'information des ressources intégrées est écrit en EXPRESS.
- 7 Les méthodes d'implantation décrivent comment chaque élément d'EXPRESS est implanté.
- 8 Les méthodes de tests de conformité disent comment EXPRESS-I est utilisé dans la définition des tests abstraits.
- 9 Un protocole d'application est combiné avec une méthode d'implantation pour former la base d'une implantation de STEP.

10 Les méthodes de tests de conformité indiquent comment l'implantation d'un protocole d'application doit être testé.

11 Pour chaque protocole d'application, un ensemble de tests abstraits est défini.

Comme nous avons pu voir, de notre point de vue — celui de la modélisation d'objets —, STEP est constitué de deux parties :

- un ensemble de guides, primitives, tests, etc., qui indiquent ce que doivent utiliser, satisfaire, etc., les modèles et les implantations logicielles qui vont être ou ont été développés.
- un ensemble de ces modèles déjà développés.

La généricité voulue par STEP n'est obtenue que par la compilation de toutes les primitives, relations, méthodes de représentation, etc., applicables aux différentes applications ciblées par STEP. Par exemple, la ressource intégrée qui traite de la représentation géométrique et topologique donne une liste hiérarchique de primitives géométriques et topologiques et de modèles géométriques (de ceux décrits dans la section 1.3). Comme autre exemple, l'AIM qui traite du dessin donne une liste de toutes les méthodes de représentation de formes 2D et 3D que l'on doit utiliser dans de telles applications si l'on veut se conformer à STEP. Il est clair que toute introduction d'une application non ciblée par STEP doit passer par une étape de spécification de nouveaux protocoles. Mais il n'est pas exclu qu'il faille aussi définir de nouvelles ressources intégrées.

1.5.4 STEP et les critères

Nous allons voir comment se comporte STEP vis-à-vis des critères que nous avons énoncés à la section 1.4. Ceci doit être fait à deux niveaux. Le premier se trouve au niveau de la description de STEP lui-même, le second se trouve au niveau des méthodes de représentations d'objets incluses dans STEP.

Commençons par la description de STEP (voir aussi la section 2.5.2).

- STEP est multi-attributs : chaque série de STEP est un attribut de la norme.
- STEP est hiérarchique : chaque série se décompose en parties qui elles-mêmes peuvent se décomposer sur plusieurs niveaux (la partie 43, par exemple, décrit les représentations géométriques et topologiques à l'aide de hiérarchies de primitives géométriques, de primitives topologiques et de modèles géométriques).
- STEP est modulaire : les différentes séries sont décrites indépendamment les unes des autres puis liées par des relations. Des relations sont aussi exprimées dans les différentes séries.
- Toutes les descriptions de STEP sont en texte ou en EXPRESS. Certaines parties sont qualitatives, d'autres sont quantifiées. Par exemple, la série traitant des tests à faire subir aux protocoles d'application peut contenir des données quantitatives.
- Différentes primitives sont utilisées dans la description de STEP. Ce sont tout d'abord des mots ainsi que des éléments du langage EXPRESS. Ceux-ci servent à décrire tous les éléments de STEP dont nous avons parlé à la section précédente qui sont aussi des primitives de STEP.

Nous voyons donc que la description de STEP satisfait tous les critères que nous avons introduits à la section 1.4.

Qu'en est-il des méthodes de représentations incluses dans STEP (les protocoles d'applications). Nous avons vu qu'elles utilisent en fait des modèles classiques tels que ceux que nous avons décrits aux sections 1.3, 1.5.1 et 1.5.2. De ce point de vue, STEP satisfait donc les critères que nous avons énoncés de la même manière que ces modèles. Examinons le modèle de gammes d'usinage et le GPM au regard des critères :

- Les deux modèles sont multi-attributs : ils permettent la représentation de la géométrie, des définitions des produits en jeu, des matériaux, etc.
- Le modèle de gamme décompose l'usinage en tâches elles-mêmes décomposées. Mais la hiérarchie est ici figée dans le sens où le nombre de niveaux possibles est fixe. Le GPM représente explicitement le fait qu'un produit est fait de produits. Ce modèle est donc hiérarchique.
- Le GPM est modulaire. Les produits sont représentés indépendamment puis liés explicitement par des relations. La modularité du modèle de gammes est discutable. En effet, les relations entre les différentes tâches de l'usinage ne sont qu'implicitement représentées par la quantification des tâches : une tâche est quantifiée par une liste ordonnées de sous-tâches (voir aussi la section 2.5.1). Ceci implique que la tâche ne peut pas être considérée sans ses sous-tâches.
- Les deux modèles ont plusieurs niveaux de quantification.
- Des primitives de types différents sont utilisées dans les deux modèles. Le modèle de gammes utilise des primitives sémantiques et des primitives géométriques qui ont une composante qualitative et une composante quantitative (les SATT). Mais ces primitives sont très dépendantes de la tâche. Le GPM utilise des primitives sémantiques ainsi que des primitives géométriques (les primitives des arbres CSG).

Le GPM se veut un modèle générique, mais de produits « uniquement ». Ceci restreint donc son caractère générique. Notamment, les relations et primitives utilisées sont propres au domaine manufacturier. Il en est de même pour le modèle de gammes.

1.6 Un nouveau modèle : GNOME

Les modèles que nous avons exposés précédemment ne montrent qu'un caractère générique partiel, quand ce n'est aucun. Leur domaine d'application n'est donc que

restreint. Pourtant, les échanges intra- et inter-entreprises de représentations informatiques sont de plus en plus fréquents, échanges qui seraient d'autant plus facilités si toutes les représentations utilisées suivaient un même modèle.

Nous avons développé un modèle générique d'objets (GNOME : « GeNeric Object ModEl ») basé sur les différents critères que nous avons précédemment énoncés. Ce modèle utilise des structures mathématiques permettant la représentation de primitives et de relations quelconques. Il renforce la modularité par l'utilisation de graphes (pour représenter les relations) et la hiérarchie par l'utilisation d'arbres. Chaque attribut de l'objet peut y avoir sa place, d'une part, de façon qualitative et, d'autre part, de façon quantifiée éventuellement suivant plusieurs niveaux. GNOME est décrit dans le prochain chapitre.

Chapitre 2

GNOME : un modèle générique d'objets

Le chapitre 1 parlait, d'une part, de critères que devrait satisfaire un modèle d'objets et, d'autre part, de la satisfaction de ces critères par différents modèles de la littérature. Ceci a permis deux constatations : les critères sont tous satisfaits par au moins un modèle, mais aucun modèle ne satisfaisait tous les critères. Tous les modèles présentés (à part STEP) ne sont pas — et ne se veulent pas pour la plupart — génériques. La norme ISO 10303 — ou encore STEP — (section 1.5) a été l'occasion d'une introduction à la problématique de la modélisation générique. Nous avons vu que STEP est une intégration de méthodes de représentation du domaine manufacturier, l'intégration ayant lieu aux niveaux les plus bas des représentations — c'est-à-dire au niveau des primitives, des modèles géométriques, etc. — et par la collection des représentations.

Dans ce chapitre, nous allons décrire le modèle que nous proposons (GNOME : « GeNeric Object ModEl », sections 2.1 à 2.3). La section 2.4 montrera quelques capacités et limitations du modèle qu'il est intéressant d'approfondir ou de préciser. La section 2.5 fera la comparaison entre STEP et GNOME.

2.1 Introduction à GNOME

Dans GNOME, les objets sont représentés par leurs attributs qui peuvent être, par exemple, la géométrie, la couleur, la densité, le matériau, la température ou encore le processus de fabrication ou la fonction. Chaque attribut est représenté indépendamment des autres dans un espace et avec une structure qui lui sont propres. Pour chaque attribut, des *objets-attributs* (des objets définis dans l'espace de représentation de l'attribut) peuvent être décomposés hiérarchiquement selon une structure arborescente. Sur cet arbre de décomposition est greffé un graphe représentant des relations entre les objets-attributs. Ces relations peuvent être la connexion, la position relative, un ordonnancement, une dépendance, etc. L'arbre et le graphe constituent une partie qualitative du modèle (la *structure*). Une partie quantitative (la *quantification*) est créée en associant aux objets-attributs ainsi qu'aux relations entre ceux-ci une application qui va préciser la forme, la taille, etc., de l'objet représenté. Un dernier graphe est introduit pour représenter des *relations inter-attributs*.

Automobile (1) : Tout au long de la description de GNOME, les concepts introduits seront illustrés par l'exemple d'une représentation, parmi de nombreuses possibles, d'une automobile. L'objectif de cet exemple n'est pas de proposer une représentation d'une automobile, mais bien de montrer comment une représentation donnée est exprimée à l'intérieur du formalisme de GNOME. Chacune des parties du document intitulées « Automobile » est une partie de l'exemple.

Représentation (1.a) : Dans les parties du chapitre intitulées « Représentation », le formalisme développé sera appliqué à la partie correspondante de l'exemple.

La section 2.2 donne un ensemble de notations nécessaires à la description du modèle, celui-ci étant décrit à la section 2.3. Plus précisément, la structure, la quantification et les relations inter-attributs sont respectivement décrites aux sections 2.3.1, 2.3.2 et 2.3.3. Une liste des symboles est donnée en début de document (page xxii).

2.2 Notations

Cette section décrit les notations que nous allons utiliser pour formaliser notre modèle d'objets. La plupart de ces notations peuvent être retrouvées dans (Ramis et al. 1983).

Un *graphe* $\Gamma(A)$ est un ensemble de couples, appelés les arcs, dont les éléments appartiennent à A (figure 2.1(a)) :

$$\Gamma(A) \subset A \times A.$$

Un nœud du graphe $\Gamma(A)$ est un élément de A appartenant à l'un des couples du graphe. À toute relation r nous pouvons associer un graphe $\Gamma_r(A)$:

$$\Gamma_r(A) = \{(a_i, a_j) \in A \times A \mid r(a_i, a_j)\},$$

où $r(a_i, a_j)$ indique que a_i est en relation avec a_j suivant la relation r . Un *graphe bipartite*, $\Gamma(A, B)$, est un graphe dont les couples sont des éléments de $A \times B$ (figure 2.1(b)) :

$$\Gamma(A, B) \subset A \times B.$$

Les graphes introduits jusqu'à présent étaient binaires, c'est à dire que les arcs étaient des couples. Un *graphe n -aire* peut aussi être défini comme étant un graphe dont les arcs sont des n -uplets. Ceci permet d'introduire un *graphe n -partite*, $\Gamma(A_1, \dots, A_n)$, qui est un graphe dont les arcs sont des n -uplets formés à partir de $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$.

Si un graphe Γ doit représenter plusieurs relations, alors il est transformé en un *graphe étiqueté*. Pour cela, une fonction F lui est adjointe (la définition d'une fonction est donnée plus bas). Cette fonction a pour ensemble de départ l'ensemble des arcs et pour ensemble d'arrivée un ensemble d'étiquettes parmi toutes celles possibles et dont l'ensemble est E . Chaque étiquette représente une relation particulière. Alors :

$$F: \Gamma \rightarrow \mathcal{P}(E).$$

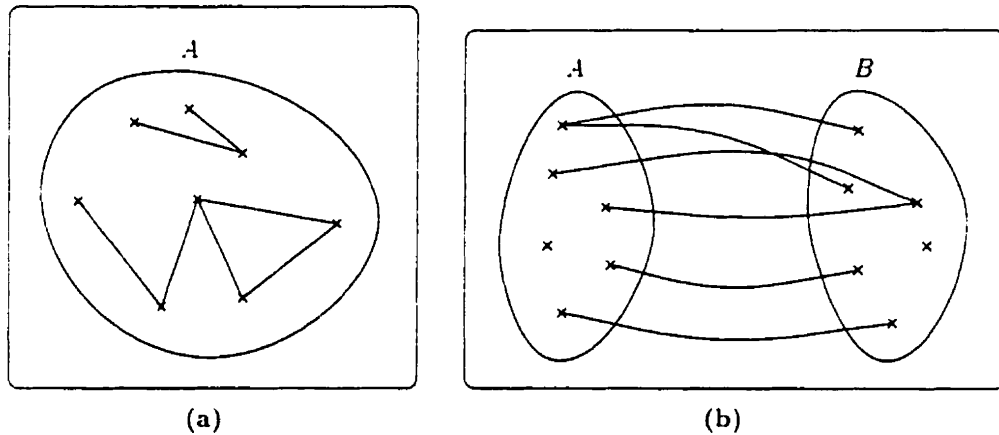


Figure 2.1 : Graphes sur un (a) ou deux (b) ensembles

où $\mathcal{P}(E)$ désigne l'ensemble des parties (ou sous-ensembles) de $E^{(1)}$.

Un *chemin* $\Pi(\Gamma)$ dans le graphe Γ est un ensemble d'arcs de Γ formant une succession de nœuds :

$$\Pi(\Gamma) = \{(a_i, a_{i+1}) \mid i = 0, \dots, n \mid (a_i, a_{i+1}) \in \Gamma\}.$$

Un *arbre* $\Theta(A)$ est un graphe défini sur l'ensemble A ayant les propriétés suivantes :

- il est connecté, c'est-à-dire qu'il existe un chemin entre tout couple (a_i, a_j) d'éléments de A et
- il n'y a pas de cycle dans le graphe, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de chemin entre un élément a de A et lui-même.

Une *correspondance* de A vers B est tout triplet $C = (\Gamma, A, B)$ où A et B sont respectivement les ensembles de départ et d'arrivée de la correspondance et Γ est un graphe de A vers B .

⁽¹⁾(Biggs 1985) définit un graphe *pondéré* comme étant un graphe avec une fonction de coût de l'ensemble des arcs vers l'ensemble \mathbb{N} .

Un *graphe fonctionnel* est un graphe tel que tout élément de l'ensemble de départ est associé à au plus un élément de l'ensemble d'arrivée. Une *fonction* est une correspondance dont le graphe est fonctionnel. Une fonction f de A dans B — lire « dont A est l'ensemble de départ et B l'ensemble d'arrivée » — sera écrite comme suit :

$$\begin{aligned} f: A &\rightarrow B \\ a \in A &\mapsto b \in B. \end{aligned} \tag{2.1}$$

Dans ce cas, (a, b) est un élément du graphe de la fonction.

Une *application* $f = (\Gamma, A, B)$ est une correspondance pour laquelle tout élément de l'ensemble de départ a une et une seule image dans l'ensemble d'arrivée (figure 2.2) :

$$\forall a \in A, \exists ! b \in B \mid (a, b) \in \Gamma.$$

L'image d'une application f , notée $\text{Im}f$, est le sous-ensemble de B tel que :

$$\text{Im}f = \{b \in B \mid \exists a \in A, (a, b) \in \Gamma\}.$$

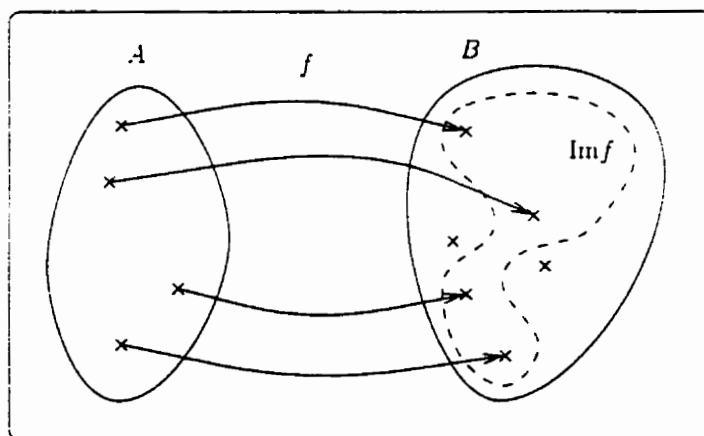


Figure 2.2 : Graphe d'une application

Une application peut aussi être écrite comme en (2.1) quand aucune confusion n'est possible. L'ensemble des applications de A vers B est noté $\mathcal{F}(A, B)$. \mathcal{F} désigne l'ensemble de toutes les applications.

2.3 Le modèle

Automobile (2) : Une partie évidente de la représentation d'une automobile est celle qui décrit sa géométrie : cela inclut les éléments qui la composent, leur forme, leur position relative ou absolue, etc. Mais l'automobile possède d'autres attributs. Par exemple, nous avons sa couleur — ou plus précisément la couleur de ses différentes parties géométriques —, les matériaux qui la composent, son circuit électrique, etc.

Dans GNOME, les objets sont représentés par leurs attributs. Ceux-ci peuvent être la géométrie, la couleur, la température, la densité, etc. Le k -ième attribut est noté A_k . Il y a N attributs.

Automobile (3) : Pour représenter la géométrie de l'automobile, nous utilisons des primitives géométriques qui sont définies dans un espace 3D cartésien. Ces primitives peuvent être de tailles variées et donc correspondre à des entités plus ou moins grosses de l'automobile.

Les couleurs présentes sur l'automobile peuvent être représentées suivant différents modèles, par exemple *rouge*, *vert*, *bleu* ou encore *teinte*, *saturation*, *valeur*. Chaque couleur correspond à un point dans l'espace de représentation de la couleur, quel qu'il soit. Toutes les couleurs présentes forment donc un nuage de points qui, vu de différentes distances, fait apparaître des groupements de points qui correspondent à différents niveaux.

Les matériaux qui apparaissent dans l'automobile sont de natures très différentes. Toutefois, un espace de représentation des différents matériaux peut être défini, cet espace contenant des primitives de haut niveau (*matière plastique*, *métal*, *verre*, etc.) et de plus bas niveau (*acier*, *cuivre*, *fonte*, etc.).

Dans un réseau électrique il y a des consommateurs, des producteurs et des transporteurs de courant. Un consommateur peut, entre autre, être une ampoule, un moteur (électrique) ou une bougie. Un producteur peut être l'alternateur ou la batterie. Les transporteurs sont généralement des câbles électriques. D'autres éléments peuvent être définis, comme des séparateurs ou des interrupteurs.

Chaque attribut A_k va être représenté dans un espace qui lui est propre, c'est-à-dire que l'attribut va prendre ses valeurs, sous forme de points, dans cet espace. Ces points, regroupés suivant différents critères correspondant à différents niveaux, font apparaître des amas qui seront appelés *objets-attributs*. Il y a donc un ensemble d'objets-attributs possibles pour chaque attribut. Par la suite, le symbole **A** sera utilisé pour désigner un objet-attribut générique.

Automobile (4) : Intéressons-nous à la géométrie de l'automobile. Celle-ci est composée d'une *carrosserie*⁽²⁾, d'un *moteur*, de *roues*, etc. Le moteur est composé d'un *bloc moteur*, d'une *culasse*, d'un *vilebrequin*, de *bielles*, de *pistons*, etc. Une roue est composée d'une *jante* et d'un *pneu*. Tous ces éléments sont des objets-attributs géométriques. Notons que cette décomposition est basée sur la notion d'assemblage de pièces mécaniques, mais une décomposition par exemple fonctionnelle pourrait être faite qui pourrait conduire à décomposer l'automobile en un corps, un habitacle et des roues.

Alors que la relation de décomposition décrite précédemment exprime une notion d'appartenance, une nouvelle relation, la connexion, permet d'exprimer la notion d'assemblage. Par exemple, un piston est connecté à une bielle qui elle-même est connectée au vilebrequin.

Des valeurs peuvent être associées aux différents objets-attributs géométriques. Par exemple, il faut spécifier la disposition des points d'attache du moteur ainsi

⁽²⁾Pour des raisons de simplification, tous les éléments de l'automobile ne sont inclus dans la représentation. Par exemple, la carrosserie est supposée inclure la caisse porteuse et les roues seront directement accrochées à la carrosserie.

que son inclinaison possible, son encombrement et son modèle, le diamètre des roues, le type de pneus, etc.

Intéressons-nous maintenant au réseau électrique. Des groupes de consommateurs, producteurs et transporteurs peuvent être identifiés. Chaque groupe peut être détaillé jusqu'à ne plus obtenir que des « groupes » élémentaires tels que des ampoules, des moteurs ou des interrupteurs. Chacun des groupes est un objet-attribut de l'attribut *électricité* et peut être quantifié par sa consommation — ou production qui est une consommation négative. D'autre part, un réseau électrique n'existe que par les connexions entre ses différents consommateurs, producteurs et transporteurs.

La représentation \mathcal{R} de l'objet O est un triplet contenant sa *structure*, sa *quantification* et un graphe exprimant les *relations inter-attributs* de l'objet. Notons que l'objet O n'est pas un objet-attribut de l'attribut géométrique mais bien l'objet représenté avec *tous* ses attributs.

Nous allons étudier chacun des éléments de ce triplet dans les sections suivantes.

2.3.1 Structure

Chaque attribut est représenté par un arbre de décomposition hiérarchique des objets-attributs et par un graphe représentant les relations qui existent entre les objets-attributs constituant les nœuds de l'arbre. La structure de l'objet O est l'ensemble des arbres et des graphes de tous ses attributs.

2.3.1.1 Arbre de décomposition des objets-attributs

Automobile (5) : Automobile (4) a montré que notre automobile se décompose en une carrosserie, un moteur, des roues, etc. Le moteur lui-même se décompose en un bloc-moteur, une culasse, un vilebrequin, quatre bielles, quatre pistons, etc. Cette relation de décomposition peut être représentée par un arbre que nous allons exprimer dans Représentation (5.a).

Soit \mathbf{A} un objet-attribut de l'attribut A_k . Cet objet-attribut est décomposé en sous-objets-attributs de ce même ensemble. Ces sous-objets-attributs sont donc les descendants de \mathbf{A} et ils seront notés de façon générique \mathbf{a} . Leur ensemble est $\Delta_k(\mathbf{A})$. Notons qu'un objet-attribut peut avoir plusieurs, un ou pas de descendants.

Chaque objet-attribut de $\Delta_k(\mathbf{A})$ peut aussi se décomposer en sous-objets-attributs afin d'avoir un niveau de représentation plus bas. Cette relation de décomposition est récursive et peut donc être représentée par un *arbre de décomposition des objets-attributs* $\Theta(\Omega_k)$ dont les nœuds sont des objets-attributs et dont les arcs indiquent la décomposition. L'ensemble de tous les objets-attributs, ou nœuds, de l'arbre est Ω_k .

Si des objets-attributs sont topologiquement (dans le sens de leur forme par opposition à leur taille, par exemple) identiques, alors ils pourront n'être représentés que par un seul et même objet-attribut dans Ω_k (c'est par exemple le cas des pistons dans le moteur). Plus généralement, tout arc de la relation de décomposition est quantifié par une application qui indique le nombre d'instances de chaque objet-attribut de Ω_k impliquées dans la décomposition. L'arbre des objets-attributs $\Theta(\Omega_k)$ est donc étiqueté par la fonction :

$$F: \Theta(\Omega_k) \rightarrow \mathbb{N}. \quad (2.2)$$

La figure 2.3 montre un arbre de décomposition d'objets-attributs. Pour plus de clarté, les étiquettes des arcs ne sont pas montrées (les arcs en traits pleins sont expliqués à la section 2.3.1.2).

Représentation (5.a) : Formalisons l'arbre de décomposition de notre automobile. Les descendants, pour l'attribut géométrique A_1 , de l'objet-attribut *automobile* (\mathbf{a}) sont la *carrosserie* (\mathbf{ca}), les *roues* (\mathbf{r}) et le *moteur* (\mathbf{m}) :

$$\Delta_1(\mathbf{a}) = \{\mathbf{ca}, \mathbf{m}, \mathbf{r}\}.$$

Nous pouvons constater qu'une seule roue est présente car les quatre roues sont identiques. Les descendants $\Delta_1(\mathbf{m})$ du moteur sont le *bloc-moteur* (\mathbf{bm}), la *culasse*

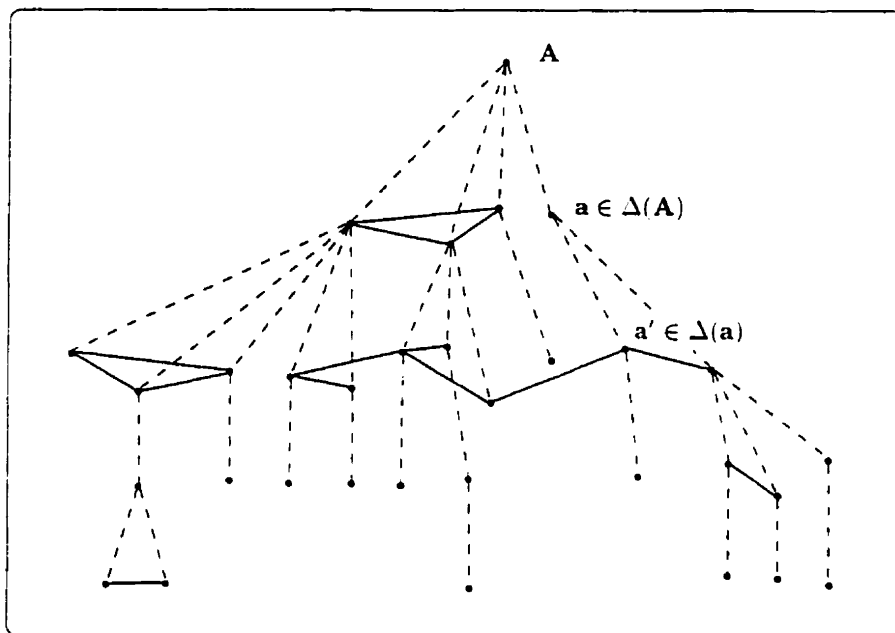


Figure 2.3 : Un arbre de décomposition et un graphe de relation. Les traits en tirets indiquent la décomposition hiérarchique des objets-attributs tandis que les traits pleins montrent des relations entre objets-attributs (par exemple la connexion).

(cu), le *vilebrequin* (v), les *bielles* (b) et les *pistons* (pi) :

$$\Delta_1(m) = \{bm, cu, v, b, pi\}.$$

Les descendants d'une roue r sont la jante (j) et le pneu (pn) :

$$\Delta_1(r) = \{j, pn\}.$$

Dans notre exemple, l'ensemble des objets-attributs géométriques est donc :

$$\Omega_1 = \{a\} \cup \Delta_1(a) \cup \Delta_1(m) \cup \Delta_1(r).$$

La figure 2.4 montre l'arbre de décomposition de l'automobile. Les indices à côté des arcs montrant la décomposition indiquent le nombre d'instances de la décom-

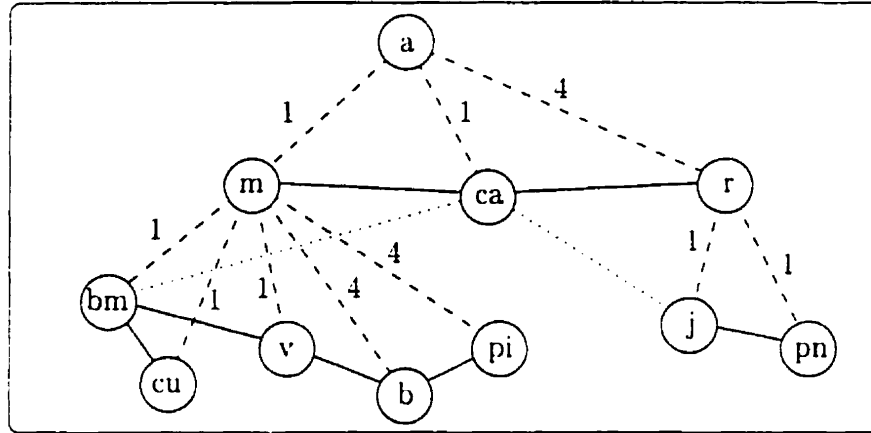


Figure 2.4 : La structure de l'automobile. Les traits en tirets indiquent la décomposition tandis que les traits pleins indiquent la connexion. Les pointillés indiquent la connexion propagée (section 2.3.1.3).

position — par exemple, l'automobile possède quatre roues. L'arbre $\Theta(\Omega_1)$ de la décomposition se formalise comme suit :

$$\begin{aligned} \Theta(\Omega_1) = \{ & \\ & (a, ca), (a, m), (a, r), \\ & (m, bm), (m, cu), (m, v), (m, b), (m, pi), \\ & (r, j), (r, pn) \\ & \}. \end{aligned}$$

Une étiquette est associée à chaque arc de cet arbre afin d'indiquer le nombre d'instances de l'objet-attribut descendant :

$$\begin{aligned} F: \Theta(\Omega_1) &\rightarrow \mathbb{N} \\ (a, ca), (a, m), (m, bm), (m, cu), (m, v), (r, j), (r, pn) &\mapsto 1 \\ (a, r), (m, b), (m, pi) &\mapsto 4. \end{aligned}$$

2.3.1.2 Relations entre les objets-attributs de Ω_k

Automobile (6) : Dans l'attribut géométrique, nous avons choisi de représenter la relation de connexion qui permet de décrire la notion d'assemblage (Automobile (4)). Notons que cette relation ne précise pas comment les objets-attributs sont assemblés mais seulement qu'ils le sont. Plus tard, nous pourrions quantifier cette relation pour donner la position relative des objets-attributs connectés. Cette relation peut être représentée par un graphe dont les nœuds sont les objets-attributs géométriques et dont les arcs indiquent les objets-attributs en relation.

Une relation de connexion similaire existe dans le réseau électrique.

Il existe des relations entre les objets-attributs de Ω_k . Ces relations peuvent être la connexion entre objets-attributs, la position relative, un ordonnancement, etc. Toutes les relations sont représentées par un même graphe $\Gamma(\Omega_k)$ dont les sommets sont les objets-attributs de Ω_k et dont les arcs indiquent les objets en relation. Puisqu'il existe plusieurs relations, les arcs du graphe sont étiquetés pour indiquer quelles relations ils représentent. Si R est l'ensemble des étiquettes représentant les relations, alors une fonction F_k est adjointe au graphe $\Gamma(\Omega_k)$:

$$F_k: \Gamma(\Omega_k) \rightarrow \mathcal{P}(R).$$

Comme il a été montré à la section 2.3.1.1, les nœuds de l'arbre de décomposition peuvent représenter plusieurs objets-attributs, comme dans Représentation (5.a). Les arcs doivent donc inclure une étiquette supplémentaire (un élément de \mathbb{N}) qui sert à distinguer les différentes instances de l'objet-attribut. L'équation précédente devient donc :

$$F_k: \Gamma(\Omega_k) \rightarrow \mathcal{P}(R \times \mathbb{N}). \quad (2.3)$$

Représentation (6.a) : Les diverses connexions entre les objets-attributs géométriques de l'automobile (figure 2.4) peuvent être représentées à l'aide du graphe suivant :

$$\Gamma(\Omega_1) = \{ \\ (m, ca), (ca, r), \\ (bm, cu), (bm, v), (v, b), (b, pi), \\ (j, pn) \\ \}.$$

L'ensemble des étiquettes représentant les relations est simplement $R = \{c\}$ puisque seule la connexion est représentée et la fonction associée au graphe s'écrit donc :

$$F_1: \Gamma(\Omega_1) \rightarrow \mathcal{P}(R \times \mathbb{N}) \\ (m, ca), (bm, cu), (bm, v), (b, pi), (j, pn) \mapsto \{(c, 1)\} \\ (ca, r), (v, b) \mapsto \{(c, 4)\}.$$

La figure 2.4 montre les connexions entre les différentes parties de l'automobile.

2.3.1.3 Propagation ou déduction de relations

Automobile (7) : Dans Représentation (6.a), nous avons explicitement représenté la relation de connexion entre la carrosserie et les roues. Or cette connexion en implique une autre : celle entre les jantes et la carrosserie.

D'autre part, la relation de décomposition explicite le fait que l'automobile contient un moteur d'une part et que le moteur contient un vilebrequin d'autre part. La décomposition impliquant une notion d'appartenance et, cette relation étant transitive, nous pouvons déduire de l'arbre de décomposition une relation d'appartenance entre des niveaux non consécutifs de la décomposition. Par exemple, l'automobile contient un vilebrequin.

Il peut, dans certains cas, être intéressant de *propager* une relation établie entre deux objets-attributs à leurs descendants ou à leurs parents. Nous pouvons aussi vouloir déduire de nouvelles relations à partir de relations déjà représentées. Cela est utile dans de nombreux cas, par exemple quand :

- la relation n'a pas été établie entre deux objets-attributs et qu'il faut vérifier si elle peut l'être afin de la représenter ;
- la quantité d'information à stocker doit être limitée et, donc, être extraite au besoin.

Explicitons ceci pour la relation de connexion. Si deux objets-attributs sont connectés, alors leurs parents respectifs, s'ils ne sont pas un seul et même objet-attribut, le sont aussi. De même, en supposant que les deux objets-attributs connectés aient des descendants, au moins un des descendants de l'un des objets-attributs est connecté à l'autre objet-attribut ainsi qu'à au moins un de ses descendants. Afin de pouvoir formaliser ceci, il nous faut d'abord introduire quelques notions de parenté, celle de descendance ayant déjà été introduite.

Notions de parenté. $\Delta(\mathbf{A})$, qui a déjà été introduit, définit l'ensemble des sous-objets-attributs qui composent l'objet-attribut \mathbf{A} . Autrement dit, $\Delta(\mathbf{A})$ est l'ensemble des descendants de \mathbf{A} ⁽³⁾.

En généralisant, $\Delta^i(\mathbf{A})$ est l'ensemble des descendants de \mathbf{A} à la i -ème génération. Nous avons donc :

$$\begin{aligned}\Delta^1(\mathbf{A}) &= \Delta(\mathbf{A}), \\ \Delta^{i+1}(\mathbf{A}) &= \left(\bigcup_{\mathbf{a} \in \Delta^i(\mathbf{A})} \Delta(\mathbf{a}) \right), \quad i \geq 1.\end{aligned}$$

⁽³⁾ Quand il est question d'un attribut A_k en particulier, nous notons $\Delta_k(\mathbf{A})$.

Inversement, $P^i(A)$ est le i -ème parent de l'objet-attribut A . Il est lui-même un objet-attribut de Ω . $P(A)$ est le parent immédiat de A ⁽⁴⁾. Par exemple :

$$P^0(A) = A.$$

$$P^1(A) = P(A).$$

$$P^2(A) = P(P(A)).$$

D'autre part, $P^i(A_1, A_2)$ sera le i -ème parent commun à A_1 et A_2 . Notamment, $P^1(A_1, A_2)$ est le premier parent commun à A_1 et A_2 .

Connexions propagées. Soient A_1 et A_2 deux objets-attributs. Si A_1 et A_2 sont connectés, alors, s'ils ont des descendants, il en est parmi eux qui sont aussi connectés :

$$\left. \begin{array}{l} \forall (A_1, A_2) \in \Gamma_c \\ \forall i, j \mid \Delta^i(A_1) \neq \emptyset, \Delta^j(A_2) \neq \emptyset \end{array} \right\} \Rightarrow \exists (a_1, a_2) \in \Delta^i(A_1) \times \Delta^j(A_2) \mid (a_1, a_2) \in \Gamma_c.$$

où Γ_c désigne le graphe des connexions.

Écrivons la réciproque. Soient A_1 et A_2 deux objets-attributs de Ω . Si ces deux objets-attributs ont des parents communs, alors le premier d'entre eux ($P^1(A_1, A_2)$) est le i -ème parent de A_1 ($P^i(A_1)$) et le j -ème parent de A_2 ($P^j(A_2)$) :

$$P^1(A_1, A_2) \equiv P^i(A_1) \equiv P^j(A_2).$$

Alors, une condition nécessaire, mais pas suffisante, pour que les objets A_1 et A_2 soient connectés (par la connexion propagée) est

$$(A_1, A_2) \in \Gamma_c \quad \text{si} \quad (P^{i-1}(A_1), P^{j-1}(A_2)) \in \Gamma_c. \quad (2.4)$$

Évidemment, i et j sont tous deux supérieurs à 1 et non tous deux égaux à 1. En

⁽⁴⁾Quand il s'agit d'un attribut particulier A_k , le parent est noté $P_k(A)$.

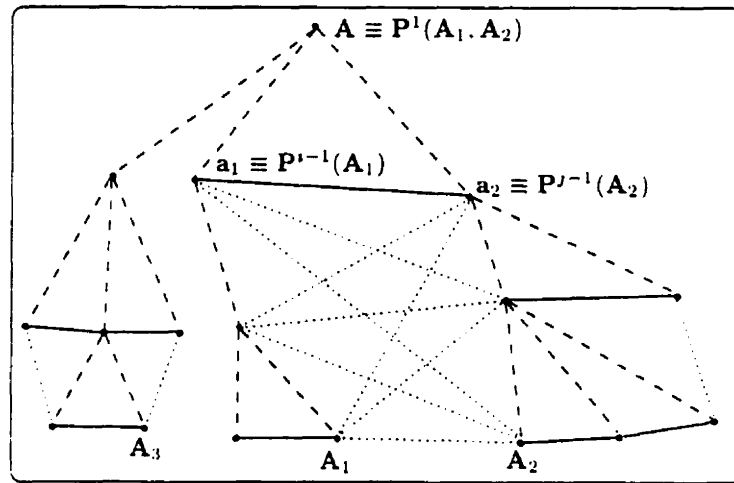


Figure 2.5 : Propagation (vers le bas) de la relation de connexion. Les traits pleins indiquent les connexions établies tandis que les traits en pointillés montrent les connexions propagées. Les connexions ont été propagées jusqu'aux objets-attributs A_1 et A_2 car un parent de l'un est connecté à un parent de l'autre. Par contre, aucune connexion n'a été propagée entre les objets-attributs A_1 et A_3 car aucun parent du premier n'est connecté à aucun parent du second.

effet, si $i = j = 1$, alors A_1 et A_2 ont le même parent et leur connexion éventuelle était alors déjà définie.

Si A_1 et A_2 sont liés par une connexion, alors eux-mêmes et leurs parents respectifs jusqu'à leur parent commun sont aussi liés par une connexion :

$$(A_1, A_2) \in \Gamma_c \Rightarrow \forall (k, l) \in [0; i-1] \times [0; j-1] \quad (P^k(A_1), P^l(A_2)) \in \Gamma_c.$$

La figure 2.5 montre un exemple de propagation vers le bas de la connexion avec un cas où la condition (2.4) est remplie et un cas où elle ne l'est pas.

Représentation (7.a) : La figure 2.4 montre en pointillés les connexions propagées de la roue vers la jante et du moteur vers le bloc-moteur.

2.3.1.4 Structure globale

La structure globale $\mathcal{R}\mathcal{S}(\mathbf{O})$ de l'objet physique \mathbf{O} dans la représentation \mathcal{R} est composée de l'ensemble des arbres de décomposition des objets-attributs et de l'ensemble des graphes de relations entre les objets-attributs de tous les attributs :

$$\mathcal{R}\mathcal{S}(\mathbf{O}) = \left(\bigcup_{k=1}^N \Theta(\Omega_k), \bigcup_{k=1}^N \Gamma(\Omega_k) \right).$$

2.3.2 Quantification

Automobile (8) : Il faut spécifier des dimensions pour notre automobile, mais aussi des valeurs de consommation dans le réseau électrique, spécifier des couleurs, préciser les matériaux, etc.

La quantification de l'objet \mathbf{O} représenté est composée d'un ensemble d'applications qui quantifient les objets-attributs des différents attributs de \mathbf{O} et d'un ensemble d'applications qui quantifient les relations entre ces objets-attributs. La quantification d'un objet-attribut d'un attribut particulier est présentée à la section 2.3.2.1 tandis que celle des relations entre objets-attributs l'est à la section 2.3.2.3.

2.3.2.1 Quantification d'un objet-attribut \mathbf{A} d'un attribut A_k

Automobile (9) : Dans notre représentation, l'automobile a une longueur, une largeur, une hauteur, un empattement et une voie. Les roues ont un diamètre et une largeur. La quantification du moteur, quant à elle, nécessite la spécification d'un référentiel attaché au moteur. Ce référentiel permet ensuite de spécifier la position des points d'ancrage du moteur ainsi qu'un intervalle d'inclinaisons permises et un volume occupé. La carrosserie sera décomposée en pièces de carrosserie qui seront représentées par des surfaces paramétriques — par exemple des surfaces de Bezier.

La quantification d'un objet-attribut \mathbf{A} est une application notée $Q_k(\mathbf{A})$. Elle peut être notée comme Q_k si aucune confusion n'est possible.

Représentation (9.a) : L'objet-attribut géométrique *automobile* est simplement quantifiée par une application constante qui donne un quintuplet exprimant les longueur, largeur, hauteur, empattement et voie.

De la même manière, le moteur est quantifié par un quadruplet de points de \mathbb{R}^3 - si nous supposons que le moteur possède quatre points d'attache - , par deux intervalles de \mathbb{R} pour spécifier les inclinaisons latérales et longitudinales possibles et par six éléments de \mathbb{R} pour spécifier l'encombrement suivant les six directions possibles. Ces grandeurs sont exprimées dans un référentiel associé au moteur dont l'origine se trouve à la sortie du vilebrequin, l'axe y est aligné avec le vilebrequin et orienté vers l'intérieur du moteur, l'axe z est parallèle à la trajectoire des pistons et l'axe x est tel que le référentiel est orthogonal direct.

Une pièce de carrosserie pc_i , représentée par une surface paramétrique, est quantifiée par une fonction qui associe à tout couple de $[0:1] \times [0:1]$ un point de \mathbb{R}^3 dans un référentiel associé à l'automobile :

$$Q_1(pc_i) = (\Gamma, [0:1] \times [0:1], \mathbb{R}^3).$$

Le graphe associe à chaque (u, v) un triplet (x, y, z) :

$$\begin{aligned} Q_1(pc_i): [0:1] \times [0:1] &\rightarrow \mathbb{R}^3 \\ (u, v) &\mapsto (x, y, z). \end{aligned}$$

Il est possible que l'objet-attribut **A** ait lui-même des descendants qui peuvent être quantifiés. La section 2.3.2.2 va montrer que $Q_k(\mathbf{A})$ n'est pas indépendant des $Q_k(\mathbf{a})$, $\mathbf{a} \in \Delta_k(\mathbf{A})$.

2.3.2.2 Propagation des quantifications d'objets-attributs

Automobile (10) : L'information de longueur, largeur et hauteur de l'automobile est contenue dans la forme des pièces de carrosserie : c'est la boîte englobante de toutes les pièces de carrosserie réunies.

Dans l'attribut *électricité*, la consommation d'un objet-attribut global est la somme des consommations des objets-attributs le composant.

Dans la hiérarchie d'un attribut donné, une information quantitative similaire doit pouvoir être retrouvée entre deux niveaux consécutifs. Plus précisément, l'information représentée par la quantification d'un objet-attribut à un niveau donné doit être contenue dans l'information représentée par les quantifications de ses descendants. Cela ne veut pas dire que l'information doit se retrouver sous la même forme aux deux niveaux, mais que celle du niveau haut doit pouvoir être extraite à partir de celle du niveau bas. Autrement dit, la quantification d'un objet-attribut **A** doit pouvoir être obtenue à partir des quantifications des objets-attributs **a** de $\Delta(\mathbf{A})$. c'est-à-dire que le graphe de l'application de quantification de **A** va dépendre des valeurs prises par les applications de quantification des objets-attributs de $\Delta(\mathbf{A})$.

Représentation (10.a) : Supposons que l'axe x de l'automobile soit suivant sa longueur.

l'axe y suivant sa largeur et l'axe z suivant sa hauteur. La longueur L de l'automobile sera donc la différence entre la plus grande et la plus petite valeur x des surfaces paramétriques décrivant les pièces de carrosserie. Il en est de même pour la largeur et la hauteur :

$$\begin{aligned} L &= \max_{pc_i \in \Delta_1(ca)} Q_1(pc_i)_x - \min_{pc_i \in \Delta_1(ca)} Q_1(pc_i)_x \\ l &= \max_{pc_i \in \Delta_1(ca)} Q_1(pc_i)_y - \min_{pc_i \in \Delta_1(ca)} Q_1(pc_i)_y \\ h &= \max_{pc_i \in \Delta_1(ca)} Q_1(pc_i)_z - \min_{pc_i \in \Delta_1(ca)} Q_1(pc_i)_z \end{aligned}$$

2.3.2.3 Quantification des relations

Automobile (11) : La relation de connexion entre objets-attributs géométriques peut être quantifiée afin de montrer comment les objets-attributs sont positionnés les uns par rapport aux autres. Cette relation, en plus d'être représentée par le graphe des relations (Automobile (6)), doit donc être quantifiées.

Les relations entre objets-attributs de Ω_k peuvent être quantifiées (mais pas nécessairement, si la relation est qualitative, par exemple) en leur adjoignant une application. Mais celle-ci ne doit pas être la même pour toutes les instances de la relation. Par exemple, dans un attribut A_k où la notion de distance existe et a été définie, la relation « est à la distance x de », où x est le quantificateur de la relation, peut être appliquée à tous les objets-attributs de Ω_k avec une quantification différente pour chaque arc. Cela implique que chaque arc est étiqueté par un ensemble de triplets formés d'un élément de R , l'ensemble des étiquettes de relations, d'un élément de N , pour distinguer les éventuels multiples objets-attributs représentés par un seul nœud (équation (2.3)) et d'un élément de l'ensemble des applications. La fonction d'étiquetage F_k du graphe des relations entre objets-attributs de Ω_k s'écrit donc :

$$F_k: \Gamma(\Omega_k) \rightarrow \mathcal{P}(R \times N \times (\mathcal{F} \cup \{\emptyset\})). \quad (2.5)$$

Dans l'équation précédente, $\mathcal{F} \cup \{\emptyset\}$ permet de tenir compte à la fois des relations quantifiées et de celles qui ne le sont pas.

Représentation (11.a) : Nous modifions donc la fonction associée au graphe des relations (Représentation (6.a)) afin d'ajouter l'application donnant la pose relative P des éléments connectés :

$$F_1: \Gamma(\Omega_1) \rightarrow \{c\} \times N \times P.$$

Ici, l'ensemble des étiquettes se réduit à $\{c\}$ car seule la connexion est représentée. L'application P donne une pose relative exacte quand les objets-attributs sont liés de façon rigide ou inexacte — sous la forme d'intervalles possibles — pour les objets-attributs qui peuvent bouger relativement à ceux auxquels ils sont attachés, ce qui est par exemple le cas des roues par rapport à la carrosserie ou des bielles par rapport au vilebrequin.

2.3.2.4 Quantification de l'objet \mathbf{O}

La quantification globale ${}^{\mathcal{R}}\mathcal{Q}(\mathbf{O})$ de l'objet physique \mathbf{O} dans la représentation \mathcal{R} est composée de l'ensemble des quantifications de tous les objets-attributs de tous les attributs de \mathbf{O} et de l'ensemble des quantifications des relations entre les objets-attributs de tous les attributs :

$${}^{\mathcal{R}}\mathcal{Q}(\mathbf{O}) = \left(\bigcup_{\substack{k=0 \\ \mathbf{A} \in \Omega_k}}^N Q_k(\mathbf{A}), \bigcup_{k=0}^N F_k \right).$$

2.3.3 Relations inter-attributs

Automobile (12) : Automobile (4) a décrit indépendamment la décomposition de la géométrie et de l'attribut *électricité* alors qu'une relation existe entre ces deux attributs. En effet, certains objets-attributs géométriques sont des consommateurs, producteurs ou transporteurs d'électricité. Nous allons donc créer une association entre ces objets-attributs géométriques et les objets-attributs électriques correspondants. Il en est de même pour le matériau et la couleur. Les objets-attributs géométriques sont faits d'un matériau (ou plusieurs) et ont une couleur. D'autre part, les matériaux ont une couleur. Notons que la couleur des objets-attributs géométriques n'est pas nécessairement celle du matériau les composant.

Des relations portant sur les objets-attributs d'un attribut donné ont déjà été définies. Il faut aussi définir des relations inter-attributs. En effet, bien que les attributs aient été représentés indépendamment les uns des autres, ceux-ci ne sont pas indépendants. La correspondance est une relation inter-attributs importante car souvent présente notamment dans les modèles qui associent, de façon ponctuelle, de l'information non géométrique à la géométrie. Elle associe entre eux des objets-attributs, des applications de quantifications d'objets-attributs ou des valeurs de ces applications d'attributs différents. Elle sert à dire, par exemple, qu'une partie d'un objet est rouge tandis qu'une autre est bleue ou à donner la densité des différentes

parties d'un objet.

Automobile (13) : Les associations décrites dans Automobile (12) sont des correspondances et portent sur des objets-attributs géométriques, des objets-attributs électriques, des matériaux et des couleurs.

Les relations inter-attributs entre deux attributs sont donc représentées par un graphe bipartite. Les deux ensembles à partir desquels les couples de sommets du graphe sont construits contiennent les objets-attributs, les quantifications de ces objets-attributs ainsi que l'ensemble des valeurs prises par ces quantifications et ce pour les deux attributs. L'ensemble des valeurs quantitatives prises par l'attribut A_k est noté V_k et est la réunion des images de toutes les applications de quantification :

$$V_k = \bigcup_{A \in \Omega_k} \text{Im } Q_k(A).$$

De même, l'ensemble des quantifications de tous les objets-attributs de Ω_k est noté Ξ_k :

$$\Xi_k = \{Q_k(A) \mid A \in \Omega_k\}.$$

Le graphe Γ_{ij} représentant les relations inter-attributs entre les deux attributs A_i et A_j est donc tel que :

$$\Gamma_{ij} \subset (\Omega_i \cup \Xi_i \cup V_i) \times (\Omega_j \cup \Xi_j \cup V_j) \quad i \neq j.$$

Comme toutes les relations déjà décrites, les relations inter-attributs peuvent être quantifiées (les relations exprimant les correspondances sont qualitatives). Un graphe étiqueté est donc construit avec le graphe Γ_{ij} précédent en lui adjoignant la fonction F_{ij} qui associe à chaque arc du graphe plusieurs relations avec leur éventuelle quantification :

$$F_{ij} : \Gamma_{ij} \rightarrow \mathcal{P}(R_{ij} \times \mathbb{N} \times \mathcal{F} \cup \{\emptyset\}), \quad (2.6)$$

où $R_{i,j}$ est l'ensemble des étiquettes des relations entre l'attribut i et l'attribut j et où N est présent pour la même raison que dans l'équation (2.3).

L'ensemble de tous les graphes exprimant toutes les relations inter-attributs pour toutes les paires d'attributs de l'objet O dans la représentation \mathcal{R} est notée $\mathcal{RI}(O)$:

$$\mathcal{RI}(O) = \bigcup_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N \Gamma_{i,j}.$$

Remarquons que $\mathcal{RI}(O)$ est un graphe multi-partite. Pour quantifier les relations inter-attributs, ce graphe est étiqueté avec la fonction F construite comme (2.6) :

$$F: \mathcal{RI}(O) \rightarrow \mathcal{P}(R \times N \times \mathcal{F} \cup \{\emptyset\}). \quad (2.7)$$

où R est l'ensemble des étiquettes de toutes les relations inter-attributs entre tous les attributs de O .

La fonction décrite dans (2.7) est en fait la « réunion » des fonctions (2.6) pour toutes les paires d'attributs dans le sens où les ensembles de départ et d'arrivée et le graphe de la première sont la réunion respectivement des ensembles de départ et d'arrivée et des graphes des secondes⁽⁵⁾.

Une remarque supplémentaire doit être faite. Il n'a été question ici que de relations inter-attributs entre deux attributs. Toutefois, des relations entre plus que deux attributs sont possibles et leur définition est très semblable à celle des relations entre deux attributs. Ces relations sont alors représentées par des graphes n -partites.

2.4 Quelques capacités et limitations de GNOME

Après avoir décrit GNOME par son formalisme, nous allons revenir sur quelques capacités importantes du modèle que la description précédente n'a pas (suffisamment)

⁽⁵⁾Rappelons qu'une fonction est une correspondance et est donc caractérisée par un ensemble de départ, un ensemble d'arrivée et un graphe (voir la section 2.2).

fait ressortir. Ceci nous permettra de montrer les limitations de GNOME.

GNOME a été conçu pour permettre la représentation des divers attributs d'un objet. Chaque attribut possède sa propre structure de décomposition dans son espace de représentation. Cette décomposition sert à représenter l'attribut à divers niveaux. Elle doit être guidée par des critères qui dépendent de l'application, autrement dit de l'objet représenté et de l'agent qui va utiliser la représentation. Chaque niveau de la représentation de l'attribut utilise un critère différent. La différence peut porter sur le type de critère — par exemple un critère fonctionnel à un niveau et un critère géométrique à un autre — ou sur la sensibilité du critère. Cette décomposition hiérarchique conduit à la création d'objets-attributs de types ou de tailles différents, mais donnant toujours plus d'information quand nous descendons dans la hiérarchie de décomposition.

La décomposition permet de représenter une hiérarchie de spécialisation par la décomposition d'un espace permettant de représenter les paramètres d'un attribut d'un objet. Décomposer cet espace revient à préciser la valeur des paramètres, la précision augmentant avec le niveau de décomposition. Ceci crée des classes d'objets correspondant à divers niveaux de spécialisation (voir, par exemple, (Brooks 1981)). Par exemple, et nous tirons cet exemple de (Brooks 1981), tous les avions ont un fuselage, deux ailes et un empennage. Ce qui différencie un modèle d'avion d'un autre, c'est la taille des différents éléments de l'avion, leur positions relatives, le nombre de moteurs, etc. Tous ces paramètres sont représentés dans un espace à autant de dimensions qu'il y a de paramètres. Au niveau le plus élevé, des intervalles précisent les valeurs possibles des paramètres pour la classe des avions en général. Ensuite, les classes des avions de tourisme, des avions de transport commercial et des avions de chasse seront distinguées en décomposant les intervalles représentant les différents paramètres suivant les caractéristiques de ces différentes classes. Toutefois, ceci ne permet pas de représenter des classes d'objets héritant de plusieurs classes puisque les classes sont produites par décomposition uniquement et non par regroupement.

En général, il est préférable de ne pas permettre la création d'objets-attributs d'un attribut donné ayant une intersection non nulle dans l'espace de représentation de l'attribut⁽⁶⁾. En effet, une intersection non nulle est généralement synonyme soit d'une indétermination du critère, soit d'une propriété commune à une partie de plusieurs objets-attributs différents. Par *indétermination du critère*, nous entendons le fait qu'un critère n'est généralement pas satisfait de façon ponctuelle mais plutôt sur un intervalle. Supposons par exemple que le critère soit de décomposer un objet là où une propriété de l'objet n'est pas constante. Or, généralement, une propriété physique ne varie pas brusquement et la variation de la propriété ne se produit donc pas de façon ponctuelle mais plutôt sur une étendue. Permettre une intersection non nulle est équivalent à représenter implicitement un tel aspect de l'objet représenté. Si une intersection existe et doit être représentée, il est préférable de le faire de façon explicite, à l'aide d'un nouvel objet-attribut, afin de pouvoir utiliser cet aspect.

La décomposition fortement suggérée par GNOME pose un problème pour les objets représentés sur un seul niveau. En effet, un objet-attribut correspondant à un niveau factice doit être introduit afin de pouvoir construire l'arbre de décomposition. GNOME apparaît donc comme étant lourd pour ce type d'objet. Il en est de même pour les objets dont nous ne voulons représenter qu'un seul attribut.

Des relations intra-attribut et inter-attributs peuvent (doivent) être représentées. Ces relations, comme les objets-attributs, peuvent rester qualitatives, mais peuvent aussi être quantifiées. La quantification peut être faite à l'aide d'une quantité qui peut être un nombre, un texte, la description d'une surface — c'est à dire son équation paramétrique par exemple —, etc. Cette quantité peut aussi être variable dans le temps et est alors caractérisée par une fonction du temps. Mais la quantification peut aussi être incertaine par exemple par l'association d'un intervalle, plutôt que d'une quantité précise, ou d'une distribution de probabilité.

⁽⁶⁾Toutefois, rien dans la structure de GNOME n'empêche d'avoir des objets-attributs dont l'intersection n'est pas nulle.

2.5 GNOME et STEP

Dans cette section nous allons comparer la norme STEP (section 1.5) et GNOME. En particulier, nous allons voir, à l'aide des deux exemples d'applications conformes à STEP que nous avons donnés (section 1.5.1 et 1.5.2), des différences dans la méthode de représentation entre STEP et GNOME (section 2.5.1). La section 2.5.2 décrira des relations entre STEP et GNOME, relations qui permettront de positionner un modèle par rapport à l'autre. Enfin, la section 2.5.3 montrera deux autres différences entre STEP et GNOME qui se situent au niveau du but des modèles.

2.5.1 Différences de représentation

Tout d'abord, comparons les représentations d'automobile suivant STEP (ou plus précisément le modèle GPM qui est conforme à STEP) à la figure 1.2 (page 32) et suivant GNOME à la figure 2.4 (page 50). Les relations « NextAssemblyUsage » et « ComponentUsageQuantifiedAssembly » du GPM forment un arbre très semblable à celui produit par la relation de décomposition de GNOME. La seule différence est due au fait que les relations du GPM contiennent une notion d'assemblage. Le moteur est donc décomposé en un produit vilebrequin-bielles-pistons, lui-même décomposé en un vilebrequin et des assemblages bielle-piston, chacun de ces assemblages étant décomposé en une bielle et un piston. Cette notion d'assemblage dans l'exemple de GNOME que nous avons donné est plutôt représentée par la connexion. Mais la décomposition aurait pu être guidée par la notion d'assemblage de produits (comme c'est le cas dans le GPM) et nous aurions obtenu la même décomposition que dans le GPM. La relation « SpecifiedHigherUsage » du GPM correspond à notre connexion propagée. Les relations et entités (les objets-attributs de GNOME) sont quantifiées de la même manière dans les deux modèles. Notons toutefois que la forme précise d'un objet-attribut de GNOME serait donnée en poursuivant la décomposition et quantifiant les objets-attributs de bas niveau ainsi créés (comme dans un modèle par décomposition

en cellules) plutôt qu'en associant un autre type de représentation (un arbre CSG dans le cas du GPM). En fait, dans le GPM, la topologie des produits est nettement séparée de la géométrie. Ceci vient du fait que le GPM représente des produits. Or, à un certain niveau, un produit ne se décompose plus mais est manufacturé — par usinage par exemple — à partir d'un matériau. Dans ce cas, la géométrie de ce dernier produit doit être spécifiée. Dans GNOME, la topologie et la géométrie sont aussi séparées, mais cette dernière peut être spécifiée en quantifiant la première.

L'arbre formé par la représentation d'une gamme d'usinage (figure 1.1, page 28) est aussi semblable à un arbre que GNOME pourrait produire. Il y a plusieurs critères de décomposition selon le niveau dans la représentation : le lieu (plus précisément la cellule de production), le porte-pièce, l'outil, etc., (section 1.5.1). Notons toutefois que, dans cet exemple, les relations de décomposition et d'ordonnancement ne sont qu'implicitement représentées par la spécification de champs (les informations associées à une instance de classe) : un champs est une liste ordonnée de descendants. Ceci peut poser des problèmes lors d'une recherche suivant les relations. Dans GNOME, la représentation explicite des relations est fortement encouragée — le formalisme de GNOME contient d'ailleurs un graphe pour cela. Une représentation implicite est toutefois possible par le biais de la quantification des objets-attributs. Toutefois, une relation représentée de cette manière ne peut être inter-attributs puisqu'il ne s'agit que d'une association entre un objet-attribut et une quantité indépendante.

Dans les deux exemples, comme dans toute application conforme à STEP, une partie textuelle est incluse dans la représentation. Cette partie peut être purement administrative (autorisations, références de compagnies, etc.), descriptive (liste de documents par exemple), historique, etc. Certains de ces aspects présentent une hiérarchie ou encore concernent une information utilisée en divers endroits de la représentation. C'est par exemple le cas de la succession de versions représentée par le GPM, chaque version étant liée à la description du produit correspondant. Ces aspects peuvent alors être représentés comme des attributs dans GNOME. D'autres

aspects sont ponctuels, locaux et peuvent alors être considérés comme une quantification d'objets-attributs de GNOME.

2.5.2 Relations entre STEP et GNOME

EXPRESS possède toutes les capacités descriptives d'un langage orienté objets classique. Ce langage peut donc être utilisé pour implanter une représentation basée sur GNOME et même être utilisé pour décrire GNOME à un niveau plus proche de l'implantation logicielle que cela ne l'a été à la section 2.3. Une instance de GNOME peut donc être conforme à STEP et, donc, faire partie des protocoles d'application, comme les deux exemples présentés à la section 1.5. Inversement, toute représentation d'un objet écrite en EXPRESS et décrivant des relations, des décompositions, associant des quantités à des relations ou des primitives, etc., est une instance de GNOME.

Nous avons déjà dit que STEP est composé de plusieurs séries, chacune correspondant à un aspect particulier de STEP. Chaque série se décompose en parties qui, généralement, se décomposent elles aussi. Par exemple, la partie décrivant les représentations géométriques et topologiques (partie 43) inclut une hiérarchie de primitives géométriques, une hiérarchie de primitives topologiques et une hiérarchie de modèles géométriques. Bien évidemment, des relations existent entre ces trois hiérarchies. Il existe donc des relations entre les différentes parties d'une série ainsi qu'entre les différentes séries (figure 1.3, page 35). Dans la terminologie de GNOME, chaque série est donc un attribut de STEP. Chaque attribut présente une décomposition. De plus, des relations intra-attribut et inter-attributs existent. STEP peut donc être décrit comme une instance de GNOME.

La figure 2.6 résume les différentes relations entre STEP et GNOME que nous avons décrites :

- GNOME permet de représenter STEP et en particulier les protocoles d'application.

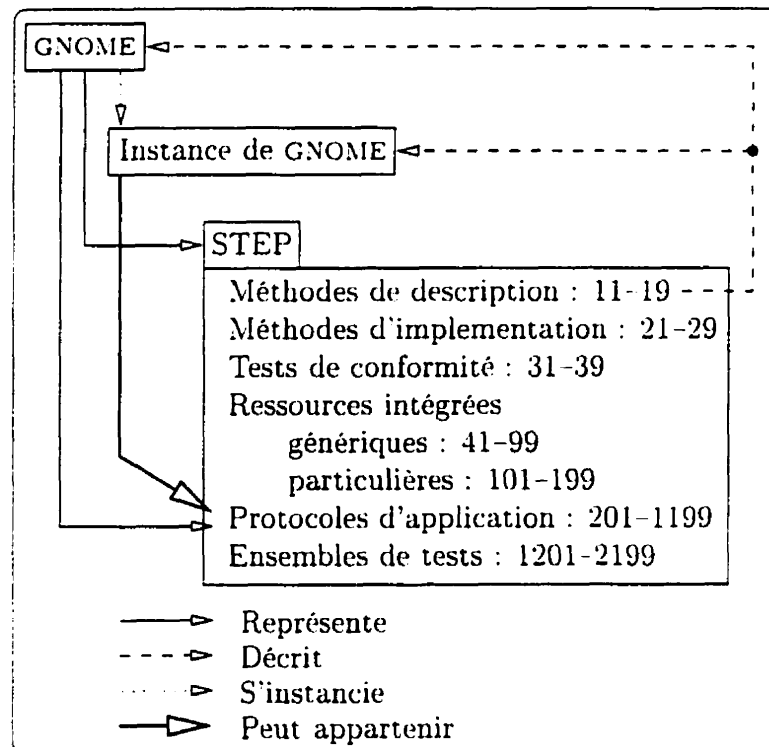


Figure 2.6 : Les relations entre STEP et GNOME

- Les méthodes de description de STEP (le langage EXPRESS) permettent de décrire GNOME ainsi que ses instances.
- Une instance de GNOME peut appartenir aux protocoles d'applications.

2.5.3 Différents buts de la modélisation

Un but de STEP est de fournir une description des objets qui puisse à la fois être lue par un être humain et interprétée par un ordinateur. Les représentations conformes à STEP sont donc très proches du niveau de l'implantation logicielle. Notamment, les descriptions sont faites à l'aide d'un langage de description orienté objets. Ceci implique la création de nombreuses classes — au sens des langages orientés objets — pour décrire les différentes structures nécessaires (comme par exemple la hiérarchie

de classes pour représenter les relations du GPM), même si la description n'utilise finalement que les feuilles de la hiérarchie. La méthode d'implantation créant le fichier d'échange décrivant le produit (section 1.5.3) ne fournit d'ailleurs qu'une description à ce même niveau (Owen 1993, page 85). À l'opposé, GNOME se trouve à un niveau abstrait et indépendant de l'implantation qui peut en être faite. Plus précisément, dans GNOME, la description se fait en termes d'objets mathématiques : des arbres, des graphes, des applications, etc.

Le tout premier but d'un modèle est de fournir un cadre générique qui, une fois instancié, permettra la représentation d'objets particuliers. Cet aspect-là est couvert aussi bien par STEP que par GNOME. Par exemple, dans STEP, les ressources intégrées propres à des applications apportent une première ébauche de représentation particulière. Les protocoles d'application précisent cette ébauche puisqu'ils décrivent de façon générale des applications particulières — voir par exemple le GPM (section 1.5.2) ou le modèle pour les gammes d'usinage (section 1.5.1). GNOME, quant à lui, constitue le niveau le plus élevé d'une hiérarchie de caractère générique. L'exemple que nous avons donné lors de sa description (section 2.3) est une instance de GNOME mais constitue un modèle générique d'automobiles. Nous proposerons plus tard un modèle générique de mine souterraine (chapitre 3) qui est aussi une instance de GNOME.

Un autre but de la modélisation est de donner une description — une instance du modèle — d'un objet qu'il faut créer et vérifier (figure 2.7(a)). Dans ce cas, la représentation constitue la référence et l'objet doit se conformer à cette référence. Par exemple, une représentation d'un objet est donnée à une machine-outil afin que cette dernière construise l'objet à partir de matériaux bruts. Puis une autre machine vérifie que la construction a été faite conformément à sa description. Le résultat de cette vérification est soit l'acceptation de l'objet, soit le rejet de l'objet ou encore un réajustement de l'objet. Ces opérations sont courantes dans le domaine manufacturier et STEP est en partie conçu pour représenter un tel processus. GNOME peut

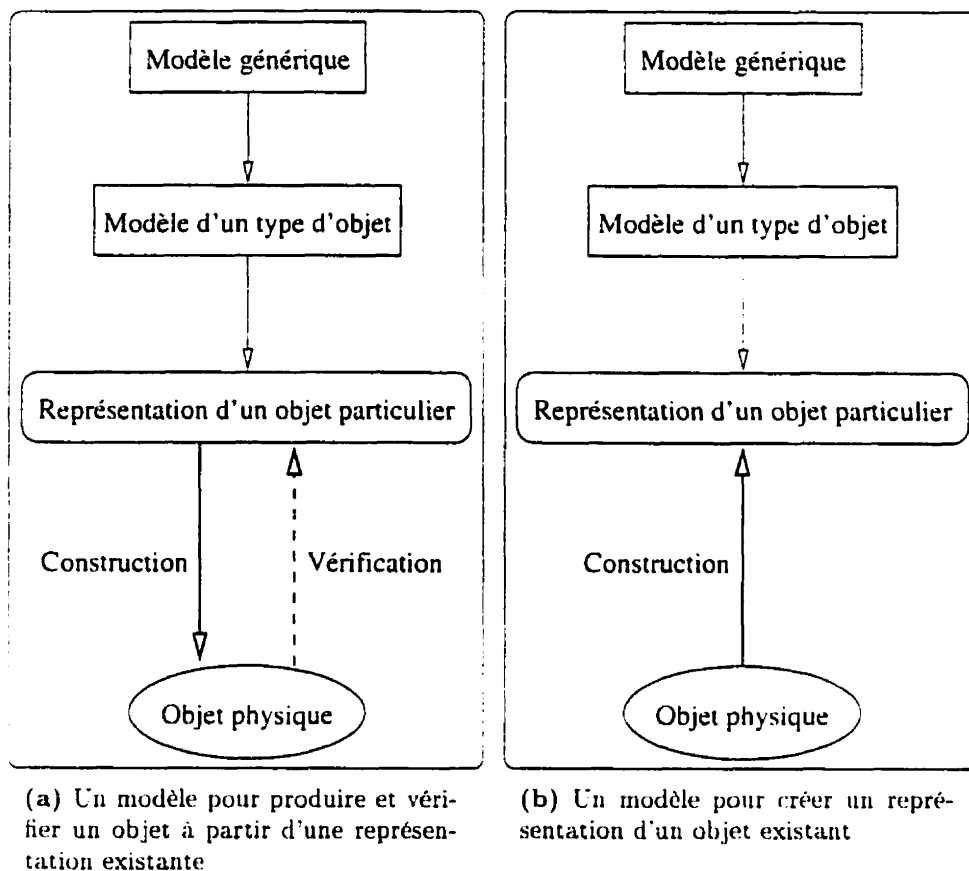


Figure 2.7 : Différents buts de la modélisation

aussi donner une description d'un objet afin de permettre sa construction puis sa vérification⁽⁷⁾.

Mais la référence peut aussi être l'objet lui-même — c'est par exemple le cas d'un objet naturel. Dans ce cas, le but est de construire une représentation à partir de l'objet existant tout en suivant un modèle (figure 2.7(b)). La création d'une représentation peut se limiter à la modification d'une représentation existante afin qu'elle devienne conforme à l'objet physique existant. La vérification de la représentation fait généralement partie de sa construction. La construction de représentations à partir

⁽⁷⁾ Le processus de construction et de vérification peut aussi être représenté par GNOME comme il l'est par STEP.

d'objets n'est pas un but de STEP dont le rôle est de représenter des objets manufacturiers à construire⁽⁸⁾. Par contre, ceci est un but de GNOME. Le chapitre 5 porte d'ailleurs sur la construction, basée sur un modèle qui est une instance de GNOME, de représentations de mines souterraines.

2.6 Récapitulation

Dans ce chapitre, nous avons présenté GNOME, un modèle générique d'objets. GNOME a été développé en se basant, d'une part, sur les caractéristiques de modèles existants et, d'autre part, sur des besoins de l'industrie. Ceci nous a conduit à un modèle hiérarchique, modulaire, relationnel et permettant l'inclusion de plusieurs attributs. Aucune supposition n'a été faite sur les objets modélisés, notamment au niveau des primitives de représentation qui peuvent être quelconques.

Nous allons maintenant présenter GNOMine, une instance de GNOME. Avec ce modèle, nous entrerons dans un domaine particulier, à savoir celui des mines souterraines. Nous commencerons par décrire des besoins de l'industrie minière en terme de représentations des mines. Nous nous baserons sur un examen de ces besoins pour proposer le modèle GNOMine qui permet l'intégration de l'information relative à une mine et à son exploitation.

⁽⁸⁾ Bien sûr, des représentations conformes à STEP ont probablement été construites à partir d'objets existant, mais ces objets étaient conformes à une description préalable.

Chapitre 3

Modélisation des mines

Après avoir présenté un modèle générique d'objets, nous allons aborder un domaine plus particulier, bien qu'encore très vaste, à savoir celui des mines et proposer un modèle pour ce type d'objet. L'industrie minière souffre actuellement d'un problème qui a trait à la représentation de toutes les données utiles aux différentes opérations minières. Ce problème, qui n'est pas récent, est actuellement exacerbé par le besoin d'augmenter la productivité, dû aux coût de plus en plus élevés de l'exploitation. Nous allons montrer dans ce chapitre quels sont exactement ces problèmes et en quoi nous pouvons être utiles à leur résolution. Dans la section 3.1, certaines opérations minières seront détaillées, ce au regard des informations qu'elles utilisent et qu'elles produisent. Puis, une certaine intégration des données échangées sera présentée (section 3.2). Nous décrirons ensuite le modèle générique de mine — une instance de GNOME — que nous proposons et qui permettra une représentation intégrée de ces informations (section 3.3).

3.1 Différentes opérations minières

Tout au long de la vie d'une mine, de nombreuses opérations sont effectuées : arpentage et cartographie, planification de la mine, planification et contrôle des activités,

surveillance et contrôle de l'environnement de travail, surveillance et contrôle du trafic, navigation autonome, etc. Certaines de ces opérations sont effectuées de temps en temps, d'autres sont effectuées de façon continue. Toutes ont lieu du début à la fin de la vie de la mine. Ces opérations échangent des informations de types très différents, certaines informations étant utilisées par plusieurs opérations comme nous allons le voir dans la description des opérations.

3.1.1 Arpentage et cartographie

L'arpentage consiste en l'acquisition de données essentiellement topographiques et géologiques⁽¹⁾. Un premier arpentage est effectué avant le début de l'exploitation de la mine afin d'évaluer les réserves disponibles de minerai. Ensuite, d'autres données sont acquises au fur et à mesure que l'exploitation de la mine progresse. Ces nouvelles données concernent la géométrie des excavations et permettent aussi de raffiner l'estimation des réserves de minerai.

La cartographie consiste en la création de cartes topographiques ou géologiques. Ces cartes peuvent correspondre à diverses coupes selon différentes orientations de la mine. Les cartes, anciennement sur papier, sont actuellement remplacées par des représentations infographiques tridimensionnelles. Ceci permet d'une part une meilleure visualisation, par exemple, de la localisation et de la qualité du minerai et, d'autre part, un traitement informatique des données.

Essentiellement deux types de modèles (et leurs variantes) sont utilisés pour représenter les données topographiques et géologiques : des modèles de blocs et des modèles de type CAD (« Computer Aided Design/Drafting »).

Les modèles de blocs procèdent comme suit. L'espace (généralement 3D mais parfois aussi 2D (Horst et Tsai 1995)) est décomposé en cellules. À chacune de ces cellules est associée une qualité ou une quantité. La qualité peut être l'occupation, la

⁽¹⁾Le recensement et positionnement d'équipement statique dans la mine peut être considéré comme faisant partie de l'arpentage ou simplement comme entrée au processus de la cartographie.

non-occupation ou la semi-occupation ou encore peut spécifier le type de roche présent dans la cellule. La quantité peut, par exemple, indiquer la teneur du minerai ou la probabilité d'occupation de la cellule. Ce type de modèle a l'avantage de permettre la représentation de formes complexes par l'information volumétrique correspondante. Il est donc principalement utilisé pour représenter les veines de minerai. Parfois, il est aussi utilisé pour représenter les excavations présentes dans ces corps (Kavouras et al. 1988, Horst et Tsai 1995). Un autre avantage de ce type de modèle est que les calculs liés au volume (volume de minerai, densité d'une zone, etc.) sont aisés. Afin de résoudre le compromis entre le manque de compacité du modèle et la faible résolution spatiale de celui-ci, des cellules de taille variable ont été introduites. Par exemple, Nader et al. (1994) utilisent des cellules de hauteur variable s'adaptant à la hauteur de la veine. Masry et al. (1988) utilisent, quant à eux, un arbre octal dans laquelle l'espace est décomposé récursivement en huit cellules de même taille jusqu'à ce que chaque cellule soit homogène ou qu'une taille minimale soit atteinte. Plus précisément, une représentation en cellules de taille identique est créée à partir d'un modèle CAD provenant de l'arpentage. Les cellules sont ensuite regroupées en cellules plus grosses. Mais la forme des cellules demeure parallélépipédique.

La seconde classe de modèle est le type CAD (« Computer Aided Design Drafting »). Dans ce cas, les volumes sont représentés par leur surface — ou les surfaces par leur frontière dans le cas 2D. Les surfaces sont généralement triangulées mais peuvent aussi être paramétriques (Pareja et Pelley (1995) utilisent des NURBS). Les utilisations des modèles de ce type sont généralement différentes. Une utilisation possible est comme étape intermédiaire entre des données géologiques et le modèle de bloc de la veine (Masry et al. 1988). Une seconde utilisation, plus importante, est la planification d'excavations d'exploitation ou permanentes (Henley et Wheeler 1988, Campbell et Smith 1991, Wheeler 1993, Pareja et Pelley 1995). Ces modèles servent aussi à représenter et visualiser les données d'arpentage des excavations et faire des calculs (journaliers ou mensuels par exemple) de volume excavé, de longueur

de galerie, etc., (Campbell et Smith 1991, Wheeler 1993). De tels modèles sont aussi utilisés en 2D pour représenter l'environnement de véhicules en opération (Shaffer et Stentz 1992, Gonzalez et al. 1994, Horst et Tsai 1995).

Du fait que ces deux types de modèles sont très différents et ont des utilisations complémentaires, les systèmes développés actuellement les intègrent tous les deux généralement de façon logique en fournissant des outils pour passer de l'un à l'autre. Par exemple, Horst et Tsai (1995) décrivent des algorithmes pour transformer une grille d'occupation (modèle de blocs en 2D où chaque cellule donne la probabilité d'être occupée) en un modèle de frontière et inversement. Masry et al. (1988) mentionnent un système semi-automatique partant des données d'arpentage et arrivant à un arbre octal en passant par un modèle CAD et une décomposition en cellules toutes identiques. Wheeler (1993) fait l'intersection entre une galerie décrite par la surface constituant ses parois et le modèle de blocs du lieu où passe la galerie. Les roches représentées par le modèle de blocs sont alors visualisées sur les parois de la galerie.

3.1.2 Planification des mines

Cette opération a pour but de décider quelles vont être les zones qui doivent être exploitées, avec quelles techniques, dans quel ordre, etc. Le résultat est une séquence d'excavations à creuser qui peuvent servir d'accès, pour l'exploitation, pour la ventilation, pour l'évacuation du minerai, etc.

Des données de divers types sont nécessaires à cette activité (Bullock 1982, Allison et al. 1995, Wilke et al. 1995, Huang et al. 1995) : la structure de la veine, la structure de la roche autour de la veine, des informations économiques, l'équipement disponible, les excavations actuelles, etc.

La structure de la veine est l'information la plus importante. Elle permet de déterminer les parties qui doivent être exploitées. La structure de la veine comprend la géométrie de la veine ainsi que la qualité du minerai dans la veine. Notons que la veine peut contenir plusieurs types de minerai. Les différents types de modèles

géométriques de veines ont été décrits à la section 3.1.1.

La structure de la roche autour de la veine permet d'évaluer la résistance de ce qui est autour de la veine lors de son exploitation. Cela contribue aussi à la détermination de la méthode d'exploitation. Il faut donc représenter la *solidité de la roche* (la *fragmentation de la roche*, l'*orientation des couches*, etc.).

Les informations économiques contiennent les coûts d'exploitation, le prix de vente des minerais, les infrastructures aux alentours (routes, habitations), etc. Ces informations n'ont pas ou peu de relation avec le reste, mis à part, peut-être, ce qui concerne les coûts d'exploitation, mais elles affectent les séquences d'exploitation.

La planification se base évidemment aussi sur les excavations actuelles et sur l'équipement disponible. En retour, elle spécifie des excavations futures — qu'il faut arpenter et cartographier quand creusées — ainsi que des besoins en équipement. Elle permet aussi de « découvrir » que des zones sont peu ou mal connues et requièrent donc un nouvel arpentage.

3.1.3 Gestion de la ventilation

La gestion de la ventilation est un problème important dans les mines⁽²⁾. Traditionnellement, la mine est ventilée suivant la quantité minimale nécessaire à la pire activité, ce de façon constante même si cette activité ne se produit pas de manière continue. Cela implique des dépenses énormes inutiles (Hardcastle et al. 1995, Lunder 1995). Il y a donc, d'une part, un travail d'optimisation à faire et, d'autre part, une surveillance constante et un ajustement des paramètres de ventilation à effectuer en temps réel en fonction des besoins réels.

L'optimisation est faite à l'aide de simulateurs qui travaillent à partir d'une représentation du système de ventilation. Cette représentation semble suivre toujours le

⁽²⁾ Plus généralement, la gestion de l'environnement minier complet est un problème important à traiter. Notamment, les déformations et contraintes des roches, la température, les émissions de gaz, etc., doivent être surveillées (Beus et Orr 1992).

même modèle (voir par exemple (Hardcastle et al. 1995, Lunder 1995)) : il consiste en un réseau de nœuds représentant les intersections et de branches représentant les conduits et les ventilateurs. Les branches sont quantifiées par les paramètres physiques des conduits (volume, section, surface, résistance à l'écoulement (facteur K), etc.) et par leur rôle dans la simulation (flux fixe, variable ou contrôlé, ventilateur, etc.). Le facteur K dépend essentiellement du matériau constituant le conduit, donc du type de roche quand il s'agit d'une excavation. Un conduit peut être un tuyau ne transportant que de l'air ou une galerie de mine. Dans ce dernier cas, le type de roche et sa finition — et donc la méthode de creusage — sont des facteurs importants. Des tables donnent les valeurs de ce facteur (Mount 1982). Notons que les nœuds peuvent correspondre à des intersections entre seulement deux branches (Lunder 1995) ce qui permet une représentation plus fine des conduits.

La partie *surveillance et ajustement* nécessite de connaître les activités polluantes en cours (présence de véhicules diesel, sautage, concassage, etc.) afin d'anticiper la ventilation. Des mesures locales faites à l'aide d'un réseau de capteurs permettent de corriger localement la ventilation (Hardcastle et al. 1995).

3.1.4 Gestion du trafic des véhicules miniers

Les galeries de circulation sont, pour des raisons économiques, généralement très étroites. Ceci implique que les croisements de véhicules ne sont généralement possibles qu'en des endroits spécialement prévus pour cela et qu'il faut s'assurer que deux véhicules ne s'engagent pas en même temps et en sens inverse dans la même galerie (Crocker et Brophey 1994). La gestion du trafic permet aussi de répartir les véhicules sur tous les chemins possibles afin d'éviter l'engorgement de certaines voies. Ceci implique de savoir où sont les véhicules dans la mine, ou au moins le temps qu'il leur faut pour atteindre une zone de croisement ou encore sortir d'une galerie.

La gestion du trafic nécessite de connaître la géométrie des excavations, ou au moins la longueur des galeries, l'emplacement des points de croisement, la topologie de

la mine, la largeur des galeries, etc. L'information sur les véhicules peut comprendre leur emplacement exact et en temps réel, leur vitesse, leur largeur, leur aptitude à manœuvrer et, évidemment, leur destination. En retour, la gestion du trafic produit un plan de route pour chaque véhicule et peut aussi exprimer des besoins en termes de voies de passage ou de points de croisement.

3.1.5 Navigation autonome

Une fois spécifié le plan de route d'un véhicule — par le module de gestion de trafic —, il faut planifier le chemin, voire la trajectoire, correspondant et le suivre. Pour cela, différentes données peuvent être utilisées. Par exemple, de l'information sur la géométrie autour du véhicule peut être utile pour aider l'interprétation des données sensorielles ou l'anticipation du contrôle. De l'information sur la condition des surfaces — par exemple des estimations des degrés de régularité ou de specularité — permet d'évaluer la confiance que nous pouvons avoir dans la réponse des senseurs du type caméra ou télémètre à lumière structurée. La connaissance de la présence d'obstacles fixes ou mobiles — inconnus au moment de l'établissement du plan de route — permet une re-planification locale anticipée afin de prévenir les accidents.

Mais ceci n'est pas le seul aspect de la navigation autonome. La connaissance précise et mise à jour en temps réel de l'emplacement d'un véhicule permet de contrôler à distance — sans « intelligence » embarquée — les déplacements de ce véhicule. Par exemple, Hinz et Dagenais (1995) contrôlent à distance un mineur en continu dont la position est donnée à l'aide de différents senseurs (poursuite d'un point lumineux, gyroscopes et senseurs ultrasoniques).

À l'inverse, la navigation peut aussi permettre la découverte d'obstacles ou d'erreurs dans la géométrie de la mine. Chaque véhicule en déplacement peut aussi indiquer aux autres opérations, par exemple la gestion du trafic ou de l'équipement, où il se trouve.

3.1.6 Gestion des activités minières

Toutes les actions qui doivent se dérouler dans la mine doivent être planifiées et exécutées en fonction des ressources disponibles, des besoins ou activités prévues par d'autres modules — comme la planification de mine ou l'arpentage —, d'horaires et délais à respecter, etc. Su et al. (1995) décrivent une telle planification pour les tâches d'abattage. Les ressources peuvent être humaines, matérielles, énergétiques, etc.

Les activités étant planifiées, des données peuvent être transmises à d'autres opérations. Par exemple, une activité particulière peut nécessiter la présence d'un certain nombre de mineurs en un lieu donné de la mine, mineurs qui doivent être transportés à l'aide d'un véhicule. Les déplacements de ce véhicule doivent donc être soumis au contrôleur du trafic. Une activité polluante comme le sautage nécessitera plus de ventilation, requête qui doit être envoyée au gestionnaire de la ventilation. Une telle activité peut aussi conduire à une interdiction de circulation dans certaines zones, interdiction qui doit être transmise au contrôleur du trafic.

3.2 Une certaine intégration de l'information

La figure 3.1 montre les différentes opérations minières que nous avons décrites à la section 3.1 ainsi que les informations échangées. Comme ce diagramme le montre, les mêmes informations sont utilisées par différentes opérations. Or, historiquement, chacune des opérations utilisait ses propres données, ce qui conduisait à une duplication importante de celles-ci. Cette duplication est évidemment à éviter, ce pour plusieurs raisons. La première est une question d'inefficacité puisque le même travail, par exemple l'interprétation des données brutes, est fait de nombreuses fois. La seconde a trait à la cohérence des données : si chaque opération utilise et modifie ses propres données, celles-ci deviennent vite globalement incohérentes.

L'industrie minière s'est rendu compte de ce problème il y a longtemps. Par exemple, Chueke et Armony (1988) décrivent un système permettant l'intégration

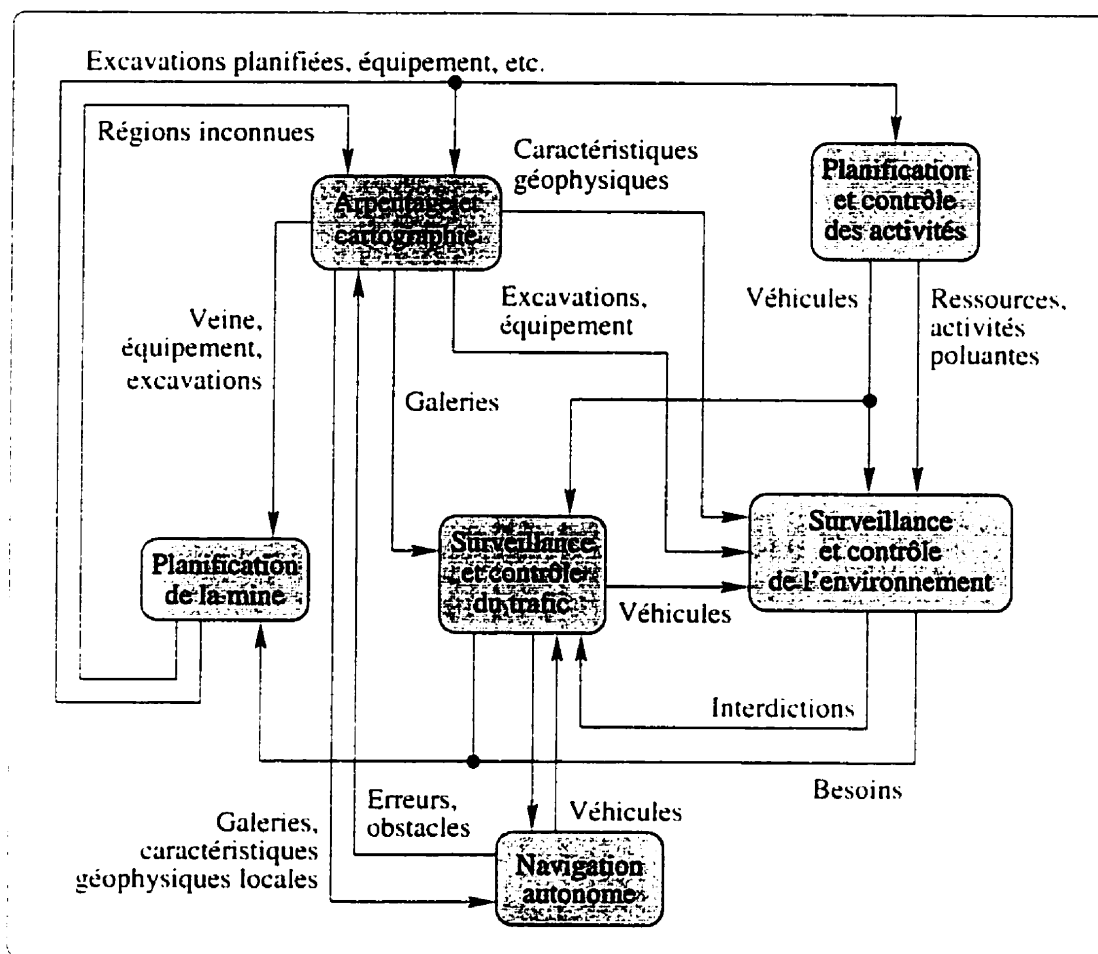


Figure 3.1 : Différentes opérations minières et leurs échanges d'information

dans une base de données des informations depuis l'arpentage jusqu'à la création de cartes⁽³⁾. Plus récemment, Taylor et Paananen (1991) décrivent un système permettant d'interpréter les données géologiques et de planifier (graphiquement) les excavations. Ce système permet aussi de suivre le minerai de la phase de planification jusqu'au moment du traitement. Ils décrivent le flux de données concernant le minerai et arrivent à un diagramme similaire à celui de la figure 3.1⁽⁴⁾.

⁽³⁾ Il n'était alors pas encore question d'automatisation minière.

⁽⁴⁾ Ce diagramme est plus détaillé que celui de la figure 3.1 mais ne présente que l'aspect géologique.

Depuis, la recherche d'une intégration complète de toutes les données dans le cadre de l'automatisation minière se poursuit (Devine et Brogden 1994. Sas 1994). Par exemple, Schumacher et Hünefeld (1995) décrivent une base de données contenant les informations nécessaires à diverses opérations minières : arpentage, ventilation, planification des opérations et de l'équipement et gestion de l'électricité. Chacune de ces opérations accède aux données dont elle a besoin en les transformant localement suivant ses besoins. Mottola et al. (1995) proposent une représentation plus avancée des données. Celles-ci sont décomposées (ou regroupées) par types d'activité : surveillance de la mine, gestion de la machinerie mobile, des équipements statiques et de l'infrastructure (eau, énergie, air, réseau de communication, etc.). La décomposition n'est donc pas basée sur les types de donnée, ce qui a pour conséquence une certaine dispersion de l'information. Huang et al. (1995) proposent eux un modèle qui semble être orienté vers les données, c'est-à-dire que la décomposition est basée sur la nature des données et non plus sur leur utilisation. D'autre part, ce modèle intègre aussi bien des données propres à une mine que de l'information générale à l'industrie minière complète — comme, par exemple, les méthodes d'exploitation.

3.3 GNOMine : un modèle de mine souterraine

Nous allons maintenant décrire une instance du modèle générique d'objets GNOME, soit un modèle de mine souterraine ayant pour but de réaliser l'intégration de différents types d'information nécessaires à différentes opérations minières. Pour cela, nous allons commencer par décrire rapidement les types d'information dont nous avons déjà parlés à la section 3.1, mais cette fois-ci sous l'angle des données et non plus des opérations qui utilisent les données. Ces types vont former des attributs du modèle de mine qui seront décrits par la suite.

La géométrie des excavations est utilisée par plusieurs des opérations décrites à la section 3.1 : la gestion du trafic, la navigation, la planification des mines et la

ventilation. La navigation a besoin d'une description détaillée de cette géométrie. Par contre, la gestion du trafic n'utilise qu'une description topologique quantifiée par des distances entre points de croisement ou intersections. La planification de mine, quant à elle, doit connaître l'existence des excavations ainsi que leur position dans la veine afin de savoir quelles parties de la veine ont déjà été atteintes et comment en atteindre de nouvelles. Enfin, la ventilation utilise la géométrie des excavations entre autres à travers des paramètres décrivant la résistance des excavations à l'écoulement de l'air, paramètres dépendant entre autres de la géométrie des excavations. D'autre part, chaque excavation peut être planifiée, déjà creusée, inconnue, mal représentée, remblayée, etc. De plus, comme nous l'avons déjà dit, les excavations peuvent avoir plusieurs utilisations : navigation, conduit (d'air, de minéral ou de remblais), exploitation (sautage, creusage, remplissage, etc.), salle (de repos, servant d'atelier), etc. Un attribut *géométrie des excavations* (section 3.4) devra donc être lié à un attribut *utilisation des excavations* (section 3.5). Les diverses utilisations conduisent principalement à quatre types d'excavations : des galeries, des intersections, des chambres et des puits⁽⁵⁾. Chacun de ces lieux doit être décrit suivant différents niveaux de détail pour les différentes opérations minières (comme nous le verrons à la section 3.4).

Toutes les opérations minières utilisent de l'information concernant les équipements. Ceux-ci sont statiques ou mobiles, ce qui constitue une première classification de l'équipement. Les classifications suivantes sont basées sur la fonction de l'équipement (statique : concasseur, ventilateur, conduit de ventilation, porte, éclairage, pompe, etc. ; mobile : camion, LHD (« Load, Haul, Dump »), excavateur, mineur en continu, véhicule de transport, etc.), puis sur le type (pompe électrique, pompe thermique), suivant le modèle (LHD Wagner MT426, Elphinstone R1700 ou encore Toro T501D), etc. Huang et al. (1995), par exemple, utilisent une telle hiérar-

⁽⁵⁾Une mine souterraine peut être constituée de plusieurs niveaux formés d'excavations généralement horizontales. Ces niveaux sont reliés entre eux et à la surface à l'aide de puits quand la différence de profondeur est importante et par des rampes sinon. Ici, nous n'avons pas inclus ces rampes qui sont en fait des galeries dont la pente varie.

chie. Le niveau le plus bas de cette hiérarchie correspond aux différentes pièces d'équipement. Chacune est quantifiée par différents paramètres : consommation d'énergie et débit d'air d'un ventilateur, dimension et capacité de transport d'un camion, etc. Certains paramètres peuvent (doivent) être mis à jour en temps réel pour toutes les opérations de surveillance du trafic ou des conditions environnementales. L'attribut *équipement* permettant de représenter cette hiérarchie d'équipement doit être lié à la géométrie des excavations afin de positionner les pièces d'équipement. Cette relation doit être variable pour les équipements mobiles. Cet attribut sera décrit à la section 3.6 tandis que la relation le liant à la géométrie des excavations le sera à la section 3.8.2.

Notons que les obstacles peuvent être représentés d'une façon similaire à la représentation de l'équipement statique. Ils peuvent être distingués suivant leur forme, leur degré de permanence — une roche tombée d'un camion est moins permanente qu'un éboulement —, leur importance (danger pour la navigation, obstruction d'un passage), etc. Ils sont positionnés dans les excavations avec une relation du même type que celle positionnant l'équipement statique. Nous ne décrirons donc pas plus cet attribut.

La représentation de la veine, ou plus généralement de toute la roche du site de la mine, incluant donc la veine, est principalement utilisée pour la planification de la mine. Toutefois, la nature de la roche peut aussi être utilisée dans différentes opérations et différents niveaux de représentation seront donc nécessaires. Par exemple, la navigation et la ventilation n'ont besoin que d'une spécification de la nature des roches qui soit grossière et globale sur toute une portion d'excavation. Par contre, la planification de la mine doit disposer d'une spécification précise de la position et de la qualité des roches. Nous voyons donc que la représentation de la roche contient en fait plusieurs types d'information : la *géométrie des structures rocheuses*, le *type des roches* et la *qualité des roches*. Ce dernier type couvre d'une part la qualité du minerai — quantité de minerai utile par unité de volume — et d'autre part la solidité

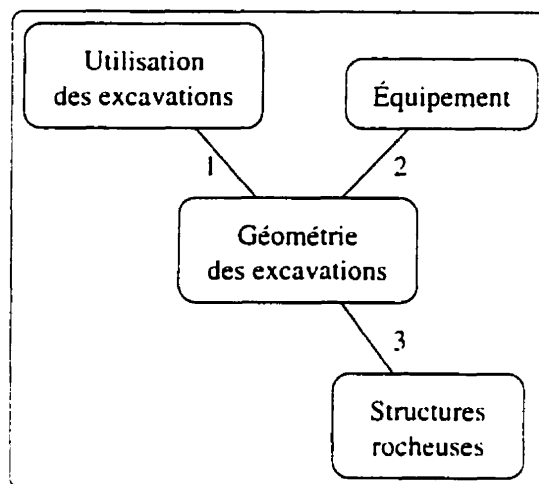


Figure 3.2 : Les attributs de la mine et leurs relations

de la roche qui n'est pas du minéral. Ces trois types d'information vont être représentés à l'aide d'un attribut, les *structures rocheuses*. Celui-ci va contenir une partie décrivant la géométrie et une partie décrivant la nature et la qualité des roches. Cet attribut sera décrit plus en détail à la section 3.7. La relation créant le lien entre les structures rocheuses et les excavations sera quant à elle décrite à la section 3.8.3.

La figure 3.2 montre les différents attributs ainsi que les relations qui les lient. Nous allons maintenant décrire et formaliser en détail les attributs que nous avons introduit. Les relations entre ces divers attributs seront aussi décrites (section 3.8).

Chacun des aspects introduits sera illustré à l'aide d'un exemple de mine. La figure 3.3 montre la mine avec ses attributs, à savoir la géométrie des excavations, des types de roche et des pièces d'équipement — des éclairages, un LHD, une porte et un ventilateur (à la base du puits).

Pour chacun des attributs, nous allons donner des diagrammes en EXPRESS-G décrivant les objets-attributs et leurs relations. Nous donnerons aussi de tels diagrammes pour décrire les relations inter-attributs. Ceci permettra de montrer que GNOMine, une instance de GNOME, peut faire partie de STEP. D'autre part, grâce aux



Figure 3.3 : Un exemple de mine

méthodes d'implantation de STEP (parties 21 à 29), une implantation informatique de GNOMine peut facilement être obtenue. Notons qu'EXPRESS, dont EXPRESS-G est une représentation graphique, étant un langage orienté objets, les diagrammes donnés peuvent facilement être traduits en un quelconque langage de ce type.

3.4 La géométrie des excavations

En suivant GNOME, nous allons d'abord décrire l'arbre de décomposition de l'attribut *géométrie des excavations* (section 3.4.1), puis les relations entre objets-attributs de cet attribut (section 3.4.2). Enfin, les quantifications des objets-attributs (section 3.4.3) et des relations (section 3.4.4) seront données. Cet attribut est supposé être l'attribut numéro 1.

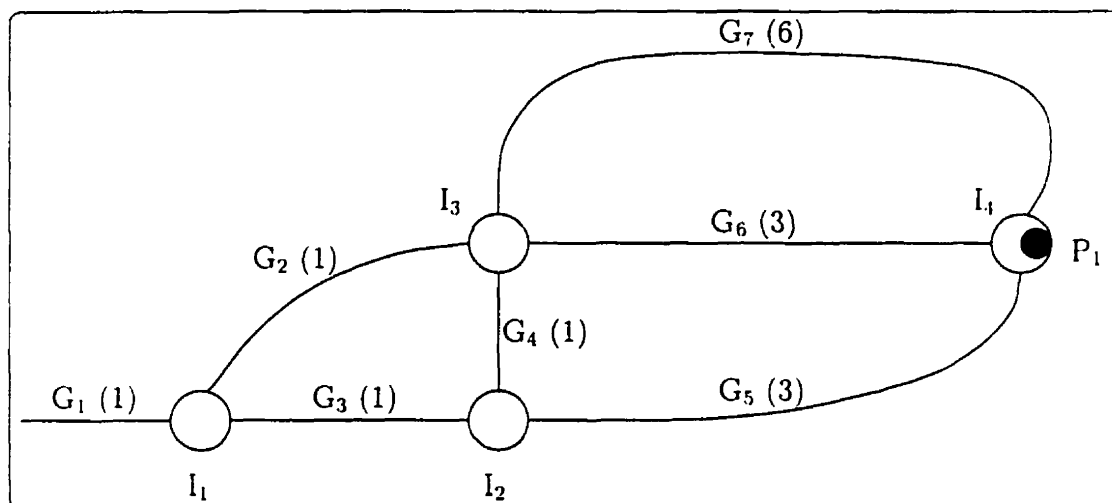


Figure 3.4 : Un exemple d'excavations de mine. Les traits symbolisent les galeries — dont le nombre de tronçon est marqué entre parenthèses —, les cercle vides les intersections et le cercle noir un puits.

La figure 3.4 montre un schéma des excavations de la mine que nous décrivons. Ces excavations sont le résultat de la construction d'une représentation à partir de données d'arpentage (section 5.5). Nous allons présenter le graphe de décomposition et des relations pour ces excavations ainsi que la quantification de quelques-unes des excavations et relations.

3.4.1 L'arbre de décomposition

Comme nous l'avons dit à la section 3.3, la géométrie des excavations doit distinguer plusieurs types de lieu selon leur utilisation. De plus, chaque type de lieu doit être représenté à différents niveaux pour les différentes opérations utilisant la représentation.

Le premier objet-attribut constitue la racine de l'arbre de décomposition et représente toutes les excavations de la mine. Nous l'appellerons *excavations* (E). Au niveau suivant, cet objet-attribut est décomposé en *galeries* (G_i), *intersections* (I_i).

chambres (C_i) et puits (P_i). Les chambres sont des lieux de la mine où différentes activités peuvent se produire : creuser, décharger le contenu de camions, entretenir l'équipement, etc. Du point de vue de la navigation, une chambre est un lieu à deux dimensions. Par opposition, les galeries sont des lieux où la navigation est unidimensionnelle. Leur rôle est de relier des chambres et, incidemment, des intersections. Elles pourraient donc n'être représentées que par des arcs (exprimant la connexion) entre les chambres et les intersections. Toutefois, nous devons représenter les galeries, pour la navigation, à des niveaux plus fins en précisant, par exemple, leur forme locale. Il faut donc qu'elles soient représentées comme des objets-attributs afin de pouvoir les décomposer. Enfin, les intersections sont des lieux où plusieurs galeries se rencontrent. Elles ont donc une importance pour des opérations comme la gestion du trafic ou de la ventilation. Pour la navigation, elles sont des lieux unidimensionnels mais à choix multiples. Les puits sont des excavations verticales joignant deux niveaux horizontaux de la mine ou un niveau à la surface. Ceux-ci servent à contenir des ascenseurs ou servent de conduit d'air ou de remblais.

À un niveau plus fin, les galeries sont décomposées en *tronçons de galerie* (TG_i) et *intersections* (I_i). Les intersections existent donc à plusieurs niveaux dans la hiérarchie. La décomposition des galeries est nécessaire afin d'avoir une représentation « simple » de la galerie ainsi que pour pouvoir exprimer des propriétés locales de la galerie. La forme de la galerie complète peut être complexe et représenter celle-ci en une seule partie n'est généralement pas faisable. Toutefois, une représentation simple des tronçons de galerie peut poser des problèmes pour leur raccordement. En effet, le lieu géométrique entre deux tronçons simples peut avoir une forme complexe. Représenter celui-ci par une intersection (entre deux tronçons de galerie) permet de ne pas avoir une représentation complexe pour les deux tronçons qui y aboutissent (figure 3.5). Enfin, la petite partie entre deux tronçons de galerie pourrait n'être représentée que comme un arc liant les deux tronçons. Toutefois, cette partie existe physiquement, possède donc une géométrie et il faut pouvoir lui associer un type de

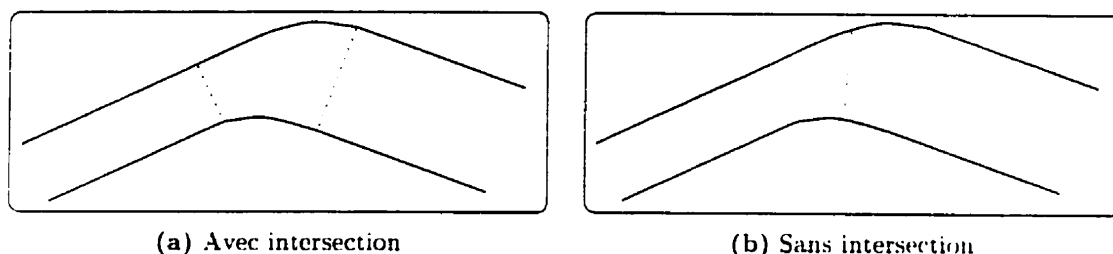


Figure 3.5 : Avec ou sans intersection? Représenter la transition entre les deux parties de galerie « simples » permet de ne pas avoir une représentation complexe pour ces deux parties (ici, permet de ne pas représenter une forme essentiellement droite avec, par exemple, des splines ou des polynômes de degré élevé à cause de la petite portion courbe).

roche ou y positionner une pièce d'équipement. Cette partie est donc représentée comme un objet-attribut. La décomposition des galeries étant faite principalement pour la navigation, elle sera guidée par la variation de la courbure de la galerie, par la largeur de la galerie et la hauteur de celle-ci. De plus, deux tronçons de galerie se raccorderont directement (sans intersection entre eux) si leurs axes forment une courbe continue en position, orientation et courbure. Nous verrons à la section 3.4.3.3 que les tronçons de galeries sont représentés comme des cônes généralisés clothoïdaux ce qui permet de définir un axe dont la courbure varie linéairement avec le déplacement le long de celui-ci. Cet axe représente un chemin qui peut être suivi par un véhicule. Préserver la continuité de courbure entre deux tronçons successifs permet de conserver ce caractère à l'axe de la galerie. Si une galerie présente un angle, alors une intersection sera introduite (figure 3.5). Notons que toutes les galeries peuvent ne pas être décomposées. En effet, si une galerie n'est utilisée que comme conduit de remblai, il n'est pas nécessairement intéressant d'en avoir une description géométrique précise. De plus, une galerie peut ne se décomposer qu'en un seul tronçon de galerie si la galerie est simple mais que sa description géométrique est nécessaire.

Afin de pouvoir associer plusieurs types de roches à un tronçon de galerie, celui-ci va être décomposé en deux *murs de galerie* (MG_1 pour le mur droit et MG_2 pour le

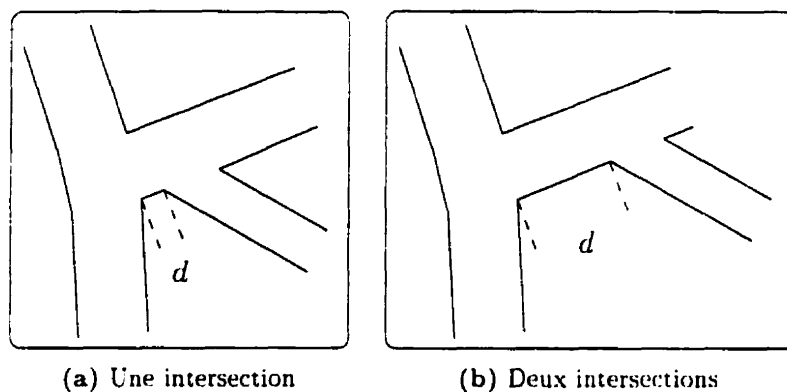


Figure 3.6 : Une ou deux intersections? À partir de quelle distance d y a-t-il deux intersections?

mur gauche⁽⁶⁾), un *sol* (S) et un *toit* (T).

Les intersections peuvent être décomposées en d'autres intersections plus élémentaires liées par des tronçons de galerie. Cette décomposition est introduite parce que, dans certains cas, il n'est pas clair si plusieurs galeries se rencontrent en *une* ou *plusieurs* intersections. Souvent, la distinction n'est pas unique et est sujette à interprétation (figure 3.6). La décomposition peut être arbitraire, par exemple en fixant un seuil sur la distance d de la figure 3.6, ou basée sur un critère objectif, par exemple de visibilité (Béranger 1996). Dans le cas où une intersection est décomposée en deux (ou plusieurs) intersections, alors celles-ci sont bien reliées par un tronçon de galerie et non par une galerie car la distance entre les deux intersections est « petite » et la représentation géométrique « simple ».

Quand une intersection est élémentaire, c'est-à-dire quand il n'est plus possible (ou désirable) de la décomposer en d'autres intersections, alors elle est décomposée en plusieurs *murs* (M_i), un *sol* et un *toit*. Les chambres sont décomposées suivant le même schéma que les intersections élémentaires.

⁽⁶⁾Nous allons définir des référentiels pour les tronçons de galerie (section 3.4.2) ce qui nous permettra effectivement de parler de droite et de gauche.

Les murs sont les parties verticales des parois des intersections ou des chambres entre les arrivées de deux galeries adjacentes dans la chambre ou l'intersection. Ils sont décomposés en *tronçons de mur* (TM_i). La décomposition est telle que les tronçons de mur puissent être représentés par une équation simple. En particulier, une cassure doit être introduite aux endroits de forte courbure, c'est à dire aux angles des murs. Une décomposition en tronçons de courbure constante peut être envisagée : par exemple, voir (Dudek et Tsotsos 1991) pour une telle méthode de décomposition. Ceci conduit à une représentation basée sur des arcs de cercle (ou des segments droits si la courbure est nulle). Gonzalez et al. (1994) utilisent des segments droits pour représenter les murs de l'environnement d'un mineur en continu. Toutefois, ceci conduit à une représentation contenant un grand nombre de tronçons et il peut être préférable d'utiliser une équation plus complexe, par exemple des splines. Dans ce cas, une décomposition comme celle décrite dans (Lacroix et al. 1994) (appliquée au cas 2D) peut être faite : les données sont approchées par des splines avec une discrétisation donnée et, là où l'erreur est trop importante, une discrétisation plus fine est utilisée. La section 3.4.3.2 décrit la quantification actuellement retenue. Les tronçons de mur permettent d'avoir une représentation « précise » des murs d'une intersection ou d'une chambre, c'est-à-dire de l'espace libre correspondant. Ceci permet, par exemple, de planifier un chemin d'une galerie à une autre dans l'intersection ou la chambre.

Les puits sont verticaux et de section constante, ils ne seront pas décrits géométriquement plus en détail. Leur quantification donnera leur hauteur et leur diamètre.

La figure 3.7 montre la relation de décomposition de la géométrie des excavations d'une façon générique. La figure 3.8 montre une visualisation 3D des excavations telles que reconstruites à partir des données d'arpentage des excavations servant à la navigation (voir la section 5.5)⁽⁷⁾. La figure 3.9 montre l'arbre de décomposition des excavations de notre mine (figure 3.4). Les décompositions d'une seule intersection (I_3) et d'un seul tronçon de galerie (TG_{1G_3}) sont montrées, les autres étant similaires.

⁽⁷⁾Le puits n'est pas montré sur cette figure car il n'a pas été arpenté.

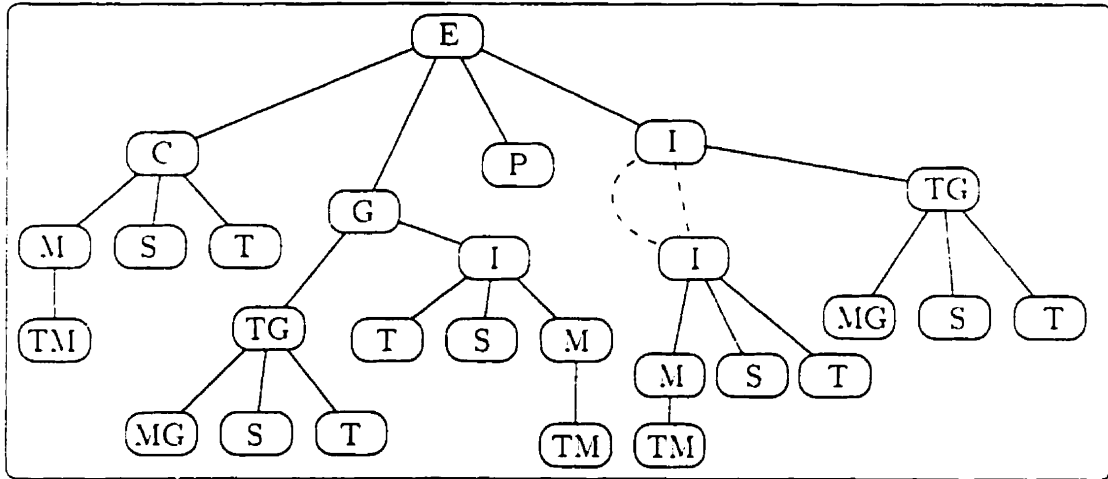


Figure 3.7 : L'arbre générique de décomposition pour la géométrie des excavations. Les lignes en tirets montrent une récursivité possible (un seul niveau de récursivité est montré). Les sigles décrivent les objets-attributs suivants : E : excavations. C : chambres. M : murs. TM : trçons de mur. S : sols. T : toits, G : galeries. TG : trçons de galerie. MG : murs de galerie. I : intersections. P : puits.

Pour la mine de la figure 3.4, l'ensemble des objets-attributs Ω_1 de l'attribut *géométrie des excavations* créés par la décomposition est :

$$\Omega_1 = \{$$

E,

$G_1, \dots, G_7, I_1 \dots I_4, P_1,$

$TG_{1G_1}, TG_{1G_2}, TG_{1G_3}, TG_{1G_4}, TG_{1G_5}, \dots, TG_{3G_5}, TG_{1G_6}, \dots, TG_{3G_6},$

$TG_{1G_7}, \dots, TG_{6G_7},$

$M_{1I_1}, \dots, M_{4I_1}, M_{1I_2}, \dots, M_{4I_2}, M_{1I_3}, \dots, M_{4I_3}, M_{1I_4}, \dots, M_{4I_4},$

$TM_{1I_1}, \dots, TM_{3I_1}, TM_{1I_2}, \dots, TM_{3I_2}, TM_{1I_3}, \dots, TM_{4I_3}, TM_{1I_4}, \dots, TM_{3I_4},$

$T_{1I}, \dots, T_{I_4}, S_{1I}, \dots, S_{I_4},$

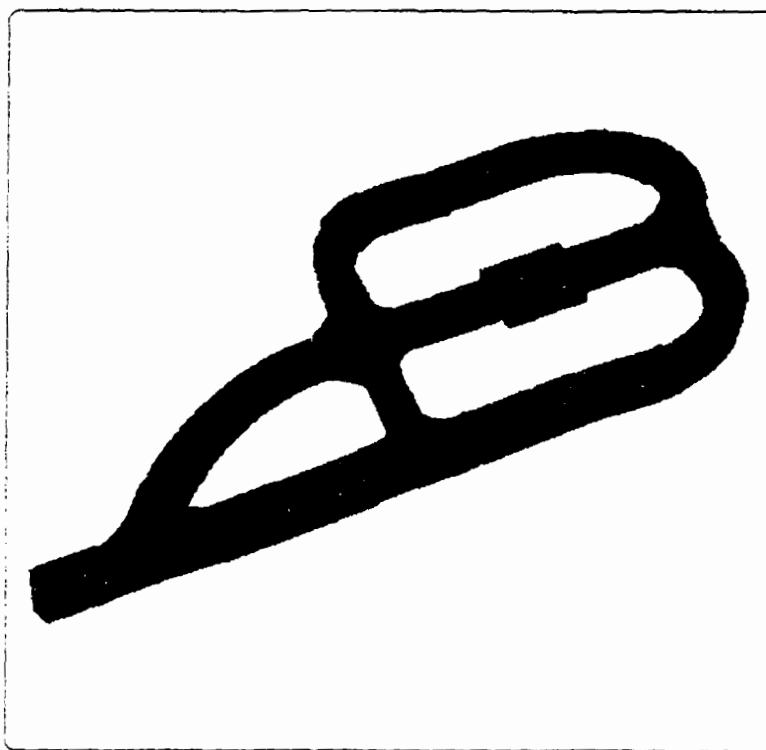


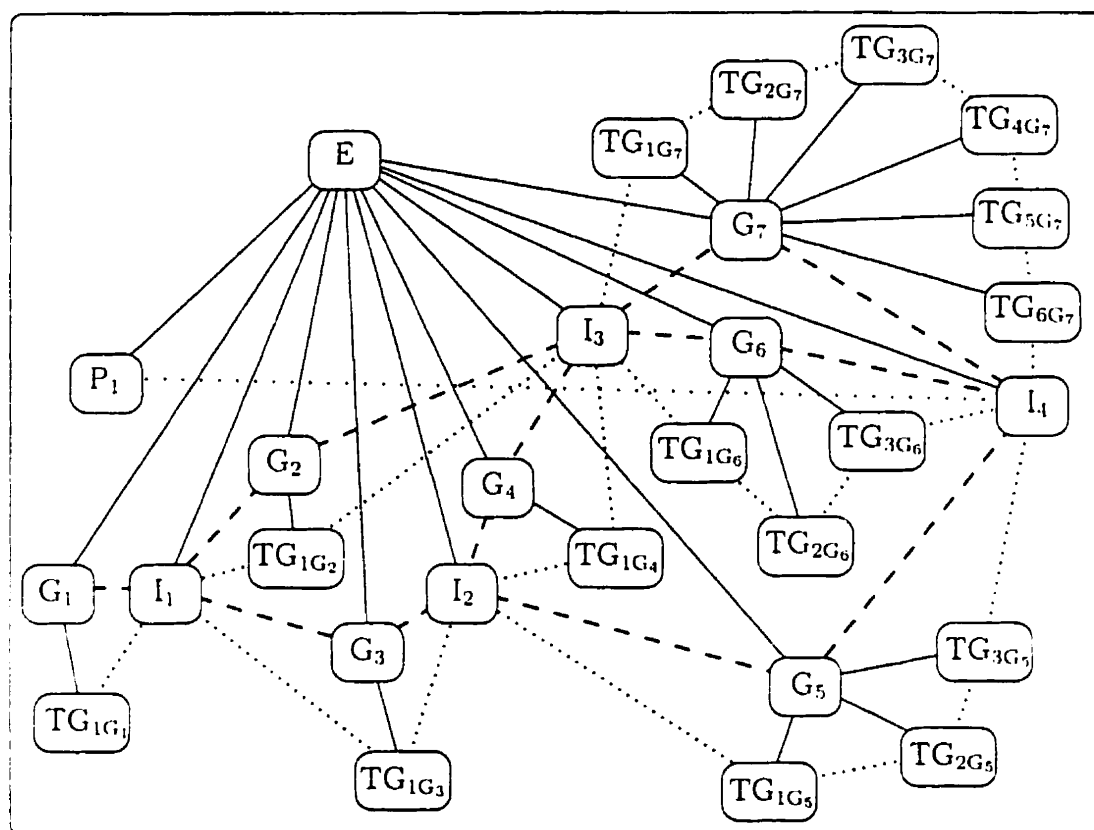
Figure 3.8 : Une représentation graphique 3D des excavations. Les galeries et les intersections sont de tons différents. La décomposition des galeries en tronçons de galerie est visible grâce aux changements de largeur ou hauteur.

$$\left. \begin{aligned} &MG_{1TG_{1G_1}}, \dots, MG_{1TG_{6G_7}}, MG_{2TG_{1G_1}}, \dots, MG_{2TG_{6G_7}}, \\ &T_{TG_{1G_1}}, \dots, T_{TG_{6G_7}}, STG_{1G_1}, \dots, STG_{6G_7} \end{aligned} \right\}.$$

La figure 3.9 montre plus de détails sur les différents objets-attributs de la décomposition, notamment en ce qui a trait à leur numérotation.

3.4.2 Les relations entre objets-attributs de la géométrie

Deux relations sont représentées, les deux exprimant une connexion. L'une de ces relations est qualitative tandis que l'autre est quantifiée afin de préciser comment les



(a)

Figure 3.9 : L'arbre de décomposition de la géométrie des excavations ($\Theta(\Omega_1)$) et le graphe des relations entre objets-attributs ($\Gamma(\Omega_1)$). La décomposition est montrée en traits pleins, la connexion en lignes à tirets et le raccordement en pointillés. Toutes les décompositions ne sont pas montrées. Les décompositions des intersections et tronçons de galerie suivent toutes le même schéma qu'en (b) et (c). (Suite page 94)

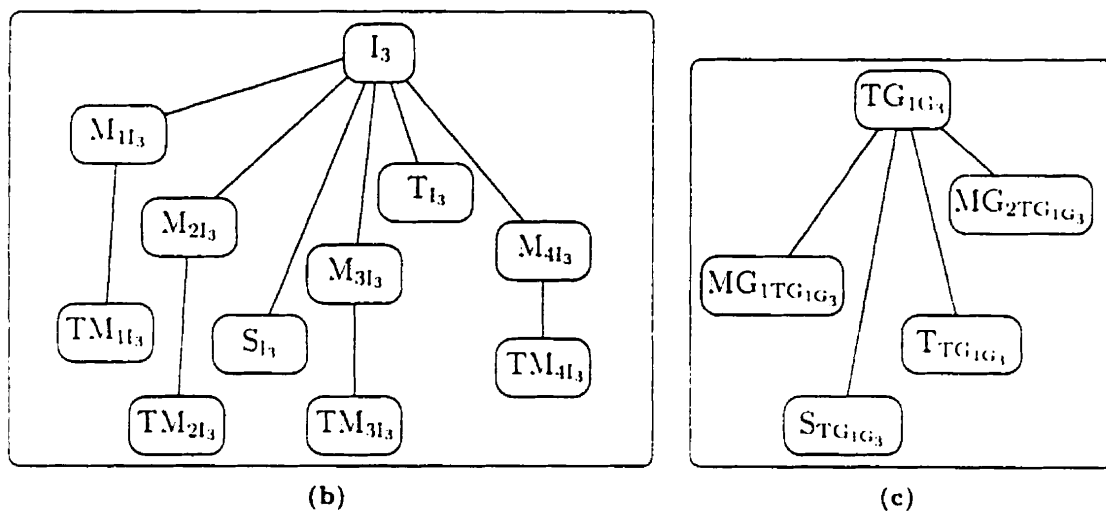


Figure 3.9 : (suite)

objets-attributs en relation sont connectés. Le graphe représentant ces relations est montré à la figure 3.9. Les relations de connexion sont bidirectionnelles.

La première relation est donc qualitative. Elle est appelée *connexion* et est notée c . Elle s'applique aux galeries, puits, intersections et chambres. Elle permet une description topologique de la mine qui peut être utilisée, par exemple, par le gestionnaire de trafic pour créer un plan de route — une succession de galeries, intersections et chambres — entre deux chambres.

La seconde relation va intervenir au niveau détaillé des excavations. Afin de spécifier la seconde relation, des référentiels doivent être associés aux objets-attributs. Nous allons maintenant les décrire.

Deux référentiels sont associés à chaque tronçon de galerie. Leur origine est sur l'axe du tronçon (à une hauteur nulle) à chacune des extrémités. L'axe y est tangent à l'axe du tronçon et pointe vers l'autre extrémité, c'est-à-dire vers les abscisses curvilignes croissantes. Les axes x et z sont respectivement horizontal et vertical et

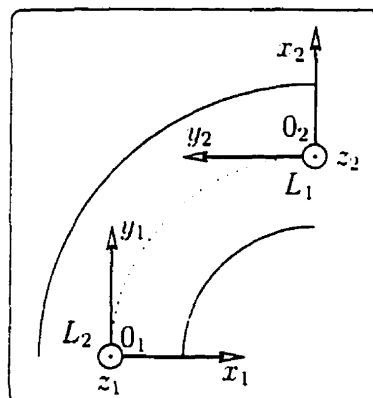


Figure 3.10 : Les référentiels associés à un tronçon de galerie

les trois axes forment un référentiel orthonormé direct⁽⁸⁾. Les deux référentiels sont arbitrairement numérotés 1 et 2. La figure 3.10 montre ces référentiels.

Deux référentiels sont aussi associés à chaque puits. Ils sont situés aux extrémités de l'axe du puits en suivant la même convention que pour les tronçons de galerie : l'axe y pointe vers l'autre extrémité. Toutefois, les axes x et z sont ici quelconques mais tels que les deux axes x soient coplanaires.

Enfin, des référentiels sont associés aux chambres et intersections : un par galerie et puits qui leur est connectée. Chaque référentiel coïncide avec le référentiel du tronçon de galerie qui arrive en ce point de la chambre ou de l'intersection tourné de π autour de son axe z ⁽⁹⁾. De cette façon, les référentiels sont orientés vers l'intérieur de l'intersection ou de la chambre. La figure 3.11 montre les référentiels associés à une intersection et correspondant aux tronçons de galerie. Les référentiels d'une intersection ou d'une chambre sont numérotés de 1 à N , le nombre de galeries et puits

⁽⁸⁾ En fait, nous pouvons définir un tel référentiel en chaque abscisse curviligne de l'axe, ce qui sera utilisé pour positionner des pièces d'équipement dans les tronçons (section 3.8.2). Autrement dit, les référentiels des deux extrémités peuvent être « glissés » le long de l'axe du tronçon de galerie et en particulier jusqu'à l'autre extrémité. Un référentiel « glissé » jusqu'à l'autre extrémité puis tourné de π autour de son axe z coïncide avec l'autre référentiel à sa position originale. Ceci sera utile pour calculer l'orientation d'un tronçon de galerie dans le voisinage immédiat d'une intersection.

⁽⁹⁾ En d'autres mots, ce référentiel coïncide avec le référentiel de l'autre extrémité du tronçon de galerie ou puits glissé jusqu'à cette extrémité.

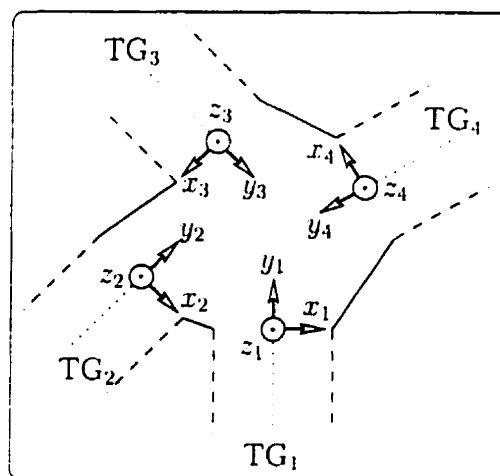


Figure 3.11 : Les référentiels associés à une intersection et correspondant aux tronçons de galerie

connectés à l'intersection ou à la chambre. L'ordre de numérotation suit l'ordre d'arpentage tout en s'assurant que les référentiels associés aux puits sont numérotés en dernier (ceci permet de simplifier la quantification des intersections et chambres, section 3.4.3.4). Pour la quantification des intersections et des salles (section 3.4.3.4 pour les intersections), le référentiel numéro 1 est utilisé comme référence pour positionner les $N - 1$ autres référentiels. Le même référentiel est aussi utilisé pour positionner les tronçons de mur (section 3.4.3.2) ainsi que les pièces d'équipement (section 3.8.2). Dans un puits, il faut pouvoir positionner des pièces d'équipement jusqu'au niveau du sol quand le puits est au dessus de l'intersection ou de la chambre. Les puits vont donc jusqu'au niveau du sol de l'intersection ou de la chambre auxquelles ils sont connectés. Notons toutefois que l'excavation s'arrête physiquement au niveau du plafond quand le puits est au dessus de l'intersection ou de la chambre.

La relation quantitative de connexion indique comment sont raccordés les tronçons de galerie, les puits, les intersections et les chambres. Cette relation est donc appelée le *raccordement* et est notée r . Un tronçon de galerie peut être raccordé à un autre tronçon de galerie ou à une intersection ou une chambre. Un puits, quant à lui, peut

être raccordé à une intersection ou une chambre. Un raccordement est spécifié par les indices des référentiels respectifs des deux objets-attributs en relation.

Le graphe $\Gamma(\Omega_1)$ représentant les relations entre les objets-attributs de la géométrie est donc l'ensemble suivant :

$$\begin{aligned} \Gamma(\Omega_1) = \{ & (G_1, I_1), (G_3, I_1), (G_3, I_2), (G_4, I_2), (G_4, I_3), (G_2, I_1), \\ & (G_2, I_3), (G_5, I_2), (G_5, I_4), (G_6, I_3), (G_6, I_4), (G_7, I_3), (G_7, I_4), \\ & (TG_{1G_1}, I_1), (TG_{1G_3}, I_1), (TG_{1G_3}, I_2), (TG_{1G_4}, I_2), (TG_{1G_4}, I_3), (TG_{1G_2}, I_1), \\ & (TG_{1G_2}, I_3), (TG_{1G_5}, I_2), (TG_{1G_5}, TG_{2G_5}), (TG_{2G_5}, TG_{3G_5}), (TG_{3G_5}, I_4), \\ & (TG_{1G_6}, I_3), (TG_{1G_6}, TG_{2G_6}), (TG_{2G_6}, TG_{3G_6}), (TG_{3G_6}, I_4), \\ & (TG_{1G_7}, I_3), (TG_{1G_7}, TG_{2G_7}), (TG_{2G_7}, TG_{3G_7}), (TG_{3G_7}, TG_{4G_7}), \\ & (TG_{4G_7}, TG_{5G_7}), (TG_{5G_7}, TG_{6G_7}), (TG_{6G_7}, I_4), (P_1, I_4) \\ & \}. \end{aligned}$$

La fonction F indique les relations représentées par chaque arc :

$$\begin{aligned} & F: \Gamma(\Omega_1) \rightarrow \mathcal{P}(R) \quad (3.1) \\ & \left. \begin{aligned} & (G_1, I_1), (G_3, I_1), (G_3, I_2), (G_4, I_2), (G_4, I_3), (G_2, I_1), \\ & (G_2, I_3), (G_5, I_2), (G_5, I_4), (G_6, I_3), (G_6, I_4), (G_7, I_3), (G_7, I_4) \end{aligned} \right\} \rightarrow \{c\} \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l}
 (TG_{1G_1}, I_1), (TG_{1G_3}, I_1), (TG_{1G_3}, I_2), \\
 (TG_{1G_4}, I_2), (TG_{1G_4}, I_3), (TG_{1G_2}, I_1), \\
 (TG_{1G_2}, I_3), (TG_{1G_5}, I_2), (TG_{1G_5}, TG_{2G_5}), \\
 (TG_{2G_5}, TG_{3G_5}), (TG_{3G_5}, I_4), (TG_{1G_6}, I_3), \\
 (TG_{1G_6}, TG_{2G_6}), (TG_{2G_6}, TG_{3G_6}), (TG_{3G_6}, I_4), \\
 (TG_{1G_7}, I_3), (TG_{1G_7}, TG_{2G_7}), (TG_{2G_7}, TG_{3G_7}), \\
 (TG_{3G_7}, TG_{4G_7}), (TG_{4G_7}, TG_{5G_7}), (TG_{5G_7}, TG_{6G_7}), \\
 (TG_{6G_7}, I_4)
 \end{array} \right\} \rightarrow \{r\}.$$

$$(P_1, I_4) \mapsto \{c, r\}.$$

où $R = \{c, r\}$ est l'ensemble des étiquettes représentant les relations. Comme nous l'avons déjà dit, les deux relations sont bidirectionnelles.

3.4.3 La quantification des objets-attributs

Nous allons maintenant décrire la quantification des excavations, c'est à dire la quantification des objets-attributs de Ω_1 .

Nous attachons à chaque excavation un *état* indiquant si l'excavation est planifiée (p), en cours (c), active (a), inactive (i), remblayée (r), etc. E sera l'ensemble des états possibles :

$$E = \{p, c, a, i, r\}.$$

La seconde caractérisation commune aux excavations est la méthode d'excavation utilisée. Ceci a pour but de permettre la détermination du facteur K (section 3.1.3). Des valeurs possibles sont le sautage s , le perçage p , le creusage c , etc. M sera l'ensemble des méthodes possibles :

$$M = \{s, p, c\}.$$

Donnons maintenant les quantifications additionnelles propres à chaque type d'ex-

cavation. Nous associons un référentiel à l'objet-attribut *excavations*. Celui-ci coïncide avec l'un des référentiels du tronçon de galerie formant l'une des entrées de la mine. L'objet-attribut *excavations* est de plus quantifié par une rotation (un angle autour de l'axe z) et une translation qui permettent de transformer son référentiel en le référentiel terrestre de la mine. Ce référentiel terrestre est celui dans lequel sont données toutes les mesures d'arpentage (voir la section 4.1) et correspond au point géodésique le plus proche de l'entrée de la mine. Les galeries sont quantifiées par leur longueur, largeur et hauteur, les tronçons de galerie par leur longueur, largeur, hauteur ainsi que les paramètres décrivant leur axe. Les intersections et chambres sont quantifiées par les transformations entre leurs différents référentiels. Les tronçons de mur sont quantifiés par une équation paramétrique donnée dans le référentiel numéro 1 de l'objet-attribut père. Notons que l'état d'un tronçon de mur peut différer de celui de l'intersection ou de la chambre à laquelle le mur appartient car, par exemple, une chambre peut être en cours d'excavation mais un mur de la chambre peut être terminé. Les toits et sols, quant à eux, ne sont pas quantifiés. Leur forme est déterminée par les murs puisqu'ils sont la surface la plus plane s'appuyant sur ou sous les tronçons de mur. Leurs état et méthodes d'excavation sont les mêmes que ceux de l'intersection ou la chambre correspondante. Les murs de galerie ne sont pas non plus quantifiés. Leurs état et méthodes d'excavations sont les mêmes que ceux du tronçon de galerie. Les puits sont quantifiés par leur hauteur et leur diamètre.

Formalisons les applications de quantification de quelques objets-attributs.

3.4.3.1 La quantification de l'objet-attribut *galerie* (G_i)

À chaque galerie sont associés une longueur L , une largeur l , une hauteur h , un état et une méthode d'excavation. La largeur et la hauteur sont la valeur minimale des quantités correspondantes des tronçons de galerie constituant la galerie. L'application de quantification d'une galerie est donc l'application constante donnant L , l , h , l'état et la méthode. Notons que la longueur, la largeur et la hauteur peuvent être des

Tableau 3.1 : La quantification des galeries de la figure 3.4

Galerie	L (m)	l (m)	h (m)	État	Méthode
G ₁	6.8	5.0	3.6	<i>e</i>	<i>s</i>
G ₂	26.8	4.7	3.4	<i>e</i>	<i>s</i>
G ₃	16.9	5.1	3.8	<i>e</i>	<i>s</i>
G ₄	8.2	4.3	2.3	<i>e</i>	<i>s</i>
G ₅	47.3	4.5	3.5	<i>e</i>	<i>s</i>
G ₆	33.3	4.5	3.7	<i>e</i>	<i>s</i>
G ₇	76.1	4.4	3.3	<i>e</i>	<i>s</i>

valeurs spécifiées — comme ça l'est dans le tableau 3.1 — ou bien des fonctions qui calculent les quantités correspondantes à partir des valeurs des tronçons de galerie.

Le tableau 3.1 montre la quantification des galeries de la mine qui nous sert d'exemple (figure 3.4). Notons que ces valeurs sont celles fournies par la reconstruction de la mine à partir des données d'arpentage (section 5.5).

3.4.3.2 La quantification de l'objet-attribut *tronçon de mur* (TM_{*i*})

Un tronçon de mur d'une chambre ou d'une intersection est quantifié, en plus de son état et de ses méthodes d'excavation, par une courbe 3D donnant la forme de la base du mur avec les coordonnées x et y et la hauteur avec la coordonnée z . Cette courbe est représentée par une équation paramétrique définie sur l'intervalle $[0 : 1]^{(10)}$ et donnée dans le référentiel numéro 1 de l'intersection ou de la chambre. L'application de quantification s'écrit donc :

$$Q_1(\text{TM}_i) : [0 : 1] \times \{\eta\} \times \{\mu\} \rightarrow \mathbb{R}^3 \times E \times M$$

$$(t, \eta, \mu) \mapsto (c(t), \eta_j, \mu_j).$$

⁽¹⁰⁾Le paramètre aurait pu être l'abscisse curviligne de la base du mur et donc varier de 0 à la longueur de celui-ci. Toutefois, la longueur des murs n'est pas utile dans notre représentation et n'est donc pas représentée.

où t est le paramètre des équations, $c(t)$ l'équation de la courbe paramétrique 3D, η l'état du tronçon de mur, E l'ensemble des états possibles, η_j un élément de E , μ la méthode d'excavation du tronçon, M l'ensemble des méthodes d'excavation possibles et μ_j un élément de M .

Une équation simple, typiquement un polynôme de degré 1, est évidemment attirante. Toutefois, des segments de droite ne sont pas adaptés à la représentation des murs d'excavations qui ne sont a priori pas rectilignes — sauf dans certains types d'exploitation qui peuvent conduire à la création de murs rectilignes (minage en continu par exemple). Des courbes plus complexes sont donc plus intéressantes de ce point de vue, mais au détriment de la simplicité. Par exemple, Pareja et Pelley (1995) utilisent des NURBS. Pour la construction de représentation des intersections (section 5.4), nous utiliserons des polynômes de degré trois pour leur bon compromis entre la simplicité (nombre de paramètres peu élevé et surtout pas de manipulation de point d'ancrage comme dans les NURBS) et le pouvoir de représentation. L'équation paramétrique utilisée est donc :

$$\mathbf{c}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{3x}t^3 + a_{2x}t^2 + a_{1x}t + a_{0x} \\ a_{3y}t^3 + a_{2y}t^2 + a_{1y}t + a_{0y} \\ a_{3z}t^3 + a_{2z}t^2 + a_{1z}t + a_{0z} \end{pmatrix} = \mathbf{a}_3t^3 + \mathbf{a}_2t^2 + \mathbf{a}_1t + \mathbf{a}_0, \quad (3.2)$$

où (x, y) donne la position d'un point du mur et z donne la hauteur du mur en ce même point.

L'équation (3.2) montre que douze degrés de liberté sont à spécifier pour chaque tronçon. Étant intéressés à représenter les angles des murs, nous allons spécifier chaque tronçon par ses extrémités : position et dérivée de la position par rapport à l'abscisse. Les positions des extrémités fixent six degrés de liberté :

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_0 &= \mathbf{c}(0) = (x_0, y_0, z_0)^T = (x(0), y(0), z(0))^T, \\ \mathbf{c}_1 &= \mathbf{c}(1) = (x_1, y_1, z_1)^T = (x(1), y(1), z(1))^T. \end{aligned} \quad (3.3)$$

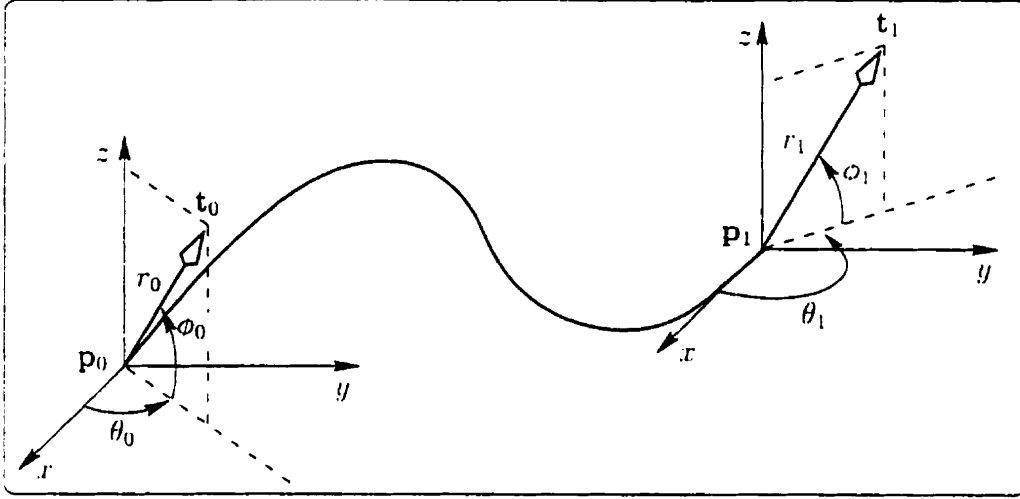


Figure 3.12 : Les spécifications initiale et finale d'un tronçon de mur

La dérivée de la position spécifie les six derniers degrés de liberté. Cette dérivée ne va pas être exprimée comme $\dot{\mathbf{c}}(t)$ mais comme un vecteur \mathbf{t} spécifié par sa norme r et deux angles θ et ϕ comme montré à la figure 3.12 :

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_0 = \mathbf{t}(0) &= (r_0, \theta_0, \phi_0)^T = (r(0), \theta(0), \phi(0))^T, \\ \mathbf{t}_1 = \mathbf{t}(1) &= (r_1, \theta_1, \phi_1)^T = (r(1), \theta(1), \phi(1))^T. \end{aligned} \quad (3.4)$$

ce qui fixe les six derniers degrés de liberté. Cette représentation en (r, θ, ϕ) est plus intuitive dans notre problème et va permettre de spécifier des limites angulaires pour les orientations du tronçon à ces extrémités lors de la construction de représentation d'intersections (section 5.4). $\dot{\mathbf{c}}$ est obtenu comme suit :

$$\dot{\mathbf{c}} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cos \phi \cos \theta \\ r \cos \phi \sin \theta \\ r \sin \phi \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

Les coefficients de (3.2) sont donnés par (Mortenson 1985) :

$$a_3 = 2c_0 - 2c_1 + \dot{c}_0 + \dot{c}_1.$$

$$a_2 = -3c_0 + 3c_1 - 2\dot{c}_0 - \dot{c}_1.$$

$$a_1 = \dot{c}_0$$

$$a_0 = c_0.$$

Le tableau 3.2 montre la quantification des tronçons de mur de la mine que nous décrivons comme exemple.

3.4.3.3 La quantification de l'objet-attribut *tronçon de galerie* (TG_i)

La navigation dans les galeries est essentiellement linéaire et peut (très) grossièrement être résumée à « suivre les murs » ou encore « suivre un chemin planifié ». Un chemin planifié l'est souvent en terme de segments ayant une équation donnée. Des types de segments fréquemment retrouvés sont des segments droits ou circulaires exprimés dans un référentiel absolu (Cox 1991) ou relatif à la position courante du véhicule et en terme d'état du véhicule (Steele et al. 1991). Le problème avec ces types de segments est qu'ils n'assurent pas la continuité de la courbure lors d'un changement de segment. Il en découle que le chemin ne peut être suivi par un véhicule dont le braquage des roues ne se fait pas à vitesse infinie, produisant des problèmes de suivi de chemin en ces endroits, comme l'ont remarqué, par exemple, Steele et al. (1991). Une solution à ce problème est l'utilisation de segments clothoïdaux (Fleury et al. 1995). Notons que dans certains pays, les routes sont légalement constituées de portions clothoïdales. Lorsqu'il s'agit non plus de planifier à l'avance un chemin mais de faire naviguer un véhicule sur une route (Dickmanns et al. 1990) ou dans une galerie de mine (Juneau et al. 1993), un modèle clothoïdal pour l'axe ainsi qu'une largeur constante sont généralement choisis. Dans notre cas, nous allons en plus représenter la hauteur, supposée constante dans un tronçon, de la galerie. En effet, les dimensions

Tableau 3.2 : La quantification des tronçons de mur des intersections

Tronçon	c_0 (m ; m ; m)	t_0 (m ; rad ; rad)	c_1 (m ; m ; m)	t_1 (m ; rad ; rad)	État	Méthode
TM ₁₁	(-2,4 ; 0,0 ; 3,3)	(10,6 ; 1,6 ; 0,2)	(-8,2 ; 5,3 ; 3,3)	(1,7 ; 1,9 ; 0,8)	e	s
TM ₂₁	(-4,6 ; 9,0 ; 3,6)	(1,8 ; -0,3 ; 0,4)	(-2,7 ; 12,5 ; 3,5)	(3,4 ; 2,2 ; -0,5)	e	s
TM ₃₁	(2,5 ; 12,7 ; 3,5)	(3,2 ; -2,7 ; 0,9)	(2,4 ; 0,2 ; 3,5)	(3,9 ; -1,4 ; 0,5)	e	s
TM ₁₁	(-2,5 ; 0,2 ; 4,1)	(9,7 ; 1,5 ; -0,2)	(-5,0 ; 4,6 ; 2,1)	(11,5 ; 3,8 ; -1,1)	e	s
TM ₂₁	(-4,8 ; 8,5 ; 2,0)	(10,2 ; -0,4 ; 1,4)	(-1,9 ; 12,7 ; 4,2)	(11,5 ; 1,7 ; 0,3)	e	s
TM ₃₁	(2,7 ; 12,4 ; 4,1)	(3,5 ; -0,9 ; -0,3)	(2,4 ; 0,0 ; 4,0)	(2,4 ; -0,6 ; -0,1)	e	s
TM ₁₁	(-2,3 ; 0,0 ; 2,6)	(4,2 ; 0,7 ; 0,4)	(-6,1 ; 3,8 ; 3,2)	(4,0 ; -3,5 ; -0,2)	e	s
TM ₂₁	(-5,8 ; 8,8 ; 3,4)	(0,4 ; -0,3 ; 0,3)	(-2,1 ; 12,5 ; 3,5)	(2,3 ; 1,5 ; 0,2)	e	s
TM ₃₁	(2,5 ; 12,4 ; 3,7)	(3,3 ; -2,4 ; -0,4)	(6,0 ; 8,5 ; 3,8)	(6,2 ; 0,2 ; 0,3)	e	s
TM ₄₁	(6,0 ; 4,1 ; 3,8)	(3,3 ; -4,0 ; -0,5)	(2,2 ; -0,4 ; 2,6)	(10,5 ; -1,2 ; -0,2)	e	s
TM ₁₁	(-2,3 ; 0,1 ; 3,7)	(5,3 ; 1,5 ; 0,1)	(-6,0 ; 6,1 ; 4,1)	(4,6 ; 2,6 ; 0,6)	e	s
TM ₂₁	(-2,4 ; 10,3 ; 3,5)	(2,9 ; -0,6 ; 0,3)	(5,1 ; 7,1 ; 3,7)	(2,2 ; 0,6 ; -0,4)	e	s
TM ₃₁	(4,9 ; 2,4 ; 3,7)	(6,6 ; -2,7 ; 0,0)	(2,6 ; -0,3 ; 3,8)	(6,8 ; -2,0 ; 0,0)	e	s

des galeries étant généralement faibles, il est important de les connaître afin que le gestionnaire de trafic puisse déterminer si un véhicule peut emprunter une galerie.

Un tronçon de galerie va donc être un cône généralisé clothoïdal de section rectangulaire⁽¹¹⁾, c'est à dire ayant un axe dont la courbure varie linéairement avec l'abscisse curviligne et dont la largeur et la hauteur sont constantes :

$$\kappa(s) = \kappa_0 + ks,$$

$$h(s) = h,$$

$$l(s) = l,$$

où s est l'abscisse curviligne, κ la courbure, κ_0 la courbure initiale, k le coefficient de variation de la courbure, h la hauteur et l la largeur. La quantification n'est complète que si nous spécifions aussi la longueur L du tronçon. La courbe formée par une telle équation est une spirale de Cornu. L'annexe A donne les équations paramétriques de cette courbe.

Notons qu'un cercle et une droite sont des cas particuliers de clothoïdes correspondant respectivement aux cas $\kappa_0 \neq 0$ et $k = 0$ d'une part et $\kappa_0 = 0$ et $k = 0$ d'autre part.

La figure 3.13 montre des exemples de clothoïdes pour différentes valeurs de κ_0 et k et pour L valant 35 m.

L'application de quantification est donc l'application constante donnant tous les paramètres du tronçon de galerie (la largeur, la hauteur, la longueur, la courbure initiale et le coefficient de variation de la courbure) ainsi que son état et sa méthode d'excavation.

Les tronçons de galerie possèdent deux référentiels qui leur sont associés (section 3.4.2). Il faudrait donc donner une quantification pour chacun de ces deux

⁽¹¹⁾Brooks (1981), par exemple, donne une définition complète des cônes généralisés. Nous ne considérons ici que ceux dont la section est rectangulaire, orthogonale à l'axe et constante -- ce qui correspond à une loi de balayage (« sweeping rule ») constante.

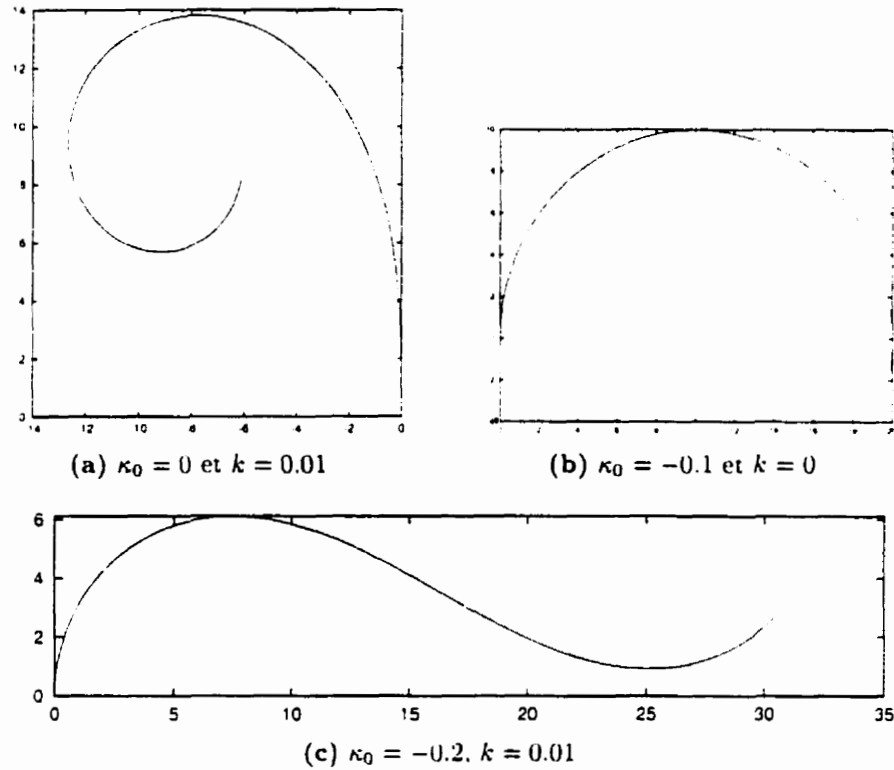


Figure 3.13 : Des clothoïdes pour différentes valeurs de κ_0 et k et pour $L = 35$ m

référentiels. Toutefois, il est suffisant en pratique de ne donner la quantification que dans un des deux référentiels — typiquement le référentiel numéro 1 —, l'autre pouvant s'obtenir facilement. Si, dans le premier référentiel, la clothoïde a pour courbure $\kappa(s) = \kappa_0 + ks$ alors, la même clothoïde dans le second référentiel a pour courbure $\kappa'(s) = \kappa'_0 + k's$ avec $\kappa'_0 = -\kappa_0 - kl$ et $k' = k$ (annexe A.2).

3.4.3.4 La quantification de l'objet-attribut *intersection* (I_i)

Les intersections (et les chambres) sont quantifiées par les transformations (translations et rotations) du référentiel numéro 1 en les $N - 1$ autres référentiels. La translation est spécifiée par trois coordonnées (t_x, t_y, t_z) dans le référentiel numéro 1. La rotation est spécifiée par trois angles (α, β, γ) de rotation autour des axes (x_1, y_1, z_1)

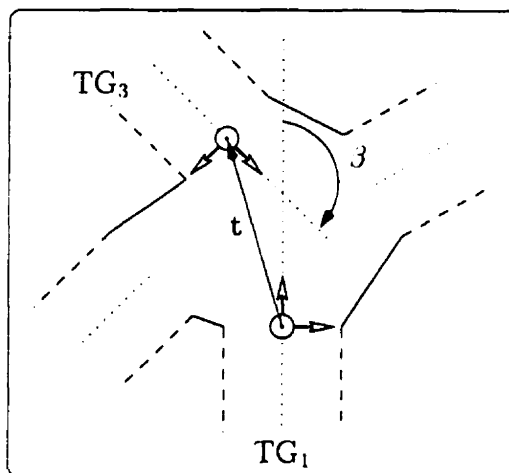


Figure 3.14 : La quantification d'une intersection dans notre implantation actuelle où la mine est supposée plane et horizontale et ne contient pas de puits

du référentiel numéro 1.

L'application de quantification d'une intersection (ou d'une chambre) est donc l'application constante donnant $N - 1$ translations et rotations qui sont des éléments de \mathbb{R}^3 ainsi qu'un état et une méthode d'excavation.

Notons que dans notre implantation actuelle, les puits ne sont pas représentés — car ils ne sont pas arpentés par notre procédure d'arpentage automatique — et les excavations sont supposées planes et horizontales. Ceci implique que la translation se limite à (t_x, t_y) et la rotation à l'angle β (figure 3.14).

3.4.4 La quantification des relations

Le raccordement est la seule relation à quantifier. La quantification de cette relation donne le numéro de deux référentiels. Le premier indique le référentiel d'un tronçon de galerie ou d'un puits. Le second donne le référentiel de l'intersection, de la chambre ou du tronçon de galerie auquel est raccordé le premier objet-attribut. L'application de quantification de cette relation (r) est donc l'application constante qui associe à

une entité $r^{(12)}$ un élément de $N \times N$:

$$r \in \mathcal{F}(\{r\}, N \times N).$$

La fonction d'étiquetage (3.1) du graphe des relation (section 3.4.2) devient donc :

$$F: \Gamma(\Omega_1) \rightarrow \mathcal{P}(R \times (\mathcal{F}(\{r\}, N \times N) \cup \{\emptyset\})).$$

3.4.5 Les diagrammes en EXPRESS-G représentant l'attribut *géométrie des excavations*

Nous allons montrer dans cette section les diagrammes en EXPRESS-G qui permettent de décrire la géométrie des excavations, c'est à dire les objets-attributs et leurs relations. La figure 3.15 montre la définition des objets-attributs, de leur décomposition et d'une partie de leur quantification. La figure 3.16 montre la quantification commune — transmise par héritage — à certains objets-attributs. La figure 3.17 décrit les types introduits et non définis dans la figure 3.15. Notons que la relation de décomposition est représentée implicitement par le fait qu'un objet-attribut est caractérisé, en plus de sa quantification, par l'ensemble de ces descendants. Par exemple, une chambre est caractérisée par un ensemble de murs, un sol et un toit (figure 3.15). La décomposition aurait pu être explicitement représentée comme à la figure 3.18 pour les chambres. La figure 3.19 montre l'implantation en EXPRESS-G des relations de connexion et d'attachement.

3.5 L'utilisation des excavations

Comme nous l'avons déjà dit (section 3.3), nous introduisons un attribut qui a pour rôle de préciser l'utilisation des diverses excavations. La même information pourrait

⁽¹²⁾Cette entité n'a pour seul rôle que la matérialisation de la quantification d'un raccordement.

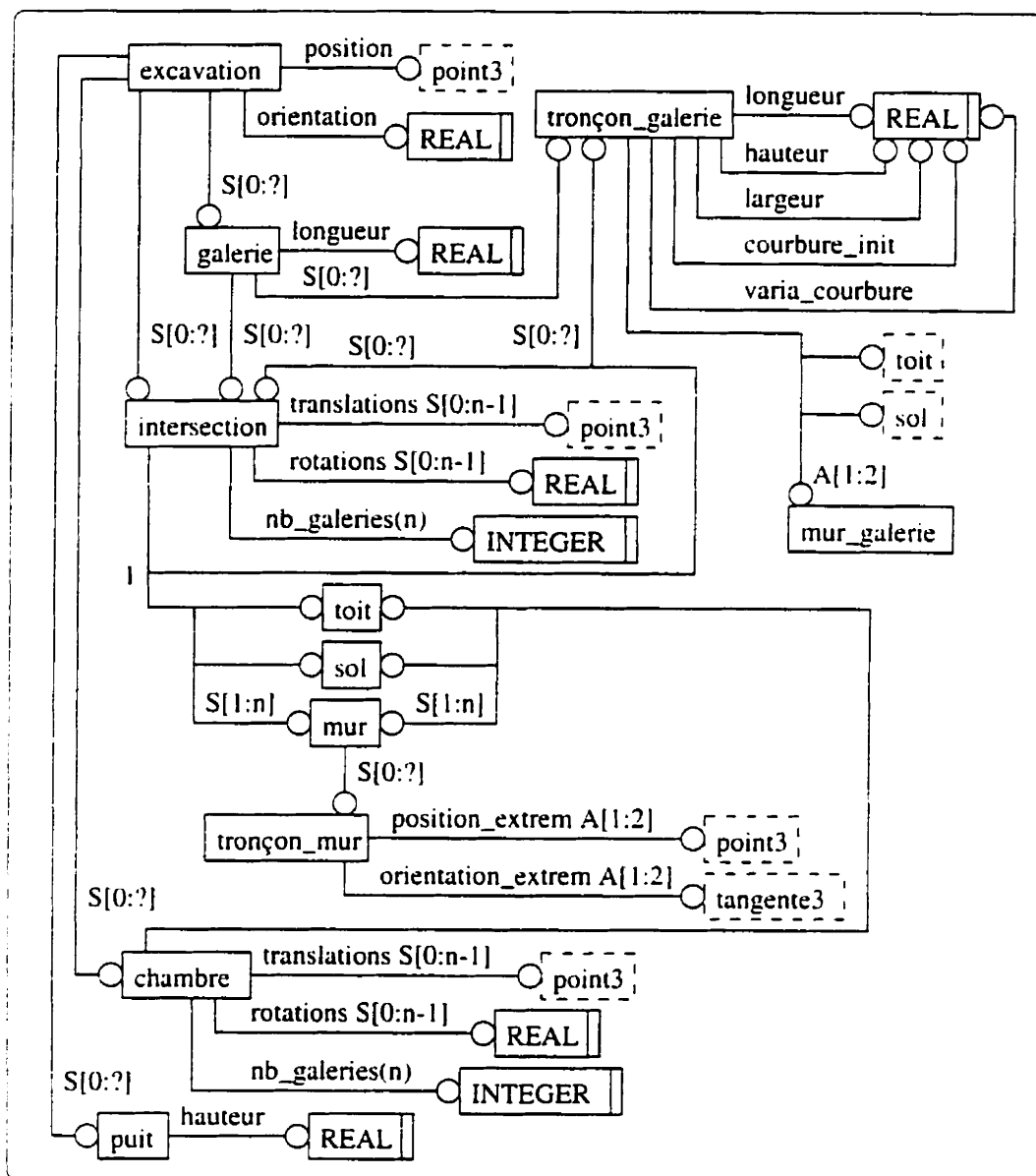


Figure 3.15 : Description en EXPRESS-G des objets-attributs de l'attribut *géométrie des excavations*, de leur décomposition et d'une partie de leur quantification. Le reste de leur quantification est montrée à la figure 3.16

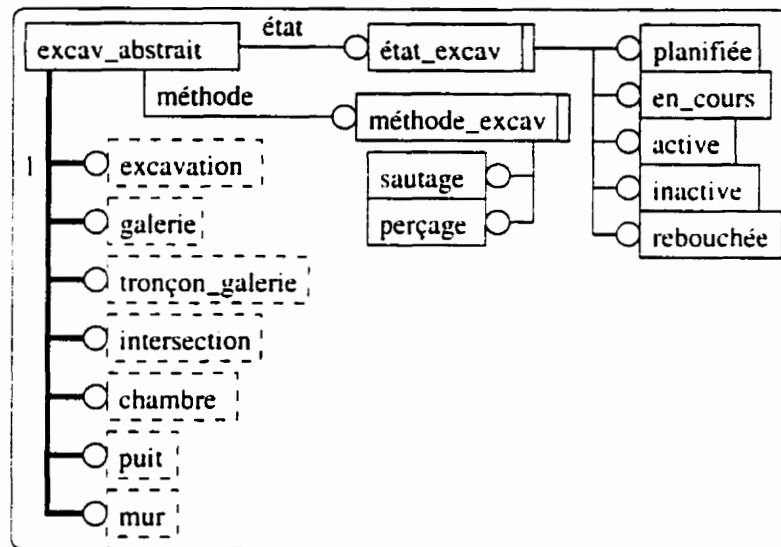


Figure 3.16 : La quantification commune à certains objets-attributs de l'attribut *géométrie des excavations*

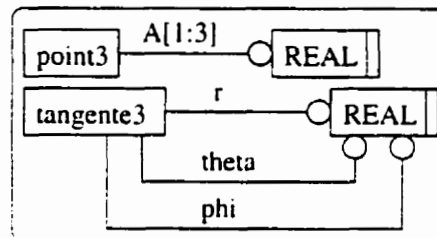


Figure 3.17 : Quelques types en EXPRESS-G nécessaires à la quantification des objets-attributs de l'attribut *géométrie des excavations*

simplement être attachée à chaque excavation. Toutefois, comme nous allons le voir, celle-ci présente une hiérarchie qui est intéressante à préserver car utile pour les différentes opérations minières. Par exemple, pour la gestion du trafic, il faut d'une part savoir quelles sont les excavations qui servent à la navigation, d'autre part savoir quels sont les excavations dans lesquelles une activité ayant une influence sur la navigation se produit : ce peut être par exemple la présence d'autres véhicules impliqués dans des tâches d'exploitation de la mine ou de personnes se déplaçant à pied. Il n'y

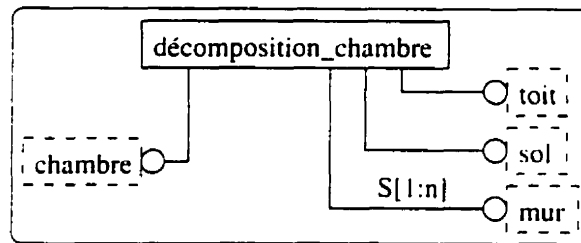


Figure 3.18 : La représentation explicite de la décomposition — ici pour les chambres. Les éléments *chambre*, *toit*, *sol* et *mur* sont ceux définis à la figure 3.15 sans les liens vers les éléments représentant d'autres objets-attributs.

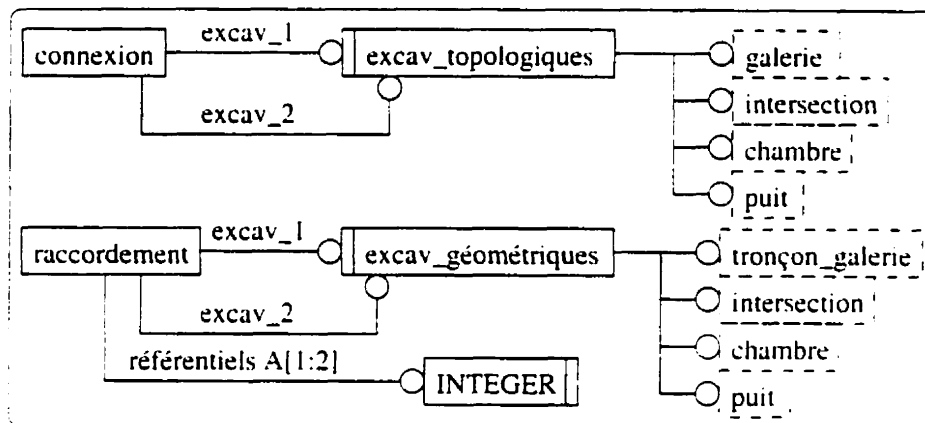


Figure 3.19 : Les diagrammes EXPRESS-G décrivant les relations de l'attribut *géométrie des excavations*. Notons que la contrainte sur les connexions et raccordements entre objets-attributs — un puits ne peut être connecté ou raccordé qu'à une intersection ou une chambre — ne peuvent être exprimées en EXPRESS-G.

a pas besoin, à ce niveau, de connaître plus précisément l'activité des véhicules ou des personnes. Par contre, afin de pouvoir gérer les activités minières, il nous faut savoir en quels endroits de la mine sont, par exemple, les points de déchargement ou de remplissage, ce qui correspond à une description plus détaillée des opérations minières.

Dans le modèle de mine actuel, nous avons retenu trois classes d'utilisation. La

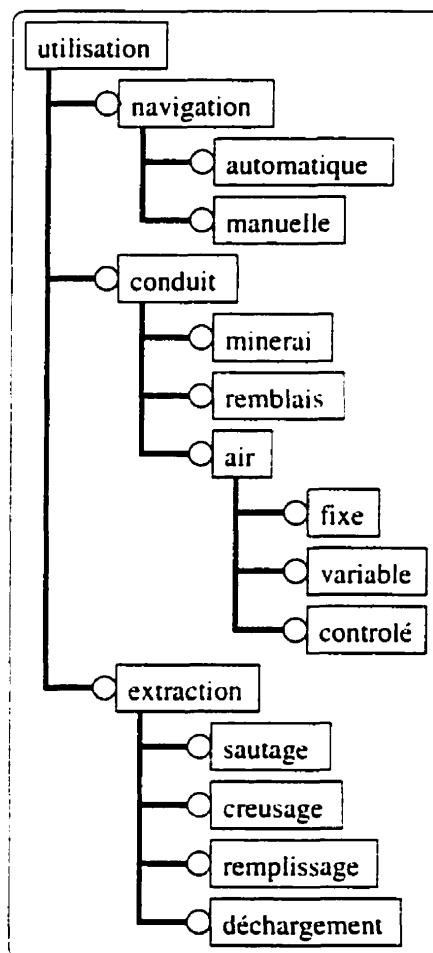


Figure 3.20 : La hiérarchie des utilisations d'excavations

première est la navigation qui peut être automatique ou manuelle. La seconde est l'utilisation comme un conduit de minerai, de remblais ou d'air — dans ce dernier cas, le flux peut être fixe, variable ou contrôlé. Enfin, la troisième utilisation est l'extraction qui inclut le sautage, le creusement, le remplissage et le déchargement. La figure 3.20 montre le diagramme en EXPRESS-G décrivant la hiérarchie des utilisations d'excavations. Notons que cette description en EXPRESS-G se présente sous la forme d'un arbre de décomposition de cet attribut décrivant une hiérarchie de spécialisation. Les nœuds et les feuilles de cet arbre sont les objets-attributs de l'attribut *utilisation des*

excavations. Cet attribut n'est pas quantifié. Il sera lié à la géométrie des excavations (section 3.8.1).

3.6 L'équipement

L'équipement utilisé dans une mine présente une hiérarchie — qui a d'ailleurs déjà été proposée dans la littérature (Huang et al. 1995) — qui suit la fonction des pièces d'équipement. Nous allons ici regrouper les différentes pièces d'équipement suivant cette même classification.

À un premier niveau, se trouve l'ensemble de toutes les pièces d'équipement. Cet ensemble est séparé en deux ensembles qui correspondent aux pièces *statiques* — c'est-à-dire dont la position ne change pas — et aux pièces *mobiles*. Ceci permet de faire une première sélection pour les différentes opérations minières : par exemple, toutes les pièces d'équipement mobile vont être utilisées par la gestion du trafic. L'ensemble des pièces d'équipement statique se décompose, dans la version actuelle de GNOMine, en un ensemble d'*éclairages*, un ensemble de *ventilateurs* et un ensemble de *portes* tandis que l'équipement mobile se décompose en un ensemble de *camions*, un ensemble de *LHD* et un ensemble de *transporteurs de personnel*. D'autres catégories peuvent bien évidemment être ajoutées. Notons que ce niveau précise la fonction de l'équipement. Nous avons ensuite retenu les éclairages *ponctuels* et *uniformes* ainsi que les ventilateurs *permanents* et *temporaires*, chacune de ces catégories formant un nouvel ensemble. Chaque catégorie finale est ensuite décomposée en pièces d'équipement particulières de cette catégorie. Les objets-attributs représentant des ensembles correspondant à des catégories fonctionnelles permettent la gestion des pièces d'équipement, une tâche de la gestion des activités minières (section 3.1.6). Les objets-attributs représentant des pièces d'équipement particulières — avec leur quantification, voir plus loin — permettent de voir si les pièces peuvent être utilisées dans l'opération voulue. La figure 3.21 montre l'arbre de décomposition de cet at-

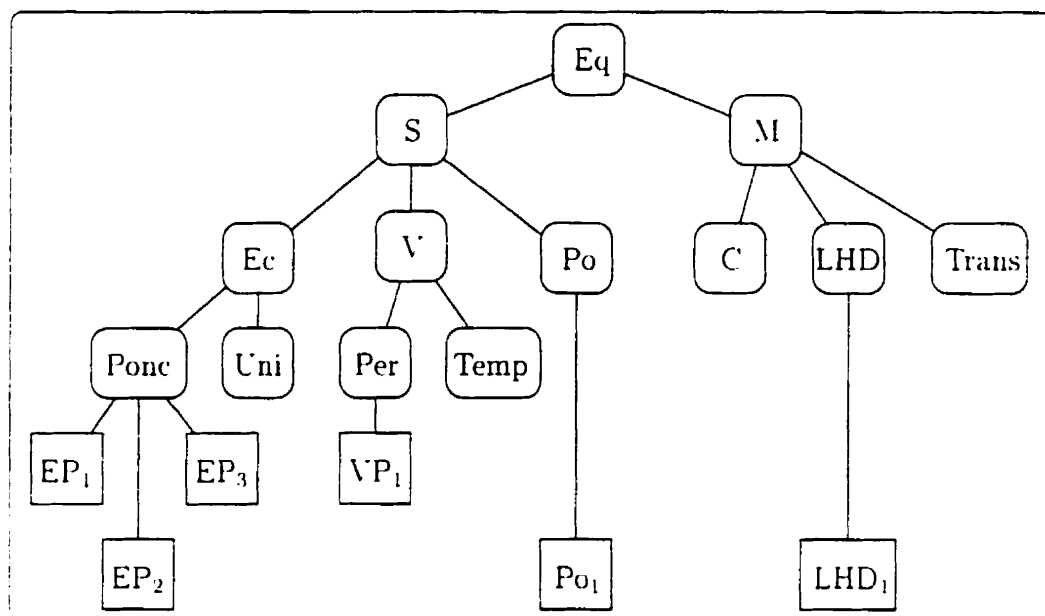


Figure 3.21 : L'arbre de décomposition de l'attribut *équipement* : Eq : équipement. S : statique. Ec : éclairage. Ponc : éclairage ponctuel. Uni : éclairage uniforme. EP_i : éclairage ponctuel n°i. V : ventilateur. Per : ventilateur permanent. Temp : ventilateur temporaire. VP₁ : ventilateur permanent n°1. Po : porte. M : mobile. C : camion. LHD : véhicule « Load Haul Dump ». Trans : transporteur de personnel. Les boîtes arrondies désignent des ensembles de pièces d'équipement tandis que les boîtes anguleuses désignent les objets-attributs qui correspondent à des pièces d'équipement et sont donc propres à notre exemple de mine.

tribut. Les boîtes aux angles arrondis désignent des ensembles de pièces d'équipement tandis que les boîtes aux angles droits, désignent des pièces d'équipement — ces pièces étant propres à notre exemple de mine.

Tous les objets-attributs correspondant à des catégories fonctionnelles de la décomposition sont quantifiés. Ce sont, dans l'état actuel de GNOMine, les ensembles d'éclairages, de ventilateurs, de portes, de camions, de LHD, de transporteurs, ainsi que les ensembles qui en descendent. Les ensembles sont quantifiés par deux éléments de N : le premier, T , désigne le nombre total de pièces d'équipement de la catégorie

tandis que le second, U , désigne le nombre de ces mêmes pièces qui sont utilisées. Les ensembles représentés par des objets-attributs plus élevés dans la hiérarchie ne sont pas quantifiés. Leur nombre total de pièces et leur nombre de pièces utilisées peuvent être obtenus, au besoin, à partir de la somme des quantités correspondantes des ensembles les composant. Les objets-attributs qui représentent des pièces d'équipement — ceux qui sont dans des boîtes aux angles droits à la figure 3.21 — vont être quantifiés par des quantités décrivant les pièces d'équipement correspondantes. Les descendants des objets-attributs *éclairage ponctuel* et *éclairage uniforme* sont quantifiés par leur puissance P exprimée en watts (W), c'est-à-dire qu'une application constante associe à chacun d'eux un nombre de \mathbb{R}^+ . De la même manière, les objets-attributs correspondants aux ventilateurs de la mine sont aussi quantifiés par leur puissance P exprimée cette fois-ci en chevaux-vapeur (CV) tandis que les portes sont quantifiées par un indice indiquant si la porte est ouverte ou fermée. Toutes les pièces d'équipement mobiles sont quantifiées par leur vitesse V (en kilomètres par heure), longueur L , largeur l , hauteur h et rayon de courbure minimum R_{min} et maximum R_{max} (les cinq dernières quantités étant exprimées en mètres). Certaines quantifications sont évidemment variables avec le temps : la vitesse des équipements mobiles et l'état de la porte. Le tableau 3.3 donne la quantification à un instant donné de quelques-uns des objets-attributs de notre mine.

Les figures 3.22 à 3.24 montrent les diagrammes en EXPRESS-G décrivant cet attribut. Les figures 3.22 et 3.23 décrivent la hiérarchie des ensembles. Nous pouvons constater que seuls les ensembles des plus bas niveaux sont effectivement implantés comme des ensembles. Les autres ne font que pointer vers leurs descendants, les éléments de ces ensembles ne correspondant pas à des pièces d'équipement. Ces ensembles peuvent être construits en suivant les liens vers les ensembles descendants au besoin. La figure 3.24 décrit l'implantation des pièces d'équipement. Cette implantation est orientée objets, comme cela a déjà été suggéré dans la littérature (Huang et al. 1995).

Tableau 3.3 : Les quantifications de quelques objets-attributs de l'attribut *équipement*

objet-attribut	quantification
Ec	$T = 10$ $U = 3$
Ponc	$T = 10$ $U = 3$
LHD	$T = 4$ $U = 1$
EP ₁	$P = 300 \text{ W}$
VP ₁	$P = 150 \text{ CV}$
Po ₁	fermée
LHD ₁	$V = 9.2 \text{ km h}$ $L = 10.3 \text{ m}$ $l = 2.7 \text{ m}$ $h = 2.6 \text{ m}$ $R_{min} = 3.8 \text{ m}$ $R_{max} = 7.2 \text{ m}$

3.7 Les structures rocheuses

Il y a plusieurs problèmes dans la représentation des structures rocheuses et du minéral qui s'y trouve enchassé. Le premier est que la géométrie de ces structures est généralement très complexe. Il est donc généralement vain d'essayer d'utiliser une expression mathématique pour la représenter. De plus, une représentation volumétrique est généralement plus appropriée pour l'utilisation qui est faite de la représentation des veines (voir la section 3.1.1). Un autre problème est que la veine est souvent constituée de plusieurs veines — et non d'une seule — puisqu'elle contient souvent plusieurs minerais différents. Ces minerais sont généralement étroitement imbriqués et présents à des teneurs différentes. Le dernier problème est qu'il nous faut aussi représenter la roche qui entoure le minéral, roche qui n'est donc pas du minéral et est appelée stérile. Or dans un contexte de partage des données, il est préférable de ne représenter qu'une seule fois la géométrie des structures rocheuses. Nous allons

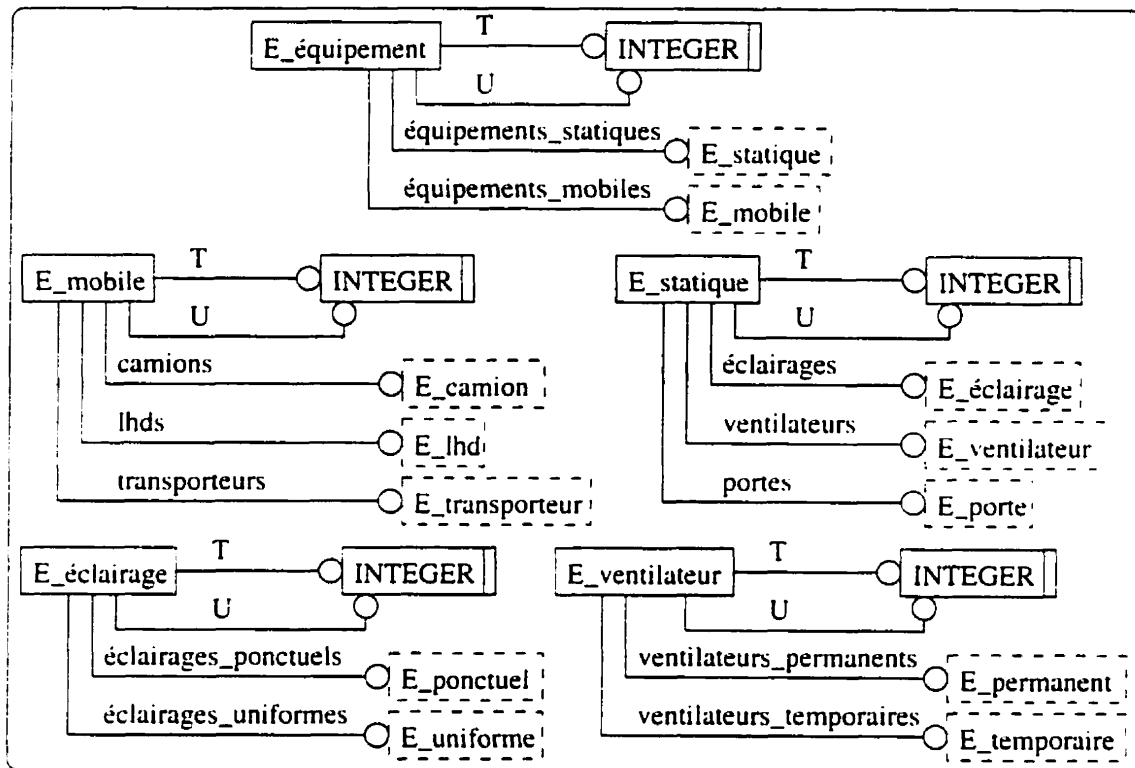


Figure 3.22 : Les schémas en EXPRESS-G décrivant l'attribut *équipement* : les ensembles correspondants aux catégories fonctionnelles

donc adopter un modèle de blocs pour représenter la géométrie des structures, modèle largement utilisé dans l'industrie minière pour un tel problème, ce type de modèle se prêtant bien à la représentation des volumes. Le type des roches et minerais ainsi que leur qualité seront représentés en associant à chaque bloc les minerais contenus ainsi que leur qualité.

Rappelons qu'un modèle de blocs représente un volume par la juxtaposition de cellules sur une grille régulière 3D, chaque cellule correspondant à une petite portion du volume. Ce modèle implique donc un niveau très grossier, le volume complet, et un niveau très fin constitué de toutes les cellules. Remarquons que pour une représentation proche de la réalité, il faut un grand nombre de cellules, ce qui implique une représentation volumineuse du point de vue de la quantité d'information. Pour

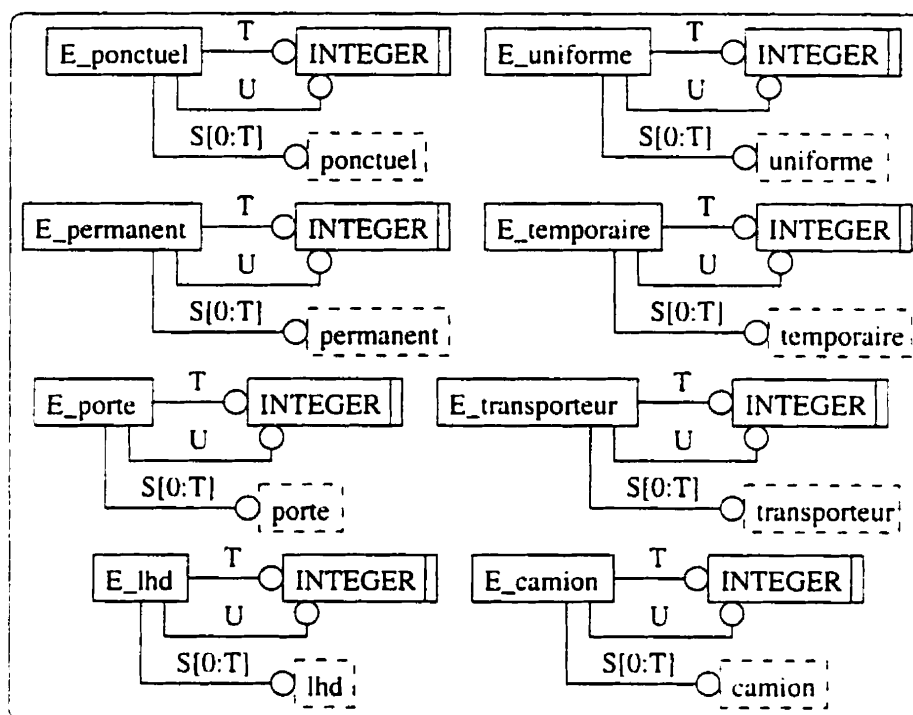


Figure 3.23 : Les schémas en EXPRESS-G décrivant l'attribut *équipement* : les ensembles de pièces d'équipement

permettre plusieurs niveaux de représentation, nous allons utiliser un arbre octal. Dans une telle représentation, un volume est décomposé en huit cellules marquées *noire*, *blanche* ou *grise*. Les cellules grises, qui sont aussi des volumes, sont à leur tour décomposées de la même manière jusqu'à un niveau de détail spécifié (voir la section 1.3.1 pour une description plus complète). La figure 3.25 montre un exemple de l'arbre formé par un arbre octal.

Cette décomposition crée donc un arbre de décomposition dont les nœuds sont les cellules. La taille et la position des cellules dépend du niveau dans la décomposition et de la position de la cellule sur la grille ainsi que, respectivement, de la taille et de la position de la plus grosse cellule. Plus précisément, un référentiel est associé à chaque cellule (figure 3.26). Chaque cellule se décompose de façon récursive en cellules plus petites celles-ci étant numérotées de manière à ce qu'un code associé à

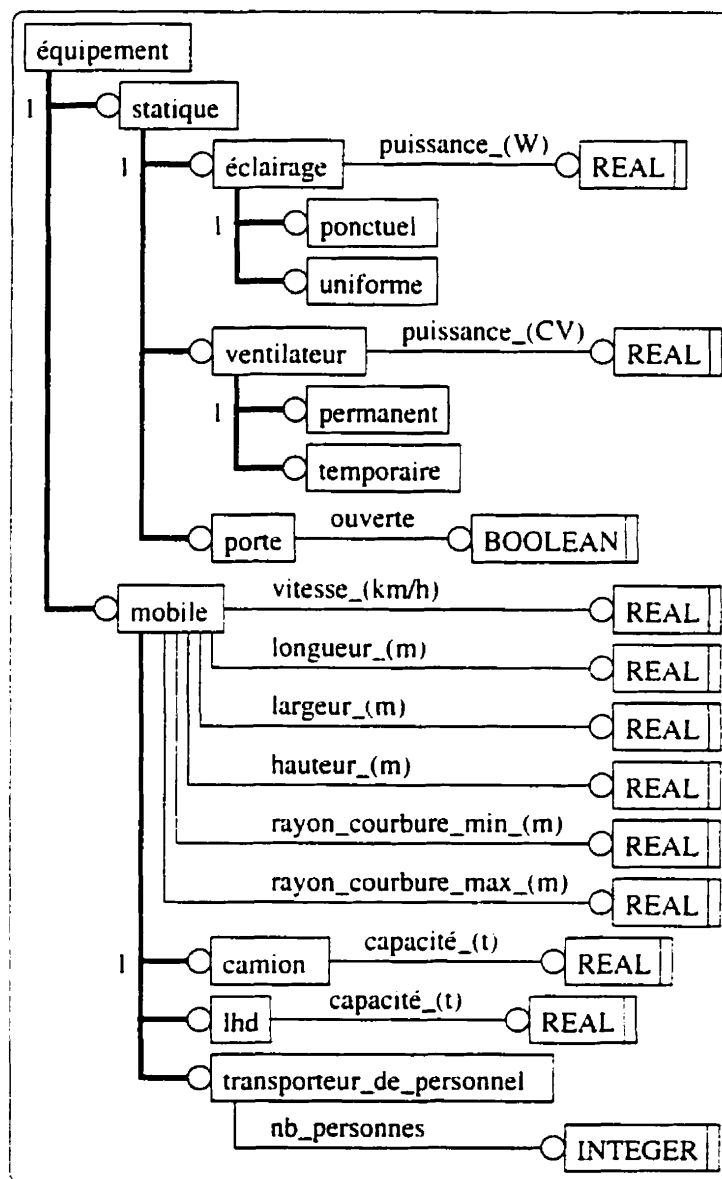


Figure 3.24 : Les schémas en EXPRESS-G décrivant l'attribut *équipement* : la définition de la hiérarchie de spécialisation des pièces d'équipement

chaque cellule d'un arbre octal permette une identification unique de la cellule (voir la figure 3.25). De par les formes généralement pas parallélépipédiques des veines, le niveau 1 de l'arbre octal pourra ne pas être complet. Dans l'exemple de que nous allons présenter ici, le premier niveau n'est composé que des cellules 0 et 1 (voir la

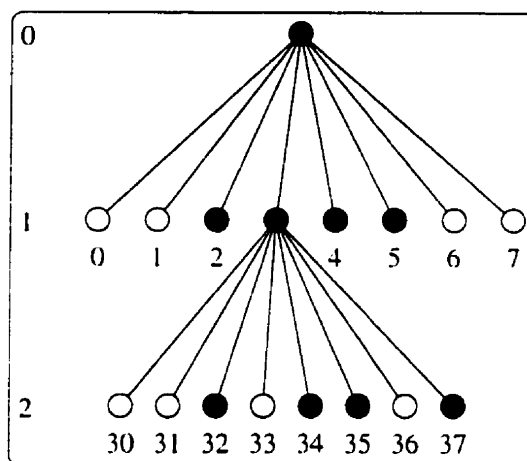


Figure 3.25 : Un arbre octal

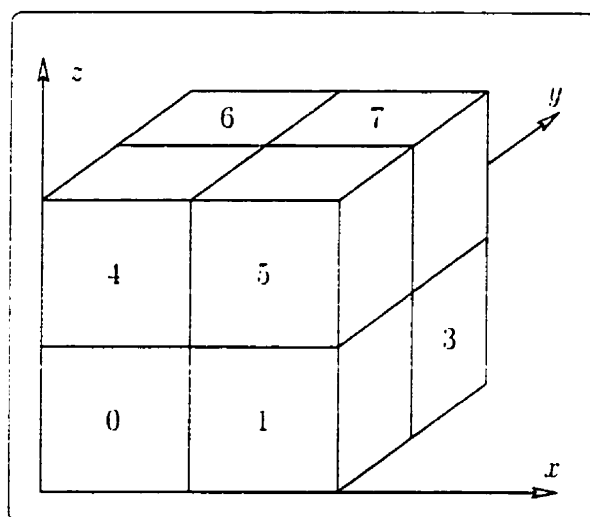


Figure 3.26 : Le référentiel et la numérotation des descendants d'une cellule de l'arbre octal représentant les structures rocheuses

figure 3.28).

Afin de finaliser la représentation des structures rocheuses, chaque cellule de l'arbre octal va être quantifiée par une application constante donnant un ensemble de couples: le premier élément du couple est un type de roche ou de minéral contenu

Tableau 3.4 : Les codes des teintes de la figure 3.27

Teinte	Contenu de la cellule		
clair	4% Pb	30 g/t Ag	8% Zn
moyen	8% Pb	60 g/t Ag	21% Zn
foncé	16% Pb	120 g/t Ag	21% Zn
vide	roche solide		

dans la cellule et le second élément est la qualité du type de roche ou de minéral. Cette qualité est généralement exprimée sous la forme d'un pourcentage de minéral ou d'une description de la roche quand il ne s'agit pas de minéral. La cellule du niveau 0, appelée *roches*, est généralement grise. Si ce n'est pas le cas, c'est que la connaissance de la veine est très incomplète. Cette cellule possède une quantification supplémentaire : elle donne le numéro des cellules du niveau 1 qui existent effectivement dans la représentation ainsi qu'une rotation (un angle autour de l'axe z) et une translation qui permettent de transformer le référentiel de la cellule 0 de l'arbre octal en le référentiel terrestre de la mine (section 3.4.3).

Voici un exemple de veine dans sa structure rocheuse. La figure 3.27 montre une représentation graphique 3D des structures rocheuses. La petite sphère montre l'origine du référentiel associé aux structures rocheuses. Les codes des teintes sont donnés au tableau 3.4. La figure 3.28 montre les deux premiers niveaux de l'arbre octal. La veine ayant une forme allongée, le premier niveau n'est constitué que des deux cellules 0 et 1. Le tableau 3.5 montre la quantification de quelques-unes des cellules de l'arbre octal.

La figure 3.29 montre le schéma en EXPRESS-G de l'arbre octal représentant les structures rocheuses.

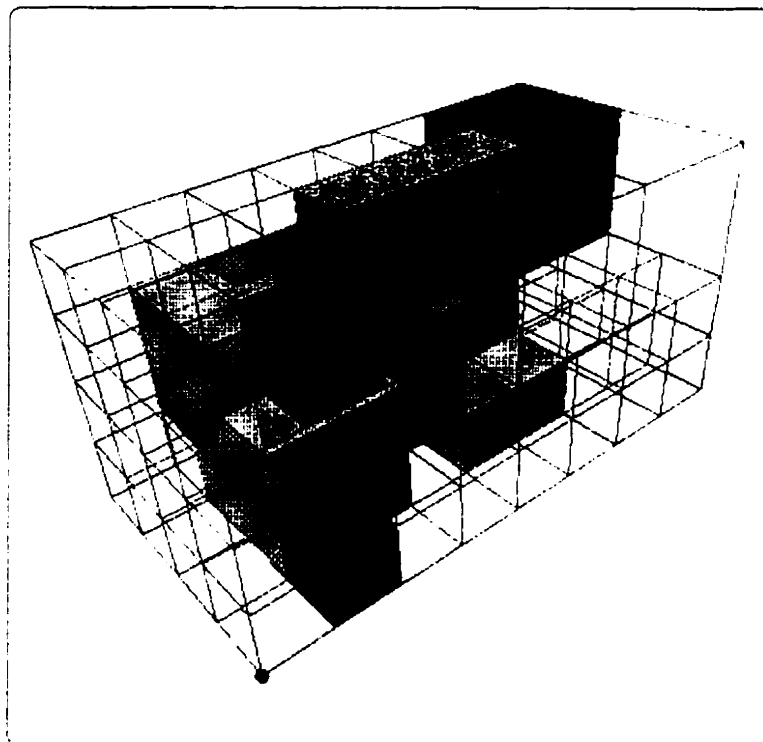


Figure 3.27 : Une représentation graphique 3D des structures rocheuses. Les différentes teintes sont expliquées dans le tableau 3.4. La petite sphère en bas montre l'origine du référentiel.

Tableau 3.5 : La quantification de quelques cellules des structures rocheuses. Les codes sont donnés dans le tableau 3.4.

Cellule	Quantification	Code
000	(roche, solide)	vide
001	(Pb, 16%) (Ag, 120 g/t) (Zn, 21%)	foncé
041	(Pb, 8%) (Ag, 60 g/t) (Zn, 21%)	moyen
102	(Pb, 4%) (Ag, 30 g/t) (Zn, 8%)	clair
15	(roche, solide)	vide
17	(Pb, 8%) (Ag, 60 g/t) (Zn, 21%)	moyen

3.8 Les relations inter-attributs

Il faut maintenant lier les différents attributs. La première relation inter-attributs que nous allons présenter sera celle qui associe une utilisation aux excavations (sec-

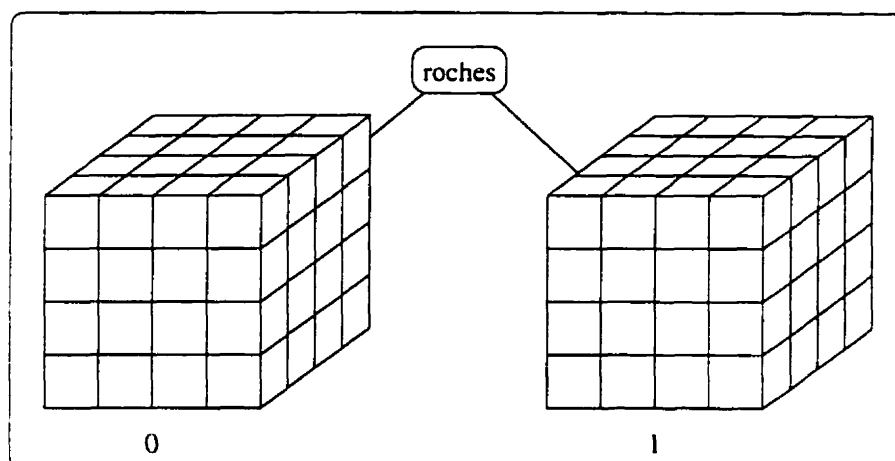


Figure 3.28 : La décomposition de l'attribut *structures rocheuses*

tion 3.8.1). Nous allons ensuite décrire comment les pièces d'équipement sont positionnées dans les excavations (section 3.8.2). Enfin, nous allons lier la géométrie des excavations et la géométrie des structures rocheuses (section 3.8.3).

3.8.1 Utilisation des excavations et géométrie des excavations

Comme nous l'avons déjà mentionné, les excavations peuvent avoir différentes utilisations. Plus précisément, nous n'allons donner l'utilisation que de quatre types d'excavation : les galeries, les intersections, les chambres et les puits. La raison est que les utilisations ne peuvent être localisées de façon précise dans une excavation soit parce qu'elles sont globales à l'excavation — par exemple la ventilation et la navigation — soit parce que l'utilisation peut avoir lieu n'importe où dans l'excavation — par exemple le remplissage. Ceci implique que les descendants des objets-attributs auxquels une utilisation est associée ont la même utilisation. C'est un exemple de relation qui peut être propagée — ici vers le bas — (section 2.3.1.3). Cette relation n'est pas quantifiée.

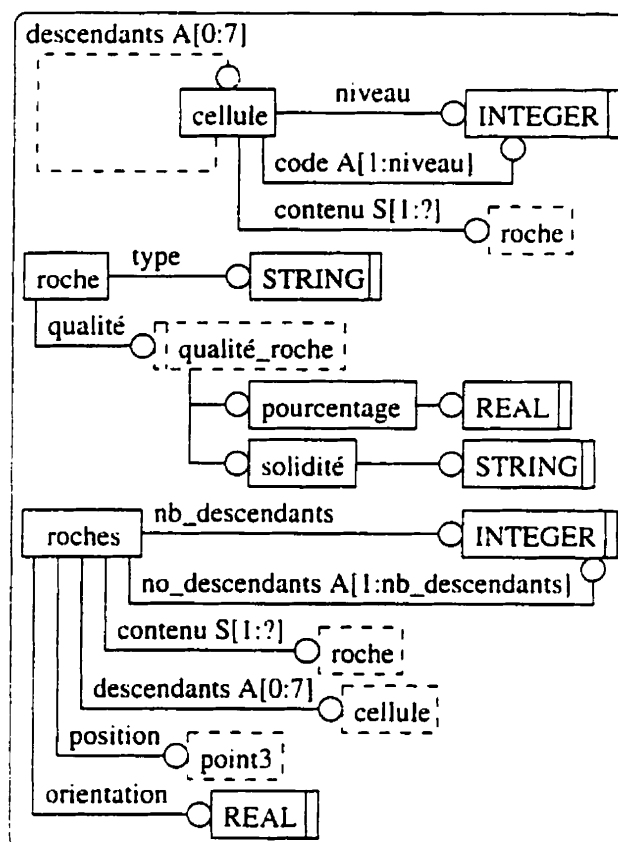


Figure 3.29 : Les structures rocheuses en EXPRESS-G

Nous allons donc associer à chaque galerie, intersection, chambre et puits un ensemble d'utilisation. Ceci est donc représenté à l'aide d'un graphe qui s'écrit comme suit (si l'on suppose que l'attribut *utilisation des excavations* est l'attribut numéro 2) :

$$\Gamma = \{(e, \mathcal{U}) \in \Omega_{1t} \times \Omega_2\}.$$

où Ω_{1t} est l'ensemble des objets-attributs topologiques de l'attribut *géométrie des excavations*, c'est-à-dire l'ensemble des galeries, chambres, intersections et puits (voir la figure 3.19), e est une excavation de cet ensemble et \mathcal{U} est l'ensemble des utilisations de e .

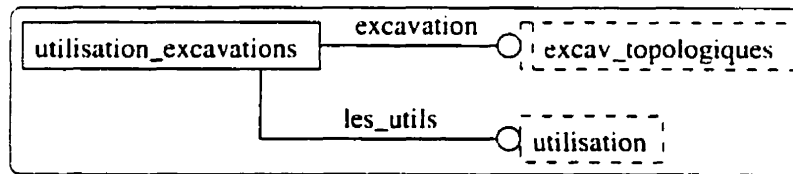


Figure 3.30 : La description en EXPRESS-G de la relation entre l'utilisation des excavations et la géométrie des excavations

Dans notre mine, le graphe est le suivant :

$$\Gamma = \{$$

$$(G_1, \{n, av\}), (G_2, \{n, av\}), (G_3, \{n, av\}), (G_4, \{n, av\}),$$

$$(G_5, \{n, ac\}), (G_6, \{n, av\}), (G_7, \{n, av\}), (G_8, \{ac\}),$$

$$(I_1, \{n, av\}), \dots, (I_4, \{n, av\}), (P_1, \{af\})$$

$$\}.$$

où les étiquettes *n*, *av*, *ac* et *af* désignent respectivement la navigation, un conduit d'air à flux variable, un conduit d'air à flux contrôlé et un conduit d'air à flux fixe.

La figure 3.30 montre la description en EXPRESS-G de cette relation.

3.8.2 Équipement et excavations

Les pièces d'équipement doivent être positionnées dans des excavations dont nous avons une représentation géométrique, en l'occurrence dans les tronçons de galerie, les intersections, les chambres et les puits. Rappelons que les pièces d'équipement sont les objets-attributs qui constituent les feuilles de la hiérarchie de l'attribut *équipement*. Le graphe de cette relation va donc être constitué de paires dont le premier élément est une excavation géométrique et le second élément une pièce d'équipement (en

supposant que l'attribut *équipement* est le troisième attribut) :

$$\Gamma = \{(eg, pe) \in \Omega_{1g} \times \Omega_{3p}\}.$$

où Ω_{1g} désigne le sous-ensemble de Ω_1 des excavations géométriques (l'ensemble des tronçons de galeries, des intersections, des chambres et des puits) et Ω_{3p} est l'ensemble des pièces d'équipement — un sous-ensemble de Ω_3 . Il faut encore préciser l'emplacement des pièces d'équipement dans les excavations. Cela est fait en quantifiant cette relation. Nous allons voir que la signification de la quantification va dépendre de l'excavation concernée et de la pièce d'équipement positionnée.

Dans les excavation « horizontales », à savoir les tronçons de galerie, les intersections et les chambres, trois coordonnées sont à spécifier, coordonnées qui dépendent du type d'équipement. Les pièces d'équipement statiques sont positionnées à l'aide des coordonnées (x, y, z) dans le référentiel principal des intersections et chambres et des coordonnées (x, s, z) dans les tronçons de galeries où s est l'abscisse curviligne le long de l'axe et x et z sont les coordonnées respectivement horizontale et verticale dans le référentiel positionné en ce point de l'axe (voir la section 3.4.2). Quant aux pièces d'équipement mobile, il ne faut plus donner leur hauteur mais leur orientation dans l'excavation. La coordonnée z est donc remplacée par la coordonnée θ . Celle-ci donne l'orientation de l'axe de la pièce d'équipement mobile — défini par son sens de marche avant — par rapport à l'axe y du référentiel principal de l'intersection ou de la chambre ou du référentiel à l'abscisse curviligne s du tronçon de galerie. Dans les excavations « verticales », à savoir les puits, les coordonnées (x, h, z) sont spécifiées dans le référentiel du haut du puits — le référentiel numéro 1 — quelque soit le type d'équipement — les seuls équipements mobiles possibles dans les puits sont les ascenseurs et seule leur hauteur importe. La coordonnée h donne la hauteur. Les coordonnées (x, z) permettent de spécifier à quel endroit de la section du puits se trouve la pièce d'équipement.

Le graphe de cette relation peut donc être quantifié comme suit :

$$F: \Gamma \rightarrow \mathbb{R}^3$$

$$(eg, pe) \mapsto (a, b, c).$$

où (a, b, c) désigne le triplet (x, y, z) , (x, s, z) , (x, y, θ) , (x, s, θ) ou (x, h, z) .

Notons que la quantification de cette relation pour les pièces d'équipement mobile est variable puisque celles-ci se déplacent. De plus, il y a deux types de variation. Le premier est une variation sur les valeurs des coordonnées et permet un déplacement à l'intérieur d'un objet-attribut donné. Mais il se produit aussi qu'une pièce d'équipement mobile change d'excavation, c'est-à-dire change d'objet-attribut dans la représentation. Donc, en plus d'avoir une quantification variable, les relations vont se « déplacer », c'est à dire que les objets-attributs *excavation* sur lesquels portent les relations vont changer. Ces changements ne sont toutefois pas quelconques. En effet, les pièces d'équipement ne peuvent se déplacer que d'une excavation à une autre excavation attachée à la précédente. Quand une pièce d'équipement passe d'un objet-attribut *excavation* à un autre, l'arc représentant la relation de positionnement dans le premier objet-attribut est détruit et un autre est créé pour positionner la pièce d'équipement dans le second objet-attribut.

Dans notre exemple, à l'instant où la vue de la figure 3.3 a été prise, la relation de positionnement des pièces d'équipement est telle que donnée dans le tableau 3.6.

La figure 3.31 montre la description en EXPRESS-G des deux relations.

3.8.3 Excavations et structures rocheuses

Cette relation a pour rôle de mettre en correspondance la géométrie des excavations et les structures rocheuses. Elle va être utilisée par plusieurs opérations, la principale étant la planification de la mine, en particulier la planification de nouvelles excavations dans et autour de la veine. Une autre utilisation de cette information concerne la

Tableau 3.6 : La relation de positionnement des pièces d'équipement dans les excavations à l'instant où la vue de la figure 3.3 a été prise

Arc	Quantification
(EP_1, I_1)	$(0 ; 6 ; 3.7)$
(EP_2, I_2)	$(-2.5 ; 6 ; 3.7)$
(EP_3, TG_{3G_6})	$(0 ; 4.5 ; 3.9)$
(VP_1, P_1)	10
(LHD_1, TG_{1G_4})	$(1 ; 4 ; 0)$

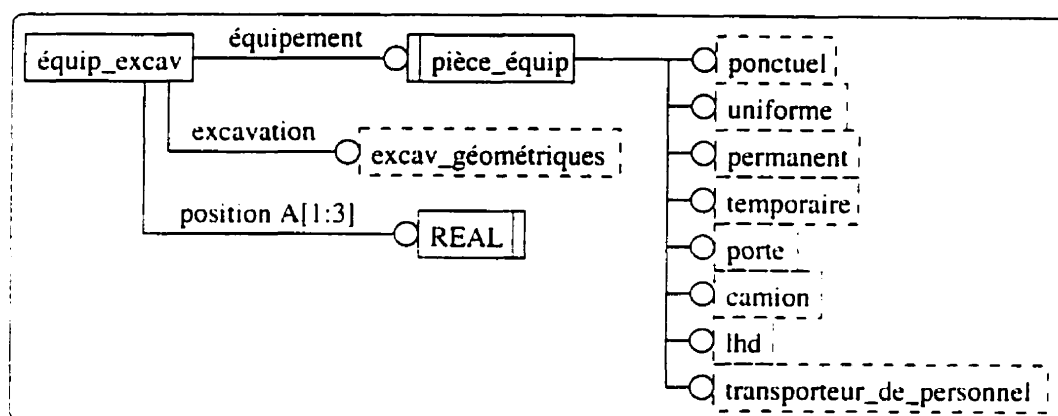


Figure 3.31 : La description en EXPRESS-G des relations entre l'équipement et les excavations

gestion de la ventilation, qui requiert la connaissance de la rugosité de la roche des parois des excavations servant de conduit d'air. Cette rugosité dépend du type de roche. Savoir où passe l'excavation dans la roche permet de savoir le type de roche des parois. Dans ce cas, seule une information très grossière sur la nature des roches est nécessaire. Pour cette opération, seule l'intersection entre les excavations et les structures rocheuses sera donnée. La navigation, quant à elle, peut être aidée par une information sur la nature des roches. Toutefois, dans ce cas, le positionnement des types de roche dans les excavations est important. Seuls les murs étant utilisés pour la navigation, nous allons préciser où sur ceux-ci les cellules de structures rocheuses commencent et finissent.

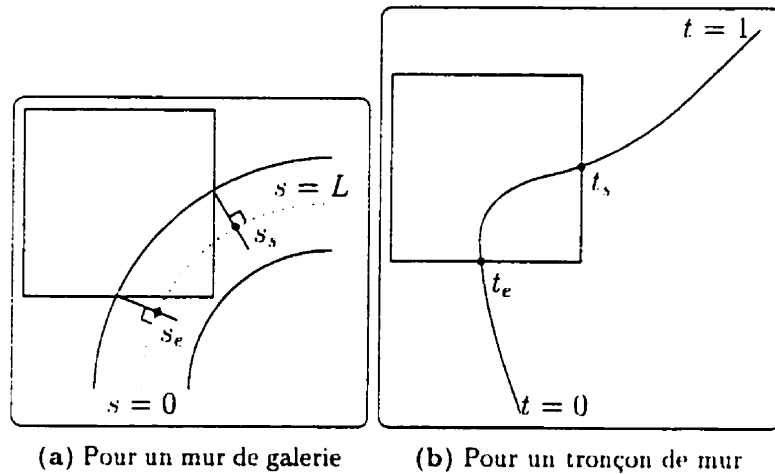


Figure 3.32 : Les points d'entrée et de sortie des excavations dans les cellules de roches

Les arcs du graphe de la relation vont associer des cellules de structures rocheuses et des objets-attributs de l'attribut *géométrie des excavations* qui représentent des parois des excavations. Ces objets-attributs sont les murs de galerie, les tronçons de mur (d'intersection et de chambre), les sols et les toits. Une description géométrique précise existe pour les murs de galerie et les tronçons de mur. L'intersection entre ces objets-attributs et les cellules rocheuses peut donc être déterminée et sera quantifiée par les points d'entrée et de sortie du mur de galerie ou du tronçon de mur. Ces points seront spécifiés par leur abscisse curviligne dans le tronçon de galerie ou par leur abscisse sur le tronçon de mur (figure 3.32). Notons que cette quantification pourrait ne pas être spécifiée et l'information retrouvée au besoin. Toutefois, ceci implique de nombreux calculs⁽¹³⁾ et il est donc préférable de conserver cette information plutôt que de la calculer à chaque fois.

Aucune description géométrique des sols et toits n'existe. Toutefois, l'intersection

⁽¹³⁾ Si la position absolue de la cellule est facile à obtenir, celle des murs de galerie ou tronçons de mur nécessite plus de calcul. En effet, puisque toutes les excavations sont positionnées par rapport à celles auxquelles elles sont raccordées, un chemin depuis l'entrée des excavations (qui est positionnée dans le référentiel terrestre de la mine) jusqu'à l'excavation considérée doit être cherché.

peut quand même être déterminée. En effet, les intersections avec les murs de galerie et les tronçons de mur déterminent les frontières d'une région dans les structures rocheuses : les cellules du bas [resp. du haut] de cette région intersectent nécessairement le sol [resp. le toit] de l'excavation correspondante, le sol et le toit étant supposés être les surfaces les plus planes possible s'appuyant sur les murs.

Le graphe de cette relation s'écrit donc, si l'on suppose que l'attribut *structures rocheuses* est le quatrième :

$$\Gamma(\Omega_4, B) = \{(c, e) \mid i(c, e)\},$$

$$B = \{MG_1, \dots, MG_l, TM_1, \dots, TM_m, S_1, \dots, S_n, T_1, \dots, T_p\}.$$

où c et e désignent respectivement les objets-attributs *cellule de structure rocheuse* et *excavation*, l , m , n et p sont les nombres respectivement de murs de galerie, de tronçons de mur, de sols et de toits et $i(c, e)$ est la relation qui indique que la cellule c est intersectée par l'excavation e .

La quantification de cette relation associe à chaque arc du graphe un ensemble de couples d'éléments de \mathbb{R} , chaque couple étant formé des deux abscisses telles que décrites à la figure 3.32 :

$$F: \Gamma(\Omega_4, B) \rightarrow \mathcal{P}(\mathbb{R}^2).$$

Il faut associer un ensemble de couples à chaque arc car une excavation peut éventuellement entrer et sortir plusieurs fois d'une cellule.

La figure 3.33 montre une représentation graphique de l'intersection de la veine — la partie des structures rocheuses qui contient du minerai — et des excavations. Le tableau 3.7 donne quelques exemples de couples du graphe de cette relation.

La figure 3.34 montre la description en EXPRESS-G de cette relation.

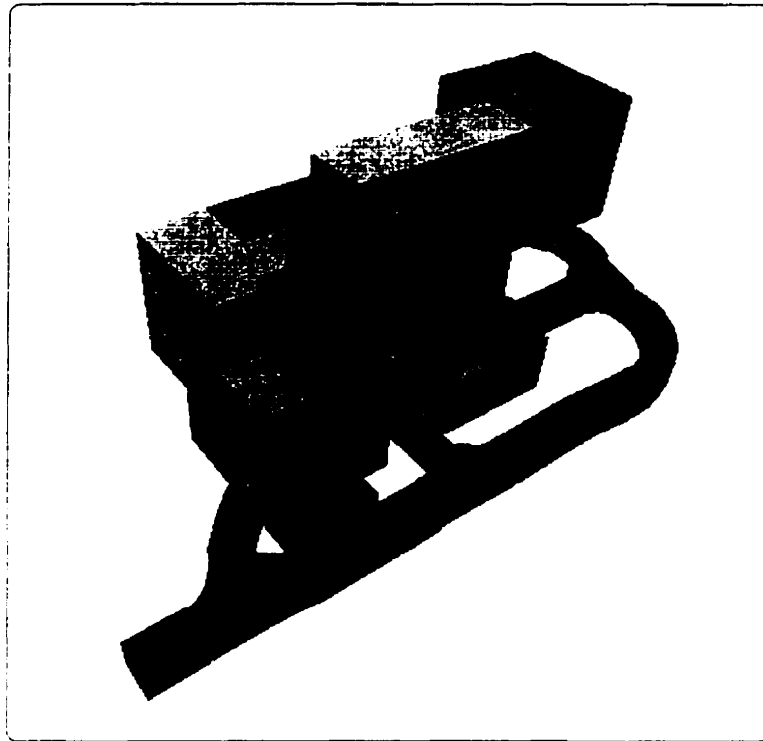


Figure 3.33 : Une représentation graphique de l'intersection de la veine et des excavations

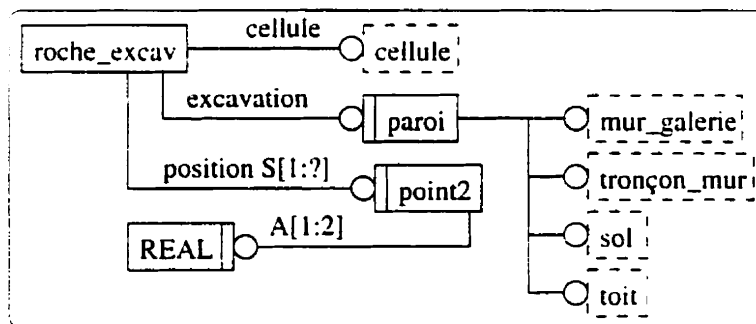


Figure 3.34 : La description en EXPRESS-G de la relation entre les attributs *structures rocheuses* et *géométrie des excavations*

3.9 Récapitulation

Dans ce chapitre, nous avons présenté GNOMine, un modèle de mine basé sur GNOME. Nous avons basé GNOMine sur des besoins de l'industrie. Ces besoins ont été mis en

Tableau 3.7 : Quelques exemple de couples du graphe de la relation entre les structures rocheuses et la géométrie des excavations

Cellule	Excavation
(0 0 4)	TG _{1G₁}
(0 0 5)	MG _{1G₁}
(0 0 5)	S _{G₁}
(0 0 5)	T _{G₁}
(0 0 7)	MG _{2G₁}
(0 0 5)	S _{G₁}
(0 0 5)	T _{G₁}
(1 1 6)	TM _{1M₁₁}
(1 1 6)	S _{I₁}
(1 1 6)	T _{I₁}
(1 1 7)	TM _{1M₁₁}
(1 1 7)	S _{I₁}
(1 1 7)	T _{I₁}
(1 1 7)	TM _{2M₁₁}
(1 1 7)	TG _{6G₇}

évidence par l'étude de la littérature et de quelques opérations minières intéressantes du point de vue de l'automatisation : arpentage et cartographie, planification des mines, gestion des conditions environnementales, du trafic et des activités minières, navigation autonome, etc. Ceci nous a conduit à l'incorporation dans GNOMine des attributs suivants : *géométrie des excavations*, *utilisation des excavations*, *équipement* et *structures rocheuses*. Diverses relations entre ces attributs ont été décrites. La modularité de GNOME permet en outre de compléter GNOMine par l'ajout d'attributs afin de refléter les besoins d'applications spécifiques.

Dans les chapitres suivants, nous allons décrire comment nous pouvons construire des représentations de mines souterraines suivant GNOMine en partant de données d'arpentage. Nous verrons que ces données d'arpentage peuvent provenir d'un arpentage manuel ou d'un arpentage automatique.

Chapitre 4

Arpentage des mines, traitement et interprétation des données d'arpentage

L'arpentage consiste à acquérir des données métriques sur une mine. Celles-ci donnent la position de points saillants de la mine dans un référentiel terrestre, c'est-à-dire donnent la topographie de la mine. Souvent, d'autres données sont aussi acquises. Elles peuvent porter sur la qualité ou la quantité du minerai, les fractures, les écoulements d'eau, etc.

Ce chapitre décrit l'arpentage des mines ainsi que l'utilisation qui est faite des données collectées : essentiellement la création de cartes. Les techniques traditionnelles sont d'abord présentées (section 4.1) puis l'automatisation de ces techniques est décrite (section 4.2). Enfin, la section 4.3 montre comment des données artificielles sont générées afin d'être utilisées pour la reconstruction de mines suivant le modèle GNOMine (chapitre 5).

4.1 Techniques traditionnelles

Actuellement, l'arpentage des mines est fait « manuellement », c'est-à-dire qu'une équipe d'arpenteurs parcourt la mine et fait des mesures. Chaque arpenteur ou chaque compagnie minière a sa propre technique d'arpentage. Les techniques diffèrent essentiellement par la façon de mesurer les angles et par le format des données fournies. Toutefois, des constantes, que nous allons décrire, apparaissent. Plus de détails peuvent être trouvés dans (Williams 1983).

Le traitement et l'interprétation des données d'arpentage consiste en la création de cartes montrant des informations de divers types. La topographie du lieu constitue toujours la base de toutes les cartes. Diverses couches peuvent être ajoutées montrant la végétation, l'hydrographie, la géologie, etc.

4.1.1 Généralités

Généralement, les mesures effectuées sont relatives à une mesure précédente puis rapportées dans un référentiel commun à toutes. Nous allons voir que c'est toujours le cas des distances et parfois aussi des orientations, selon qu'une orientation absolue est disponible ou non. Dans le cas des mines, le référentiel est généralement situé proche d'une entrée de la mine.

Précisons quelques termes. Un *repère* est un point dont la position (horizontale et verticale) est connue de façon absolue. Il est matérialisé par une pièce métallique fermement fixée au lieu en question. Un « foresight » représente l'information mesurée à propos d'un lieu précédemment inconnu. Un « backsight » est l'information mesurée à propos d'un lieu déjà connu. Un point tournant (« turning point ») est le lieu où l'instrument de mesure est placé pour faire de nouvelles mesures.

Les appareils de mesure sont de plusieurs types. Le théodolite sert à mesurer des angles horizontaux et verticaux, relatifs ou absolus. Le télémètre sert à mesurer des distances. Le bâton de pointage, quant à lui, est une règle graduée qui sert à

mesurer des hauteurs relatives. Celles-ci sont lues à partir du point tournant à l'aide du télescope faisant partie du théodolite.

4.1.2 Mesure des hauteurs

La mesure des hauteurs se fait de la façon suivante :

1. Une référence est choisie. Dans le cas des mines, celle-ci est généralement le lieu précédemment mesuré ou, pour la première mesure, un point géodésique, extérieur à la mine. Ce point géodésique appartient à un réseau de références créé lors de la cartographie de la région où se trouve la mine.
2. Un point tournant est choisi de manière à maximiser le nombre de mesures faisables à partir de ce point. Un télescope est installé en ce point.
3. Des bâtons de pointage sont positionnés sur la référence et sur le lieu dont la hauteur est à mesurer.
4. Le télescope est orienté vers le bâton du point de référence afin de lire la hauteur de l'instrument par rapport au point de référence — ceci constitue le « back-sight ». Il est ensuite tourné vers le second bâton afin de mesurer la hauteur de l'instrument par rapport au nouveau point — cette hauteur est le « foresight ».
5. Une simple différence de hauteur permet de calculer la hauteur absolue du nouveau point.

La figure 4.1 montre les différentes mesures impliquées par ce processus.

Dans le cas des mines, la procédure est la même sauf que les points de référence sont placés au plafond afin qu'ils ne soient pas détruits par les véhicules qui passent. Les hauteurs mesurées sont donc celles du plafond. La hauteur de la galerie est prise en chaque point de mesure afin d'avoir la hauteur absolue du sol de la galerie.

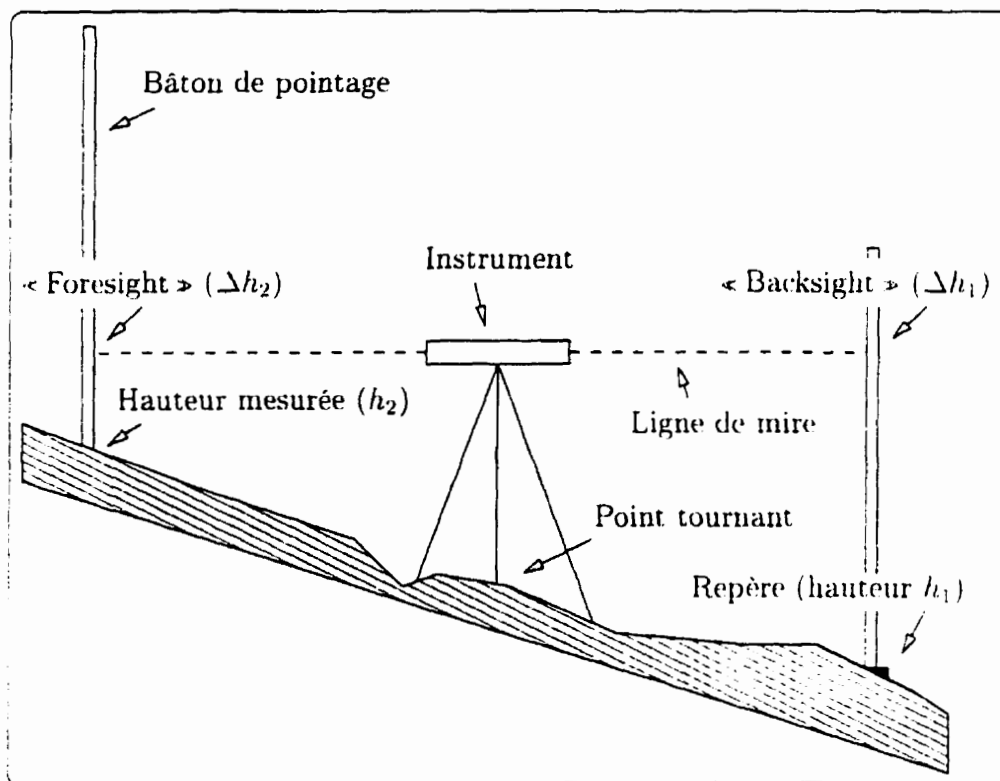


Figure 4.1 : La technique de mesure des hauteurs. La hauteur mesurée absolue h_2 vaut : $h_2 = h_1 + \Delta h_1 - \Delta h_2$.

4.1.3 Calcul des positions horizontales

Une partie importante et délicate de l'arpentage est la mesure des angles. Différentes façons de mesurer les angles sont possibles et utilisent un *angle à droite*, de *multiples angles à droite*, un *angle de déflexion*, des *angles intérieurs*, un *azimut* ou un *angle de direction* (« bearing angle »). Les quatre premiers angles sont relatifs à une direction donnée, la direction entre le point tournant et le point précédent, tandis que les deux dernières sont absolues. L'angle à droite est mesuré en tournant à droite (dans le sens horaire) du point précédent — le « backsight » correspond à l'origine de la mesure de l'angle — jusqu'au point à mesurer — le « foresight » est alors l'angle mesuré. La figure 4.2(a) montre de tels angles. La méthode des multiples angles à droite

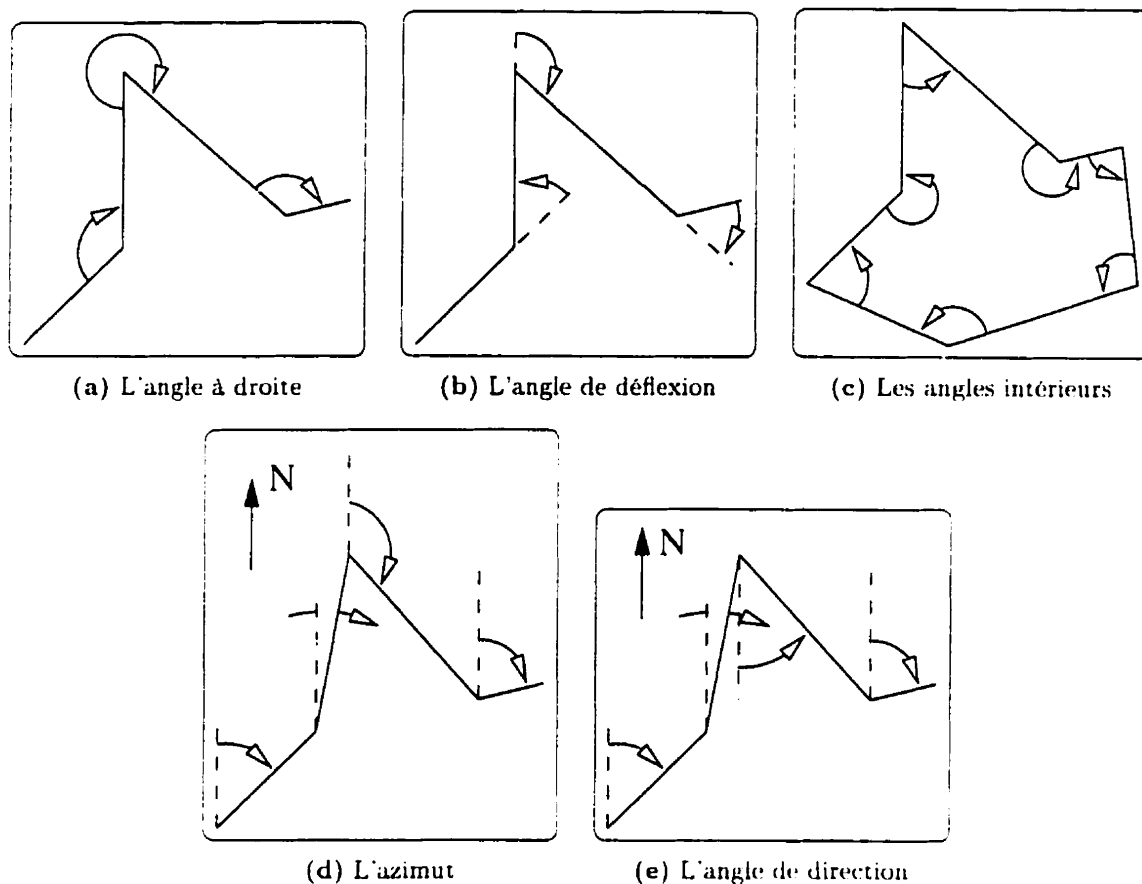


Figure 4.2 : Les différentes méthodes de mesure des angles

est la même que celle de l'angle à droite, sauf que la valeur retenue est la moyenne de plusieurs mesures. L'angle de déflexion est l'angle de changement d'orientation du parcours allant du point de mesure précédent au point de mesure suivant en passant par le point tournant. Cet angle est toujours compris entre 0° et 180° et un code indique si la mesure est faite en tournant dans le sens horaire ou anti-horaire (figure 4.2(b)). La méthode des angles intérieurs s'applique quand un parcours fermé est suivi. Les angles sont pris à l'intérieur du parcours (figure 4.2(c)). L'azimut est mesuré à partir d'un méridien, une ligne orientée nord-sud. Il est généralement mesuré à partir du nord du méridien vers la ligne passant par le point tournant et

le point à mesurer (figure 4.2(d)). La dernière méthode, celle de l'angle de direction, est similaire à celle de l'azimut sauf que l'angle est toujours compris entre 0° et 90° . Un code indique d'où commence la mesure — direction nord ou sud — et dans quelle direction elle est prise — est ou ouest — (figure 4.2(e)). La méthode généralement utilisée est celle des (multiples) angles à droite mais reportées sous forme d'azimut ou d'angles de direction pour faciliter les calculs subséquents. Les angles de déflexion sont utilisés dans l'arpentage des chemins de transport puisqu'ils représentent les changements d'orientation de celui-ci.

En plus de l'angle permettant de donner la direction du point à mesurer, il faut connaître la distance de ce point par rapport à la mesure précédente. Les distances entre le point précédent et le point tournant, d'une part, et entre le point tournant et le point à mesurer, d'autre part, sont donc mesurées. Une simple relation trigonométrique permet de donner la position, relative ou absolue, du nouveau point.

4.1.4 L'arpentage dans son ensemble

Une fois les méthodes de prises de mesures décrites, comment l'arpentage d'une mine est-il fait? Tout d'abord, l'arpentage peut être fait suivant un chemin ouvert ou fermé. Il se fait toujours de proche en proche, à partir d'un point dont la position et l'orientation (relative ou absolue) sont connues, vers un nouveau point. Un maximum de la distance entre références est généralement fixé légalement. La distance doit toutefois être plus courte en cas de galeries très compliquées. Une source importante d'erreur dans le positionnement absolu final des points est la « descente » d'un premier méridien (ou une orientation connue par rapport à un méridien) dans la mine quand celle-ci est reliée à l'extérieur par un puits. Ceci est traditionnellement fait en utilisant deux fils à plomb par rapport auxquels la première orientation dans la mine est prise. Des techniques utilisant des gyroscopes sont maintenant disponibles. Elles ont l'avantage de permettre un recalage des orientations en tout temps et lieux pendant l'arpentage, mais le désavantage d'être coûteuses.

Le résultat de l'arpentage est un tableau donnant toutes les mesures effectuées. Il ne fait pas partie du rôle de l'arpenteur d'interpréter les mesures. Ce rôle est dévolu au cartographe qui doit donc disposer d'un document clair donnant toutes les mesures prises.

Dans le cas des mines, des mesures latérales sont effectuées afin d'obtenir de l'information sur la forme des galeries. Par exemple, des mesures perpendiculaires à la ligne joignant deux points de référence sont faites pour indiquer la position des piliers et des intersections, ou tout simplement la largeur locale de la galerie. Les positions sont données en terme de distance le long de la ligne à partir de la première des deux références et de distance perpendiculaire à cette ligne avec une lettre indiquant si le point mesuré est à droite ou à gauche. La figure 4.3 montre un exemple de galerie avec les mesures latérales qui pourraient être faites tandis que la figure 4.4 montre un exemple du document qu'un arpenteur pourrait fournir pour cette galerie. La première ligne du tableau indique qu'il s'agit de la ligne joignant les points de référence 4 et 5, que la distance entre les deux points est de 24 m et que cette ligne fait un angle de 58° avec le nord vers l'est. Les lignes suivantes du tableau indiquent des événements se produisant le long de la ligne. Par exemple, à 2 m du premier point de référence, à 1 m à droite, il y a une fin d'intersection. La dernière colonne indique le type d'événement : DI pour un début d'intersection, FI pour une fin d'intersection et M pour un mur.

Une autre méthode, utilisée notamment dans les intersections, consiste à faire des mesures, en coordonnées polaires à partir du point tournant, de points saillants sur les parois. La figure 4.5 montre un exemple dans une intersection.

4.1.5 Utilisation et interprétation des données d'arpentage

Les mesures sont utilisées pour placer tous les points dans un référentiel absolu afin de dresser la carte de la mine.

Il y a donc d'abord une première étape d'interprétation des documents fournis par

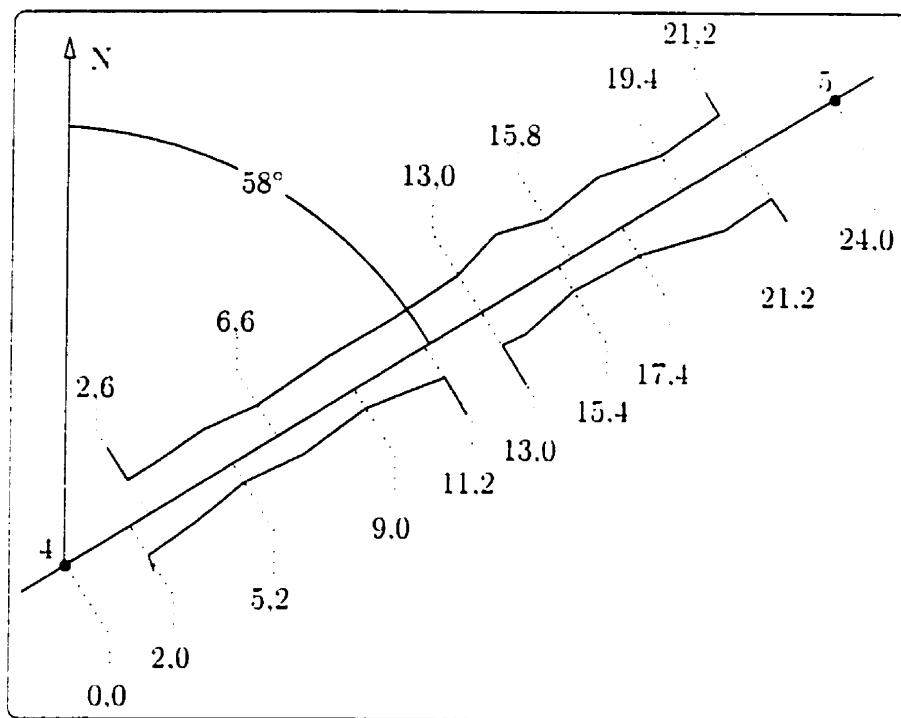


Figure 4.3 : Un exemple de mesures latérales le long d'une ligne joignant deux références

les arpenteurs (figure 4.4). Par exemple, quand le parcours d'arpentage est fermé, le point final doit être à la même position que le point initial. Si ce n'est pas le cas, ce qui se produit généralement, l'erreur est comparée à la longueur du parcours. Si elle n'est pas satisfaisante, alors un nouvel arpentage est commandé. Si, au contraire, elle l'est, alors l'erreur est reportée tout au long du parcours. Ce report est généralement uniforme, sauf si l'arpenteur a indiqué des endroits comme étant de possibles sources d'erreur, auquel cas plus d'erreur est reportée à ces endroits.

Ensuite vient le processus de création de la carte. Les coordonnées absolues calculées à l'étape précédente sont transformées pour les besoins immédiats. Les transformations peuvent être linéaires (pour une mise à la bonne échelle par exemple) ou non linéaires (selon la projection utilisée : conique, Mercator, etc.).

À la carte topographique ainsi créée peut être ajoutée de l'information non to-

4 - 5	24,0 m	58°	E	
	2,0 m	D	1,0 m	FI
	2,6 m	G	1,0 m	FI
	5,2 m	D	0,6 m	M
	6,6 m	G	1,0 m	M
	9,0 m	D	0,6 m	M
	11,2 m	D	1,0 m	DI
	13,0 m	D	1,1 m	FI
	13,0 m	G	1,2 m	M
	15,4 m	D	0,8 m	M
	15,8 m	G	1,2 m	M
	17,4 m	D	0,9 m	M
	19,4 m	G	1,1 m	M
	21,2 m	G	1,2 m	DI
	21,2 m	D	1,4 m	DI

Figure 4.4 : Un exemple du document fourni par l'arpenteur correspondant à la galerie de la figure 4.3 (voir le texte pour l'explication).

pographique comme la position des prélèvements de roches, de l'information sur la végétation (pour les régions à ciel ouvert), sur la ventilation (pour les mines souterraines), l'écoulement d'eau, etc. D'autre part, des calculs peuvent être (et sont) faits pour estimer les réserves de minerai (pureté, quantité) à partir des prélèvements rocheux.

Toutes ces étapes sont à refaire pour chaque nouvelle carte, à chaque fois qu'un nouvel arpentage est fait ou, plus généralement, que de nouvelles données sont acquises. Les mêmes données sont donc manipulées plusieurs fois ce qui accroît les probabilités d'introduction d'erreurs. Toutes ces étapes, de l'acquisition de données à la génération de cartes, sont donc progressivement et de plus en plus souvent automatisées. La section suivante décrit les étapes de l'automatisation de l'arpentage et du traitement des données.

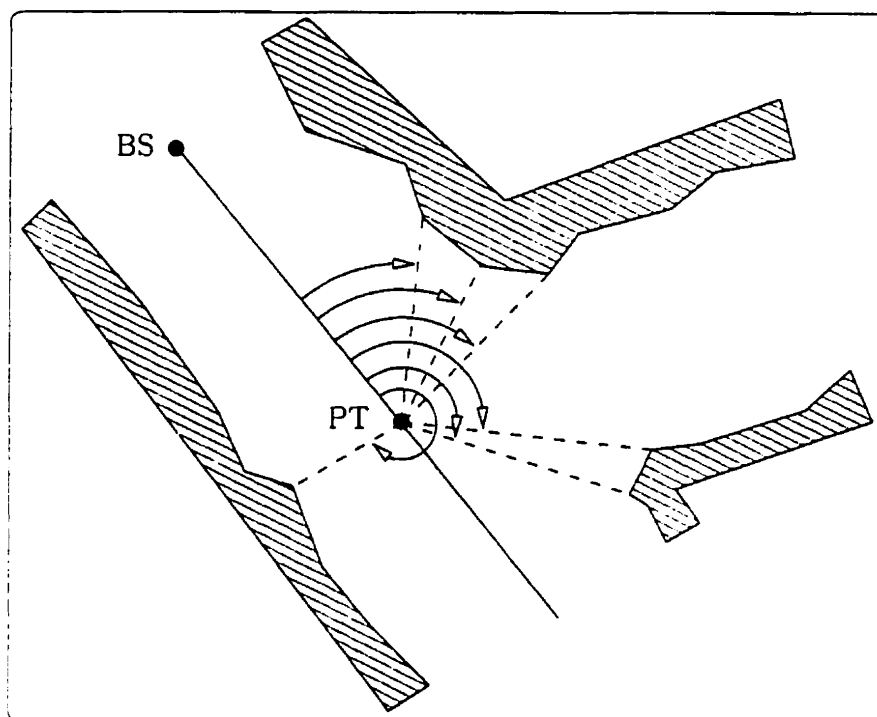


Figure 4.5 : Un exemple de mesures de points saillants dans une intersection. Les angles sont de type à *droite*. BS désigne le « backsight » et PT le point tournant.

4.2 Automatisation

Plusieurs voies sont explorées dans l'industrie minière pour effectuer l'automatisation de l'arpentage. La première concerne l'élaboration de modèles de mines pour représenter les données acquises (modèles que nous avons déjà décrits à la section 3.1.1). Des logiciels permettent de traiter les données afin de construire les représentations et de les interpréter afin de fournir une aide à la décision (section 4.2.1). Mais ces deux voies nécessitent une mise sous forme informatique des données. Celle-ci peut se faire soit par saisie de données existantes, soit directement lors de l'acquisition (section 4.2.2). Enfin, un projet de recherche actuellement en cours au sein du Groupe de Recherche en Perception et Robotique est décrit. Ce projet a pour but de faire réaliser l'exploration et l'arpentage par un véhicule autonome (section 4.2.3). Les données produites

par cet arpentage sont utilisées pour faire la reconstruction de mine suivant GNOMine (chapitre 5).

Comme dans de nombreux domaines, l'informatisation ne se fait pas sans problème et en une seule étape, ceci étant en partie dû à la réticence des personnes et à l'évolution rapide du matériel et des logiciels (Yetter et Hughes (1988) pour l'arpentage, Green (1988) ou Taylor et Paananen (1991) pour l'interprétation géologique, géochimique, etc. ou encore MacIntyre (1991) pour la cartographie). Souvent, l'éloignement des sites et la diversité des équipes ayant à accéder aux mêmes données imposent une étude sérieuse des communications entre les sites (Chueke et Armony 1988). Ceci dit, le pas semble avoir été franchi vu le nombre de logiciels spécialement développés ou adaptés pour le domaine minier (Franklin 1988, Booth 1990, Raczka 1991, Bedell 1992, Wheeler 1993, Nader et al. 1994, Lovejoy 1995, Nader et al. 1995). Cette multitude de programmes pose d'ailleurs un problème de compatibilité lors d'échanges de données (Stokes 1993).

Les progrès récents en visualisation 3D permettent de créer des environnements virtuels pour étudier divers problèmes, comme par exemple la pré-visualisation des travaux d'excavation et de leur effet sur l'environnement ou l'apprentissage de diverses techniques (Schofield et al. 1994) ou encore divers problèmes liés à la navigation autonome (Labrosse et al. 1998).

4.2.1 Informatisation des calculs faits sur les données d'arpentage

Il n'est pas suffisant d'avoir des modèles permettant de représenter la géométrie des mines. Il faut aussi avoir des outils permettant de traiter et interpréter les données (topographiques, géométriques, géologiques, etc.). Par exemple, avant d'arriver à une représentation d'une veine de minerai, il faut passer par une étape d'interprétation des prélèvements effectués sur le terrain : c'est la corrélation des prélèvements afin de déterminer le positionnement et l'étendue des veines (Roghani 1991).

Les systèmes développés se basent sur les techniques des GIS : « Geographic Information System » (Bartier et Keller 1991). Une base de données permet de ranger de l'information topographique ou non (les données non topographiques pouvant être textuelles, numériques, qualitatives, relationnelles, etc.). Un programme utilise les données contenues dans cette base pour interpréter les données géologiques et créer le modèle de la veine, planifier les excavations, dessiner des cartes reliant divers types d'information, etc. (Franklin 1988, Plummer 1991, Raczka 1991). Des logiciels basés sur les modèles de type CAD permettent aussi, dans une certaine mesure, ce types de calculs (Campbell et Smith 1991, Bedell 1992). Au Canada, une base de données des mines inactives ainsi qu'un ensemble d'outils avancés permettant l'interrogation de cette base ont été développés (Vance et al. 1995). Cette base de données est accessible via divers moyens de communications par des personnes éventuellement physiquement éloignées.

4.2.2 Automatisation de la saisie des données

Tous les systèmes décrits jusqu'à présent nécessitent la saisie des données. Souvent, et au moins au début, des données existent déjà, par exemple sous forme de cartes : celles-ci sont alors digitalisées à l'aide de tablettes à digitaliser. Les données peuvent aussi provenir du traitement numérique d'images prises d'un avion ou d'un satellite (Booth 1990). Elles sont alors directement sous forme informatique. Mais, le plus souvent, surtout dans le cas des mines souterraines, les données proviennent de l'arpentage « manuel » des mines. À ce niveau, une saisie immédiate (ou au moins journalière) des mesures permet une grande amélioration de la productivité. En effet, la mise sous forme informatique des mesures permet un traitement rapide de celles-ci, ce qui permet, par exemple, de détecter immédiatement des erreurs de mesures (non-fermeture d'une boucle par exemple) et donc de replanifier un arpentage immédiatement ou pour le lendemain.

Les équipes d'arpenteurs sont donc munies d'un ordinateur portable qui remplace

les notes manuscrites traditionnelles (Yetter et Hughes 1988, Struik et al. 1991). Dans certains cas, ce type d'équipement n'est pas envisageable. La saisie est alors faite le soir, « de retour au camp », et les données sont immédiatement analysées (Marlon-Lambert 1988). Les appareillages de mesure aussi ont évolués puisqu'ils sont maintenant capable de conserver les mesures d'une journée d'arpentage. Ces appareils sont ensuite connectés à un ordinateur afin de transférer les données (Marlon-Lambert 1988).

4.2.3 Exploration et arpentage automatique

L'arpentage est un processus long, répétitif et coûteux. Par exemple, les équipes d'arpenteurs, de par leurs déplacements irréguliers et permanents, ont besoin de véhicules qui leur sont propres (Marlon-Lambert 1988).

Le Groupe de Recherche en Perception et Robotique de l'École Polytechnique de Montréal travaille à l'exploration automatique de mines souterraines dans le but de collecter des données d'arpentage. Un véhicule autonome parcourt la mine et fait des mesures télémétriques (à l'aide de télémètres à laser) latérales et verticales. Ces mesures sont en fait des profils desquels les mesures les plus contraignantes sont extraites afin d'obtenir les largeur et hauteur utiles. La figure 4.6 montre un tel véhicule ainsi que les télémètres latéraux et verticaux. La figure 4.7 montre les profils extraits lors de l'exploration d'une mine. Ce sont ces profils qui sont utilisés pour la reconstruction d'une mine complète (section 5.5). Le véhicule possède au départ une carte topologique de la mine (décrivant de façon qualitative les galeries et les intersections ainsi que leurs interconnexions) sous forme d'un graphe. Au fur et à mesure des déplacements du véhicule dans la mine, une analyse des profils permet de détecter des événements importants, comme l'entrée dans une intersection ou la sortie d'une intersection. Ceci permet de localiser le véhicule dans le graphe et d'assurer une exploration complète de la mine (Debanné et al. 1997). Ceci permet aussi d'associer les mesures acquises aux galeries ou aux murs des intersections. Le résultat de

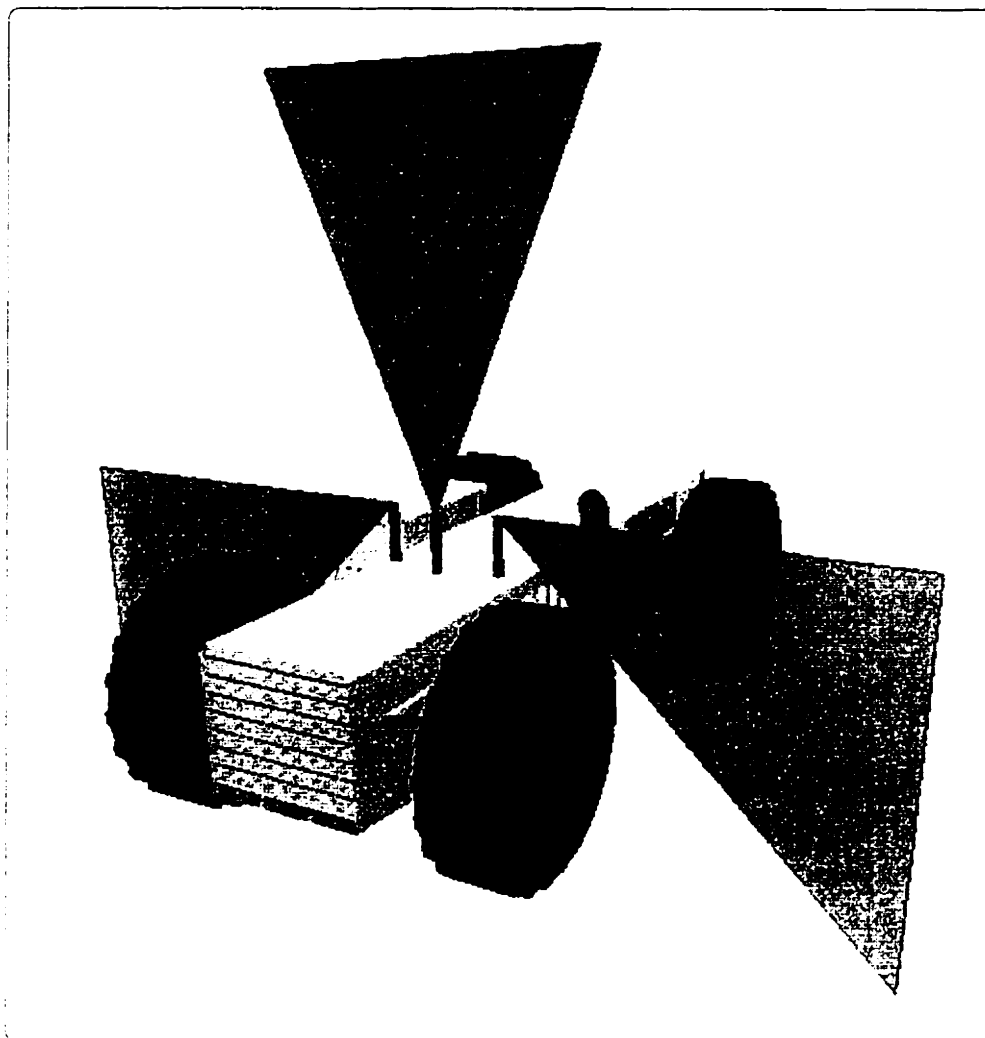


Figure 4.6 : Un véhicule d'arpentage et ses senseurs

l'arpentage automatique, comme de l'arpentage manuel, est un ensemble de mesures pour chaque galerie et chaque intersection du graphe initial. Pour chaque galerie ou intersection, les mesures sont séparées suivant les différents murs et sont exprimées dans un référentiel global.

Il y a toutefois une différence entre les mesures acquises de façon automatique et celle acquises de façon manuelle : leur densité. En effet, les mesures fournies par l'arpentage automatique sont denses afin de pallier au « manque d'expérience » du

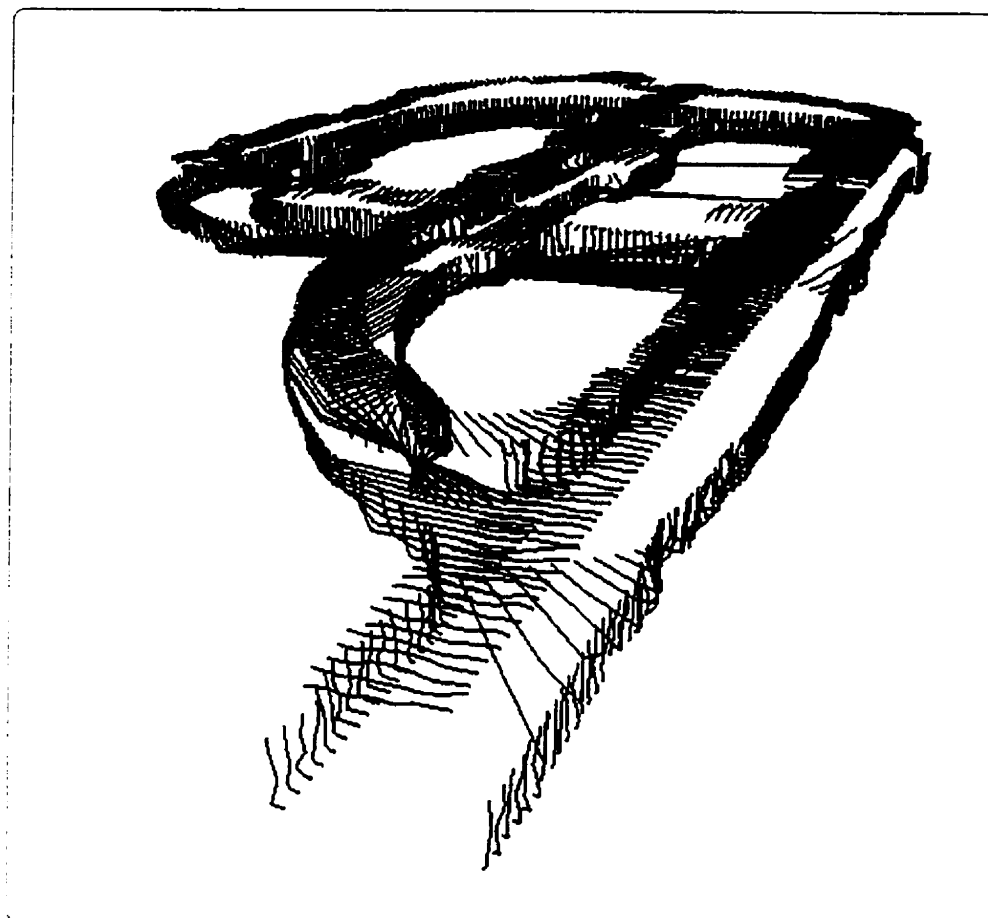


Figure 4.7 : Des profils extraits lors de l'exploration d'une mine

véhicule par rapport à son homologue humain. Ce dernier *sait* quelles sont les mesures importantes à faire et peut donc fournir des données éparses.

Cet arpentage automatique de mine n'est pas l'objet de cette thèse. Seul le résultat de cet arpentage est utilisé ici.

4.3 Génération de données artificielles

Afin de tester la reconstruction de la mine (chapitre 5) et n'ayant pas à notre disposition de mesures réelles, nous avons généré des données artificielles qui auraient

pu être prises par le véhicule explorant la mine. Deux méthodes sont utilisées : la synthèse de mesures et l'exploration d'une mine virtuelle. La première méthode (section 4.3.1) synthétise des mesures de galeries et d'intersections de façon individuelle et a pour avantage d'être rapide et de permettre de varier de nombreux paramètres caractérisant les données. La seconde méthode (section 4.3.2) utilise les résultats de l'arpentage automatique de mines (section 4.2.3), dans notre cas virtuelles. L'avantage de cette méthode est qu'elle fournit des mesures pour une mine complète.

4.3.1 Synthèse de mesures

D'après GNOMine (section 3.4.3.3), les tronçons de galerie sont des rubans clothoïdaux. Nous spécifions donc une galerie comme étant une succession de tels tronçons en donnant leurs paramètres, à savoir leurs coefficient de variation de courbure, longueur, largeur et hauteur. Il faut aussi spécifier les position, orientation et courbure initiales de la galerie.

Un tel protocole permet de générer une succession de tronçons parfaits dans le sens où ils sont effectivement des rubans clothoïdaux donc avec une largeur et une hauteur constantes. Afin de s'éloigner de ce modèle parfait, nous allons introduire du relief sur les murs et le plafond des galeries. Pour cela, deux signaux sont ajoutés aux largeurs et hauteurs. Ce sont tous les deux des mouvements browniens mais l'un varie rapidement (ce qui crée de grande amplitudes) et est utilisé pour créer un relief basse fréquence tandis que l'autre a une faible amplitude et est utilisé pour créer de la rugosité des parois (cette rugosité peut aussi en partie représenter du bruit de mesure). De tels mouvements browniens sont souvent utilisés pour générer du relief fractal (Peitgen et Saupe 1988). Un mouvement brownien $B(t)$ est une fonction, dans notre cas, à valeur dans \mathbb{R} d'une variable t (généralement le temps). Les incréments $B(t + \Delta t) - B(t)$ de cette fonction sont stationnaires, indépendants et leur densité de probabilité est gaussienne de moyenne nulle et d'écart-type σ . Augmenter la valeur de σ augmente l'amplitude des mouvements. En pratique, l'amplitude du mouvement

est limitée pour ne pas dépasser une amplitude maximale. Le relief basse fréquence est généré en prenant un mouvement brownien d'amplitude élevée étiré spatialement le long de la galerie et filtré pour lisser les marches créées. Ce filtrage sert aussi à lisser les changements de largeur et hauteur entre deux tronçons. Le relief haute fréquence est généré par un autre mouvement brownien de faible amplitude.

Lors de la reconstruction de galeries et d'intersections (sections 5.3.6.2 et 5.4.5.2, nous utilisons des reliefs d'amplitude et de régularité variables. Pour cela, nous jouons sur l'amplitude maximale du relief basse-fréquence et sur l'écart-type de la distribution gaussienne de son mouvement brownien (σ) pour en varier la régularité. Afin d'obtenir une très grande irrégularité, le mouvement brownien pourra aussi être remplacé par une distribution uniforme.

Une fois une galerie créée, il faut prendre des mesures à droite, à gauche et en haut le long de celle-ci. Pour cela, en chaque point de l'axe, un point à droite et ou à gauche est pris avec une certaine probabilité. De cette manière, la répartition spatiale non-uniforme des mesures est simulée et la densité des mesures peut être spécifiée. Un point, à droite ou à gauche, est en fait tridimensionnel, les deux premières coordonnées montrant la position latérale et la dernière coordonnée donnant la hauteur du tronçon en ce point.

La figure 4.8 récapitule les diverses étapes de la génération des mesures.

Les intersections sont générées de la même manière. Une intersection est composée de plusieurs murs (chacun reliant une paire de galerie). Un mur est une succession de tronçons représentés comme une courbe 3D polynomiale de degré 3. Les deux premières coordonnées définissent une courbe 2D qui est la base du mur. La dernière coordonnée donne la hauteur du mur le long de celui-ci. Des paramètres de tronçons sont donc spécifiés, à savoir la position des extrémités des courbes ainsi qu'un vecteur tangent à la courbe pour chaque extrémité. Ce vecteur est spécifié en coordonnées polaires (section 3.4.3.2).

Comme pour les galeries, du bruit sur la position horizontale et sur la hauteur est

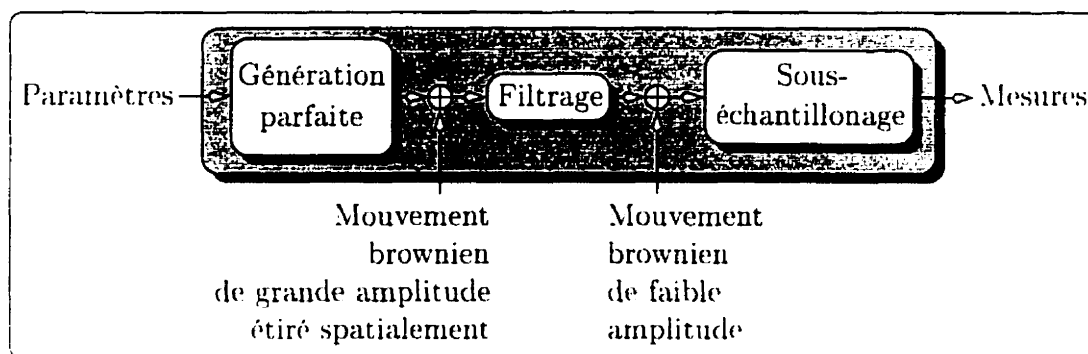


Figure 4.8 : Le processus de génération des mesures

ajouté pour créer du relief. Les mesures sont des points ainsi générés et sélectionnés de façon aléatoire le long des murs.

Un exemple d'une galerie faite de trois tronçons est présenté à la figure 4.9. La figure 4.9(a) montre les trois tronçons parfaits tandis que la figure 4.9(b) montre ces memes tronçons mais lissés. Du relief basse fréquence est ajouté à la figure 4.9(c) et lissé à la figure 4.9(d). À ceci, du relief haute fréquence est ajouté (figure 4.9(e)). Enfin, la figure 4.9(f) montre les mesures simulées à partir de la dernière galerie. Les toits ne sont pas montrés car ils présentent un relief similaire à celui des murs.

La figure 4.10 montre la génération d'une intersection à trois murs ainsi que les mesures correspondantes.

4.3.2 Exploration de mines virtuelles

Des mines réelles n'étant pas à notre disposition, l'arpentage automatique de mines est testé dans des mines virtuelles générées par un logiciel que nous avons développé sur station SGI à l'aide de la librairie de graphisme 3D *Open Inventor*^{ap}. Ce logiciel interprète une représentation de mine (suivant GNOMine) et crée les objets 3D correspondants (Labrosse et al. 1996a, Labrosse et al. 1998). La figure 4.11 montre quelques vues de mines virtuelles avec différents attributs. Le parcours de telles mines

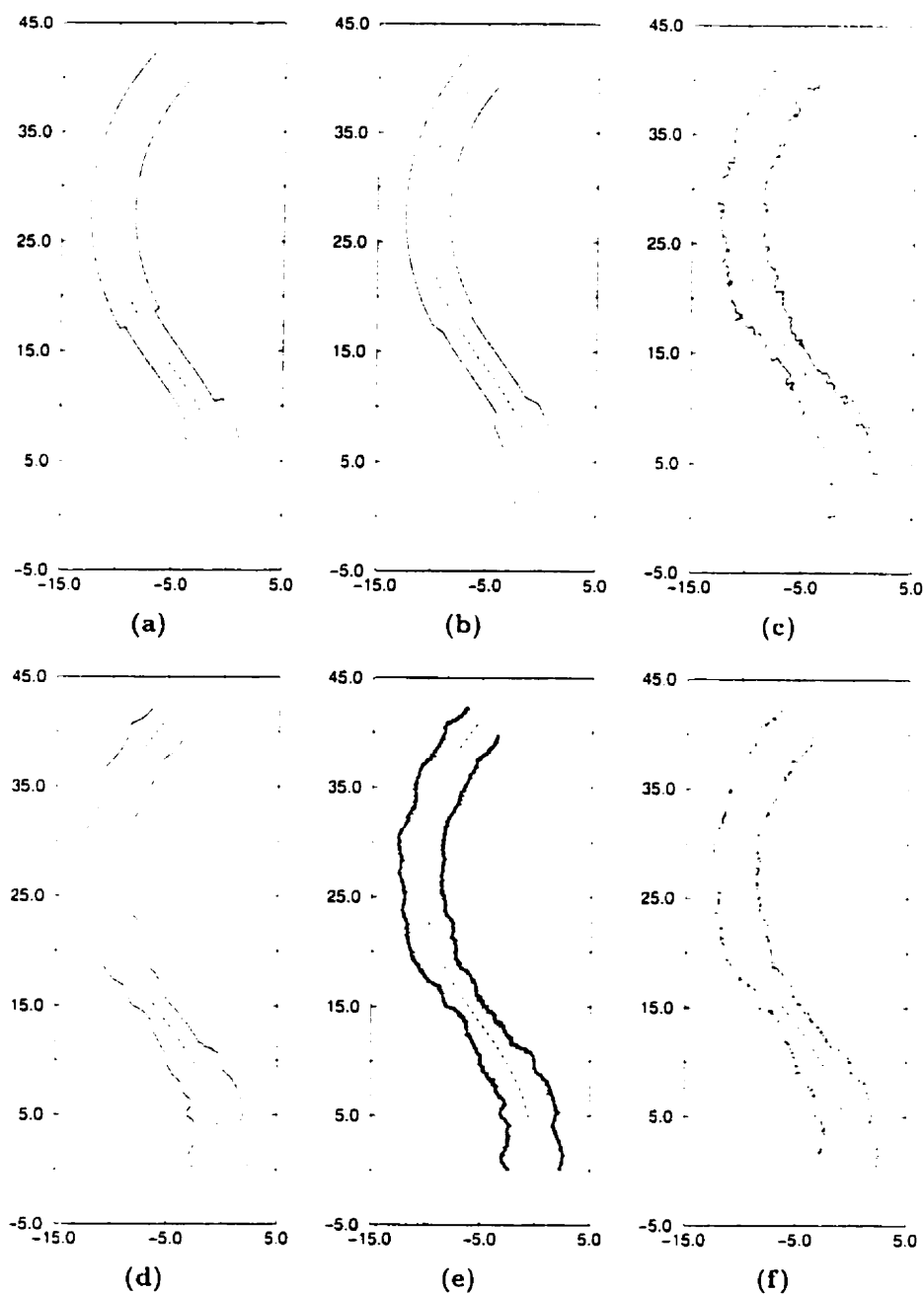


Figure 4.9 : Les mesures d'une galerie faite de trois tronçons : les tronçons parfaits (a), les tronçons parfaits lissés (b), les tronçons avec un relief basse fréquence (c), le même relief lissé (d), ajout d'un relief haute fréquence (e), les mesures simulées de la galerie (f).

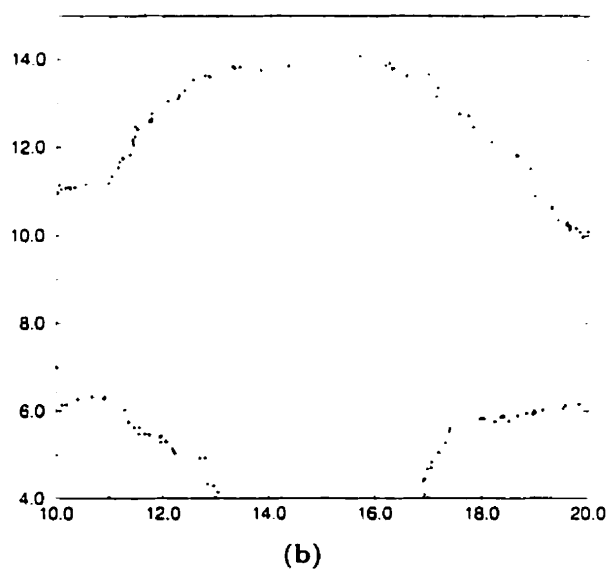
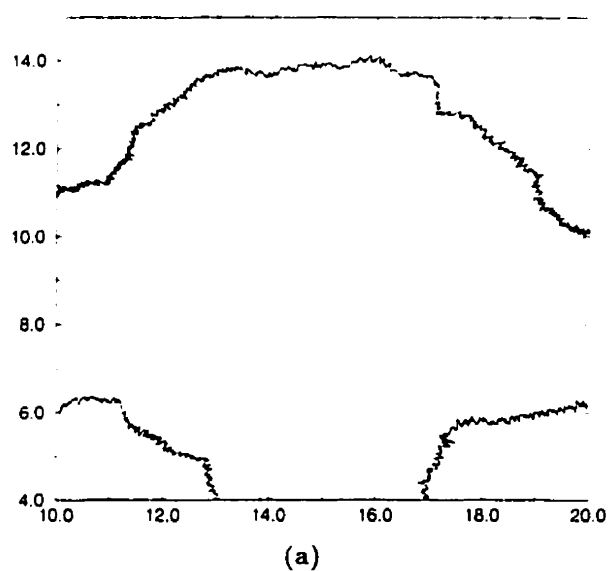


Figure 4.10 : Les mesures d'une intersection faite de trois murs : les murs générés (a), les mesures correspondantes (b).



Figure 4.11 : Quelques vues de mines virtuelles avec différents attributs (Suite pages 154 et 155)

par un véhicule lui aussi virtuel permet la création de profils des murs et du toit de chaque galerie et intersection (de tels profils sont montrés à la figure 4.7). Les mesures les plus contraignantes (les plus intérieures) sont ensuite extraites de chaque profil, mesures qui vont servir de données à la reconstruction de la mine suivant GNOMine (section 5.5).

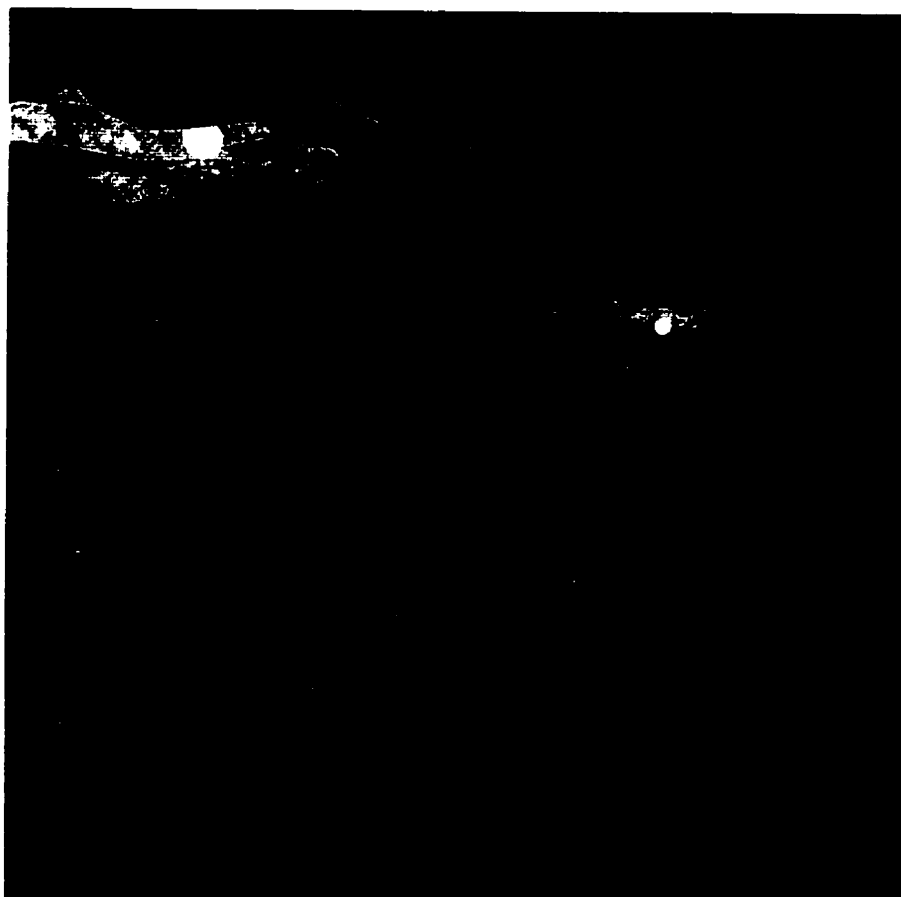


Figure 4.11 : (suite)

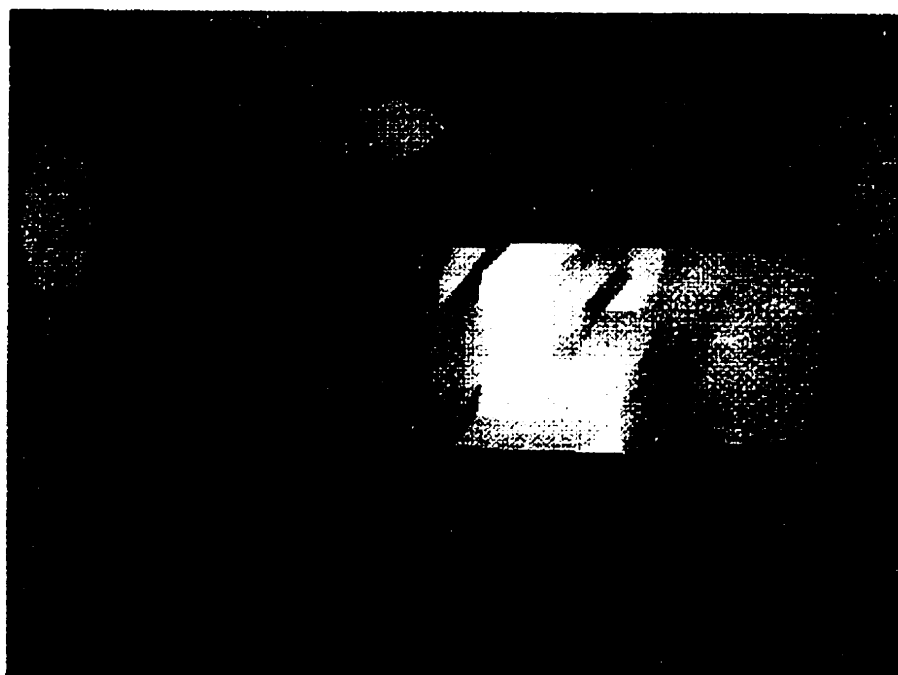


Figure 4.11 : (suite)

Chapitre 5

Construction de représentations d'excavations minières

Dans ce chapitre, nous abordons la reconstruction automatique des excavations de mines suivant le modèle de mine décrit au chapitre 3. Cette reconstruction peut être faite à partir de données d'arpentage traditionnel (chapitre 4). Toutefois, dans le contexte de l'automatisation minière, il est préférable d'utiliser les données produites lors de l'arpentage automatique de mine (section 4.2.3). En effet, ces données sont plus denses que celles fournies par un arpentage manuel et, comme nous le verrons dans ce chapitre, la densité des données est un élément contribuant à la qualité de la reconstruction. N'ayant pas accès à de telles données, faute d'existence d'un tel système, nous avons généré des séries de données synthétiques réalistes (section 4.3) à partir desquelles nous allons reconstruire la géométrie de la mine sous-jacente.

Le problème se pose comme suit :

Étant donnée une décomposition d'une mine en galeries et murs d'intersections et étant données des mesures d'arpentage effectuées dans ces différentes parties, il faut :

- *décomposer les galeries en tronçons de galerie clothoïdaux de largeur*

et hauteur constantes en préservant la continuité de position, orientation et courbure le long de l'axe créé, et déterminer les paramètres de ces tronçons,

- *décomposer les murs d'intersection en tronçons de mur tels que les angles des murs soient préservés et déterminer les paramètres des tronçons.*

Il y a donc, dans les deux cas, une segmentation à faire suivie d'un ajustement de paramètres pour approcher les données par une séquence de primitives.

Nous commençons par présenter les méthodes décrites dans la littérature pour construire des représentations suivant un modèle (section 5.1). La section 5.2 décrit ensuite la procédure de minimisation qui est utilisée ici pour ajuster les primitives aux données. Les sections 5.3 et 5.4 montrent comment les galeries et les murs d'intersection sont reconstruits. Enfin, la reconstruction des excavations d'une mine complète est décrite à la section 5.5. Notamment, nous verrons dans cette section comment sont construits les graphes des relations de décomposition, de connexion et de raccordement.

5.1 Les méthodes générales de reconstruction basée sur les modèles

La première méthode, probablement la plus courante, consiste à *approcher* des données bruitées par une primitive. Cela est fait en ajustant les paramètres de l'équation de la primitive de façon à minimiser une fonction de distance entre la primitive et les données. En règle générale, il s'agit de minimiser une mesure de l'erreur entre les

données et la primitive avec comme variables les paramètres :

$$\min_{\mathbf{p} \in \mathbb{R}^n} E(d, \mathbf{p}).$$

où E est l'erreur entre les données d et la primitive de paramètre \mathbf{p} . Diverses techniques de minimisation sont décrites dans (Gill et al. 1981). Par exemple, Whaite et Ferrie (1991) ajustent des superquadriques à des données de profondeur. Dans (MacKenzie et Dudek 1994), la primitive désirée est connue mais le nombre d'instances de cette primitive ne l'est pas. Plus précisément, un groupement de points va être approché par des segments de droites, les points étant des mesures de murs par sonar. Un premier segment est calculé comme étant l'axe principal de l'ellipse représentant la variance du groupement de points. Si la variance latérale est trop importante, alors le segment est coupé (récursivement) en deux. La représentation du groupement de points n'est donc pas connue à l'avance et la décomposition et l'identification sont simultanées. Dans (Lacroix et al. 1994), une carte d'élévation est approchée au sens des moindres carrés par des B-splines sur une grille d'abord grossière. Là où l'erreur est trop importante, une autre B-spline est calculée sur une grille plus fine. Ceci est effectué jusqu'à obtenir une erreur satisfaisante partout ou jusqu'à un niveau spécifié.

Une seconde méthode utilise les techniques de *régularisation*. Il s'agit de trouver l'équation paramétrique de la courbe, surface, etc., qui s'approche au mieux des données suivant une distance spécifiée. Cette solution n'est, en général, pas unique. Un terme de régularisation est donc ajouté. Ce terme introduit une contrainte sur la solution cherchée. Le but est de trouver u , une fonction d'une variable x , qui minimise

$$\int [\|u - d\|^2 + \lambda r(u)^2] dx,$$

(voir (Poggio et Koch 1985) pour une écriture plus générale). Ici, d est la donnée et $r(\cdot)$ est le terme de régularisation. λ est un coefficient qui permet d'ajuster l'importance

relative de la proximité aux données ($\|u - d\|^2$) et du terme de régularisation ($r(u)^2$). Une telle technique permet de décomposer les données tout en identifiant les parties. Par exemple, Blake et Zisserman (1987) font passer par des points de données la courbe la plus droite possible en introduisant une discontinuité si l'énergie (qui est la fonctionnelle à minimiser) introduite est inférieure à celle qui serait due à l'erreur entre la courbe sans discontinuité et les données. Dans (Dudek et Tsotsos 1991), des courbes avec une courbure cible sont cherchées (à la place de courbes rectilignes) en appliquant la même méthode.

Les deux méthodes précédentes supposent un grand nombre de mesures (ou de points) tout le long de l'objet à quantifier. Ce sont des méthodes *descendantes* (« top-down ») dans le sens où elles utilisent une contrainte globale sur la forme pour trouver la primitive « collant » aux données (Wu 1996). Par opposition, d'autres méthodes utilisent des contraintes locales fournies par les caractéristiques des primitives. Ce sont des méthodes *ascendantes* (« bottom-up » (Wu 1996)) qui n'utilisent généralement que peu de données. Par exemple, dans le système MOSAIC (Herman et Kanade 1984), des primitives topologiques (faces, arêtes, sommets) d'objets parallélépipédiques sont quantifiées par des primitives géométriques (plans, droites et points). Les intersections de lignes dans des images de scènes 3D forment des points qui sont utilisés pour calculer la position 3D réelle de ces points et former les primitives géométriques. Dans (Allen 1988), des quantifications de différents niveaux (ou plus ou moins grossières) sont aussi calculées à partir de données tactiles ou provenant d'un module de vision stéréo. Par exemple, les paramètres de pièces bicubiques sont calculés à partir d'un contour 3D et de quelques points intérieurs à celui-ci. D'autres quantifications sont des boîtes englobantes, des aires, des moments, etc. Bergevin et Levine (1993) donnent un autre exemple : des caractéristiques de segments, de courbes et de jonctions de dessins à base de traits (« line drawings ») servent à donner les géons qui peuvent représenter les parties d'un objet. L'*ajustement* fait aussi partie de ces méthodes. Le but est de trouver les paramètres d'une équation représen-

tant une courbe, une surface, etc., passant par un certain nombre de points. Pour une détermination complète des paramètres, il faut autant de points (ou plus généralement de mesures qui peuvent être des orientations, par exemple) que l'équation a de degrés de liberté (de variables indépendantes).

Dans les cas où une mesure d'une valeur particulière est nécessaire, il peut être intéressant de faire en sorte que celle-ci soit la plus précise possible. Un certain nombre d'outils pour la fusion de mesures bruitées en une mesure sont donnés dans (Atiya et Hager 1993, Crowley et Ramparany 1987, Durrant-Whyte 1988, Durrant-Whyte 1989, Smith et Cheeseman 1986). Une règle pour décider si deux mesures incertaines représentent la même valeur est donnée dans (Crowley et Ramparany 1987).

5.2 Minimisation

Dans notre cas, nous disposons de beaucoup de mesures qui sont fortement bruitées puisqu'elles proviennent d'un relief. Nous allons donc utiliser une méthode descendante de minimisation d'une fonction d'erreur entre les données et la primitive.

Les fonctions que nous devons minimiser pour résoudre notre problème étant instables — notamment dans le cas des galeries — et non convexes ni continue dans l'espace de leurs paramètres (sections 5.3.2 et 5.4.2), une méthode par recuit simulé a été adoptée. Ce type de méthode garantit statistiquement l'obtention du minimum global. Brièvement, son fonctionnement est le suivant. Un voisinage de la solution courante dans l'espace des paramètres va être exploré de façon aléatoire. Toute nouvelle solution meilleure que la solution courante sera acceptée. Une solution moins bonne peut aussi être acceptée avec une certaine probabilité, ceci ayant pour but de permettre à la procédure de sortir d'un minimum local. Cette probabilité décroît au cours du temps, traditionnellement suivant une distribution de probabilité de Boltzmann, c'est-à-dire proportionnelle à $\exp(-\Delta E/T)$ où ΔE est la différence d'énergie entre la nouvelle solution et la solution courante et T est la température courante

décroissante au cours du temps comme $T_0/\ln k$ où k est le temps. Il s'agit alors d'un recuit de Boltzmann (« Boltzmann annealing »). De plus, le voisinage est généralement réduit au cours du temps (Ingber 1996). Le logiciel de recuit simulé utilisé était anciennement connu sous le nom de VFSR (« Very Fast Simulated Re-annealing ») et est maintenant distribué comme ASA (« Adaptive Simulated Annealing »)⁽¹⁾. Cette procédure utilise une diminution exponentielle de la température, donc plus rapide que la précédente, tout en garantissant que le minimum global est statistiquement atteint (Ingber 1996). De plus, une température différente pour chacun des paramètres est utilisée afin de tenir compte de leur importance respective dans la fonction minimisée. À intervalles réguliers, la température est augmentée, différemment pour chaque paramètre suivant son importance, afin d'agrandir l'espace de recherche de nouvelles solutions. C'est ce qui est appelé le « reannealing ».

Pour ASA, l'espace de recherche doit être borné. Dans notre cas, les bornes sont données par la géométrie de la mine, par les capacités du véhicule utilisant la représentation de la mine ou suivant la confiance que nous avons dans l'estimation initiale des paramètres. Celles-ci seront explicitées plus loin pour les galeries et les intersections (section 5.3.3 et 5.4.3 respectivement).

5.3 Reconstruction des galeries

Intéressons-nous maintenant à la reconstruction des galeries à partir des données décrites à la section 4.3. Rappelons que pour une galerie, les données sont un ensemble de points 3D pour les murs droit et gauche. La droite et la gauche ne correspondent pas à un sens de parcours de la galerie et n'en définissent pas non plus. Elles ne font que définir une des extrémités de la galerie comme référence, les deux extrémités étant interchangeables aussi bien lors de la reconstruction que dans la représentation

⁽¹⁾Cette implantation a été trouvée à l'adresse Internet : <http://www.ingber.com/>. Elle a été réalisée par Lester Ingber et d'autres contributeurs.

finale (annexe A.2). Les deux premières coordonnées donnent la position horizontale du mur tandis que la dernière coordonnée donne la hauteur du mur.

Nous allons tout d'abord rappeler quelques points importants du modèle de galerie à la section 5.3.1. Ensuite, la section 5.3.2 explique la reconstruction : quelle est la fonction minimisée et quels en sont les paramètres. Nous allons voir qu'une segmentation initiale doit être faite. Elle est décrite à la section 5.3.3 tandis que la section 5.3.4 décrit un traitement postérieur à la minimisation qui permet d'obtenir la galerie finale. La section 5.3.5 décrit comment nous évaluons la reconstruction des galeries et la section 5.3.6 donne des résultats de reconstruction.

5.3.1 Rappel du modèle de galerie

Dans GNOMine (section 3.3), les galeries sont modélisées comme une séquence de tronçons de galerie représentés comme des cônes généralisés de section rectangulaire constante et d'axe clothoïdal. Les tronçons sont tels que leurs axes forment un axe (celui de la galerie) continu en position, orientation et courbure. Le modèle prévoit aussi le cas où une intersection est insérée entre deux tronçons de galerie ne préservant pas la continuité de position, d'orientation et de courbure de l'axe. Ce cas n'est pas considéré ici dans la mesure où le graphe initial d'exploration de la mine est supposé déjà contenir les intersections (section 4.2.3).

La courbure $\kappa(s)$ de l'axe d'un tronçon de galerie varie donc linéairement avec l'abscisse curviligne s :

$$\kappa(s) = \kappa_0 + ks.$$

où κ_0 est la courbure initiale et k le coefficient de variation de la courbure. κ_0 et k constituent deux premiers paramètres du tronçon. Il faut encore spécifier la longueur L , la largeur l et la hauteur h du tronçon.

La section suivante va décrire les paramètres utilisés pour représenter une galerie complète. Ce sont ces paramètres qui vont être estimés lors de la minimisation. La

distance minimisée va aussi être exprimée en fonction de ces paramètres.

5.3.2 Paramètres de la reconstruction des galeries

Les paramètres d'un tronçon de galerie considéré tout seul et dans son référentiel propre (section 3.4.3.3) sont la courbure initiale κ_0 , le coefficient de variation de la courbure k , la longueur L , la largeur l et la hauteur h . Dans une galerie, la continuité de courbure impose la valeur de κ_0 , sauf pour le premier tronçon. Les mesures de la galerie étant données dans un référentiel global (section 4.2.3), il faut aussi déterminer la position (x_0, y_0) et l'orientation τ_0 du début de l'axe de la galerie. Enfin, pour des raisons de commodité, nous allons spécifier le début des tronçons dans la galerie — l'abscisse curviligne du premier point de l'axe du tronçon sur l'axe de la galerie — au lieu de leur longueur. Le premier tronçon commence toujours à l'abscisse 0 : elle n'est donc pas incluse dans les paramètres de la galerie, qui s'écrivent donc :

$$\mathbf{p} = \begin{array}{ll} (x_0, y_0, \tau_0, \kappa_0, & \text{début de l'axe de la galerie} \\ k_1, l_1, h_1, & \text{premier tronçon} \\ s_{01}, k_i, l_i, h_i, \quad i = 2, \dots, n)^\top & \text{tronçons suivants} \end{array} \quad (5.1)$$

où n est le nombre de tronçons de galerie. Avec ces paramètres, la longueur du dernier tronçon n'est pas spécifiée. Pour cela, nous allons donner la longueur totale λ de la galerie. Ce paramètre n'est pas inclus dans \mathbf{p} (équation (5.1)) car il ne va pas faire partie de la minimisation. En effet, augmenter sa valeur ne pénalise pas la fonction minimisée (équation (5.2) plus loin). Par contre, diminuer sa valeur pénalise la fonction. Nous allons donc surestimer ce paramètre avant la minimisation puis en déterminer la bonne valeur après la minimisation⁽²⁾.

La reconstruction va consister en l'ajustement de \mathbf{p} afin de faire correspondre un

⁽²⁾Une surestimation de la longueur de la galerie ne pénalise pas la minimisation tandis que l'inclusion dans la fonction à minimiser d'un terme supplémentaire minimisant la longueur complique inutilement la minimisation.

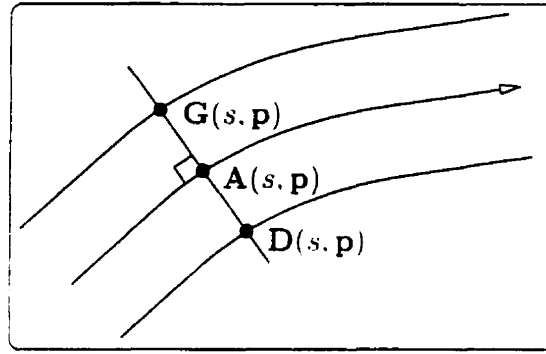


Figure 5.1 : Un point de l'axe de la galerie ainsi que les points des murs droit et gauche correspondant

modèle de galerie aux mesures dont nous disposons. Pour cela, nous allons minimiser une fonction de distance entre les mesures et la galerie⁽³⁾, cette fonction étant construite comme suit. Soit $A(s, p)$ le point de l'axe de la galerie de paramètres p à l'abscisse curviligne s . Soient $D(s, p)$ et $G(s, p)$ les points des murs droit et gauche respectivement correspondant à $A(s, p)$ (figure 5.1). Soit M_{D_k} [resp. M_{G_k}] la k -ième mesure à droite [resp. à gauche]. Sa position dans la galerie, autrement dit son abscisse curviligne s_{D_k} [resp. s_{G_k}], est l'abscisse curviligne s telle que la distance euclidienne $2D$ ⁽⁴⁾ entre M_{D_k} [resp. M_{G_k}] et $A(s, p)$ est minimale :

$$\begin{aligned} \forall s \in [0 : \lambda] \quad d_2(M_{D_k}, A(s_{D_k}, p)) &\leq d_2(M_{D_k}, A(s, p)), \\ \text{[resp. } \forall s \in [0 : \lambda] \quad d_2(M_{G_k}, A(s_{G_k}, p)) &\leq d_2(M_{G_k}, A(s, p))]. \end{aligned}$$

où $d_2(\cdot, \cdot)$ est la distance euclidienne 2D. Pour déterminer l'abscisse d'une mesure, nous considérons les points de l'axe de la galerie et non ceux du mur afin d'éviter le problème suivant (figure 5.2). Il est possible qu'un point de mur d'un tronçon

⁽³⁾ La galerie est celle définie par le vecteur p correspondant à la solution courante de la minimisation.

⁽⁴⁾ Pour trouver l'abscisse d'une mesure, la hauteur n'est pas utilisée car seule la forme (horizontale) de la galerie détermine la position des mesures le long de celle-ci.

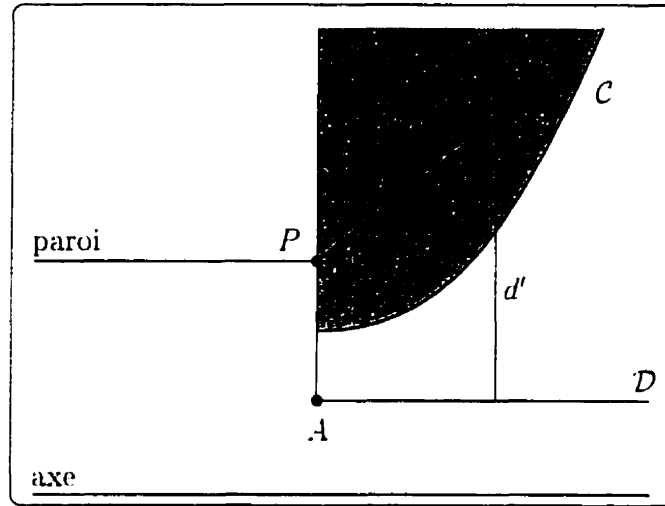


Figure 5.2 : L'abscisse d'une mesure est déterminée par rapport à l'axe et non par rapport au mur. En effet, tous les points dans la zone grise — dont une partie de la frontière est la parabole de foyer P et de directrice \mathcal{D} quand la galerie est rectiligne — sont plus proche de P que de n'importe quel point du mur du bon tronçon (demi-droite $[A, \mathcal{D}[$). Par exemple, pour la mesure M , nous avons $d < d'$.

donné soit plus proche d'une mesure que tout autre point de mur même si la mesure n'appartient clairement pas à ce tronçon.

Nous prenons comme fonction à minimiser la somme des carrés des distances entre les mesures et la galerie :

$$D(\mathbf{p}) = \sum_k d^2(\mathbf{M}_{D_k}, \mathbf{D}(s_{D_k}, \mathbf{p})) + \sum_k d^2(\mathbf{M}_{G_k}, \mathbf{G}(s_{G_k}, \mathbf{p})). \quad (5.2)$$

où $d(\cdot, \cdot)$ désigne, cette fois-ci, la distance euclidienne 3D. Dans ce cas, la distance 3D est utilisée car la hauteur de la galerie doit être déterminée.

La solution est trouvée en minimisant $D(\mathbf{p})$. Il s'agit donc d'une technique par approche des données par une primitive (section 5.1). La minimisation se fait dans un espace à $4n + 3$ dimensions où n est le nombre de tronçons de galerie.

Bien qu'ils soient d'ordres de grandeur très différents, nous n'avons pas normalisé

les paramètres. La première raison est qu'une normalisation se basant uniquement sur les valeurs des paramètres n'est pas suffisante. En effet, la fonction de distance est beaucoup plus sensible aux variations de certains paramètres (par exemple k_1 , τ_0 ou κ_0) qu'à celles d'autres paramètres (par exemple k_n , les hauteurs ou les largeurs). La seconde raison est que ASA tient compte de l'importance relative des divers paramètres (section 5.2)⁽⁵⁾.

Notons qu'une méthode par régularisation du type de celle utilisée par Blake et Zisserman (1987) a été envisagée. Toutefois, cette méthode présente certains inconvénients dans notre cas. Tout d'abord, elle nécessite autant de paramètres de tronçons (soit 4) qu'il y a de points considérés sur l'axe de la galerie. Pour un échantillonnage raisonnable de l'axe, cela conduit à un très grand nombre de paramètres, ce qui rend la minimisation très difficile car se produisant dans un espace ayant une dimension très importante. D'autre part, en supposant que la minimisation converge vers une solution, le résultat obtenu est un vecteur de paramètres de tronçon pour chaque point de l'axe de la galerie. Ces paramètres ont des valeurs idéalement constantes mais en pratique seulement très proches dans un tronçon et changent de façon significative lors d'un changement de tronçon. C'est ce qui donne la décomposition de la galerie en tronçons de galerie. Pour chaque tronçon, il faut trouver un vecteur de paramètres à partir des paramètres des points formant le tronçon. Comment ce vecteur peut-il être obtenu? Ceci reste une question ouverte. En effet, nous avons déjà mentionné l'instabilité de la forme de la galerie vis-à-vis du coefficient de variation de la courbure. Une valeur globale sur le tronçon extraite à partir des valeurs en chaque point ne donnera certainement pas la même forme de tronçon. Autrement dit, l'extraction de cette valeur unique du tronçon ne fera que détruire ce que la minimisation aura calculé. Pour ces raisons, nous avons choisi de travailler avec une notion de tronçons dès le départ de la minimisation.

⁽⁵⁾Nous avons vérifié expérimentalement que la normalisation basée sur l'ordre de grandeur des paramètres n'apporte rien au processus de minimisation de la fonction (5.2).

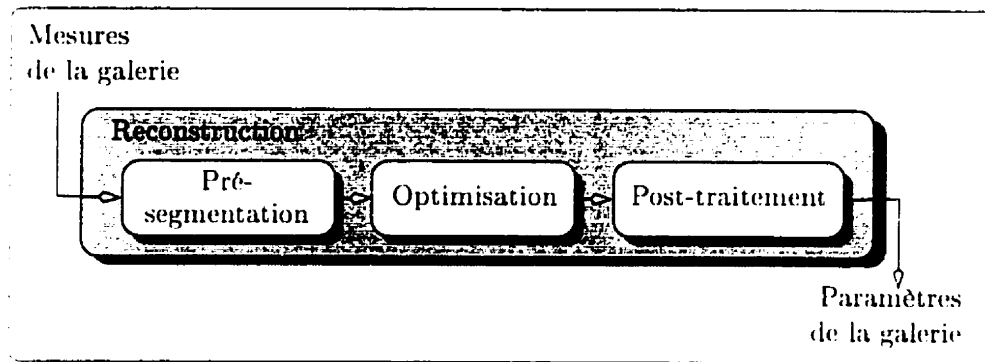


Figure 5.3 : Le processus complet de la reconstruction d'une galerie

Comme nous l'avons déjà mentionné, il nous faut déterminer, préalablement à la minimisation, le nombre de tronçons de galerie ainsi que la longueur totale de la galerie. De plus, afin d'accélérer la minimisation, nous calculons une valeur initiale de p . Ceci est décrit à la section 5.3.3, tandis que la section 5.3.4 décrit le traitement postérieur à la minimisation permettant de déterminer la longueur réelle de la galerie. La figure 5.3 récapitule ces étapes.

Le but de la méthode de reconstruction qui va être présentée dans ce qui suit est de montrer comment ce problème peut être résolu et non pas de produire un logiciel final. À ce titre, certains choix ont été faits suivant une idée préalable que nous avions des problèmes qui pouvaient se produire. Notamment, la pré-segmentation devait fournir aussi peu de tronçons que faire se peut afin d'obtenir une représentation la plus compacte possible. Ceci est aussi le meilleur moyen d'obtenir des tronçons longs, ce qui est désiré du point de vue de la navigation. En effet, des tronçons longs impliquent un contrôle du véhicule changeant peu fréquemment. Nous allons voir avec certains résultats (section 5.3.6.1) que cela n'est pas toujours la meilleure solution. Nous avons d'autre part décidé que le nombre final de tronçons devait être déterminé lors de la pré-segmentation. Ceci est motivé par le fait que remplacer plusieurs tronçons par un seul après l'optimisation ne ferait que détruire le résultat de l'optimisation, plusieurs clothoïdes ne pouvant généralement pas être remplacées par une seule.

5.3.3 Pré-segmentation d'une galerie : estimation initiale de ses paramètres

Nous déterminons ici la longueur de la galerie, le nombre de tronçons la constituant et une estimation grossière de ses paramètres.

Une transition entre tronçons de galerie se produit quand un changement significatif dans la valeur du coefficient de variation de la courbure, de la largeur et ou de la hauteur se produit. Pour déterminer le nombre de tronçons dans la galerie, il faut donc calculer ces valeurs le long de la galerie et déterminer le nombre de plateaux pour chacune d'elles, chaque plateau correspondant à un tronçon pour ce critère. Les tronçons ainsi trouvés doivent finalement être mis en correspondance.

Afin de déterminer le coefficient de variation de la courbure ainsi que la largeur en fonction de l'abscisse curviligne, il faut construire un axe de la galerie. Celui-ci va être l'axe médian (calculé à partir d'un algorithme décrit dans (Zhang et Suen 1984)) d'une forme représentant la projection de la galerie sur un plan horizontal. Notons que l'axe médian n'est pas l'axe de galerie, mais va permettre d'estimer les paramètres nécessaires. La forme est construite en joignant les projections des mesures sur le plan (figure 5.4). Afin d'obtenir un axe médian le plus régulier possible, la densité de points de la forme a été prise très élevée (arbitrairement un point par centimètre) et nous avons fait subir plusieurs érosions-dilatations à la forme (figure 5.5). Un axe est montré à la figure 5.6(a). Le lissage par érosion-dilatation a pour but d'obtenir un axe médian lisse et surtout sans mauvais segments en fin d'axe — créé par les angles des extrémités de la galerie⁽⁶⁾. Un phénomène d'embranchement multiple peut aussi se produire aux extrémités des galeries (figure 5.7(a)) ou même à l'intérieur de la galerie avec des données très bruitées.

L'orientation de l'axe médian en chacun de ses points est calculée. Pour ce faire, un certain nombre de tangentes sont calculées autour de chaque point de l'axe sur une

⁽⁶⁾ Comparons l'axe de la figure 5.6(b) obtenu à partir de la forme de la figure 5.4 (sans lissage) à l'axe de la figure 5.6(a).

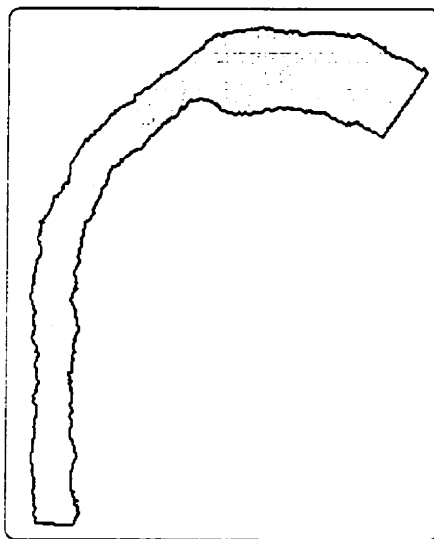


Figure 5.4 : La forme d'une galerie. Le contour est celui créé à partir des mesures de la galerie. L'intérieur est le remplissage du contour.

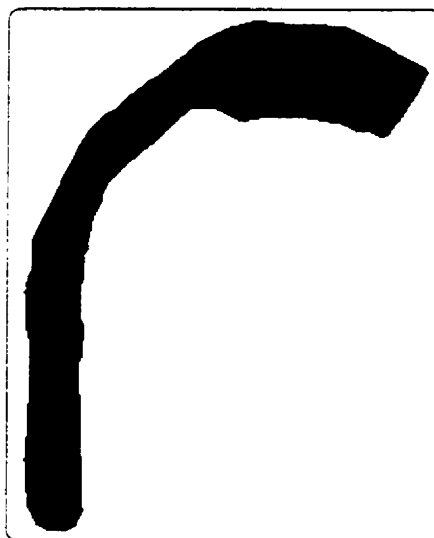


Figure 5.5 : La forme de la figure 5.4 après érosion et dilatation

distance qui peut être spécifiée. Ensuite, la valeur médiane est prise comme valeur de tangente en ce point.

Comme cela est visible sur les figures 5.6(a) et 5.7(b), la longueur de l'axe médian

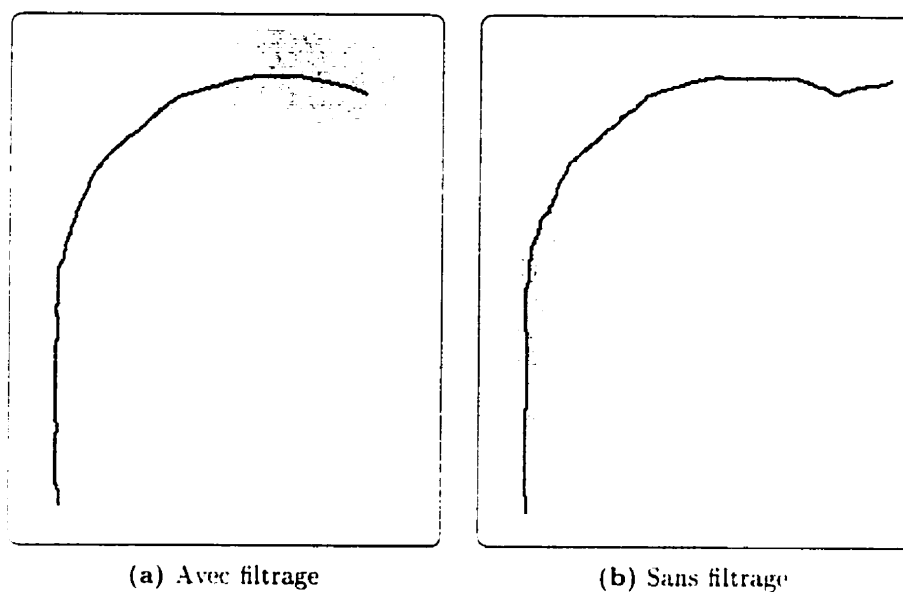


Figure 5.6 : L'axe médian de la galerie de la figure 5.4 avec ou sans filtrage

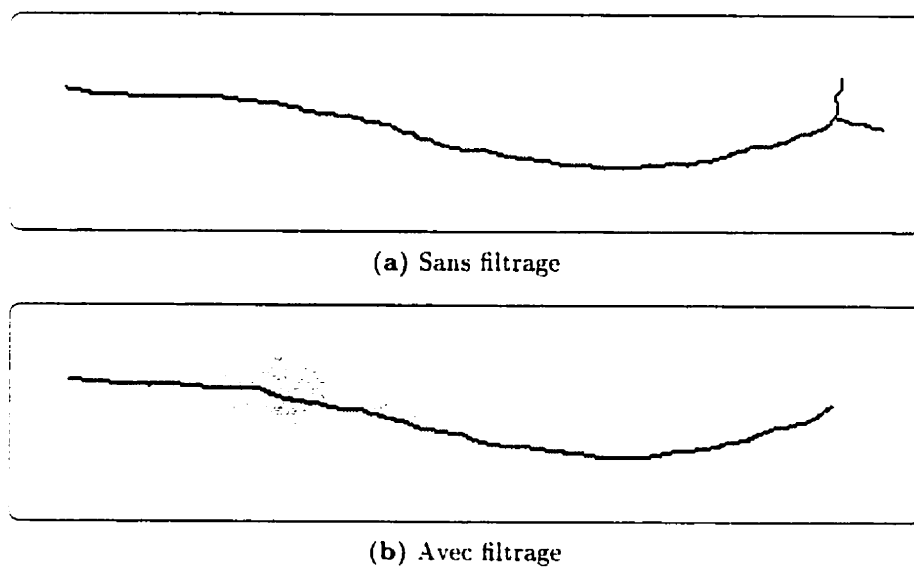


Figure 5.7 : Un autre problème lors de l'extraction de l'axe médian (a), éliminé par érosion-dilatation (b)

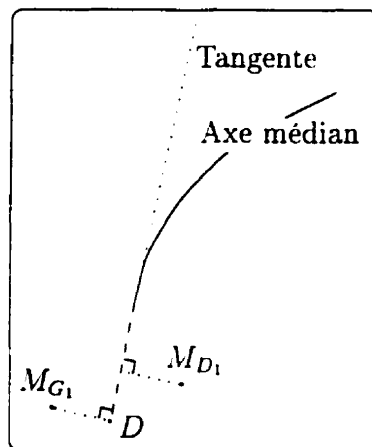


Figure 5.8 : Prolongement de l'axe médian. M_{G_1} [resp. M_{D_1}] est la première mesure à gauche [resp. à droite]. D est l'estimation initiale du début de la galerie

ne correspond pas à celle de l'axe de la galerie. L'axe médian va donc être prolongé par deux segments dont l'orientation est celle de l'axe médian à l'extrémité correspondante et dont la longueur est déterminée par les mesures (figure 5.8). La longueur de la nouvelle courbe ainsi formée est la longueur estimée de la galerie. Notons que cette longueur est surestimée par rapport à la longueur réelle dû au caractère discret de l'axe médian. L'extrémité du premier segment sert de valeur estimée initiale pour le premier point de l'axe de la galerie. L'orientation initiale estimée de l'axe de la galerie est l'orientation du début de l'axe médian.

Afin de décomposer la galerie, il nous faut exprimer les fonctions donnant le coefficient de variation de la courbure $k(s)$, la largeur $l(s)$ et la hauteur $h(s)$ en fonction de l'abscisse curviligne en chaque point de l'axe médian. Ces fonctions sont, théoriquement, constantes par morceaux et nous en cherchons les débuts de plateaux. Ceux-ci correspondent aux extrema de la dérivée des fonctions.

Le coefficient de variation de la courbure de l'axe est la dérivée seconde par rapport à l'abscisse curviligne de l'orientation de l'axe de la galerie, orientation calculée précédemment. Pour les fonctions donnant la largeur et la hauteur, nous commençons

par déterminer l'abscisse curviligne de chaque mesure à droite (ou à gauche) en cherchant le point de l'axe médian le plus proche horizontalement de la mesure. Le double de la distance horizontale entre la mesure et le point de l'axe correspondant donne la largeur tandis que la hauteur de la mesure donne la hauteur de la galerie en l'abscisse curviligne correspondante.

Dû aux divers bruits, approximations et lissages, les fonctions ne sont pas constantes par morceaux. Une dernière dérivation, elle aussi nécessitant un lissage, conduit donc à des fonctions présentant des pics étalés. La fonction est considérée comme présentant un pic quand sa valeur n'est pas nulle c'est-à-dire quand sa valeur absolue est supérieure à un seuil. Deux phénomènes se produisent : d'une part, les pics sont souvent déformés par des pics étroits et de faible amplitude et, d'autre part, les régions à valeur nulle des dérivées peuvent présenter des oscillations de faible amplitude et de grande période. Nous obtenons donc, pour chacun des critères, une série d'intervalles d'abscisses curvilignes contenant chacun un début de tronçon. Chaque intervalle représente l'incertitude sur le début du tronçon. Trois cas peuvent se produire selon la valeur du seuil (figure 5.9) :

1. le seuil est trop haut : dans ce cas il n'y a pas de détection :
2. le seuil est intermédiaire, ce qui conduit à une bonne détection mais éventuellement bruitée :
3. le seuil est bas, ce qui conduit à une bonne détection à laquelle s'ajoute de fausses détections.

Pour éviter le premier cas, nous utilisons un seuil conservateur basé sur le maximum de la dérivée. Dans le second cas, les petits tronçons détectés sont en fait la conséquence de bruit dans les mesures et/ou dérivations qui déforme un pic en une succession de petits pics. Donc, quand un petit tronçon est détecté, nous le fusionnons avec le suivant de telle sorte que le début du tronçon résultant est caractérisé par un intervalle dont le début est le début de l'intervalle du tronçon court et la fin est la fin

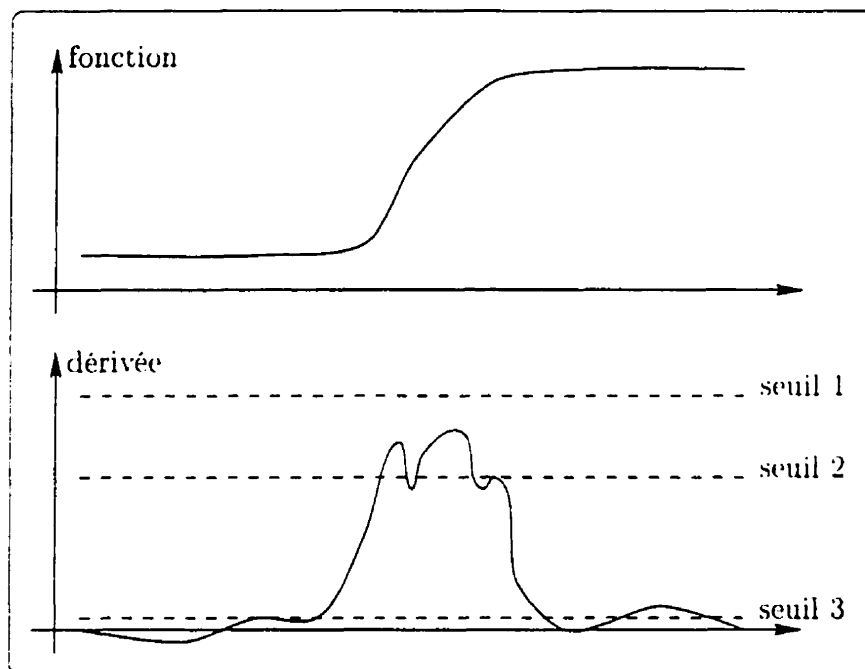


Figure 5.9 : Les différents cas de valeurs du seuil pour la détection des débuts de tronçons

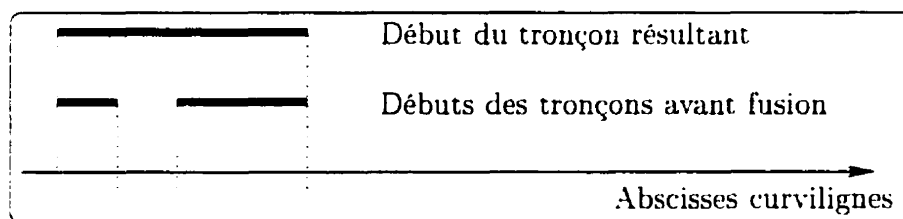


Figure 5.10 : La fusion d'un tronçon court avec le suivant

de l'intervalle du second tronçon (figure 5.10). De cette manière, l'imprécision sur le début du tronçon résultant correspond bien à la largeur du pic. Dans le troisième cas, les mauvais tronçons détectés ont la même valeur de critère (coefficient de variation de la courbure, largeur ou hauteur). C'est sur cette base que de tels tronçons sont éliminés.

Si deux mesures différentes conduisent à spécifier un même événement (ici un

début de tronçon) par deux intervalles⁽⁷⁾ ayant une intersection non vide, alors l'événement se trouve caractérisé par l'intersection des deux intervalles (Crowley et Ramparany 1987, Atiya et Hager 1993, Sutherland et Thompson 1994). C'est ce principe qui est appliqué pour mettre en correspondance et fusionner les tronçons obtenus suivant les trois critères.

Une dernière suppression de tronçon est faite. En effet, à cause d'éventuels problèmes de l'axe médian à ses extrémités (figures 5.6(b) et 5.7(a)) et surtout à cause des problèmes de dérivation et lissages aux extrémités d'intervalles, les débuts de tronçons plus proches du début ou de la fin de la galerie que la distance de filtrage sont probablement incorrects — et certainement courts. Ils sont donc supprimés.

Le milieu des intervalles est finalement pris comme estimation initiale du début des tronçons pour la minimisation. Une estimation initiale des autres paramètres des tronçons, à savoir le coefficient de variation de la courbure, la largeur et la hauteur, doit aussi être déterminée. Pour chaque tronçon, nous allons prendre le coefficient de variation de la courbure parmi les valeurs prises par la fonction $k(s)$ pour ce tronçon qui va minimiser la fonction (5.2). Les largeurs et hauteurs n'ayant qu'une très faible influence sur la valeur de la fonction (5.2), les valeurs sont choisies comme étant la médiane de $h(s)$ et $l(s)$ pour chacun des tronçons.

Il faut donner des bornes pour les différents paramètres de la minimisation (section 5.2). Les paramètres de positionnement de la galerie (x_0 , y_0 et τ_0) sont supposés être estimés correctement lors de la pré-segmentation à plus ou moins la largeur de la galerie pour la position et $\pi/4$ pour l'orientation. La courbure initiale et les coefficients de variation de la courbure sont limités par la capacité du véhicule utilisant la représentation. Chaque début de tronçon est limité par la mi-distance entre lui-même et les débuts de tronçons l'encadrant. Enfin, les largeurs et hauteurs sont limitées par des valeurs maximales typiques de largeur et hauteur de galerie. Nous constatons donc que des intervalles dépendent (un peu arbitrairement) de la confiance que

⁽⁷⁾Notons qu'il peut s'agir d'intervalles multidimensionnels ou de formes géométriques complexes.

nous avons dans la pré-segmentation tandis que d'autres dépendent d'une connaissance de l'environnement ou de l'utilisateur de la représentation. Dans ce dernier cas, si la pré-segmentation fournit une valeur hors des bornes, alors les bornes sont réajustées⁽⁸⁾.

5.3.4 Post-traitement

Les résultats de la minimisation doivent être traités. En effet, la longueur de la galerie utilisée pour la minimisation est plus grande que la longueur réelle (section 5.3.3). Il faut donc déterminer, dans la galerie obtenue, la portion couvrant effectivement les mesures. Ceci est fait en examinant les abscisses des premières et dernières mesures.

Remarquons que ce traitement permet éventuellement d'éliminer des tronçons de galerie inutiles. En effet, il est possible que des tronçons commencent après la dernière mesure ou finissent avant la première mesure. Dans ce cas, ces tronçons sont éliminés lors du post-traitement.

5.3.5 Critères de qualité de la reconstruction des galeries

Afin de pouvoir apprécier les résultats de la reconstruction, il nous faut au préalable définir des critères d'évaluation.

L'évaluation de la reconstruction des galeries n'est pas une tâche aisée. En effet, les techniques traditionnelles d'évaluation ne peuvent pas être appliquées directement dans notre cas. Décrivons brièvement ces techniques et comment nous les avons utilisées ici.

La première façon d'évaluer une reconstruction comme celle que nous avons est de la comparer à la réalité en exprimant une fonction de distance entre les paramètres reconstruits et réels. Cette fonction de distance doit représenter tous les aspects de la reconstruction et fournir une mesure globale de la qualité de la reconstruction.

⁽⁸⁾Ceci peut se produire quand la galerie n'est pas conforme à notre connaissance du milieu et réajuster les bornes correspond à une amélioration de cette connaissance.

Dans notre cas, le problème est que tout ce qui est à notre disposition est la galerie originale à laquelle un relief a été ajouté, relief qui a servi à générer les mesures. Or le relief est, par nature, biaisé et la galerie originale n'est donc pas nécessairement la meilleure au sens de la fonction minimisée. Nous ne pouvons donc pas directement et globalement comparer les paramètres de la galerie reconstruite avec ceux de la galerie originale. Une analyse quantitative et qualitative va devoir être faite afin de noter les ressemblances et surtout d'expliquer les différences.

La seconde méthode consiste en la vérification que la fonction minimisée est à son minimum global et en l'étude des distances entre les données et la primitive reconstruite. Ces distances doivent être faibles et leur distribution étroite, le bruit étant généralement relativement faible. Dans notre cas, ces distances, comme la valeur de la fonction minimisée, sont autant fonction de la qualité de la reconstruction que du relief puisque la galerie est supposée passer au plus près des mesures tout en respectant un certain nombre de contraintes. Nous allons donc étudier les distances entre les mesures et la galerie reconstruite mais en les relativisant par rapport aux distances obtenues avec la galerie originale.

Nous allons donc avoir une série de critères globaux à toute la galerie et une série de critères locaux à chaque tronçons. Les critères globaux concernent le positionnement général de la galerie, le nombre de tronçons la formant et sa fidélité aux mesures :

- Le positionnement est donné par la position de l'entrée (x_e, y_e) et de la sortie (x_s, y_s) ainsi que la longueur L de la galerie. Le positionnement est important dans la mesure où il faudra par la suite connecter la galerie aux intersections présentes à ces extrémités.
- Le nombre N de tronçons permet d'évaluer la pré-segmentation.
- La fidélité aux mesures est caractérisée par la moyenne $\langle d_3 \rangle$, l'écart-type σ_{d_3} et le maximum $d_{3\max}$ des distances 3D entre les mesures et la galerie (voir la section 5.3.2).

Les critères locaux concernent le positionnement des tronçons, leur forme, leur ouverture et leur fidélité aux mesures :

- Le positionnement est donné en termes de point d'entrée (abscisse curviligne dans la galerie s_0 et position absolue (x_0, y_0)) et d'orientation τ_0 à l'entrée.
- La forme dépend de la courbure initiale κ_0 , du coefficient de variation de la courbure k et de la longueur L du tronçon.
- L'ouverture est définie par la largeur l et la hauteur h .
- La fidélité aux données est exprimée en termes de moyenne, écart-type et maximum des distances latérales à droite (respectivement $\langle d_d \rangle$, σ_{d_d} et $d_{d\max}$) et à gauche (respectivement $\langle d_g \rangle$, σ_{d_g} et $d_{g\max}$) et verticales (respectivement $\langle d_v \rangle$, σ_{d_v} et $d_{v\max}$) entre mesures et galerie. Ces distances sont signées : une distance positive indique une mesure à l'extérieur de la galerie.

Nous suivrons ce plan pour discuter des premiers résultats que nous allons présenter plus loin. Pour les résultats suivants, seuls les faits nouveaux seront détaillés. Des remarques importantes pour l'évaluation des reconstructions seront mises en exergue lors de la discussion des résultats.

Notons que les paramètres locaux des tronçons qui vont être donnés dans les tableaux de résultats ne sont pas les paramètres de la galerie (équation (5.1)). En effet, ils sont très largement redondants par rapport à ces derniers⁽⁹⁾. Toutefois, ils permettent une étude plus détaillée des tronçons. La moyenne des distances permet de savoir comment se situe la galerie par rapport aux mesures tandis que l'écart-type et la distance maximale donnent la distribution des mesures autour de la galerie. Dans les critères locaux, nous avons utilisé des distances signées afin de voir comment les tronçons reconstruits se situent par rapport aux mesures. Par exemple, une distance

⁽⁹⁾Par exemple, les courbures initiales des tronçons dépendent de la courbure initiale de la galerie et des coefficients de variation de la courbure et longueurs des tronçons précédents.

latérale droite positive en moyenne indiquera que le mur droit du tronçon est trop à gauche. Dans certains cas, nous présenterons la courbe des distances latérales droite et gauche en fonction de l'abscisse curviligne pour chaque tronçon ainsi que la régression linéaire de ces courbes. Ceci permet de voir plus précisément l'évolution de chaque tronçon par rapport aux mesures.

Afin de tester la reconstruction, nous avons effectué plusieurs expérimentations. La première consiste en la reconstruction de galeries de formes différentes ayant des caractéristiques particulières, comme par exemple des tronçons successifs très différents ou au contraire similaires. Nous avons ensuite fait varier l'amplitude et la régularité du relief. La sensibilité à la densité des mesures a ensuite été testée. Enfin, nous avons généré un certain nombre d'ensembles de mesures à partir de la même galerie originale à laquelle nous avons ajouté un relief différent à chaque fois mais ayant les mêmes paramètres. Cette dernière expérience va nous permettre effectivement de comparer la reconstruction avec l'original.

5.3.6 Résultats

5.3.6.1 Expérience 1 : des galeries de divers types

Nous reconstruisons ici des galeries ayant des formes différentes pour étudier la robustesse du système face à divers cas qui peuvent se produire.

La galerie 1. Cette galerie est constituée de trois tronçons très différents par leur largeur, hauteur et coefficient de variation de la courbure. Elle constitue un exemple simple. La figure 5.11 montre la galerie reconstruite ainsi que les mesures. Chaque losange indique une extrémité de tronçon. Étudions d'abord les critères globaux (tableau 5.1) de la galerie, en commençant par le positionnement. Nous constatons tout d'abord que la galerie reconstruite est plus courte que la galerie originale d'environ 1.5%. Ceci est principalement dû au fait que les première et dernière mesures se situent respectivement après le début et avant la fin de la galerie originale. Ceci

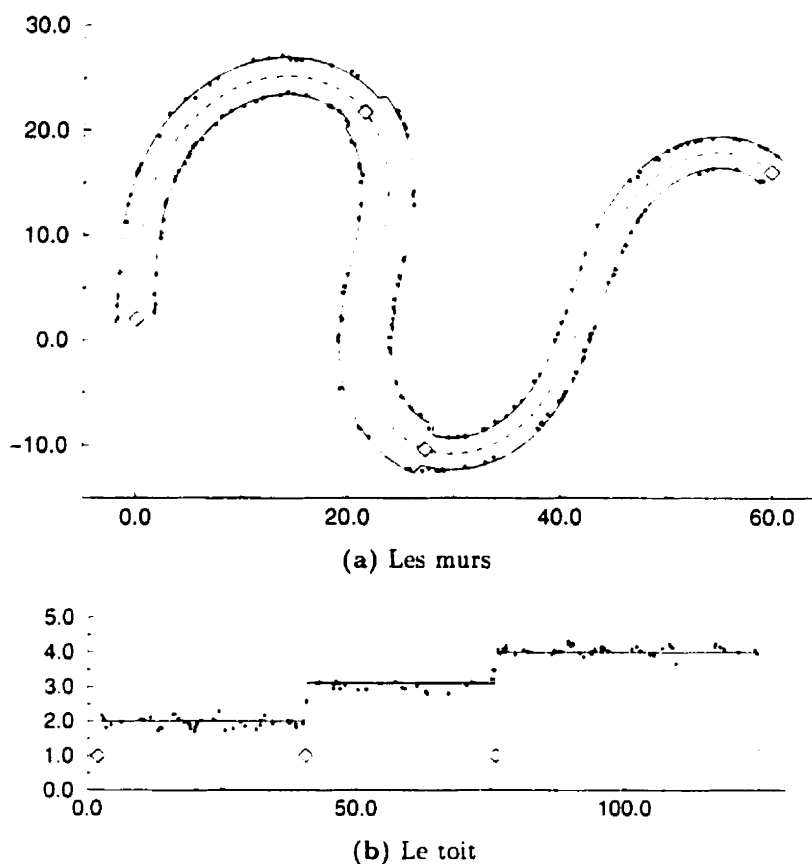


Figure 5.11 : Les mesures et la reconstruction de la galerie 1

est particulièrement visible à la figure 5.11(a) et dans la valeur de y_e .

Il y a généralement un décalage longitudinal des points d'entrée et de sortie de la galerie reconstruite par rapport à la galerie originale, décalage d'autant plus important que la densité des mesures est faible. En conséquence, la galerie reconstruite est aussi généralement plus courte que la galerie originale

L'entrée présente un décalage latéral de 6 cm par rapport à la galerie originale. La figure 5.11(a) semble pourtant montrer que la galerie suit les mesures, ce qui est confirmé par la figure 5.12. Celle-ci montre les courbes des distances latérales droite

Tableau 5.1 : Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 1 :
les critères globaux

Paramètres	Galerie	
	orig.	rec.
L	125.00	123.06
x_e	0.00	0.06
y_e	0.00	1.99
x_s	60,17	59.80
y_s	15,79	16,04
N	3	3
$\langle d_3 \rangle$	0.19	0.23
σ_{d_3}	0.16	0.31
$d_{3\max}$	1,29	0.87

Tableau 5.2 : Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 1 :
les critères par tronçon

Paramètres	Tronçons					
	orig.	rec.	orig.	rec.	orig.	rec.
s_0	0.00	0.00	40.00	38.58	75.00	73.92
x_0	0.00	0.06	21.02	21.45	26.51	27.29
y_0	0.00	1.99	22.34	21.72	-9.98	-10.43
τ_0	90.00	91.45	-47.48	-50.84	-24.78	-20.83
κ_0	0.000	-0.008	-0.120	-0.116	0.143	0.142
k	-0.00300	-0.00286	0.00750	0.00741	-0.00600	-0.00605
L	40.00	38.58	35.00	35.34	50.00	49.14
l	3.50	3.53	5.00	4.92	3.00	3.03
h	2.00	1.98	3.00	3.10	4.00	3.99
$\langle d_d \rangle$	-0.02	-0.01	-0.04	0.07	0.11	-0.04
σ_{d_d}	0.11	0.15	0.18	0.20	0.26	0.23
$d_{d\max}$	0.21	-0.26	-0.53	0.48	1.02	0.58
$\langle d_g \rangle$	0.02	0.02	-0.02	-0.03	-0.05	-0.04
σ_{d_g}	0.18	0.22	0.10	0.20	0.11	0.19
$d_{g\max}$	-0.37	-0.42	-0.21	-0.47	0.38	-0.41
$\langle d_v \rangle$	-0.08	-0.06	-0.07	-0.09	0.03	0.07
σ_{d_v}	0.14	0.14	0.24	0.19	0.19	0.12
$d_{v\max}$	-0.32	-0.30	-1.08	-0.55	-0.79	-0.33

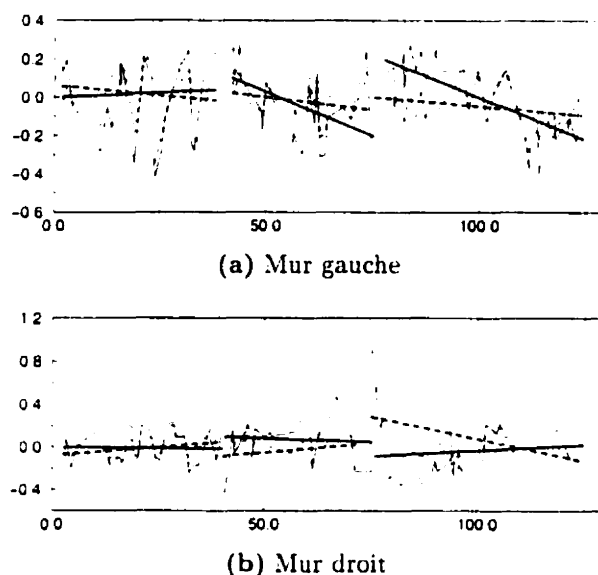


Figure 5.12 : Les distances latérales à droite et à gauche pour chaque tronçon de la galerie 1 ainsi que leur régression linéaire (galerie reconstruite en traits pleins, galerie originale en traits en tirets)

et gauche par tronçon ainsi que leur régression linéaire qui montre l'allure générale de ces courbes. Nous pouvons constater, d'après ces courbes, que les mesures sont bien réparties de part et d'autre des murs, au moins pour le premier tronçon. Le point de sortie de la galerie reconstruite est décalé latéralement par rapport à celui de la galerie originale d'environ 25 cm (tableau 5.1). La figure 5.11(a) montre d'autre part que les deux dernières mesures du mur droit sont nettement à l'intérieur de la galerie (d'environ 40 cm d'après la figure 5.12). Mais ces deux mesures correspondent clairement à une bosse du relief vu l'allure générale de la courbe des distances latérales droites. Cette même courbe, ainsi que sa régression linéaire, montre que le mur droit est correctement placé par rapport aux mesures (la pente de la droite de régression est faible et la droite est à une hauteur proche de 0, ce qui correspond à un $\langle d \rangle$ faible).

Le nombre de tronçons pour les deux galeries (reconstruite et originale) est identique, dû au fait que les tronçons sont très distincts les uns des autres.

Qu'en est-il de la fidélité globale aux mesures ? La moyenne des distances entre les mesures et la galerie reconstruite est très légèrement supérieure à celle des distances entre mesures et galerie originale d'une quantité (4 cm) pas vraiment significative d'un mauvais fonctionnement. L'écart-type est nettement supérieur (le double) alors que le maximum est nettement inférieur. Ceci provient du fait que la reconstruction se fait en minimisant la somme du carré des distances, quantité pénalisant fortement les grandes distances. Ceci a pour conséquence de diminuer ces grandes distances au détriment de l'écart-type.

Il est normal d'obtenir pour la galerie reconstruite un maximum des distances entre mesures et murs plus faible et un écart-type de ces mêmes distances plus élevé que les quantités correspondantes de la galerie originale. C'est un artéfact de la fonction minimisée.

Notons que ces grandes distances proviennent généralement des mesures au niveau des changements de tronçons. En effet, les mesures proviennent d'un relief qui est continu spatialement alors que le mur reconstruit n'est pas continu aux changements de tronçons si les tronçons n'ont pas la même largeur ou hauteur (ceci est confirmé par la figure 5.12 et par le tableau 5.11 page 199 qui montre que dans un cas où les tronçons ont les mêmes largeurs et hauteurs, les maxima et écarts-types des distances sont sensiblement les mêmes entre la galerie reconstruite et la galerie originale). Par contre, si le relief présente un creux prononcé et que de nombreuses mesures sont prises dans ce creux, alors la reconstruction va avoir tendance à décaler la galerie reconstruite dans ce creux⁽¹⁰⁾. Ceci montre que la fonction minimisée devrait considérer les distances

⁽¹⁰⁾Notons toutefois qu'un creux prononcé est très rare dans une galerie de mine pour des raisons économiques. Si un tel creux existe, c'est qu'il a été créé, par exemple, pour permettre à des véhicules de se croiser. Dans ce cas, le creux sera considéré comme une intersection où une salle dans notre représentation.

au lieu de leur carré⁽¹¹⁾.

Regardons maintenant les critères locaux de qualité de la reconstruction, et tout d'abord le positionnement. La différence de positionnement du premier tronçon a déjà été discutée. Les débuts du second et du troisième tronçons sont respectivement à 75 et 90 cm des tronçons correspondants de la galerie originale (tableau 5.2). Mais cette distance est presque totalement longitudinale puisque la distance latérale est de 10 et 8 cm respectivement⁽¹²⁾. Or, l'amplitude maximale du relief était de 50 cm (avec un écart-type de la gaussienne du mouvement brownien de 15 cm, ce qui donne un relief peu régulier, voir l'expérience 2, page 200). L'écart latéral est donc tout à fait raisonnable vu le relief. Quant à l'écart longitudinal, notons que la distance longitudinale moyenne entre les mesures est d'environ 1 m (pour cette galerie) et que nous ne pouvons nous attendre à obtenir un positionnement longitudinal meilleur que ça. Enfin, les orientations initiales sont les mêmes à moins de 4° près.

Le positionnement des tronçons doit être comparé latéralement au relief et longitudinalement à la densité des mesures. L'orientation des tronçons, quant à elle, doit être très proche de l'orientation des tronçons originaux, si le positionnement longitudinal est proche de l'original. Dans le cas contraire, il faut comparer l'orientation du tronçon reconstruit à ce qu'elle serait dans le tronçon original correspondant en ce point de l'axe.

Comparons maintenant la forme des tronçons. Celle-ci est définie par la courbure initiale, le coefficient de variation de la courbure et la longueur du tronçon. Le premier tronçon reconstruit n'est pas initialement droit ($\kappa_0 \neq 0$). Toutefois, ce tronçon commence environ 2 m plus loin que le tronçon original dont la courbure en cet endroit est de -0.006 m^{-1} contre -0.008 m^{-1} pour le tronçon reconstruit. Ces deux valeurs ne

⁽¹¹⁾Nous avons utilisé le carré pour des raisons de temps de calcul, la quantité de distances calculées pour une minimisation étant très importante.

⁽¹²⁾Ces valeurs sont calculées par rapport à la position et orientation du début des tronçons originaux.

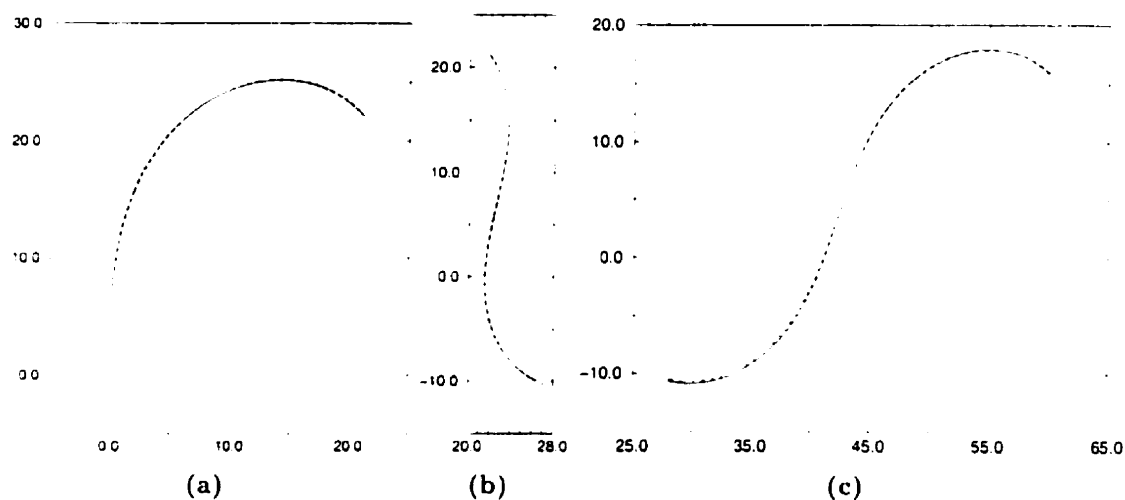


Figure 5.13 : Les axes des tronçons de la galerie 1 reconstruite (traits pleins) et originale (traits tirets)

sont pas très différentes et sont surtout très faibles. Les tronçons suivants présentent aussi une légère différence explicable entre autre par le fait que les tronçons reconstruits et originaux ne commencent pas exactement aux mêmes abscisses curvilignes dans la galerie. Les axes des tronçons sont d'ailleurs quasiment confondus (voir la figure 5.13).

En ce qui concerne l'ouverture, c'est-à-dire la largeur et la hauteur, les différences entre les tronçons originaux et reconstruits sont faibles par rapport aux dimensions des tronçons et au relief (voir les écarts-types des distances latérales et verticales dans le tableau 5.2).

Étudions la fidélité aux données par tronçon. Le tableau 5.2 donne les valeurs moyennes, écarts-types et valeurs maximales des distances latérales droite et gauche et verticales pour les tronçons originaux et reconstruits. Nous pouvons constater que ces valeurs sont tout à fait comparables ce qui montre que du point de vue des distances par tronçon la galerie reconstruite est aussi bonne que la galerie originale. Regardons toutefois plus en détail les distances latérales. La figure 5.12 permet d'abord d'avoir

un aperçu graphique de ce qui est résumé dans le tableau 5.2. Mais, en plus, ces courbes mettent en évidence la pente non négligeable des droites de régression de la distance latérale gauche des deuxième et troisième tronçons. Ceci montre que la galerie reconstruite ne suit pas très bien les mesures puisque celles-ci sont plutôt à l'extérieur au début de ces tronçons puis à l'intérieur à la fin. Ce phénomène est d'ailleurs visible à la figure 5.11(a). Toutefois, cet écart n'est pas très grand puisque de l'ordre de 20 cm vers l'extérieur au début et 20 cm à l'intérieur à la fin, soit une déviation latérale d'environ 40 cm sur 35 m de galerie. Les mêmes courbes pour la galerie originale montrent que cela ne provient pas des mesures — les droites de régression sont relativement horizontales — mais bel et bien de la reconstruction.

Les distances latérales par tronçon permettent de voir comment sont positionnés les tronçons par rapport aux mesures. Une valeur moyenne nulle est idéale. Des valeurs moyennes droite et gauche de signes opposés montrent un décalage du tronçon par rapport aux mesures. Les courbes donnant ces distances latérales en fonction de l'abscisse curviligne et surtout leur régression linéaire permettent une étude plus précise du positionnement des tronçons par rapport aux mesures le long des tronçons.

En conclusion pour la galerie 1 :

- La décomposition est correctement faite.
- Les tronçons reconstruits sont correctement positionnés et ont une bonne forme et ouverture par rapport aux tronçons originaux compte tenu des paramètres du relief (amplitude de 50 cm).
- La position globale des tronçons est correcte par rapport aux mesures mais présente de légers décalages locaux.

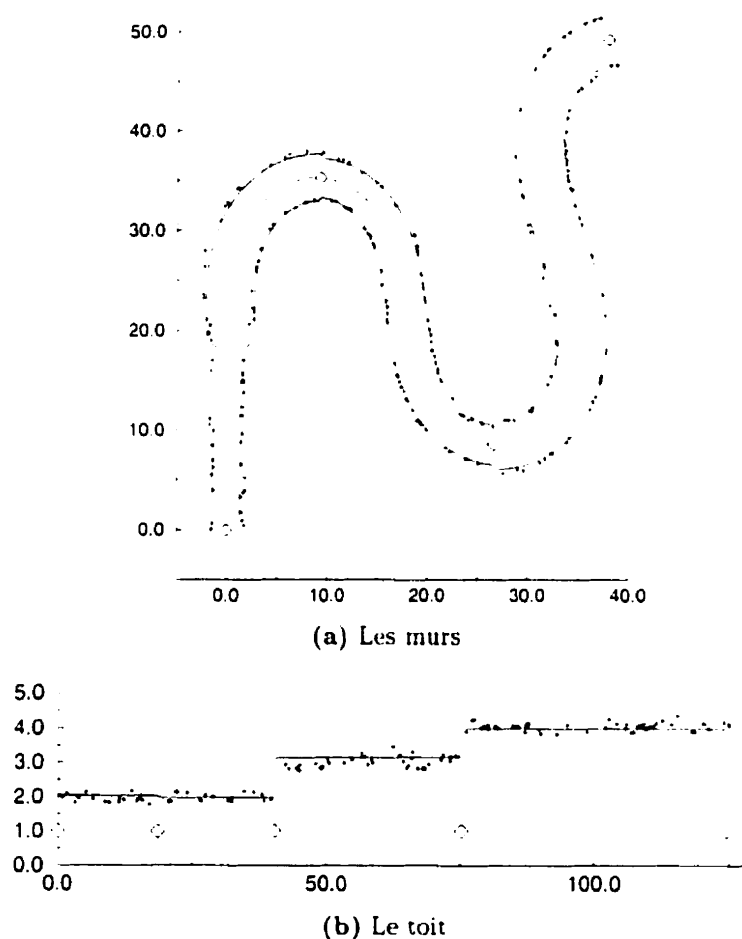


Figure 5.14 : Les mesures et la reconstruction de la galerie 2

La galerie 2. Cette galerie est une variante de la galerie 1 qui nous permet de tester l'influence d'un tronçon rectiligne sur les tronçons suivants : le premier tronçon a été remplacé par deux tronçons deux fois plus courts, le premier étant rectiligne — les coefficients de variation de la courbure des autres tronçons ont été ajustés afin de conserver une forme de galerie semblable. La figure 5.14 montre la galerie reconstruite ainsi que les mesures à partir desquelles la galerie a été reconstruite.

Le tableau 5.3 montre que la galerie est globalement bien positionnée mais aussi qu'elle est assez éloignée des mesures. Étudions donc plus en détail la galerie recons-

Tableau 5.3 : Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 2 : les critères globaux

Paramètres	Galerie	
	orig.	rec.
L	125.00	124.29
x_e	0.00	-0.08
y_e	0.00	-0.01
x_s	38.44	37.86
y_s	49.14	49.29
N	4	4
$\langle d_3 \rangle$	0.19	0.26
σ_{d_3}	0.12	0.24
$d_{3\max}$	0.85	0.80

truite et en particulier les distances latérales dans le tableau 5.4. Ces distances montrent que les deux premiers tronçons sont éloignés des mesures : le mur gauche du premier tronçon ainsi que les deux murs du second tronçon sont globalement trop à droite. De plus, cet écart se répercute sur les tronçons suivants tout en s'atténuant petit à petit, ce qui est visible aux figures 5.15 et 5.16. Ces figures montrent aussi que le premier tronçon, au lieu d'être rectiligne, oscille autour des mesures à droite (figure 5.16) et du tronçon original correspondant (figure 5.15(a)).

En conclusion pour la galerie 2 :

Le système de reconstruction des galeries ne sait pas produire des galeries rectilignes : à la place, une galerie oscillant autour des mesures est reconstruite. L'erreur introduite se répercute sur le reste de la galerie tout en s'atténuant petit à petit.

La galerie 3. Cette galerie est constituée de trois tronçons. Le premier est circulaire ($\kappa_0 \neq 0$, $k = 0$), le dernier rectiligne ($\kappa_0 = 0$, $k = 0$) et le second fait la transition entre les deux ($\kappa_0 \neq 0$, $k \neq 0$). Les deux premiers tronçons ont la même hauteur. Par contre, leurs largeurs sont différentes, mais le second tronçon étant court (5 m).

Tableau 5.4 : Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 2 : les critères par tronçon

Paramètres	Tronçons							
	orig.	rec.	orig.	rec.	orig.	rec.	orig.	rec.
s_0	0,00	0,00	20,00	18,48	40,00	40,12	75,00	75,11
x_0	0,00	-0,08	0,00	0,36	8,88	9,24	26,25	26,58
y_0	0,00	-0,01	19,99	18,72	35,43	35,30	8,41	8,55
τ_0	90,00	92,44	90,00	90,89	-1,72	-3,37	-6,64	-5,48
κ_0	0,000	-0,019	0,000	0,012	-0,160	-0,160	0,155	0,155
k	0,00000	0,00180	-0,00800	-0,00820	0,00900	0,00909	-0,00600	-0,00597
L	20,00	18,48	20,00	21,63	35,00	34,99	50,00	49,18
l	3,00	2,74	5,00	4,78	4,00	3,91	5,00	4,81
h	2,00	2,02	2,00	1,96	3,00	3,14	4,00	3,98
$< d_d >$	0,01	0,01	-0,10	-0,21	-0,06	0,05	-0,02	0,10
σ_{d_d}	0,12	0,29	0,12	0,16	0,08	0,14	0,12	0,19
$d_{d_{\max}}$	0,27	0,50	-0,37	-0,59	-0,22	0,29	-0,30	0,51
$< d_g >$	0,04	0,20	-0,09	0,14	-0,00	0,00	-0,06	0,02
σ_{d_g}	0,14	0,26	0,30	0,32	0,15	0,23	0,16	0,19
$d_{g_{\max}}$	0,29	0,56	-0,82	0,66	0,47	0,66	-0,59	0,40
$< d_v >$	-0,06	-0,08	-0,02	0,02	-0,01	-0,15	0,04	0,06
σ_{d_v}	0,10	0,10	0,11	0,11	0,17	0,17	0,11	0,11
$d_{v_{\max}}$	-0,23	-0,25	-0,15	0,18	0,46	-0,38	0,36	0,38

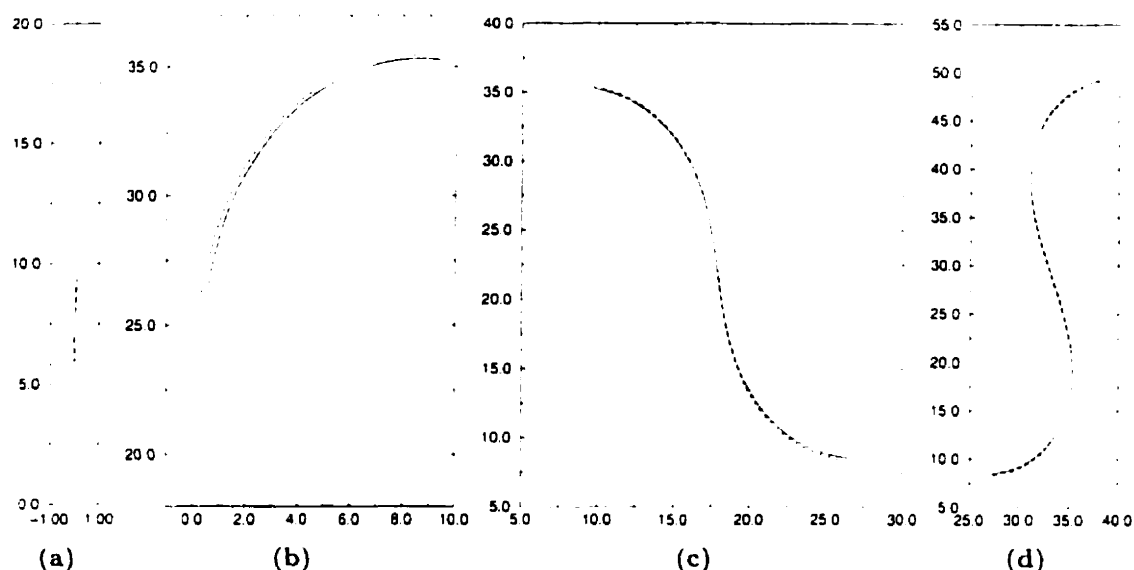


Figure 5.15 : Les axes des tronçons de la galerie 2 reconstruite (traits pleins) et originale (traits tirets)

la différence de largeur est noyée dans le relief relativement important (amplitude de 60 cm, écart-type de la gaussienne du mouvement brownien de 20 cm). La figure 5.17 montre la reconstruction ainsi que les mesures.

Le tableau 5.5 montre que la pré-segmentation extrait bien le bon nombre de tronçons. Mais les résultats de cette pré-segmentation doivent être regardés de plus près. Le tableau 5.6 donne les intervalles en abscisses curvilignes contenant les débuts des tronçons détectés (voir la section 5.3.3). Nous constatons que la constance du coefficient de variation de la courbure ne permet de détecter que deux tronçons, la position du début du second tronçon étant de plus très incertaine (incertitude d'environ 10 m). Cela est dû au fait que le second tronçon est court et que la décomposition suivant ce critère nécessite de nombreuses dérivations — et, donc, filtrages⁽¹³⁾ — (voir la section 5.3.3). Un tronçon disparaît donc. La largeur conduit

⁽¹³⁾ La distance de filtrage est de 10 m pour cette pré-segmentation soit deux fois plus longue que le second tronçon.

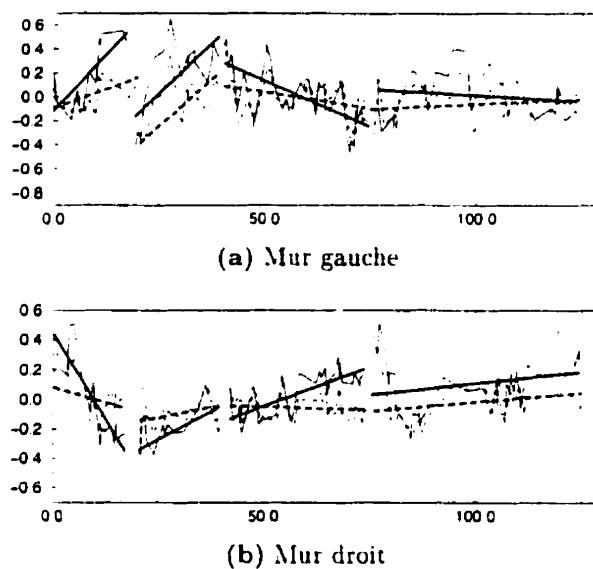


Figure 5.16 : Les distances latérales à droite et à gauche pour chaque tronçon de la galerie 2 ainsi que leur régression linéaire (galerie reconstruite en traits pleins galerie originale en traits en tirets)

Tableau 5.5 : Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 3 : les critères globaux

Paramètres	Galerie	
	orig.	rec.
L	50.00	49.44
x_e	0.00	0.31
y_e	0.00	0.25
x_s	-38.56	-38.15
y_s	19.08	18.89
N	3	3
$\langle d_3 \rangle$	0.23	0.22
σ_{d_3}	0.15	0.18
$d_{3\max}$	1.31	0.63

bien à détecter trois tronçons. Par contre, la hauteur ne permet pas de décomposer la galerie. En fait, la variation de hauteur entre le deuxième et le troisième tronçon

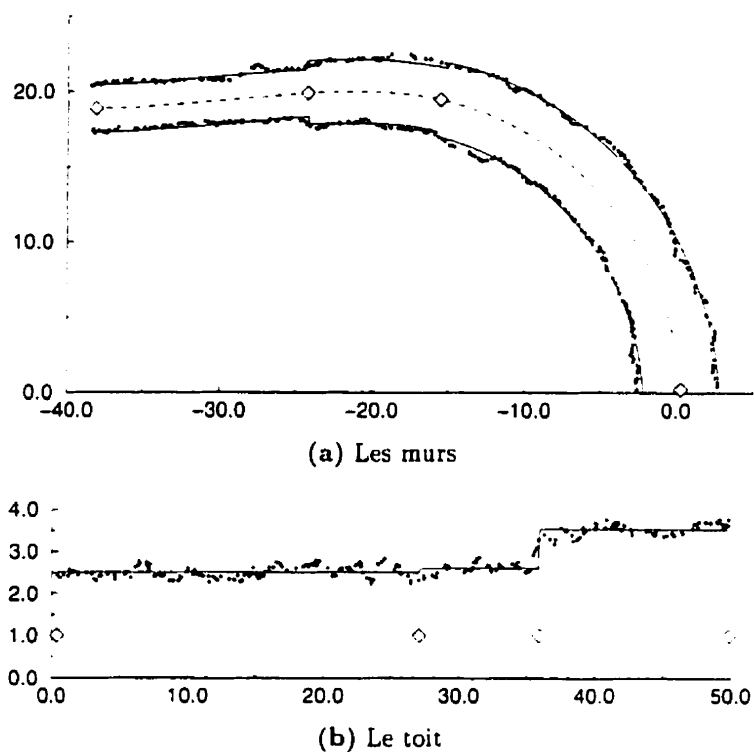


Figure 5.17 : La reconstruction de la galerie 3

Tableau 5.6 : Les tronçons détectés par la pré-segmentation de la galerie 3

Critère	Débuts					
	0.00	0.00	22.72	32.28		
k	0.00	0.00	22.72	32.28		
l	0.00	0.00	29.20	31.68	35.26	39.19
h	0.00	0.00				

est bien détectée, mais (mal) positionnée trop proche de la fin de la galerie. Cette décomposition est donc supprimée.

L'examen des tableaux 5.5 et 5.7 ainsi que de la figure 5.18 permet de constater que la galerie reconstruite est très proche de la galerie originale et des mesures, mis à part pour le positionnement du début du second tronçon. En effet, ce tronçon

Tableau 5.7 : Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 3 : les critères par tronçon

Paramètres	Tronçons					
	orig.	rec.	orig.	rec.	orig.	rec.
s_0	0.00	0.00	30.00	26.65	35.00	35.50
x_0	0.00	0.31	-18.58	-15.55	-23.58	-24.29
y_0	0.00	0.25	19.94	19.47	19.88	19.88
τ_0	90.00	93.95	175.92	167.46	183.06	183.53
κ_0	0.050	0.043	0.050	0.053	-0.000	0.012
k	0.00000	0.00037	-0.01000	-0.00466	0.00000	-0.00221
L	30.00	26.65	5.00	8.84	15.00	13.94
l	5.00	4.95	4.00	4.23	3.00	3.16
h	2.50	2.50	2.50	2.60	3.50	3.53
$\langle d_{cl} \rangle$	-0.03	-0.02	0.15	0.10	0.00	0.04
$\sigma_{d_{cl}}$	0.19	0.20	0.11	0.23	0.24	0.19
$d_{cl,max}$	-0.61	-0.60	0.52	0.54	0.61	0.57
$\langle d_g \rangle$	-0.05	0.03	0.10	0.08	0.20	-0.05
σ_{d_g}	0.19	0.22	0.15	0.16	0.17	0.15
$d_{g,max}$	0.54	0.55	0.39	-0.31	0.87	0.49
$\langle d_v \rangle$	0.01	0.01	0.14	0.03	-0.02	-0.01
σ_{d_v}	0.14	0.14	0.10	0.15	0.23	0.15
$d_{v,max}$	0.33	0.33	0.36	0.46	-0.97	-0.45

commence beaucoup trop tôt dans la galerie. Ceci est dû au fait que ni la largeur, ni la hauteur ne contraignent fortement le début de ce tronçon.

Le coefficient k de variation de la courbure ne contraint que faiblement la position d'un début de tronçon car changer la position des transitions de valeur de k — bien évidemment en changeant aussi les valeurs de k — peut produire un axe très similaire du point de vue de la fonction minimisée.

En conclusion pour le cas de la galerie 3, nous pouvons dire que les tronçons courts sont difficiles à détecter, surtout quand ils sont similaires à leurs voisins.

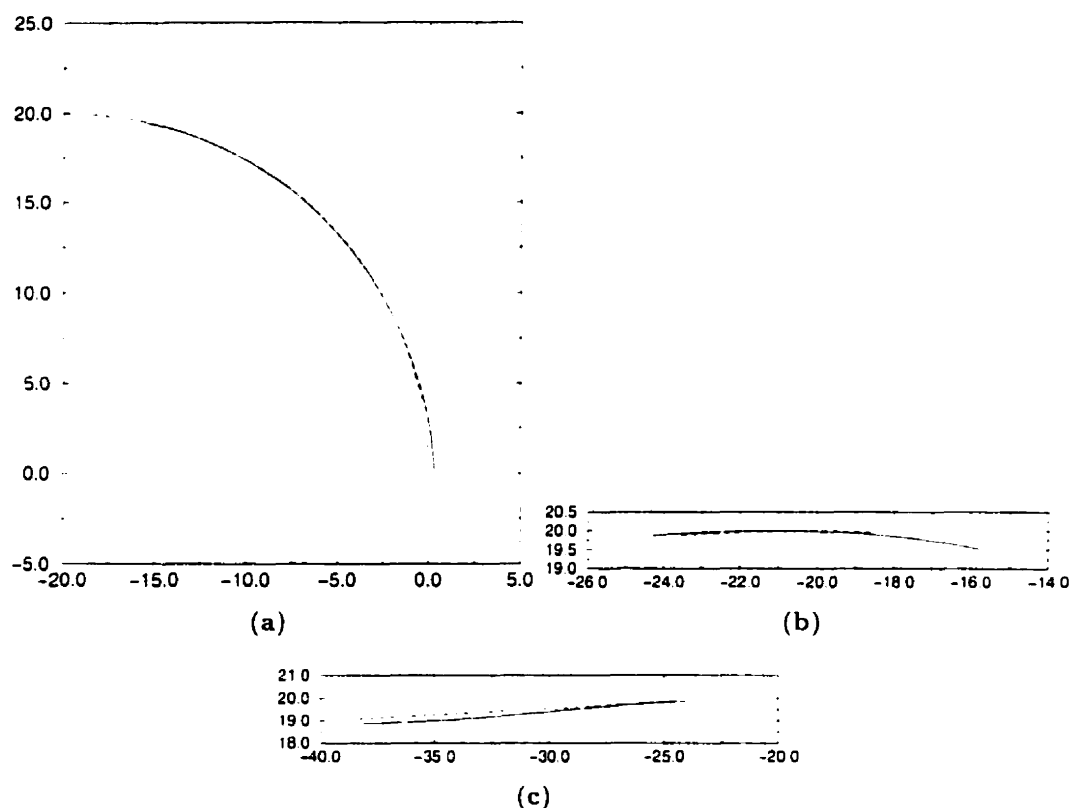


Figure 5.18 : Les axes des tronçons de la galerie 3 reconstruite (traits pleins) et originale (traits tirets)

La galerie 4. Nous avons ici une galerie constituée de trois tronçons courts et dont le coefficient de variation de la courbure est faible. La galerie est très rectiligne sa courbure initiale étant nulle. D'autre part, les trois tronçons ont presque la même hauteur — les différences sont de l'ordre de l'amplitude du relief. La figure 5.19 montre les mesures de cette galerie et la reconstruction qui en est faite.

La pré-segmentation détecte bien trois tronçons mais uniquement grâce à la largeur. Aucun tronçon suivant la hauteur n'est détecté, ce qui est correct. Par contre, le coefficient de variation de la courbure n'a pas non plus permis de décomposer la galerie. Ceci est dû au fait que les tronçons sont très similaires de ce point de vue et, surtout, parce que les distances de filtrage utilisées étaient du même ordre

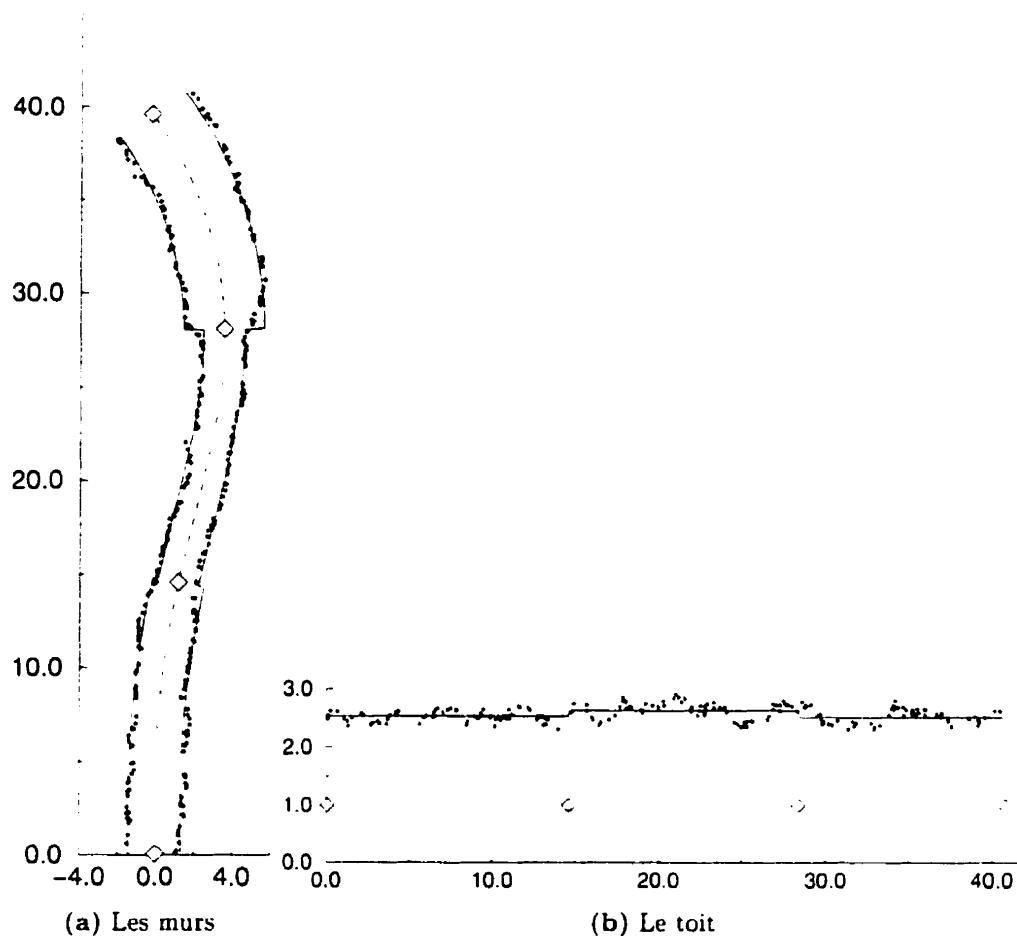


Figure 5.19 : La reconstruction de la galerie 4

de grandeur que la longueur des tronçons (10 m). Diminuer la distance de filtrage conduit à trouver des tronçons commençant ou finissant très près des extrémités de la galerie (et donc supprimés lors de la pré-segmentation, section 5.3.3). Diminuer encore cette distance conduit à trouver une multitude de tronçons très courts qui sont donc fusionnés en un seul. Ce n'est toutefois pas vraiment un problème dans le cas de cette galerie dont la forme peut être décrite par une seule clothoïde.

Le tableau 5.8 montre que la galerie reconstruite est très proche de la galerie originale, malgré une amplitude du relief de 60 cm (ceci est dû à une densité importante

Tableau 5.8 : Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 4 : les critères globaux

Paramètres	Galerie	
	orig.	rec.
L	40.79	40.63
x_e	0.00	-0.03
y_e	0.00	0.07
x_s	-0.25	-0.25
y_s	39.62	39.56
N	3	3
$\langle d_3 \rangle$	0.21	0.19
σ_{d_3}	0.19	0.25
$d_{3\max}$	1.29	0.71

des mesures, soit une tous les 20 cm en moyenne). Le tableau 5.9 confirme ceci pour chaque tronçon avec toutefois une différence pour le premier tronçon. Celui-ci est en effet reconstruit comme étant quasiment circulaire, ce qui se répercute dans une certaine mesure sur le tronçon suivant, surtout au niveau de la position de son début. Enfin, le dernier tronçon reconstruit est beaucoup plus proche des mesures que le tronçon original correspondant, grâce à une largeur plus faible (ceci est particulièrement visible à la figure 5.20).

En conclusion, cette galerie est un bon exemple de reconstruction qui compense pour le biais du relief (voir la largeur du troisième tronçon).

La galerie 5. Cette galerie est faite de trois tronçons de même largeur et hauteur. Le premier tronçon est relativement court (10 m) et les deux suivants plus longs (20 et 30 m). La pré-segmentation ne décompose évidemment pas la galerie suivant la largeur et la hauteur. En ce qui concerne la décomposition suivant le coefficient de variation de la courbure, il a fallu utiliser une distance de filtrage de 5 m (soit une distance plus faible que pour les cas précédents) afin d'obtenir trois tronçons. La figure 5.21 montre les mesures et la galerie reconstruite. Visuellement, nous constatons

Tableau 5.9 : Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 4 : les critères par tronçon

Paramètres	Tronçons					
	orig.	rec.	orig.	rec.	orig.	rec.
s_0	0,00	0,00	13,40	14,53	27,18	28,27
x_0	0,00	-0,03	0,83	1,19	3,59	3,56
y_0	0,00	0,07	13,36	14,57	26,82	28,08
τ_0	90,00	92,34	79,30	78,00	87,64	90,88
κ_0	0,000	-0,017	-0,028	-0,017	0,049	0,049
k	-0,00208	-0,00006	0,00557	0,00487	0,00000	0,00000
L	13,40	14,53	13,78	13,74	13,61	12,36
l	2,84	2,74	2,06	2,13	4,37	4,21
h	2,55	2,53	2,60	2,63	2,45	2,51
$\langle d_d \rangle$	-0,01	0,01	0,03	-0,01	-0,21	0,01
σ_{d_d}	0,15	0,19	0,09	0,11	0,39	0,24
$d_{d_{\max}}$	-0,36	-0,45	0,22	-0,26	-1,26	-0,69
$\langle d_g \rangle$	-0,04	-0,00	0,01	0,01	-0,14	-0,00
σ_{d_g}	0,11	0,14	0,14	0,15	0,31	0,17
$d_{g_{\max}}$	-0,29	0,32	0,33	0,40	-1,04	0,49
$\langle d_v \rangle$	-0,02	-0,02	0,02	0,01	0,11	0,03
σ_{d_v}	0,09	0,09	0,15	0,13	0,13	0,12
$d_{v_{\max}}$	-0,19	-0,23	0,31	0,29	0,34	0,28

que la galerie suit bien les mesures, ce qui est confirmé par les tableaux 5.10 et 5.11.

Nous pouvons toutefois constater une différence non négligeable de positionnement des tronçons reconstruits par rapport aux tronçons originaux. Mais la différence est essentiellement longitudinale et est due à divers phénomènes. Pour les extrémités de la galerie, la différence est due à la faible densité des mesures (une tous les 50 cm en moyenne). Pour les débuts des deuxième et troisième tronçons, la différence est due au fait que leur position n'est contrainte que par la forme de la galerie, contrainte dont nous avons déjà dit qu'elle n'est pas très forte localement.

La figure 5.22 montre la galerie reconstruite avec seulement deux tronçons. Nous pouvons constater que bien que la galerie soit assez éloignée des mesures, sa forme qualitative est quand même bien reconstruite, sachant que deux clothoïdes ne sont pas

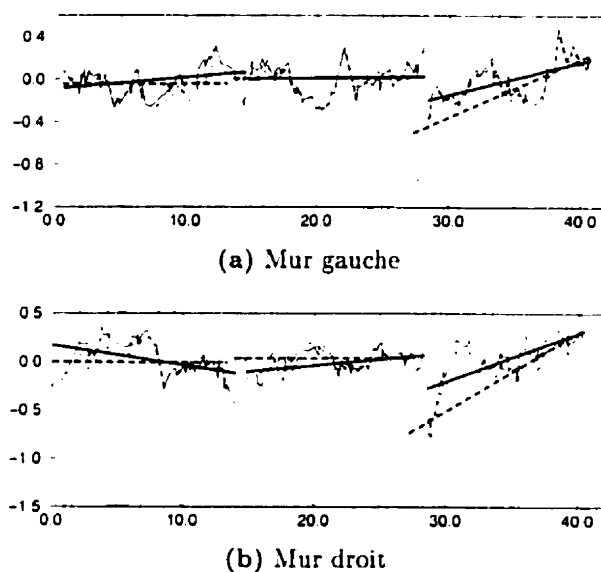


Figure 5.20 : Les distances latérales à droite et à gauche pour chaque tronçon de la galerie 4 ainsi que leur régression linéaire (galerie reconstruite en traits pleins galerie originale en traits en tirets)

Tableau 5.10 : Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 5 : les critères globaux

Paramètres	Galerie	
	orig.	rec.
L	60,00	59.39
x_e	0,00	-0.08
y_e	0,00	0.34
x_s	-0.50	-0.36
y_s	33,85	34.13
N	3	3
$\langle d_3 \rangle$	0,17	0.17
σ_{d_3}	0,08	0.22
$d_{3\max}$	0,40	0.43

suffisantes pour décrire l'axe de la galerie originale. Ceci est important du point de vue de la navigation. En effet, même si la forme retrouvée n'est pas proche des mesures.

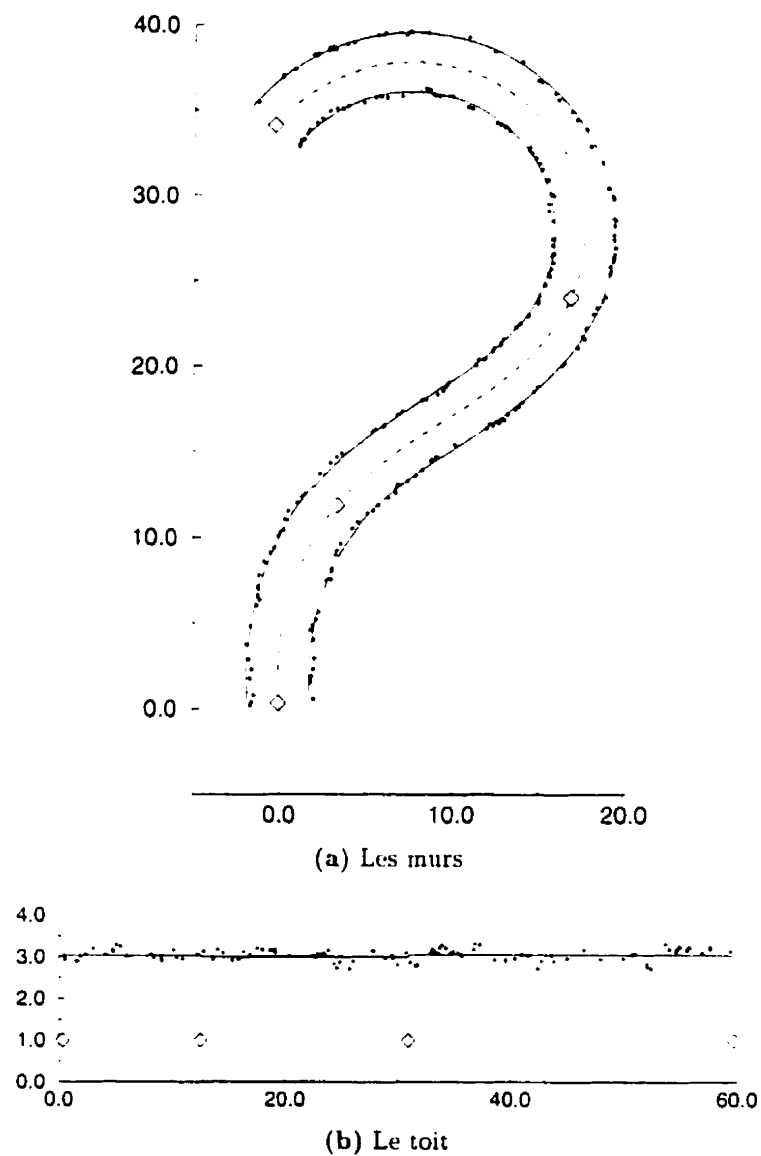


Figure 5.21 : La reconstruction de la galerie 5

elle donne une bonne indication qualitative du contrôle à appliquer au véhicule.

La conclusion pour le cas de cette galerie tient en deux points.

- La forme de la galerie est correctement reconstruite même si la largeur et la hauteur n'apportent aucune information quant à la position des débuts de tron-

Tableau 5.11 : Comparaison de la reconstruction et de l'original pour la galerie 5 : les critères par tronçon

Paramètres	Tronçons					
	orig.	rec.	orig.	rec.	orig.	rec.
s_0	0.00	0.00	10.00	12.17	30.00	30.59
x_0	0.00	-0.08	1.65	3.30	16.28	16.81
y_0	0.00	0.34	9.76	11.86	23.04	24.00
τ_0	90.00	93.16	61.27	50.27	61.32	65.76
κ_0	0.000	-0.041	-0.100	-0.078	0.100	0.104
k	-0.01000	-0.00312	0.01000	0.01000	0.00000	-0.00036
L	10.00	12.17	20.00	18.41	30.00	28.81
l	3.50	3.60	3.50	3.40	3.50	3.46
h	3.00	3.03	3.00	2.99	3.00	3.05
$\langle d_d \rangle$	0.12	0.00	-0.04	0.02	-0.01	-0.01
σ_{d_d}	0.13	0.17	0.10	0.12	0.11	0.11
$d_{d_{\max}}$	0.40	-0.27	-0.27	0.24	-0.19	-0.25
$\langle d_g \rangle$	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01	-0.06	-0.00
σ_{d_g}	0.13	0.18	0.10	0.12	0.15	0.14
$d_{g_{\max}}$	-0.24	-0.39	-0.25	0.26	-0.34	-0.27
$\langle d_v \rangle$	0.04	0.01	0.02	0.03	0.07	0.02
σ_{d_v}	0.12	0.11	0.12	0.12	0.16	0.16
$d_{v_{\max}}$	0.29	0.26	-0.30	-0.29	0.32	-0.34

çons.

- Il est clair que toute forme de galerie n'est pas réalisable avec un nombre quelconque de tronçons et qu'un nombre minimum — dépendant de la forme de la galerie — est requis. Dans tous les exemples présentés ici, nous voulions une représentation la plus succincte possible (donc avec un nombre de tronçons le plus faible possible). Il vaudrait mieux toutefois être moins sévère lors de l'élimination de « mauvais » tronçons pendant la pré-segmentation. En effet, un excès de tronçons est meilleur qu'un manque du point de vue de la qualité de la reconstruction.

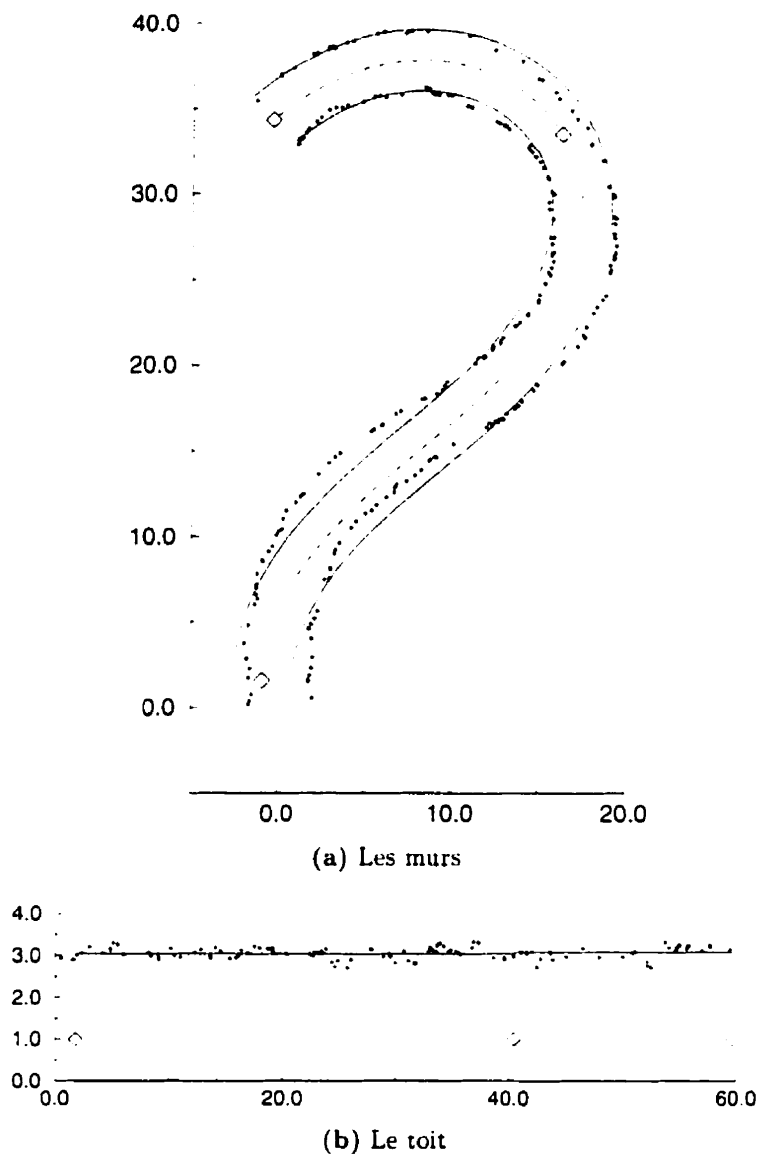


Figure 5.22 : La reconstruction de la galerie 5 avec seulement deux tronçons

5.3.6.2 Expérience 2 : influence de l'amplitude et de la régularité du relief

Dans cette expérience, nous voulons étudier l'effet du relief sur la reconstruction. Pour cela, nous faisons varier l'amplitude du relief ainsi que sa régularité. La régu-

Tableau 5.12 : Les différents paramètres du relief utilisés dans la seconde expérience et les codes correspondants

Codes		Amplitude	Distribution
a ₁	e	0.4	0.02
	l		0.1
	u		uniforme
a ₂	e	1.0	0.05
	l		0.25
	u		uniforme
a ₃	e	2.0	0.1
	l		0.5
	u		uniforme
a ₄	e	3.0	0.15
	l		0.75
	u		uniforme

larité est fonction de l'écart-type de la gaussienne du mouvement brownien du relief (section 4.3). Pour chaque amplitude, un écart-type étroit et un écart-type large ont été considérés. Ceux-ci correspondent respectivement au vingtième et au quart de l'amplitude du relief. Pour obtenir un relief encore plus irrégulier, le mouvement brownien a été remplacé par une distribution uniforme. Le tableau 5.12 donne les valeurs des paramètres d'amplitude et d'écart type pour les différentes combinaisons ainsi que les codes correspondants qui seront utilisés plus loin. Notons que les amplitudes les plus importantes (a₃ et a₄) sont telles qu'elles représentent plus un bruit de mesure important qu'un relief réel (voir la figure 5.23).

Afin de permettre une comparaison, la galerie 1 est utilisée dans cette expérience. Le relief de la version présentée plus haut avait pour amplitude 0.5 m et écart-type 0.15 m

La figure 5.23 montre la galerie reconstruite ainsi que les mesures pour chacun des reliefs. Nous constatons que, visuellement, les galeries ont des formes similaires entre elles et semblables à la galerie originale, même dans les cas de relief important.

Nous n'allons pas tenter de comparer la forme des galeries reconstruites à la forme

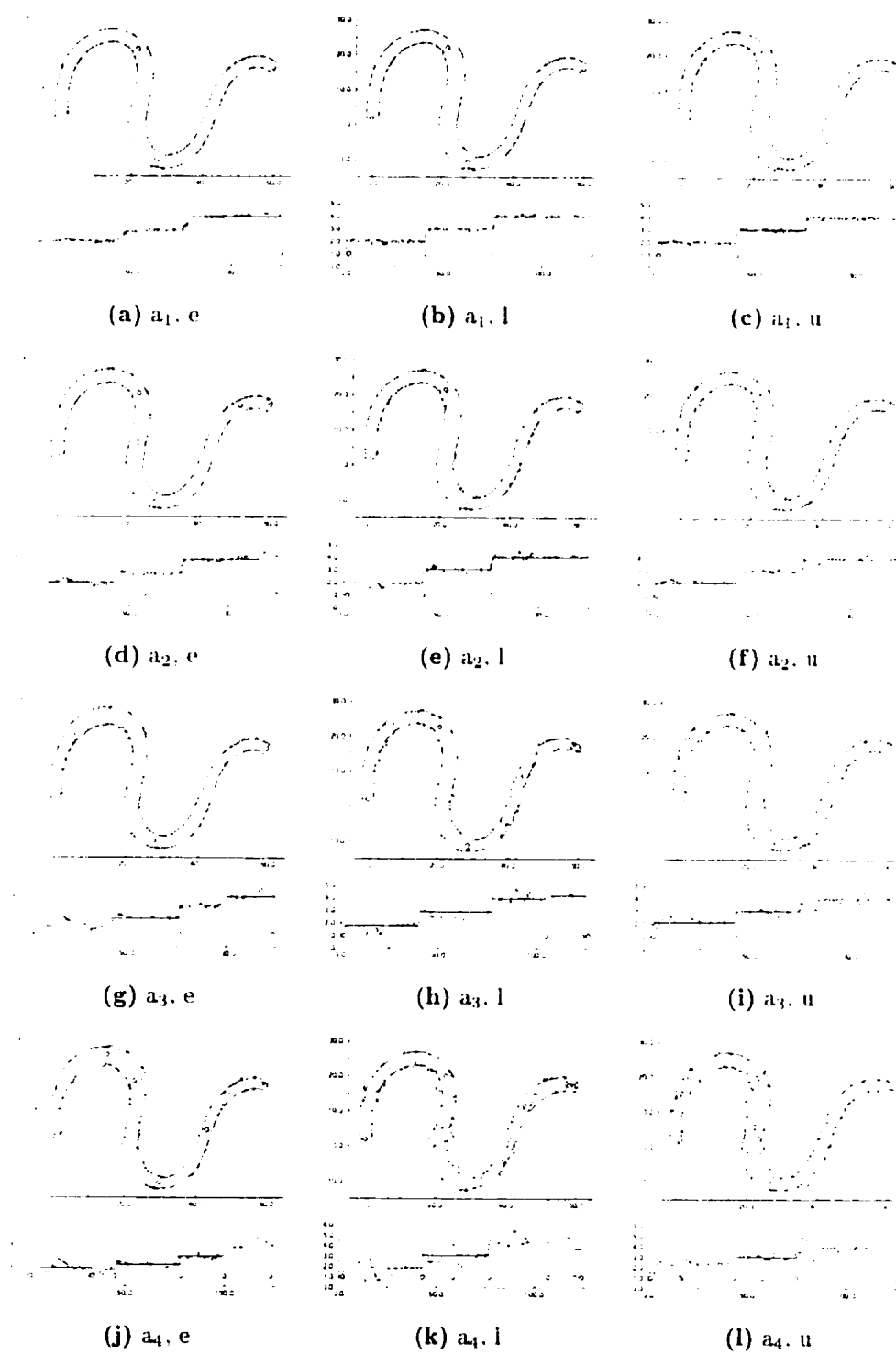


Figure 5.23 : Les galleries reconstruites en fonction des paramètres du relief

Tableau 5.13 : Nombre de tronçons de galerie donnés par la pré-segmentation en fonction des paramètres du relief suivant les trois critères de segmentation : coefficient de variation de la courbure k , largeur l et hauteur h

Amplitude	Distribution	k	l	h	Total
a_1	e	3	3	3	3
	l	3	3	3	3
	u	3	3	3	3
a_2	e	3	4	3	5
	l	3	3	3	3
	u	3	3	3	3
a_3	e	3	3	3	5
	l	5	3	3	5
	u	3	3	3	3
a_4	e	3	4	4	5
	l	6	3	3	6
	u	3	5	3	5

de la galerie originale, ceci n'ayant de sens que pour les reliefs de faible amplitude, ce qui a déjà été fait (voir la galerie 1 dans la première expérience, page 178). Nous allons plutôt comparer les galeries reconstruites entre elles ainsi que leur fidélité aux mesures et noter l'évolution en fonction des paramètres du relief.

Mais étudions tout d'abord le nombre de tronçons donnés par la pré-segmentation. La colonne *Total* du tableau 5.13 donne le nombre de tronçons en fin de pré-segmentation. Le fait que ce nombre soit plus élevé que ceux des trois colonnes précédentes indique que les positions des tronçons détectés suivant les différents critères ne correspondent pas entre elles. C'est dans le cas de la distribution étroite que la pré-segmentation fait apparaître le plus de faux tronçons. En effet, les transitions sont difficiles à détecter et à positionner correctement dans un signal très régulier. À l'autre extrémité, quand la distribution est uniforme, les transitions, bien que noyées dans le relief, sont clairement mises en évidence par le lissage (grâce à l'utilisation de valeurs médianes).

Tableau 5.14 : Position des débuts de tronçons de galerie en fonction des paramètres du relief

Amplitude	Distribution	Débuts des tronçons						
a_1	e	0.00		39.21		73.59		
	l	0.00		38.67		73.96		
	u	0.00		39.32		74.40		
a_2	e	0.00		40.93	55.35	74.30		113.26
	l	0.00		38.62		73.42		
	u	0.00		40.41		74.21		
a_3	e	0.00	19.18	36.70		74.49	95.62	
	l	0.00		38.22		75.82	102.68	121.37
	u	0.00		40.91		74.18		
a_4	e	0.00	31.22	42.52		75.53	97.21	
	l	0.00		40.85	56.49	74.86	104.94	118.59
	u	0.00	14.64	41.73	56.09	73.42		

Bien que les différentes galeries n'aient pas le même nombre de tronçons, elles présentent toutes des débuts de tronçon cohérents. Ceci est visible à la figure 5.23 et mis en évidence dans le tableau 5.14.

Qu'en est-il de la fidélité aux mesures? La figure 5.24 donne les moyennes et écarts-types des distances globales (distance 3D sur toute la galerie) entre les mesures et les galeries reconstruites et originales pour les différents reliefs. Nous constatons tout d'abord que l'écart-type pour les galeries reconstruites est supérieur à celui pour la galerie originale correspondante. Nous avons déjà constaté ce phénomène lors de l'expérience précédente (page 178). Étudions la moyenne des distances. Tout d'abord, la moyenne pour les galeries originales décroît quand la largeur de la distribution du relief augmente. Ceci provient du fait que quand le relief varie lentement, il reste plus longtemps loin de la galerie originale (c'est le cas où le biais du relief est le plus important), ce qui accroît la moyenne des distances (ainsi que leur écart-type). Ensuite, la moyenne pour la galerie reconstruite est nettement meilleure (sauf pour l'amplitude a_1) pour les distributions étroites, similaire pour les distributions larges et légèrement supérieure pour les distributions uniformes par rapport aux quantités

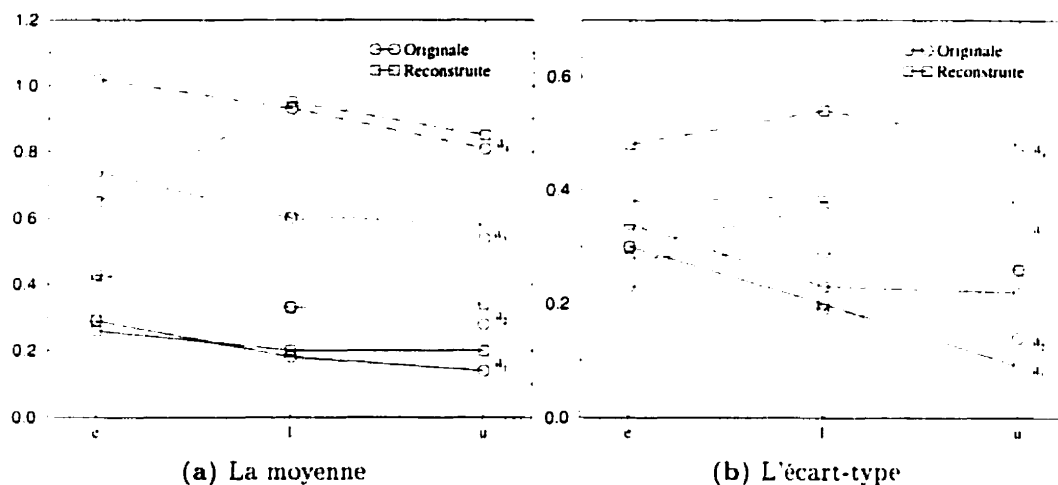


Figure 5.24 : Les distances globales entre mesures et galeries en fonction des paramètres du relief

correspondantes pour la galerie originale. Ceci montre que pour les distributions étroites, la reconstruction compense bien le biais du relief. Pour le cas de l'amplitude a_1 , l'amplitude du relief est tellement faible que le biais est quasiment nul et la reconstruction n'a donc rien à rattraper. Puis, quand la largeur de la distribution augmente, le biais diminue, la structure de la galerie devient de moins en moins visible et la reconstruction de plus en plus difficile. Notons toutefois que ce phénomène est nettement moins dramatique que ne l'est l'amélioration des distances dans le cas des distributions étroites.

Une remarque peut être faite à propos du dernier tronçon de la galerie dans le cas (a_1, l) (figure 5.23(k)). En effet, il passe latéralement à côté des mesures et le toit semble être loin des mesures montrées. Le fait est qu'il y a plus de mesures à gauche qu'à droite et que les mesures de gauche sont très à droite par rapport aux mesures précédentes et plus basses que les mesures de droite⁽¹⁴⁾. Le dernier tronçon reconstruit satisfait au mieux le plus grand nombre de mesures et est donc reconstruit

⁽¹⁴⁾ Seules les mesures de droite sont montrées avec la reconstruction de la hauteur.

Tableau 5.15 : Les différentes densités de mesures utilisées dans la troisième expérience sur la reconstruction des galeries

Code	Densité (m^{-1})
d ₁	10
d ₂	2
d ₃	1
d ₄	0,5
d ₅	0,2

très étroit pour coller aux mesures de gauche et à la hauteur de ces mêmes mesures.

La conclusion de cette expérience tient en deux points. Le premier est que le système de reconstruction compense le biais du relief puisque dans le cas des données fortement biaisées (grande amplitude, distribution étroite) la galerie reconstruite est plus proche des mesures que ne l'était la galerie originale. Le second point est que la qualité de la reconstruction diminue avec l'augmentation de l'amplitude du relief. Toutefois, la galerie reconstruite reste aussi proche des données que ne l'est la galerie originale. Le mauvais score apparent ne provient donc pas d'une mauvaise reconstruction mais du fait que les mesures ne peuvent plus être suivies par une galerie parfaite (lisse). Même dans le cas d'un relief important, la structure sous-jacente est retrouvée.

5.3.6.3 Expérience 3 : des mesures de différentes densités

Un dernier facteur intéressant à étudier est la densité des mesures. En effet, il nous faut voir quelle est la meilleure densité et si une reconstruction est effectivement possible à partir des données d'arpentage traditionnel qui sont généralement éparses (section 4.1). Le tableau 5.15 montre les densités utilisées dans cette expérience et la figure 5.25 montre les reconstructions ainsi que les mesures pour ces diverses densités.

Commençons par étudier le nombre de tronçons donnés par la pré-segmentation

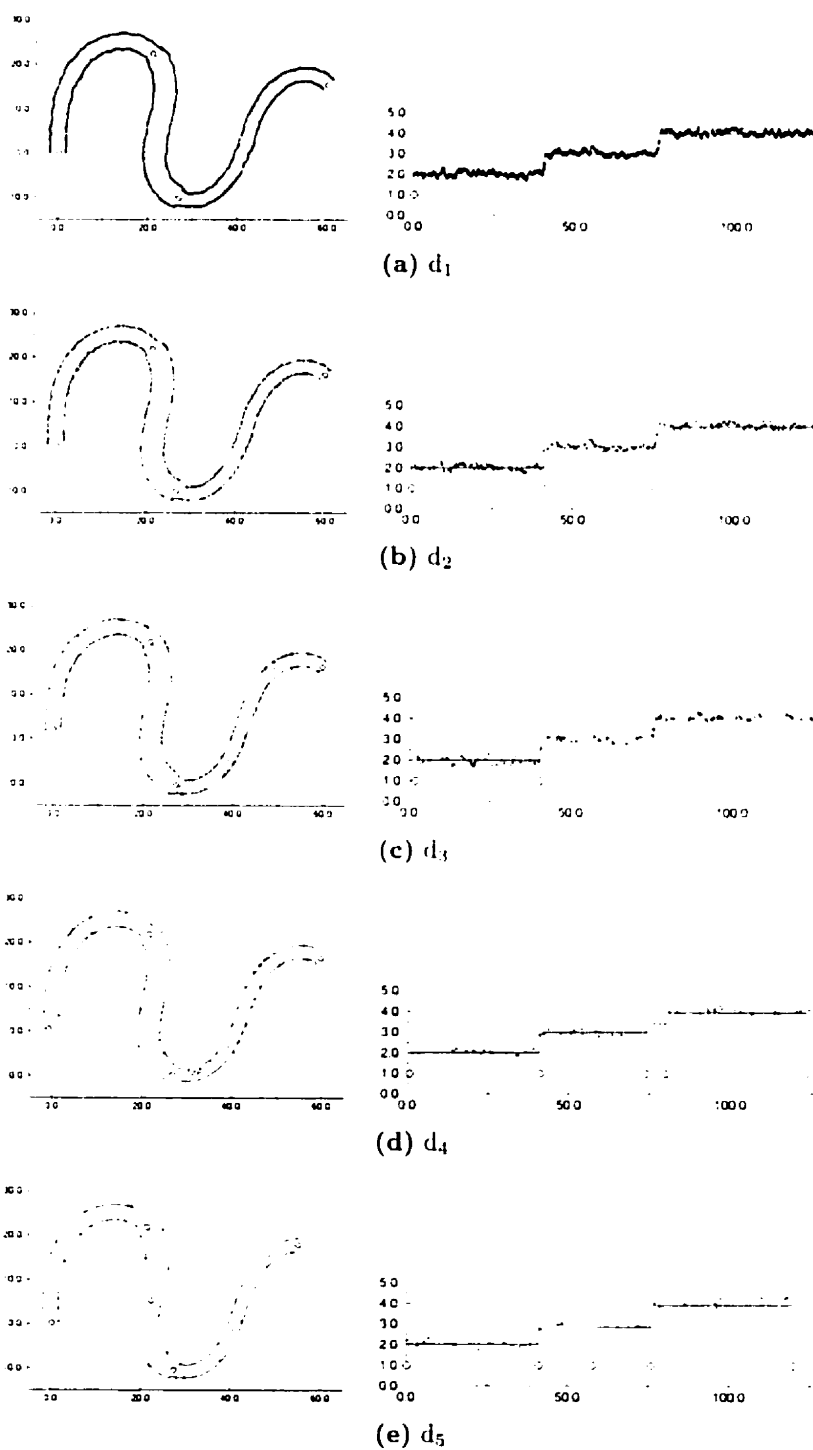


Figure 5.25 : Les reconstructions de galeries en fonction de la densité des mesures

Tableau 5.16 : Nombre de tronçons de galerie donnés par la pré-segmentation en fonction de la densité des mesures

Densité	k	l	h	Total
d_1	2	3	3	3
d_2	3	3	3	3
d_3	3	3	3	3
d_4	4	1	3	4
d_5	4	1	2	4

(tableau 5.16). Pour la densité la plus forte, nous constatons qu'un tronçon n'est pas détecté suivant le critère sur le coefficient de variation de la courbure. Il s'agit du second tronçon et sa non-détection est due à un seuil de détection trop élevé pour la valeur nulle⁽¹⁵⁾. Ce problème peut facilement être résolu en baissant le seuil⁽¹⁶⁾. Il faut ensuite attendre de faibles densités (une mesure tous les 2 ou 5 m) pour que le nombre de tronçons détectés change. Étudions d'abord la détection basée sur le coefficient de variation de la courbure. Plus la densité des données est faible, plus la forme de la galerie (section 5.3.3) est loin de la réalité et a tendance à devenir rectiligne par morceaux, ce qui est donc aussi le cas de son axe médian. Ceci fait évidemment apparaître de faux tronçons. Étudions maintenant le cas de la hauteur et de la largeur. Diminuer la densité des mesures revient à filtrer passe-bas les hauteurs et largeurs. Ceci rend les changements de valeurs difficiles à détecter. Nous constatons d'autre part que pour la largeur le nombre de tronçons détectés est inférieur à celui pour la hauteur. Ceci provient du fait que la largeur est calculée par rapport à l'axe médian dont nous avons dit qu'il est de plus en plus éloigné de l'axe réel de la galerie.

Un autre problème peut se présenter quand la densité des mesures est faible. Une grande distance entre deux mesures d'un des murs crée une déformation de la forme

⁽¹⁵⁾ Lors de la pré-segmentation, le seuil était à 4.2×10^{-4} alors que le maximum local de la dérivée de k , correspondant au changement de valeur de k , en ces abscisses est de 4.1×10^{-4} . Le seuil était donc à peine trop haut.

⁽¹⁶⁾ Nous avons déjà dit plus haut que permettre la détection d'un plus grand nombre de tronçons est généralement une bonne idée afin de garantir d'en avoir le nombre suffisant.

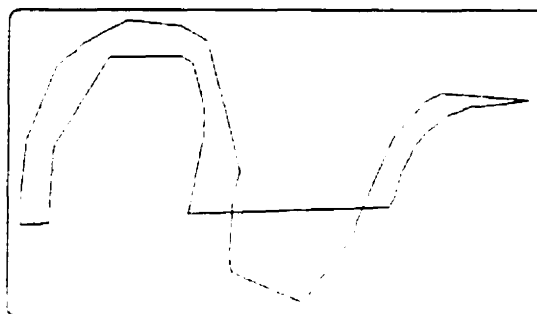


Figure 5.26 : Une forme de galerie dans un cas de données éparses et mal disposées

de la galerie qui, dans le pire des cas, peut couper la galerie en plusieurs parties (figure 5.26). Le problème n'est pas de détecter ce genre de phénomène, mais plutôt de trouver les mesures manquantes. Toutefois, ce problème n'en est pas vraiment un puisqu'il ne se produit que quand les mesures sont très éparses, soit lors d'un arpentage manuel. Or, deux mesures successives lors d'un tel arpentage doivent d'une part être en vue l'une de l'autre et d'autre part les arpenteurs choisissent des points de mesures qui correspondent à des événements importants (section 4.1). En pratique, ce genre de problème ne se pose donc pas.

Étudions la fidélité aux mesures. La figure 5.27 montre la moyenne et l'écart-type des distances globales pour la galerie originale et les galeries reconstruites en fonction de la densité. Nous voyons qu'en moyenne, la distance de la galerie reconstruite reste très proche de celle de la galerie originale et reste à peu près constante. Par contre, l'écart-type des distances des galeries reconstruites diverge fortement. Ceci vient du fait que la minimisation est de moins en moins contrainte au fur et à mesure que la densité diminue. Ceci est d'autant plus vrai quand la distribution des mesures le long de la galerie est irrégulière et fait apparaître de grandes distances sans mesure.

En conclusion, la reconstruction fonctionne relativement bien même pour des densités faibles des mesures. Toutefois, la fidélité aux mesures diminue avec leur densité. D'autre part, une densité faible des mesures impose un choix judicieux de leur emplacement. Enfin, prendre une très haute densité (10 mesures par mètre contre 2

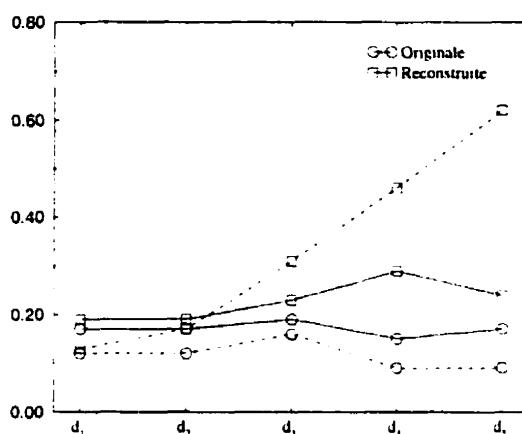


Figure 5.27 : Les distances globales entre mesures et galeries originale et reconstruites en fonction de la densité des mesures : la moyenne en traits pleins et l'écart-type en traits tirets

mesures par mètres) n'améliore pas significativement la fidélité aux mesures, tout en augmentant très fortement le temps de calcul lors de la minimisation.

5.3.6.4 Expérience 4 : des reliefs différents mais de paramètres identiques

Afin de pouvoir effectivement comparer la reconstruction avec la galerie originale et de montrer la stabilité du processus de reconstruction, nous avons reconstruit vingt galeries à partir de vingt reliefs ayant les mêmes paramètres mais produits par différents germes du générateur de nombres aléatoires. Les vingt reliefs sont donc différents. Puis nous avons calculé la moyenne et l'écart-type des paramètres des galeries reconstruites. Ceci a pour conséquence de supprimer l'effet du biais du relief sur la reconstruction. En effet, un mouvement brownien occupe tout l'espace avec la même probabilité⁽¹⁷⁾. Sur un grand nombre, les reliefs occupent donc tout l'espace permis et, en moyenne, le biais est donc nul. Le tableau 5.17 donne les paramètres de la galerie originale ainsi que la moyenne et l'écart-type des vingt reconstructions faites

⁽¹⁷⁾ Ceci n'est pas strictement le cas ici puisque notre mouvement brownien est modifié pour rester dans des bornes imposées.

Tableau 5.17 : Comparaison de l'original de la galerie 1 avec vingt reconstructions à partir de vingt reliefs différents

Paramètres	orig.	moy.	écart
L	125.00	123.73	0.56
x_0	0.00	0.05	0.23
y_0	0.00	0.86	0.42
N	3	3.25	0.19
τ_0	1.57	1.58	0.01
κ_0	0.00000	-0.00231	0.00011
s_0	0.00	0.00	0.00
k	-0.00300	-0.00297	0.00000
l	3.50	3.51	0.01
h	2.00	2.01	0.00
s_0	40.00	39.83	0.81
k	0.00750	0.00773	0.00000
l	5.00	4.87	0.02
h	3.00	2.99	0.01
s_0	75.00	74.77	0.51
k	-0.00600	-0.00601	0.00000
l	3.00	3.04	0.01
h	4.00	3.95	0.00

à partir des vingt reliefs différents⁽¹⁸⁾. Ce tableau montre clairement que la moyenne des galeries reconstruites est très proche de la galerie originale et que la distribution autour de la galerie originale est très étroite.

Une remarque quant au nombre de tronçons doit être faite. Sur les vingt cas étudiés, la pré-segmentation a donné quatre tronçons (au lieu de trois) pour cinq cas, dont l'un vient de la détection en fin de galerie d'une fausse valeur constante du coefficient de variation de la courbure — due à la difficulté de la dérivation et du lissage aux extrémités. Les quatre autres proviennent d'un relief qui présentait effectivement deux largeurs ou hauteurs très différentes dans un seul tronçon. Pour ces galeries avec un tronçon en trop, nous avons utilisé les tronçons commençant au

⁽¹⁸⁾ Il s'agit ici des paramètres de la galerie et non plus des paramètres (redondants) des tronçons.

même endroit que les tronçons originaux pour calculer les moyennes et écarts-types des paramètres.

En conclusion, cette expérience a montré que les différences entre une galerie reconstruite et la galerie originale sont bien dues au biais du relief qui est compensé par l'optimisation. D'autre part, le faible écart-type des paramètres des galeries reconstruites montre une bonne stabilité du processus de reconstruction.

5.4 La reconstruction des intersections

Après avoir décrit la reconstruction des galeries, nous allons nous intéresser à la reconstruction des intersections⁽¹⁹⁾. Rappelons tout d'abord que les mesures d'une intersection telles que fournies par l'arpentage (section 4.2.3 et 4.3) sont en fait les mesures des murs constituant l'intersection, un mur étant la partie géométrique entre deux entrées de galeries (section 3.4.1). La reconstruction d'une intersection consiste donc en la reconstruction des différents murs la composant. Nous parlerons donc dorénavant de reconstruction de murs. Chaque mesure est un point en trois dimensions : les deux premières coordonnées donnent la position horizontale du mur — ou de la mesure qui en a été faite — tandis que la dernière donne la hauteur du mur.

La reconstruction se fait en deux étapes : segmentation des murs en tronçons de mur — ce qui inclut une estimation initiale des paramètres des tronçons — puis optimisation (figure 5.28).

Comme pour les galeries (section 5.3.2), nous avons cherché à obtenir le plus petit nombre de tronçon possible, ce nombre étant déterminé lors de la pré-segmentation.

Nous allons tout d'abord faire un rappel du modèle d'intersection (section 5.4.1).

⁽¹⁹⁾Dans cette section, le terme intersection est considéré comme un terme générique désignant aussi bien les intersections que les chambres. En effet, leur modèle est similaire (section 3.4) et leur reconstruction se fait donc de la même manière. Les deux lieux diffèrent toutefois par leur dimension, les murs des intersections étant généralement plus courts que ceux des chambres. Cette dimension plus faible fait que la reconstruction des murs des intersections est plus difficile et nous ne montrerons donc que des reconstructions d'intersections.

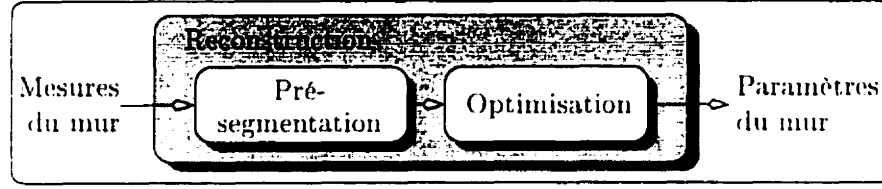


Figure 5.28 : Le processus de reconstruction d'un mur d'intersection

puis donner les paramètres de reconstruction d'un mur (section 5.4.2). Ensuite, la section 5.4.3 va montrer comment est faite la segmentation initiale d'un mur en tronçons de mur et comment est calculée une estimation initiale des paramètres — estimation initiale qui sera ensuite optimisée. La section 5.4.4 décrira les critères de qualité de la reconstruction d'un mur et des résultats de reconstruction d'intersection seront présentés à la section 5.4.5.

5.4.1 Rappel du modèle d'intersection

Dans GNOMine, une intersection se décompose en murs, eux-mêmes se décomposant en tronçons de mur (section 3.4.1). Les tronçons de mur sont quantifiés par une équation paramétrique 3D donnant la forme du tronçon de mur ainsi que sa hauteur (section 3.4.3.2). Ici, nous avons choisi d'utiliser une courbe polynomiale de degré trois :

$$\mathbf{c}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{3x}t^3 + a_{2x}t^2 + a_{1x}t + a_{0x} \\ a_{3y}t^3 + a_{2y}t^2 + a_{1y}t + a_{0y} \\ a_{3z}t^3 + a_{2z}t^2 + a_{1z}t + a_{0z} \end{pmatrix} = \mathbf{a}_3t^3 + \mathbf{a}_2t^2 + \mathbf{a}_1t + \mathbf{a}_0, \quad (5.3)$$

où t est l'abscisse (comprise entre 0 et 1), (x, y) donne la position d'un point du mur et z donne la hauteur du mur en ce même point.

Les différents tronçons formant un mur constituent une courbe 3D continue en position seulement, ce qui va permettre de représenter les angles des murs. Ceci

n'implique pas nécessairement la présence d'un angle entre deux tronçons de mur. Nous allons toutefois remarquer que la reconstruction crée généralement un angle, même s'il est éventuellement proche de 180° , entre deux tronçons. Nous verrons aussi que des angles, plus précisément des fortes courbures, vont aussi être créés dans les tronçons eux-mêmes (et pas simplement entre deux tronçons).

5.4.2 Paramètres de la reconstruction d'un mur

La section 3.4.3.2 donnait les paramètres d'un tronçon de mur comme étant :

$$\mathbf{c}_{0i} = (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i})^T.$$

$$\mathbf{c}_{1i} = (x_{1i}, y_{1i}, z_{1i})^T.$$

$$\mathbf{t}_{0i} = (r_{0i}, \theta_{0i}, \phi_{0i})^T.$$

$$\mathbf{t}_{1i} = (r_{1i}, \theta_{1i}, \phi_{1i})^T.$$

où \mathbf{c}_{0i} et \mathbf{c}_{1i} sont les positions des extrémités et \mathbf{t}_{0i} et \mathbf{t}_{1i} sont les orientations aux extrémités (équations (3.3) et (3.4)). D'après la continuité de position, deux tronçons consécutifs partagent une même extrémité :

$$\mathbf{c}_{1i} = \mathbf{c}_{0(i+1)}.$$

Pour la reconstruction, les paramètres du mur sont donc :

$$\mathbf{p} = (\mathbf{c}_{01}, \mathbf{t}_{01}, \mathbf{t}_{11}, \mathbf{c}_{11}, \mathbf{t}_{02}, \mathbf{t}_{12}, \dots, \mathbf{c}_{1n}). \quad (5.4)$$

où n est le nombre de tronçons constituant le mur.

La juxtaposition de toutes les courbes des tronçons forme la courbe $\mathbf{C}(T, \mathbf{p})$ représentant le mur. T est l'abscisse le long du mur et est comprise entre zéro et n (le nombre de tronçons). \mathbf{p} est le vecteur de paramètres (5.4). Nous pouvons déter-

miner l'abscisse T_i le long de la courbe telle que la distance euclidienne $d(\mathbf{C}(T_i, \mathbf{p}), \mathbf{M}_i)$ entre une mesure \mathbf{M}_i et le point $\mathbf{C}(T_i, \mathbf{p})$ soit la plus courte. La somme du carré de toutes ces distances est la fonction que nous minimisons pour reconstruire un mur :

$$D(\mathbf{p}) = \sum_k d^2(\mathbf{C}(T_k, \mathbf{p}), \mathbf{M}_k). \quad (5.5)$$

Notons qu'afin de contraindre la position des extrémités des murs lors de la minimisation, nous avons pris $T_1 = 0$ et $T_M = n$, où M est le nombre de mesures.

La dimension de l'espace de recherche de cette optimisation est beaucoup plus grande que pour les galeries ($9n + 3$ paramètres). Toutefois, l'unique contrainte de continuité en position n'influe pas sur la forme des tronçons de mur⁽²⁰⁾. Ceci rend l'optimisation beaucoup plus facile.

5.4.3 Pré-segmentation d'un mur : estimation initiale de ses paramètres

Comme pour les galeries, il faut déterminer le nombre de tronçons formant le mur et faire une estimation initiale des paramètres du mur. Mais, contrairement au cas des galeries, un seul critère permet de décomposer un mur en tronçons de mur : une forte courbure. Il faut donc commencer par déterminer la courbure des murs (sans tenir compte de la hauteur des murs) en chacun de leurs points puis couper aux endroits de forte courbure.

Le calcul de la courbure des murs est très similaire au calcul de la courbure de l'axe médian d'une galerie (section 5.3.3). Toutefois, la densité des points utilisés (les mesures) est beaucoup plus faible dans ce cas puisque les mesures sont directement utilisées. Cela donne une dérivation de moins bonne qualité. De plus, et de par le fait que les longueurs de murs sont généralement faibles (de l'ordre de quelques mètres),

⁽²⁰⁾La continuité en position, orientation et courbure des tronçons de galerie formant une galerie est très contraignante puisqu'elle implique que la forme d'un tronçon est dépendante des tronçons précédents.

le choix des distances de filtrage est plus délicat et a beaucoup plus d'influence sur le résultat de la pré-segmentation que dans le cas des galeries.

Nous devons déterminer ce qu'est une forte courbure. Pour cela, deux options sont envisageables. La première est d'utiliser un seuil arbitraire. Le problème avec ce seuil est qu'il ne correspond physiquement à rien. En effet, un mur peut présenter localement une forte courbure sans pour autant que le lieu où cette courbure est élevée soit significatif. Par exemple, une petite pointe présente une forte courbure mais n'est pas intéressante à représenter. À l'opposé, une grosse bosse peut ne pas montrer de forte courbure localement mais devoir être explicitée dans la représentation. Nous voyons donc qu'une forte courbure est liée à la dimension des événements. Or, ce qui fixe cette dimension est la distance de filtrage utilisée aux diverses étapes qui permettent d'obtenir la courbure. En effet, plus la distance de filtrage est importante, plus les petites pointes disparaissent et plus les « fortes » courbures sont basses. Inversement, plus la distance de filtrage est faible, plus les petites pointes subsistent et plus le seuil doit être élevé — si nous ne voulons pas détecter la moindre aspérité.

Étudions ceci plus précisément. Soit une portion de mur faisant un angle à 90° (trait en tirets sur la figure 5.29). Si la distance de filtrage est f , alors le mur effectivement traité est celui montré en trait plein gras toujours sur la figure 5.29⁽²¹⁾. Cette courbe est tangente au mur réel aux points A et B et peut être approchée par le cercle C . Dans ces conditions, la courbure maximale de cette courbe est $1/R$ où $R = f/2$. Prendre comme seuil cette courbure garantit que toute pointe dont les cotés sont de longueur supérieure ou égale à f et d'angle inférieur à 90° sera détectée. Avec la même distance de filtrage f , si nous utilisons comme seuil $1/R'$ nous pouvons montrer que les angles détectables sont au plus de :

$$\alpha = 2 \arctan \frac{f}{2R'}.$$

⁽²¹⁾ Le filtrage considère tous les points dans la distance $f/2$ de part et d'autre du point courant.

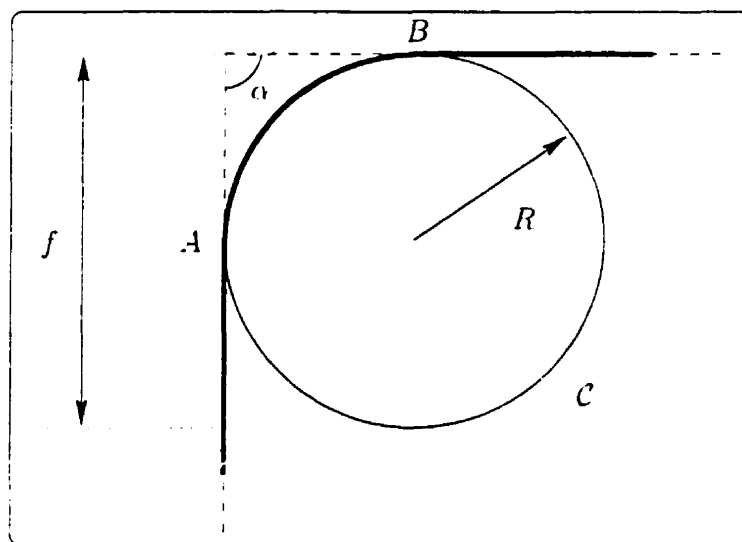


Figure 5.29 : Distance de filtrage et seuil de détection d'un angle

En pratique, les mesures des murs ne sont pas aussi régulières en disposition et en densité. La valeur de α donnée dans l'équation précédente n'est donc qu'indicative. Dans nos expérimentations, nous avons pris $1/R' = 1/2f$, ce qui donne comme valeur théorique de l'angle maximum détectable $\alpha \approx 30^\circ$.

Comme pour les galeries, de petites oscillations de la courbure peuvent conduire à de multiples détections d'un même pic de courbure (figure 5.9 page 173), conduisant à une succession de tronçons très courts. Ceux-ci sont fusionnés de la même manière que dans le cas des galeries (figure 5.10 page 173).

Une fois la décomposition faite, nous devons déterminer une estimation initiale des paramètres du mur. Les positions et orientations des extrémités des tronçons vont être les valeurs des fonctions utilisées pour calculer la courbure aux points de décomposition.

Pour la recherche des paramètres optimaux par minimisation de la fonction (5.5), nous devons spécifier des bornes pour les divers paramètres du vecteur (5.4). Ces bornes sont beaucoup plus arbitraires que dans le cas des galeries (section 5.3.3) car l'environnement *intersection* est beaucoup moins contraint par la tâche (la navigation)

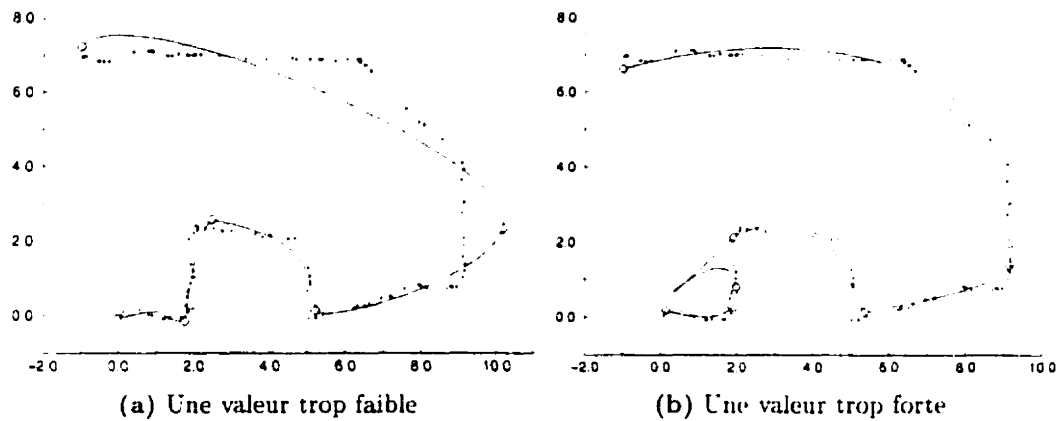


Figure 5.30 : Deux problèmes liés à de mauvaises valeurs du maximum de r_i

que ne l'est l'environnement *galerie*.

Essentiellement, la position des extrémités de tronçons de mur est supposée être correctement estimée par la pré-segmentation à 2 m près en x et y . De même, les angles θ_i (voir figure 3.12) sont supposés être correctement estimés à plus ou moins $\pi/3$ près. Pour la hauteur des extrémités des tronçons, nous avons utilisé des bornes fixes : la hauteur est supposée être entre 2 et 5 m. De même, les angles ϕ_i sont simplement compris dans l'intervalle $[-\pi/2; \pi/2]$. Mis à part pour ϕ_i , ces valeurs sont assez arbitraires ou dépendent de notre connaissance de l'environnement, mais leur effet sur la minimisation est peu important. Il reste à spécifier les bornes d'un paramètre : r_i , la norme du vecteur tangent aux extrémités (équation (3.4)). La norme a été prise comme étant contenue dans l'intervalle $[0; 15]$. Le minimum est évident, le maximum a été déterminé expérimentalement. La détermination de cette valeur est assez importante. En effet, un maximum trop faible peut donner un résultat de la minimisation loin des mesures pour certains longs tronçons (voir la figure 5.30(a)). Par contre, une valeur trop forte peut créer des boucles qui ne pénalisent pas la fonction minimisée — et ne sont donc pas supprimées par la minimisation — mais ne sont pas représentatives de la réalité (figure 5.30(b)). Cette valeur maximale devrait être

différente pour chaque tronçon puisqu'elle dépend, entre autres, de la distance qui sépare les deux extrémités du tronçon. Prendre une seule et même valeur peut donc poser un problème quand des tronçons de longueurs très différentes coexistent. Ce n'était pas notre cas et nous n'avons pas cherché à calculer cette valeur autrement qu'expérimentalement.

5.4.4 Critères de qualité de la reconstruction des murs

Comme nous l'avons déjà dit, la reconstruction des murs d'intersection est beaucoup moins contrainte que celle des galeries. En effet, la seule contrainte en est une de continuité de position des tronçons. Ceci implique que la minimisation n'a pas de structure déjà connue à approcher⁽²²⁾ et que le biais du relief devrait être très bien compensé. En conséquence, il est illusoire de vouloir comparer un mur reconstruit avec le mur original correspondant. Nous ne procéderons donc pas à cette expérience.

Nous allons donc uniquement évaluer la reconstruction des murs par leur fidélité aux mesures, soit la moyenne $\langle d_3 \rangle$, l'écart-type σ_{d_3} et le maximum $d_{3\max}$ des distances (3D) entre mesures et mur. Afin d'évaluer la compensation du biais, ces quantités seront aussi données pour la galerie originale. La pré-segmentation, quant à elle, sera évaluée en comparant le nombre N de tronçons dans la galerie reconstruite et la galerie originale.

Afin de tester la reconstruction, nous avons réalisé plusieurs expériences, les mêmes que pour les galeries (sans la comparaison avec l'original pour les raisons que nous avons données plus haut). La première consiste en la reconstruction de murs de formes diverses. Dans la seconde expérience, nous voulons voir l'effet de l'amplitude et de la régularité du relief sur la reconstruction. Enfin, dans la troisième expérience, nous allons étudier l'effet de la densité des mesures.

⁽²²⁾Dans le cas des galeries, les contraintes de continuité en position, orientation et courbure faisaient que la galerie reconstruite devait, dans une certaine mesure, s'approcher de la galerie originale, avec toutefois une compensation pour le biais du relief.

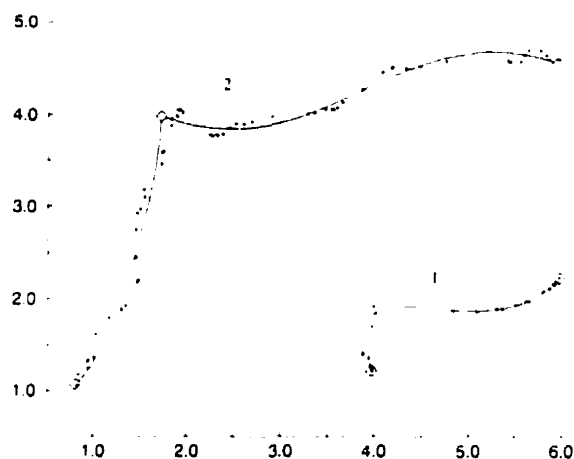


Figure 5.31 : L'intersection 1 : les mesures et les murs reconstruits

Tableau 5.18 : L'évaluation de la reconstruction de l'intersection 1

Paramètres	Murs			
	orig.	rec.	orig.	rec.
N	2	1	2	2
$\langle d_3 \rangle$	0.15	0.04	0.18	0.08
σ_{d_3}	0.0041	0.0004	0.0025	0.0016
$d_{3\max}$	0.25	0.09	0.29	0.19

5.4.5 Résultats

5.4.5.1 Expérience 1 : des murs de diverses formes

L'intersection 1. La première intersection permet de voir la reconstruction de deux murs relativement simples. Celle-ci ainsi que les mesures qui ont servi à la reconstruction sont montrées à la figure 5.31. Les extrémités des tronçons sont montrées par des losanges. Le tableau 5.18 montre le nombre de tronçons pour chaque mur ainsi que la moyenne, l'écart-type et le maximum des distances entre les mesures et les murs reconstruits et originaux. Les murs apparaissent selon l'ordre de numérotation de la figure 5.31.

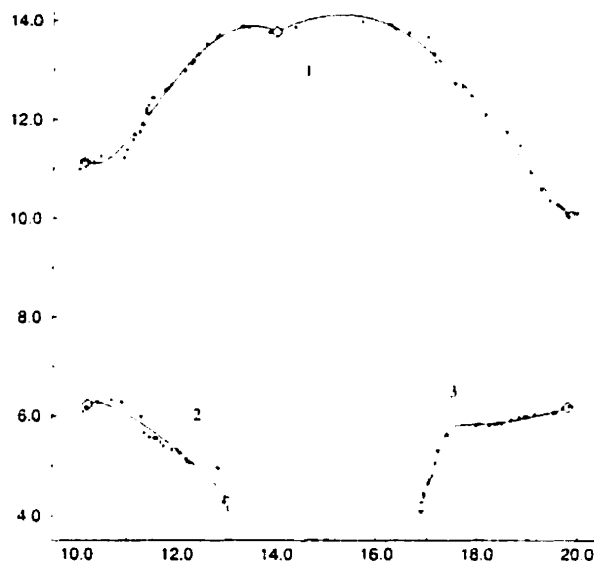


Figure 5.32 : L'intersection 2 : les mesures et les murs reconstruits

Nous pouvons voir que la pré-segmentation n'a donné qu'un seul tronçon pour le premier mur (au lieu de deux pour le mur correspondant original), ce malgré un angle bien marqué. Cela provient du fait que les deux parties de mur de part et d'autre de l'angle sont très courtes.

Un mur constitué de deux tronçons courts ne sera généralement pas décomposé, même si l'angle formé par les tronçons est aigu. Toutefois, le type de courbe utilisé pour représenter les tronçons permet de représenter des courbures fortes.

Malgré cela, nous pouvons constater que la reconstruction est beaucoup plus proche des mesures que l'original. Le processus de reconstruction compense donc bien le biais du relief.

L'intersection 2. Elle montre trois murs dont deux très courts. La figure 5.32 montre leur reconstruction tandis que le tableau 5.19 montre leur évaluation. Comme pour l'intersection précédente, un des murs est reconstruit avec un seul tronçon au lieu

Tableau 5.19 : L'évaluation de la reconstruction de l'intersection 2

Paramètres	Murs					
	orig.	rec.	orig.	rec.	orig.	rec.
N	2	2	1	1	2	1
$\langle d_3 \rangle$	0,23	0,15	0,25	0,12	0,26	0,07
σ_{d_3}	0,0344	0,0246	0,0065	0,0039	0,0058	0,0020
$d_{3\max}$	0,91	1,02	0,39	0,27	0,43	0,26

de deux. Le cas du mur 1 est plus intéressant. En effet, bien qu'il soit relativement lisse, il est décomposé en deux tronçons. Mais un examen attentif des mesures laisse apercevoir un léger angle un peu à gauche de la position de celui reconstruit (environ en (13:14)). L'effet de cet angle est, de plus, augmenté par le fait que les mesures à sa droite sont très espacées. En effet, les dérivations et lissages utilisent le même nombre de mesures de part et d'autre du point courant et toujours le même nombre de mesures pour un mur donné quelle que soit la densité locale des mesures. Dans le cas présent, les dérivations et lissages à droite utilisent donc des mesures beaucoup plus loin qu'à gauche, mesures dont la position augmente l'angle apparent.

L'angle produit par l'optimisation se trouve être déplacé de sa position initiale à cause d'une mesure formant une pointe non significative. Ceci crée un angle non significatif dans la représentation du mur. Ceci montre un premier problème avec notre reconstruction des murs et la représentation explicite de leurs angles : bien que dans le modèle un changement de tronçon n'implique pas nécessairement un angle du mur, la reconstruction produit généralement un angle, éventuellement proche de 180° , entre deux tronçons.

Il est possible qu'une disposition irrégulière des mesures fasse apparaître ou disparaître des tronçons de mur lors de la pré-segmentation. Dans le cas de l'apparition d'un tronçon, un angle est créé par l'optimisation, l'angle ne représentant souvent que du relief non significatif.

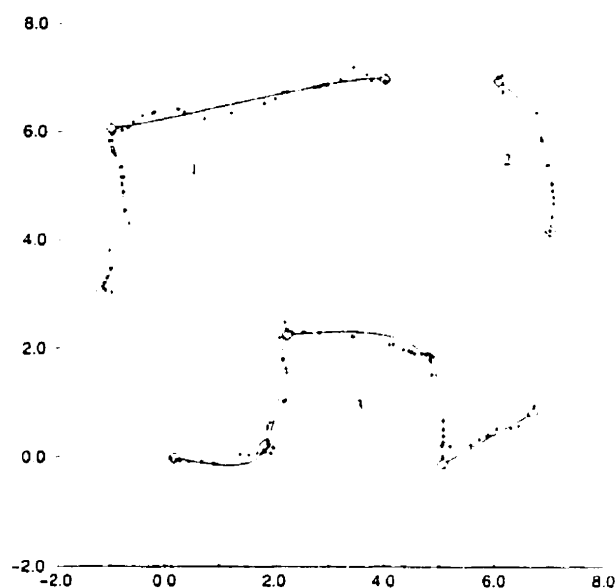


Figure 5.33 : L'intersection 3 : les mesures et les murs reconstruits

Tableau 5.20 : L'évaluation de la reconstruction de l'intersection 3

Paramètres	Murs					
	orig.	rec.	orig.	rec.	orig.	rec.
N	2	2	1	1	5	4
$\langle d_3 \rangle$	0.17	0.08	0.12	0.06	0.19	0.13
σ_{d_3}	0.0089	0.0038	0.0038	0.0022	0.0052	0.0059
$d_{3\max}$	0.39	0.29	0.23	0.15	0.38	0.34

Dans le cas de cette intersection aussi les murs reconstruits sont plus proches des mesures que les murs originaux.

L'intersection 3. Celle-ci aussi est composée de trois murs (figure 5.33). L'une d'elles, la troisième, est faite de plusieurs tronçons très marqués mais courts. Nous pouvons voir (tableau 5.20) que la pré-segmentation manque une décomposition. Le phénomène est le même que pour le mur 1 de l'intersection 2, mais inversé : les mesures plus éloignées utilisées par les dérivations et lissages atténuent l'angle. Ce manque

d'un tronçon ainsi que la forme compliquée font que la reconstruction n'améliore pas autant les distances entre les mesures et le mur que dans le cas des autres murs.

5.4.5.2 Expérience 2 : des reliefs d'amplitude et régularité différentes

Dans cette expérience, nous avons reconstruit un mur à partir de reliefs d'amplitude et régularité différentes. Le protocole est le même que pour l'expérience correspondante pour les galeries mais nous n'avons utilisé que les amplitudes a_1 , a_2 et a_3 (tableau 5.12, page 201), l'amplitude a_4 n'ayant pas beaucoup de sens dans le cas des intersections.

La figure 5.34 montre les mesures extraites des différents reliefs ainsi que la reconstruction qui en est faite. Regardons d'abord les tronçons détectés et la position de leurs extrémités. La première constatation à faire est que la décomposition est stable en fonction des paramètres du relief. En effet, il n'y a que pour les deux pires cas, (a_3, l) et (a_3, u) que la décomposition est différente et que la forme du mur s'en trouve très modifiée. Comme pour l'intersection 3 (figure 5.33), le coin de la bosse du mur situé approximativement en $(5; 2)$ n'est pas détecté. Notons aussi que toute la partie supérieure du mur n'est décomposée que pour les deux pires reliefs. La forme de la reconstruction de ce grand tronçon laisse supposer que la valeur maximale de r_i à ces extrémités était trop faible. Les valeurs obtenues pour les paramètres r_1 et r_2 de ce tronçon confirme ce fait (les valeurs sont très proches du maximum utilisé (soit 15)).

Quand le maximum permis lors de l'optimisation des paramètres r_0 , et r_{1i} d'un tronçon est trop faible, nous obtenons un tronçon trop rectiligne qui ne peut pas s'approcher suffisamment des mesures.

Nous constatons aussi que certains débuts de tronçon ne sont pas positionnés sur les angles mais que ces derniers sont tout de même bien reconstruits par une forte courbure du tronçon en cet endroit. C'est le second problème de notre reconstruction avec la représentation explicite des angles. Ceci pose un problème du point de vue de l'utilisation de la reconstruction. En effet, les angles des murs ne se trouvent pas

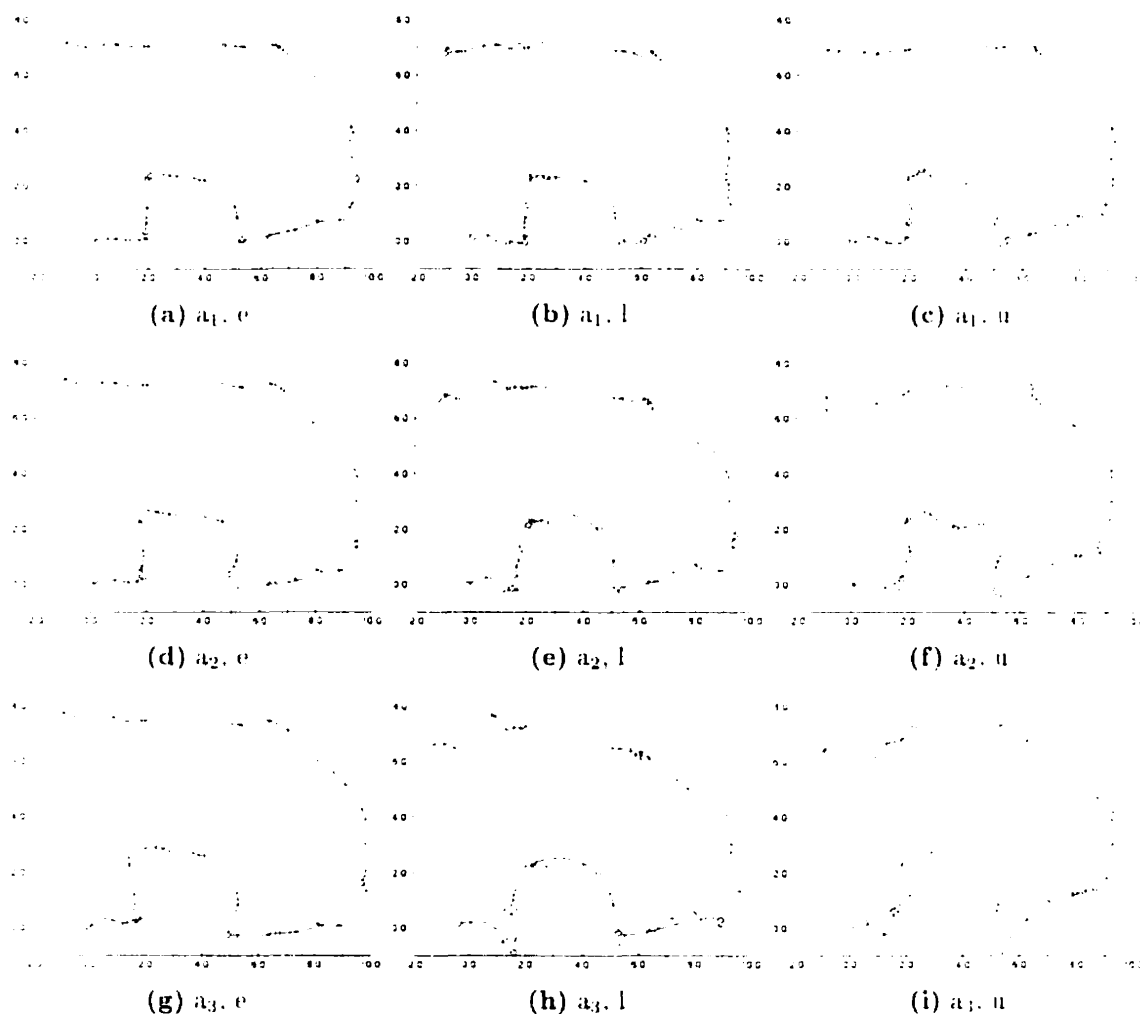


Figure 5.34 : Les reconstructions d'un mur en fonction des paramètres du relief

seulement aux endroits de changement de tronçons et doivent donc aussi être cherchés à l'« intérieur » des tronçons. Toutefois, ce problème pourrait être réglé, encore une fois, en déterminant les maxima des r_i d'une façon plus adéquate (section 5.4.5.4). Une forte courbure du tronçon n'est en effet possible que si ses paramètres r_{0i} et r_{1i} peuvent prendre de grandes valeurs. Il faut donc diminuer la valeur maximale de ces paramètres.

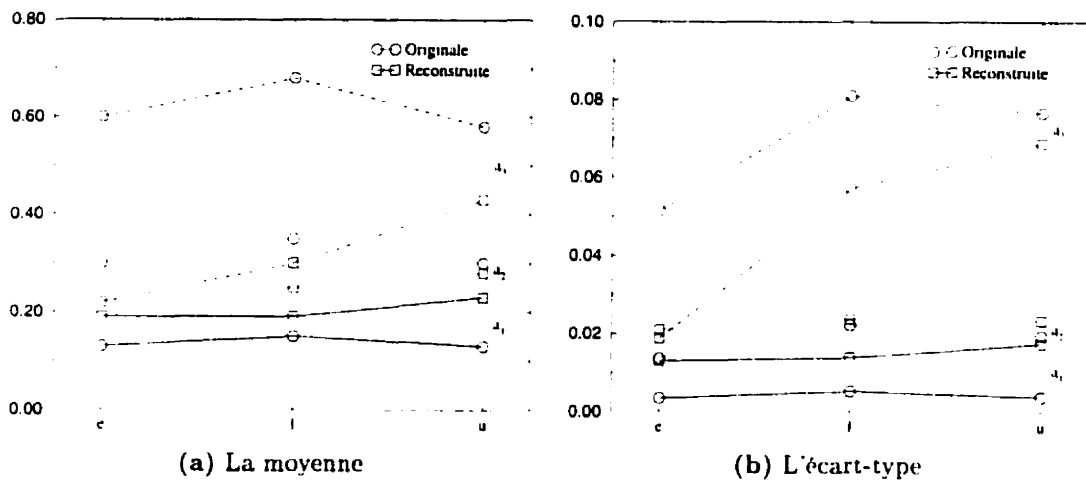


Figure 5.35 : Les distances globales entre mesures et mur en fonction des paramètres du relief

Une valeur trop forte du maximum permis lors de l'optimisation des paramètres r_{0i} et r_{1i} d'un tronçon implique que le tronçon peut présenter de fortes courbures. Ceci peut faire en sorte que les débuts du tronçon sont déplacés par rapport à l'angle du mur et même conduire à la formation de boucles.

La figure 5.35 montre les moyennes et écarts-types des distances globales entre mesures et murs (original et reconstruits) en fonction des paramètres du bruit. Nous constatons que mis à part le cas de la plus forte amplitude, la moyenne et l'écart-type des distances sont indépendants de la régularité du relief. La reconstruction est généralement meilleure que l'original (au sens des distances). Ceci n'est toutefois pas le cas de l'amplitude a_1 (pour la moyenne et l'écart-type) et de l'amplitude a_2 (pour l'écart-type). Ceci provient de la valeur maximale trop basse de r_i qui empêche une bonne reconstruction du tronçon supérieur⁽²³⁾. Par contre, une nette dégradation de la distance globale apparaît pour l'amplitude a_3 , la reconstruction étant toutefois

⁽²³⁾ C'est aussi le cas des reconstruction avec l'amplitude a_2 , mais dans ce cas le biais plus important du relief ailleurs dans le mur est compensé par la reconstruction ce qui diminue la distance globale.

Tableau 5.21 : Les différentes densités de mesures utilisées dans la troisième expérience sur la reconstruction des intersections

	Densités (m^{-1})
d_1	20
d_2	10
d_3	5
d_4	2
d_5	1

meilleure que l'original.

En conclusion, le nombre de tronçons donnés par la pré-segmentation n'est pas très sensible au relief. D'autre part, et l'expérience précédente l'avait déjà montré, la reconstruction compense bien pour le biais du relief — sauf si le maximum des paramètres r_i des tronçons est trop faible.

5.4.5.3 Expérience 3 : des mesures de différentes densités

Comme pour les galeries, nous étudions aussi la sensibilité à la densité des mesures. Toutefois, les densités considérées ne sont pas les mêmes, les dimensions des intersections n'étant pas les mêmes (tableau 5.21).

La figure 5.36 montre les mesures ainsi que la reconstruction qui en est faite. L'évolution du nombre de tronçons détectés par la pré-segmentation est conforme à ce que nous avons déjà dit. En effet, tous les tronçons sont correctement détectés pour les deux plus fortes densités, l'angle de la bosse en (5:2) n'est plus détecté à partir de la troisième densité. Finalement, pour les densités d_4 et d_5 , le nombre de tronçons détectés continu à décroître, mais nous constatons que les événements importants du mur sont quand même présents dans la pré-segmentation.

La figure 5.37 montre les moyennes et écarts-types des distances globales entre les mesures et les murs reconstruits et originaux. Nous constatons que pour les densités d_1 , d_2 et d_3 , la reconstruction est meilleure que l'original au sens de la dis-

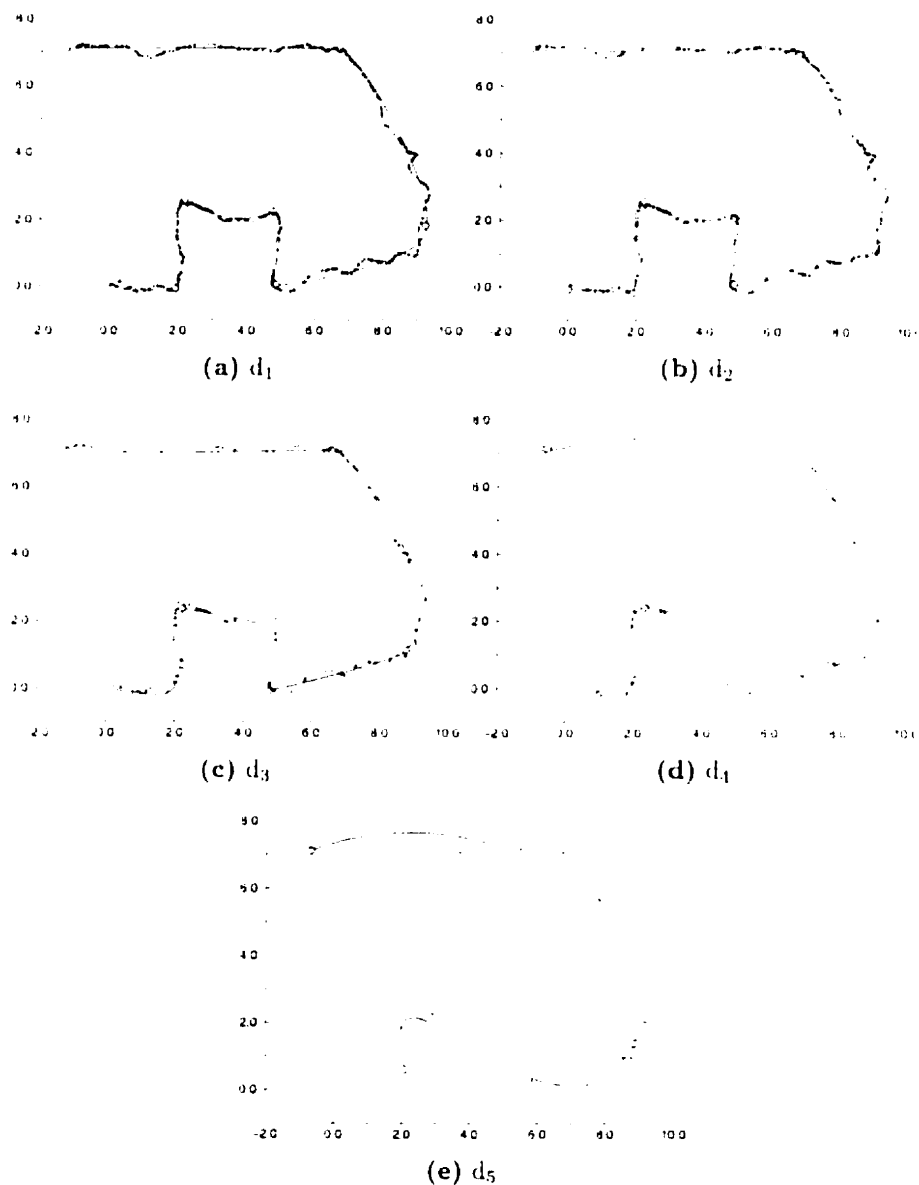


Figure 5.36 : Les reconstructions et les mesures en fonction de la densité de mesures

tance moyenne et de l'écart-type. Nous notons ensuite une nette dégradation de la reconstruction qui devient moins bonne que l'original pour la densité d_4 . Comme dans l'expérience précédente, cela est dû à un nombre de tronçons insuffisant pour correctement suivre les mesures. Notamment, nous pouvons voir quelques mesures

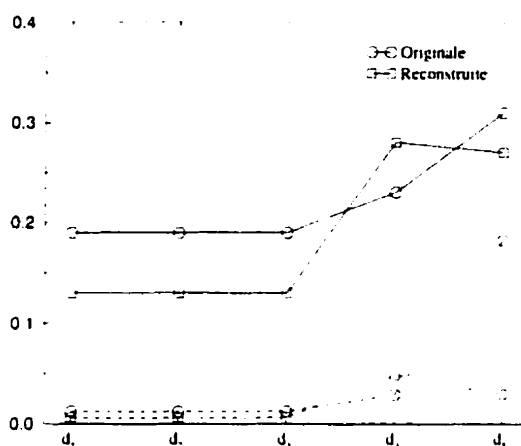


Figure 5.37 : Les distances globales entre mesures et mur reconstruit et original en fonction de la densité des mesures : la moyenne en traits pleins et l'écart-type en traits tirets

appartenant à la bosse qui sont très éloignées de la reconstruction et qui ne sont pas assez nombreuses pour conduire à la détection d'un tronçon supplémentaire (figure 5.36(d)). Ces mesures contribuent dans une bonne part au mauvais score de cette reconstruction.

Ensuite, un phénomène intéressant est observé : la reconstruction s'améliore pour la plus faible densité (d_5) et redevient plus proche des mesures que l'original. Cela vient du fait que le nombre de mesures est tellement faible que la reconstruction devient une méthode *ascendante* (voir la section 5.1) où chaque primitive n'est plus contrainte que par le nombre strictement nécessaire à la détermination de ses paramètres.

En conclusion, la densité des mesures n'est pas très importante pour la reconstruction des murs, les courbes représentant les tronçons de mur étant flexibles, sauf si l'emplacement des mesures est mal choisi. Notons d'autre part qu'une bonne densité pour un mur est beaucoup plus élevée que pour une galerie (cinq mesures par mètre pour les murs contre une mesure par mètre pour les galeries).

5.4.5.4 Conclusion sur la reconstruction des murs d'intersections

Notre système, tel qu'il est, reconstruit correctement les murs d'intersections. Notamment, le biais du relief est très bien compensé.

Tous les problèmes que nous avons montrés et qui se produisent lors de l'optimisation sont dus à une mauvaise valeur du maximum permis d'une partie des paramètres (les paramètres r_i). Dans le cadre d'un système final, il serait donc intéressant de mieux déterminer ce maximum, notamment d'en avoir un pour chaque tronçon. Ce maximum doit dépendre de la longueur des tronçons, longueur qui peut être estimée en sommant les distances entre mesures.

Un modèle plus sophistiqué pour les tronçons pourrait aussi être envisagé. Notamment, les courbes de type NURBS, bien que d'utilisation plus complexe, présentent une bonne capacité à approcher des données telles que les nôtres. Elles permettent de plus de représenter des formes très complexes au détriment d'un grand nombre de paramètres et, notamment, une représentation explicite des angles.

5.5 Un exemple de mine complète

Nous décrivons ici le résultat de la reconstruction de la géométrie des excavations d'une mine complète. La mine reconstruite est celle dont le schéma est donné à la figure 3.4, page 86. Les mesures proviennent de la simulation de l'arpentage automatique d'une mine virtuelle (section 4.3.2) et sont exprimées dans un référentiel absolu tel que le sont les données fournies par tout arpentage (section 4.1). La figure 4.7 page 147 montre les profils extraits lors de l'exploration de la mine virtuelle. La figure 5.38 montre les mesures qui sont extraites de ces profils. Ces mesures sont les points les plus contraignants des profils, c'est-à-dire les points les plus intérieurs à droite, à gauche et en hauteur.

Les galeries de cette mine virtuelle sont composées de tronçons de galerie droits et circulaires. Ainsi, deux galeries de la mine originale (G_5 et G_7) ne sont pas con-

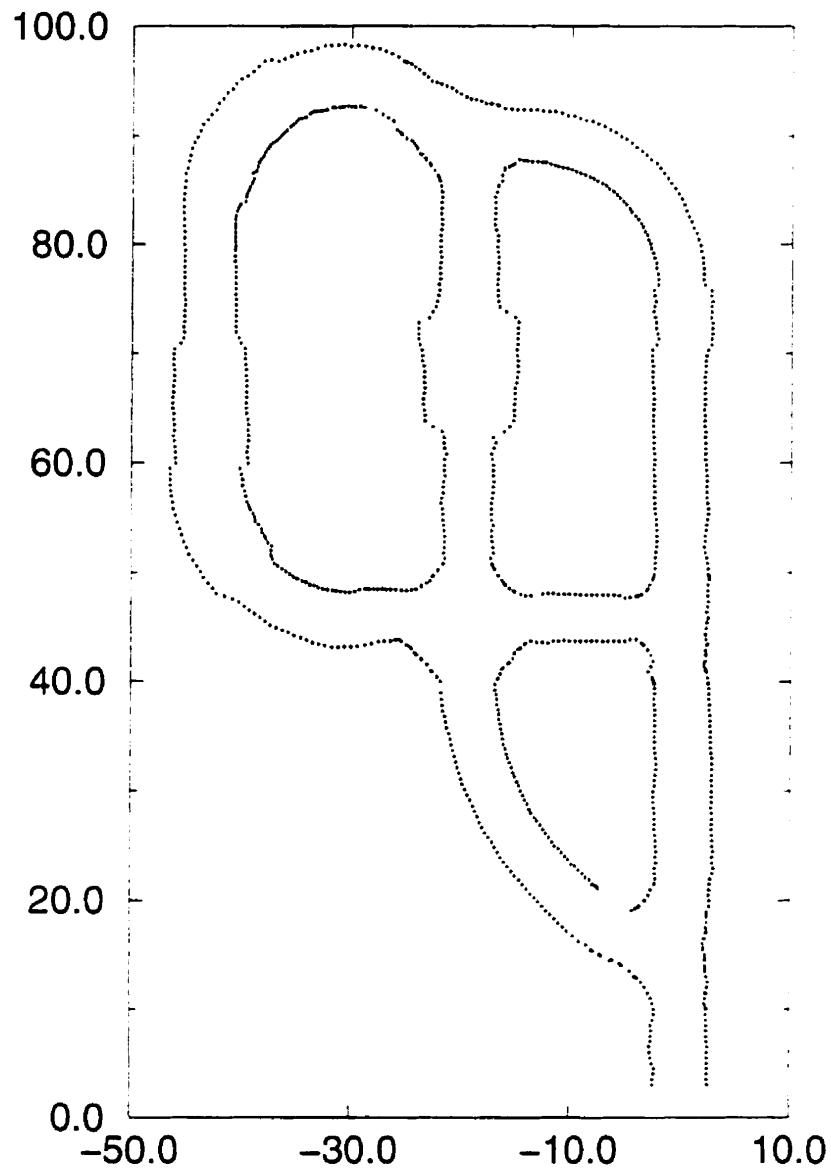


Figure 5.38 : Les mesures extraites des profils. Seules les coordonnées x et y sont montrées.

formes au modèle de galerie : leur courbure n'est pas continue. Nous étudierons la conséquence de ceci à la section 5.5.1. Comme dans les expériences précédentes, les galeries originalement rectilignes sont reconstruites avec une courbure non nulle bien

que très faible. Nous ne décrivons pas plus la reconstruction de ces galeries. La figure 5.38 montre un trou important dans les mesures à l'extrémité d'une des galeries : la galerie circulaire partant de l'intersection du bas. Nous verrons que cela n'affecte pas la reconstruction de la galerie et son raccordement à l'intersection (section 5.5.2). Une dernière section montrera le raccordement des galeries aux intersections (section 5.5.3). Les intersections de cette mine sont toutes très simples, notre logiciel de création de mine virtuelle ne pouvant, actuellement, que créer des murs d'intersection en un seul tronçon de forme droite ou polynomiale de degré trois. Nous ne discuterons donc pas ici des résultats de la reconstruction des intersections. Nous décrirons à la section 5.5.4 comment sont construits les graphes de décomposition, de connexion et de raccordement.

La figure 5.39 montre la reconstruction de la mine dans son ensemble. Une vue 3D de la reconstruction est aussi montrée à la figure 3.8 page 92.

5.5.1 Reconstruction de galeries dont la courbure n'est pas continue

Une première galerie originale dont la courbure n'est pas continue est G_5 (figure 5.39). La figure 5.40 montre les mesures ainsi que la reconstruction qui en est faite. Cette galerie est initialement constituée de trois tronçons ayant la même largeur (5 m). Les deux premiers tronçons sont droits, le troisième est circulaire (courbure de 0.07 m^{-1}). Le premier tronçon a une hauteur de 5 m, les deux suivants de 3.75 m. La différence de hauteur impose donc une coupure entre le premier et le second tronçon lors de la reconstruction. D'autre part, un relief fortement biaisé sur le second tronçon⁽²⁴⁾ impose aussi une coupure entre le second et le troisième tronçon. Malgré cela, la reconstruction est visuellement proche des mesures. Ceci vient du fait que le biais du relief du second tronçon est dans le bon sens et permet une transition douce entre le

⁽²⁴⁾Lors de la génération de la mine virtuelle, les tronçons sont construits individuellement puis raccordés ce qui fait que des cassures peuvent apparaître entre les différents tronçons.

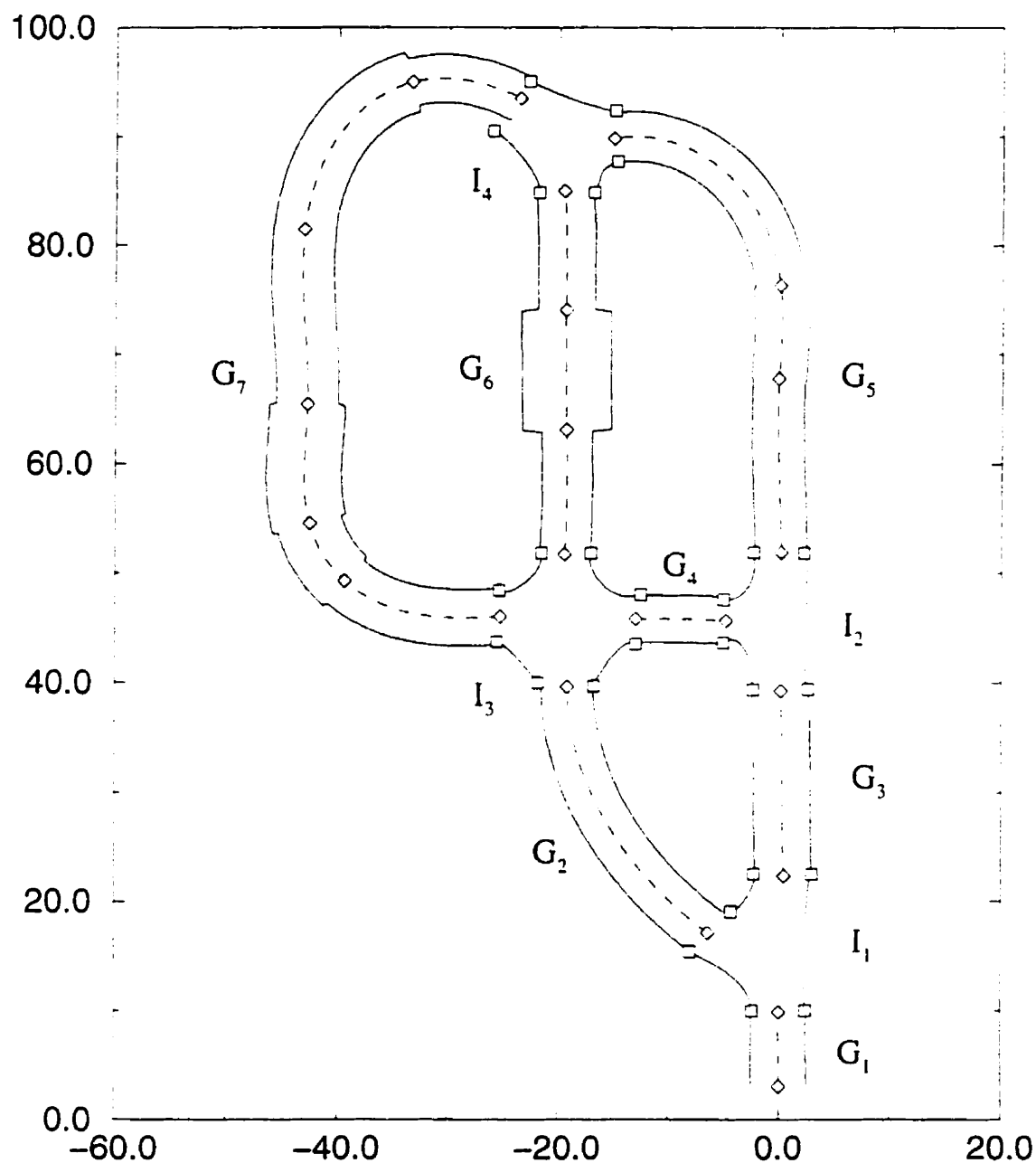


Figure 5.39 : La reconstruction de la mine dans son ensemble

tronçon rectiligne et le tronçon circulaire.

Le cas de la galerie G_7 (figure 5.39) est plus complexe. La figure 5.41 montre

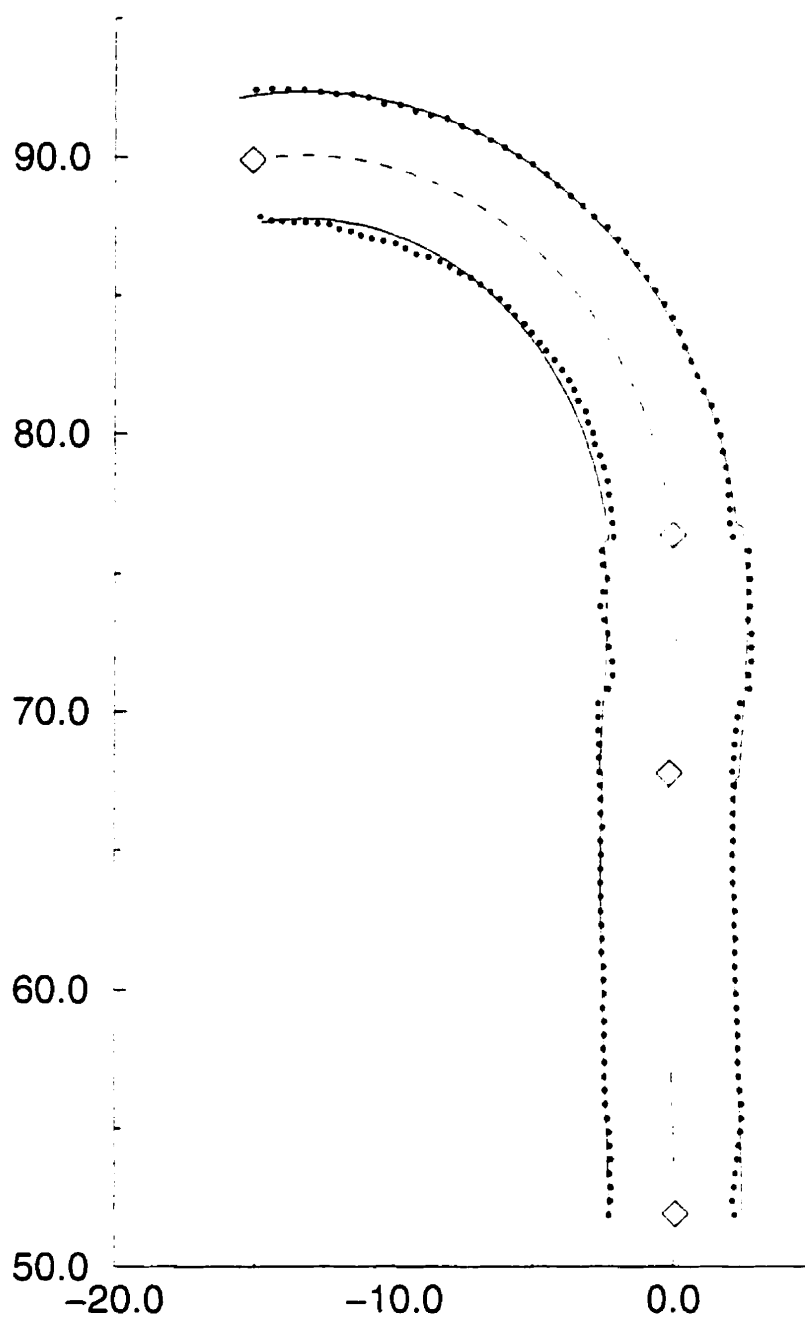


Figure 5.40 : Mesures et reconstruction de la galerie G_5

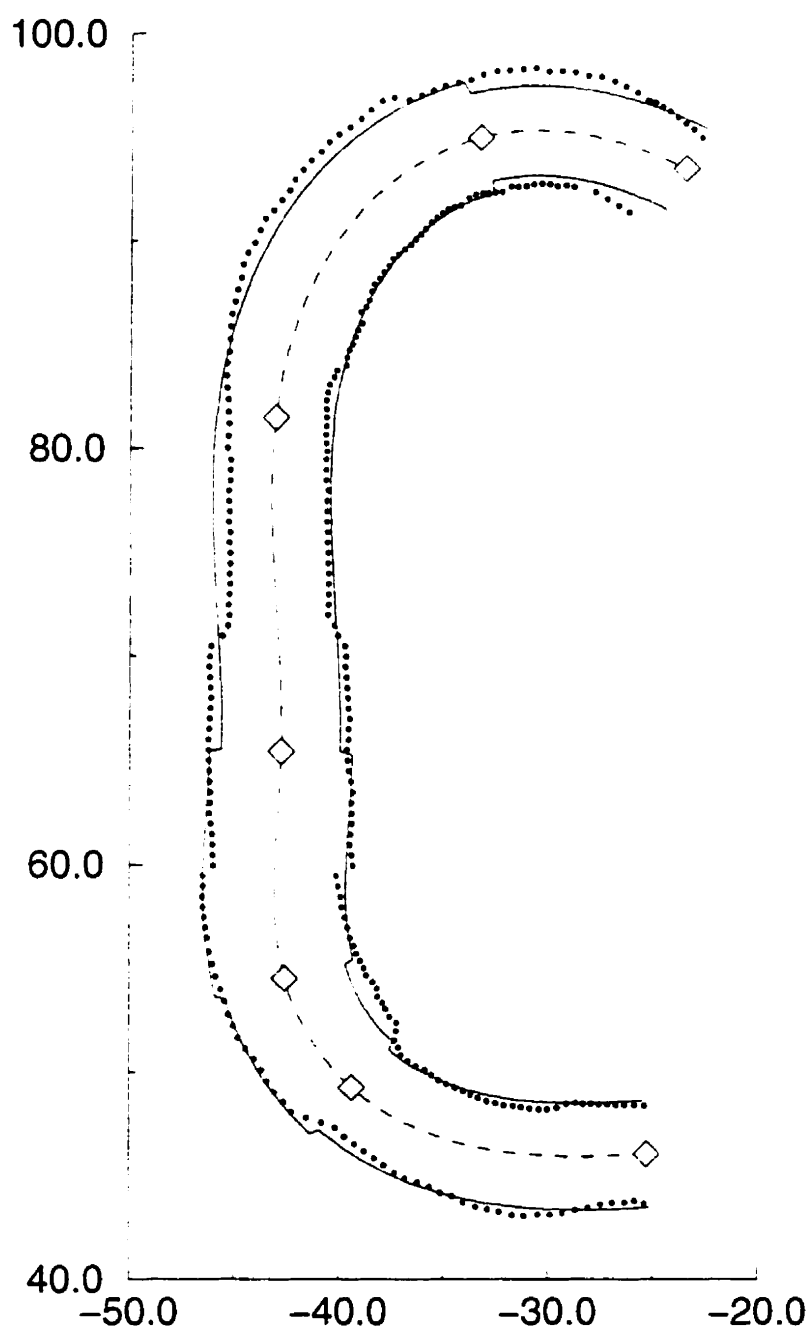


Figure 5.41 : Mesures et reconstruction de la galerie G_7

les mesures de cette galerie ainsi que sa reconstruction. La galerie originale corres-

pondante est constituée, en partant du point $(-25 : 45)$, de deux tronçons circulaires suivis de deux tronçons droits puis de deux autres tronçons circulaires. Les deux premiers tronçons ont la même courbure $(-0,07 \text{ m}^{-1})$ mais pas la même largeur (5 m et 6.5 m). Les deux tronçons droits ont respectivement 6.5 m et 5 m comme largeur. Malgré la même largeur des second et troisième tronçons, les mesures présentent un changement de largeur à ce changement de tronçon à cause des différences de biais. Les deux derniers tronçons ont la même largeur mais la différence de biais crée aussi un changement de largeur. Leur courbures sont dans l'ordre $-0,07 \text{ m}^{-1}$ et $-0,10 \text{ m}^{-1}$. Les tronçons sont donc tous significativement différents les uns des autres du point de vue de la largeur — tous les tronçons ont à peu près la même hauteur (les différences sont noyées dans le relief). Malgré cela, la reconstruction a créé des tronçons ne commençant pas nécessairement aux changements de largeur, ce qui est visible à la figure 5.41. Ceci vient du fait que la courbure de la galerie originale n'est pas continue et est donc difficile à approcher par une galerie conforme à notre modèle. Toutefois, la figure 5.41 montre que qualitativement, la galerie est bien reconstruite. Notamment, la reconstruction a donné deux tronçons courbés, deux tronçons globalement rectilignes et enfin deux tronçons courbés. La sortie du dernier tronçon est toutefois décalée par rapport aux mesures, ce qui aura une conséquence sur le raccordement avec l'intersection (section 5.5.3). Une meilleure reconstruction aurait été possible avec plus de tronçons, comme nous l'avons déjà remarqué lors de la première expérience sur les galeries (galerie 5, section 5.3.6.1).

5.5.2 Reconstruction à partir de données incomplètes

La galerie G_2 est reconstruite à partir de mesures incomplètes. La figure 5.42 montre les mesures ainsi que la reconstruction qui en est faite. Le manque de mesures provient du fait que la trajectoire du véhicule qui a exploré la mine n'a pas permis l'acquisition de mesures sur cette portion de paroi de la mine. Malgré ce manque, la galerie est correctement reconstruite dans la mesure où elle suit les mesures présentes. Nous

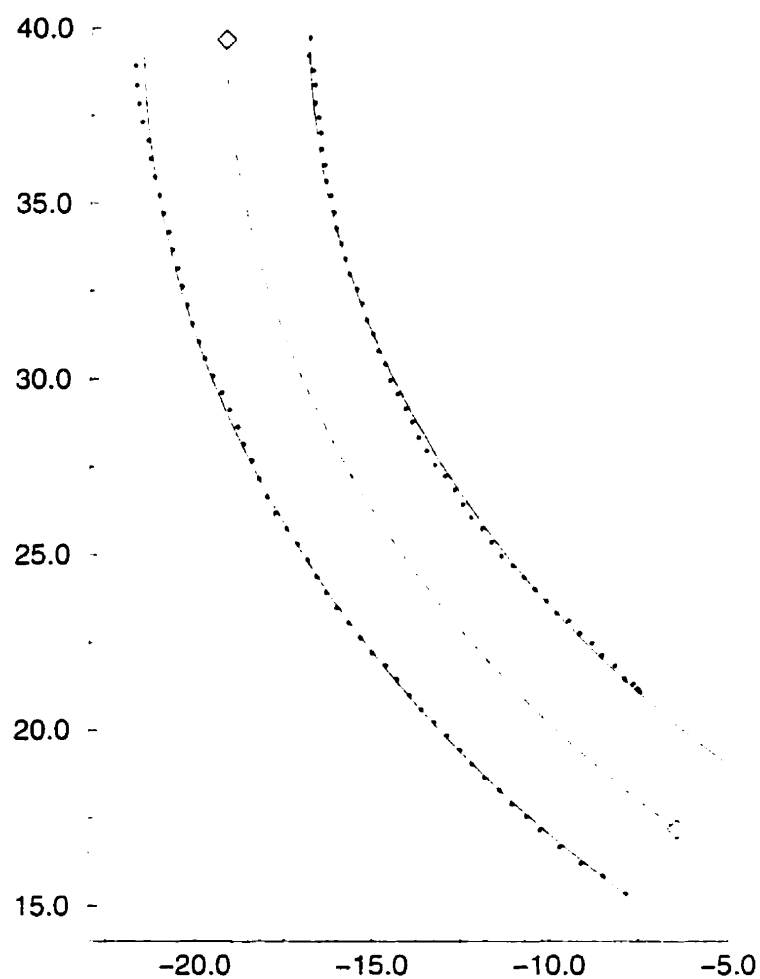


Figure 5.42 : Les mesures et la reconstruction de la galerie G_2

verrons à la section 5.5.3 que le raccordement de cette galerie avec l'intersection correspondante est correct.

5.5.3 Raccordement des galeries aux intersections

Les figures 5.43 à 5.46 montrent la reconstruction des différentes intersections de la mine avec l'arrivée des différentes galeries qui y sont connectées. Nous pouvons voir que l'écart de raccordement est au plus de l'ordre de la distance entre deux mesures.

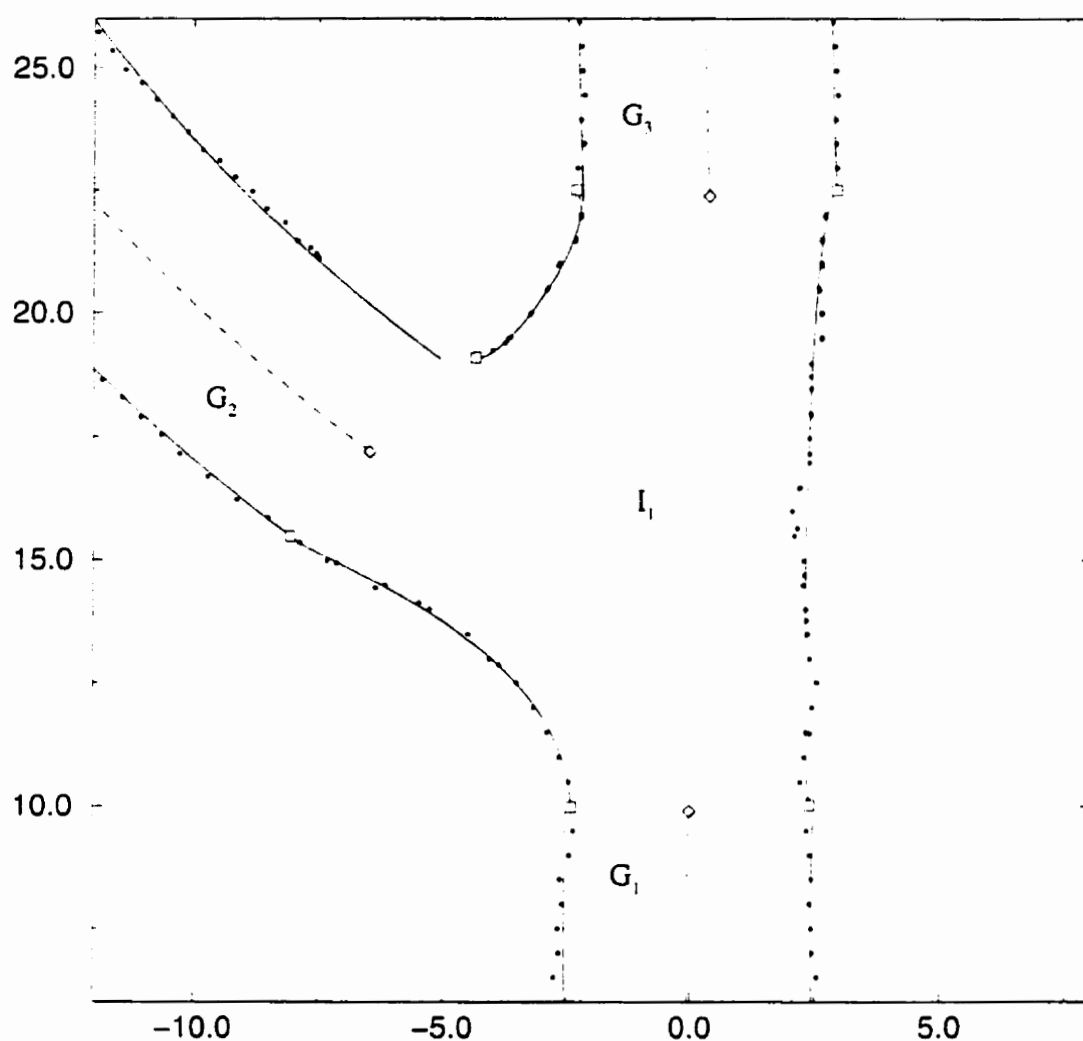


Figure 5.43 : Le raccordement entre l'intersection I_1 et les galeries qui y sont connectées

sauf dans le cas du raccordement entre la galerie G_7 et l'intersection I_4 .

En particulier, la galerie G_2 est correctement raccordée à l'intersection I_1 (figure 5.43). Un léger espace est toutefois présent, espace dû au manque d'une ou deux mesures sur le mur de l'intersection.

La galerie G_4 empiète sur un mur de l'intersection I_2 . Ceci vient du fait que la galerie reconstruite est courbée au lieu d'être droite. En effet, la fin du mur à

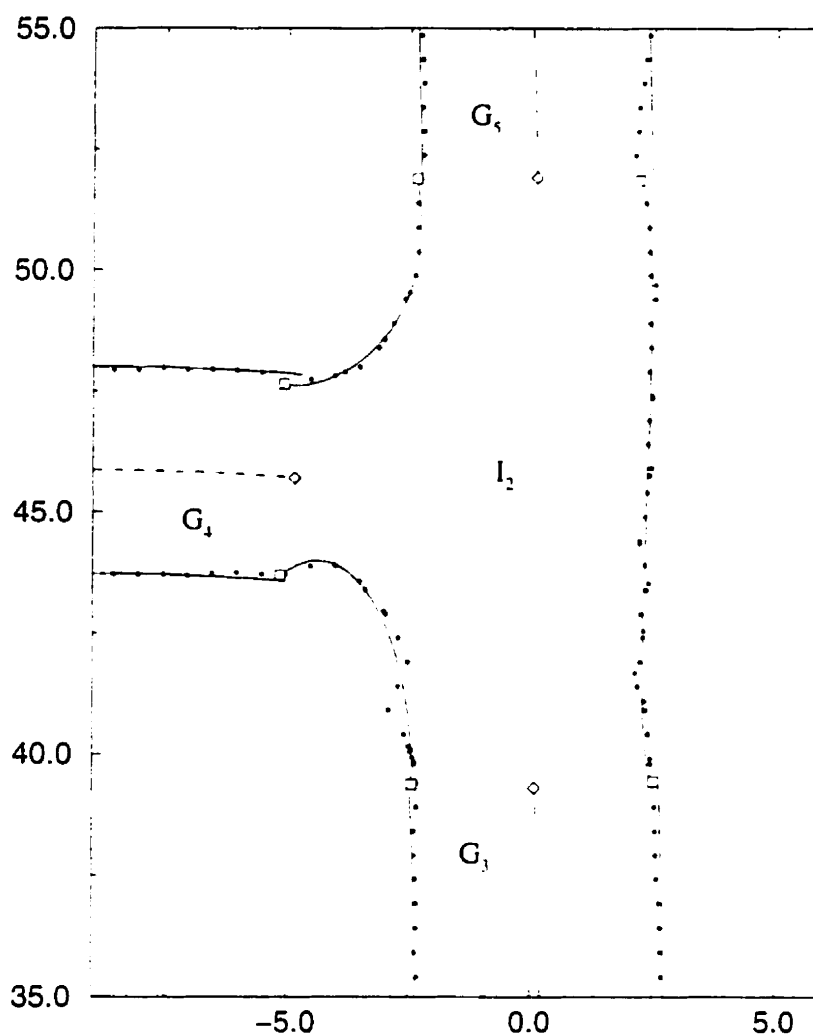


Figure 5.44 : Le raccordement entre l'intersection I_2 et les galeries qui y sont connectées

l'extérieur par rapport au centre de rotation est alors trop « tard » par rapport aux mesures. C'est aussi le cas du raccordement entre G_6 et I_4 (figure 5.46). La galerie G_7 et l'intersection I_3 se chevauchent aussi (figure 5.45) pour la même raison mais provenant d'une courbure trop importante à son extrémité.

Le raccordement entre la galerie G_7 et l'intersection I_4 (figure 5.46) est mauvais, dû au problème de reconstruction de cette galerie (section 5.5.1). Ceci a pour con-

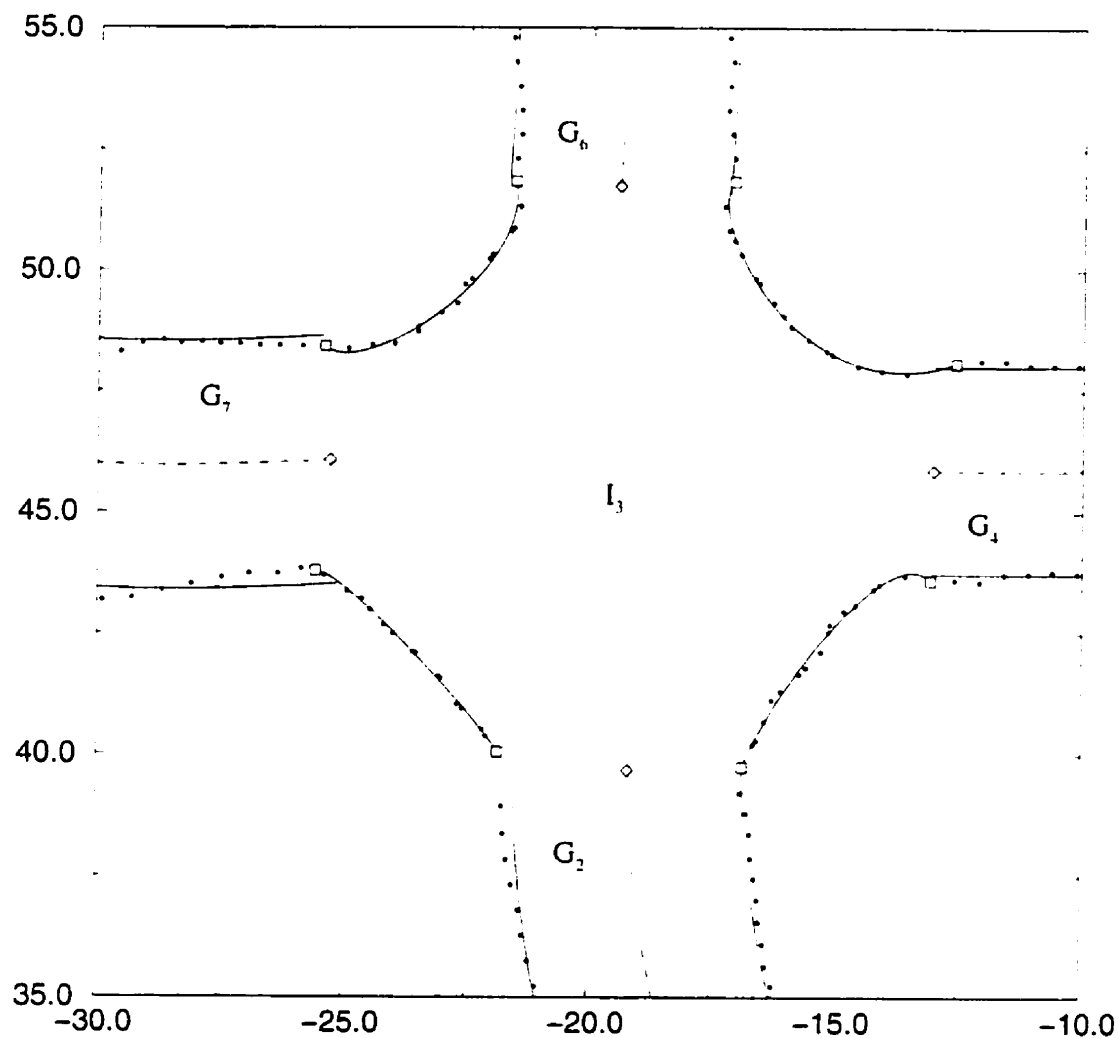


Figure 5.45 : Le raccordement entre l'intersection I_3 et les galeries qui y sont connectées

séquence de créer un trou dans la représentation de la mine. Le trou en lui-même n'a pas une grande importance, mais le mauvais positionnement de la galerie par rapport à l'intersection en a, notamment pour la navigation. Cette galerie est encore un exemple où plus de tronçons auraient été nécessaires.

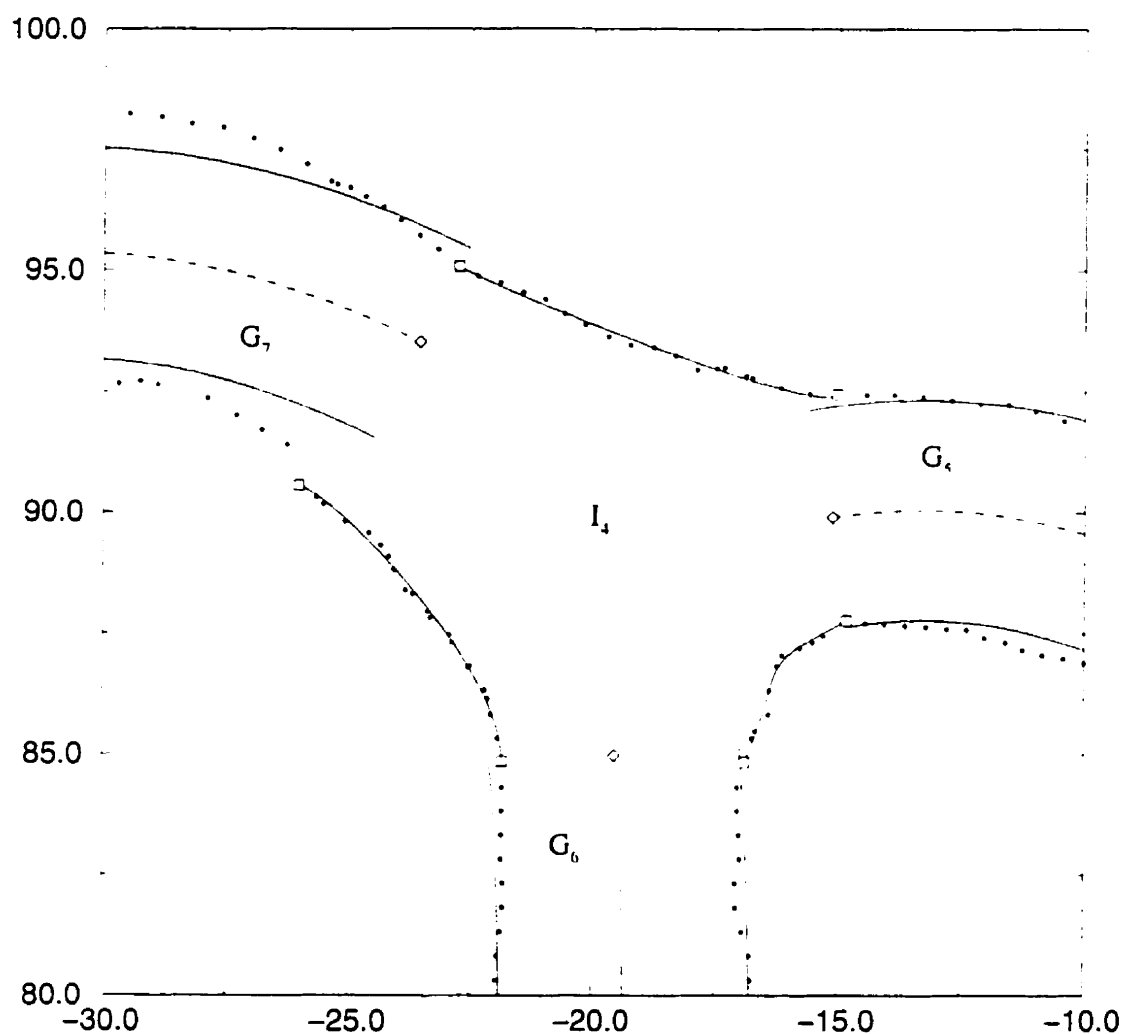


Figure 5.46 : Le raccordement entre l'intersection I_1 et les galeries qui y sont connectées

5.5.4 Construction des graphes de la géométrie des excavations

L'arbre de décomposition de l'attribut *géométrie des excavations* est déterminé par le graphe utilisé lors de l'exploration et par la reconstruction. Le graphe utilisé par l'exploration est un graphe dont les nœuds sont les intersections (et les chambres) et

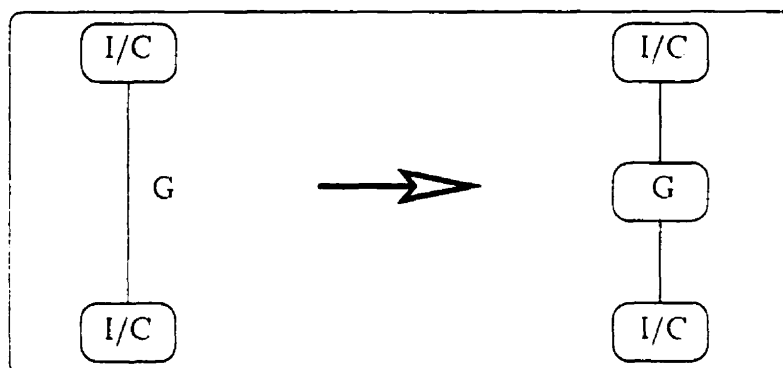


Figure 5.47 : La transformation du graphe de l'arpentage en le graphe des connexions

dont les arcs sont les galeries joignant les intersections. Ce graphe donne donc une première décomposition des excavations en termes de *salles*, *chambres* et *galeries*. Le graphe donne aussi la topologie de chaque intersection, notamment le nombre de murs formant chaque intersection. Le résultat de l'arpentage est un ensemble de mesures de chaque mur d'intersection. L'arpentage fournit donc aussi la décomposition des intersections (et chambres) en murs. La reconstruction, quant à elle, décompose les galeries en tronçons de galerie et les murs en tronçons de mur. Toute l'information nécessaire pour construire le graphe de décomposition est donc disponible. Une représentation graphique de ce graphe est montrée à la figure 3.9, page 93.

Le graphe représentant la relation de connexion est construit à partir du graphe utilisé par l'arpentage. Dans ce graphe, les arcs représentant les galeries sont remplacés par un nœud *galerie* et deux arcs représentant les connexions entre la galerie et les intersections ou chambres reliées par l'arc original (figure 5.47).

Enfin, le graphe représentant les raccordements est construit à partir du graphe des connexions et de la décomposition donnée par la reconstruction. Les connexions donnent les raccordements entre les tronçons de galerie aux extrémités des galeries et les intersections ou chambres. La décomposition des galeries donne les raccordements entre les tronçons formant une galerie. Le graphe des raccordements peut donc

Tableau 5.22 : Les arcs de raccordement et leur quantification

Arcs	Référentiels
(TG_{1G_1}, I_1)	(2; 1)
(TG_{1G_2}, I_1)	(2; 2)
(TG_{1G_2}, I_3)	(2; 2)
(TG_{1G_3}, I_1)	(1; 3)
(TG_{1G_3}, I_2)	(2; 1)
(TG_{1G_4}, I_2)	(2; 2)
(TG_{1G_4}, I_3)	(1; 1)
(TG_{1G_5}, I_2)	(1; 3)
(TG_{1G_5}, TG_{2G_5})	(2; 1)
(TG_{2G_5}, TG_{3G_5})	(2; 1)
(TG_{3G_5}, I_4)	(2; 3)
(TG_{1G_6}, I_3)	(1; 4)
(TG_{1G_6}, TG_{2G_6})	(2; 1)
(TG_{2G_6}, TG_{3G_6})	(2; 1)
(TG_{3G_6}, I_4)	(2; 1)
(TG_{1G_7}, I_3)	(1; 3)
(TG_{1G_7}, TG_{2G_7})	(2; 1)
(TG_{2G_7}, TG_{3G_7})	(2; 1)
(TG_{3G_7}, TG_{4G_7})	(2; 1)
(TG_{4G_7}, TG_{5G_7})	(2; 1)
(TG_{5G_7}, TG_{6G_7})	(2; 1)
(TG_{6G_7}, I_4)	(2; 2)

être construit (figure 3.9 page 93). Un sens ayant été donné aux galeries lors de leur arpentage, nous pouvons numérotter les référentiels associés aux différents tronçons de galerie. L'arpentage ayant aussi associé à chaque mur d'intersection (et de chambre) un numéro unique, nous pouvons aussi numérotter les référentiel associés aux intersections. La relation de raccordement peut donc être quantifiée. Les arcs de raccords ainsi que les couples d'indices de référentiels associés à chaque arc sont montrés dans le tableau 5.22.

5.6 Récapitulation

Après avoir proposé un modèle générique d'objets et l'avoir appliqué au cas des mines souterraines, nous avons vu comment construire une représentation suivant ce modèle. Nous avons proposé un système qui, partant de données d'arpentage, segmente les galeries et les murs d'intersections en tronçons de galerie et de mur respectivement. Les données utilisées peuvent provenir d'un arpentage manuel ou d'un arpentage automatique. En effet, ce second type d'arpentage, bien qu'encore à l'état expérimental, est plus satisfaisant que le premier dans l'optique de l'automatisation minière. Toutefois, les compagnie minières disposant d'une quantité phénoménale de données provenant de l'arpentage manuel, il nous a paru indispensable de pouvoir partir de ce type de données pour la construction de représentation.

Les résultats expérimentaux ont montrés que le système que nous proposons se comporte de manière satisfaisante en présence d'un relief important des parois ainsi qu'avec des données éparées. Certaines faiblesses du système sont aussi apparues, surtout au niveau de la construction des murs d'intersection et lorsque la forme des galeries est très éloignée de notre modèle clothoïdal parfait. Mais de telles géométries correspondent en fait à des galeries pas ou peu navigables. En effet, la courbure de la trajectoire d'un véhicule est nécessairement constante⁽²⁵⁾ et varie généralement de façon linéaire avec l'abscisse curviligne de la trajectoire — ce qui produit une clothoïde. En général, la reconstruction produit donc une représentation qui satisfait les critères que nous nous étions fixés au départ, à savoir d'être proche des données et de se prêter à la planification et au suivi de chemins de véhicules miniers.

⁽²⁵⁾Ceci n'est pas tout à fait vrai pour les véhicules articulés qui peuvent avoir une trajectoire dont la courbure n'est pas constante en faisant varier l'angle de leur articulation en étant à l'arrêt.

Conclusion

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à la modélisation générique des objets. Ce domaine de recherche est de plus en plus important pour l'industrie qui utilise, échange, produit, etc., une grande quantité d'information relative aux objets qu'elle manipule. Deux problèmes importants apparaissent. Le premier est que les objets impliqués peuvent être de natures très différentes. Ce sont par exemple des produits manufacturiers, des outils, des robots, des environnements de travail (ateliers, bureaux, mines souterraines), des objets naturels, des matériaux, etc. Le second problème est que pour faciliter la circulation de l'information à l'intérieur d'une compagnie comme entre plusieurs compagnies, il est important d'avoir un seul et même moyen de décrire l'information pour tous les objets impliqués et qui soit commun à toute l'industrie. Des normes sont donc apparues pour permettre cette intégration de types d'informations très différents. Notamment, nous avons décrit STEP, la norme ISO 10303 pour l'échange d'information relative aux produits manufacturiers. Nous avons vu que STEP réalise le caractère générique souhaité par la collection de primitives, méthodes de représentation, relations, etc., applicables aux différentes applications ciblées par STEP. Cette approche est donc valable tant que nous restons dans le cadre des applications ciblées mais ne l'est évidemment plus hors de ce cadre.

Nous avons donc opté pour une autre approche. Pour cela, nous avons développé GNOME (« GeNeric ObjectModel »), un modèle générique d'objets en se basant sur des critères extraits de la littérature et des besoins de l'industrie. Afin d'obtenir le caractère générique voulu, ce modèle ne fait pas de supposition quant aux primitives

de représentation mais, au contraire, permet l'utilisation de primitives quelconques. Ceci permet la modélisation des divers attributs de l'objet. Nous avons appelé les primitives des *objets-attributs* car elles sont des objets définis dans l'espace de représentation de chaque attribut. La modularité de GNOME est obtenue en utilisant comme structures de représentation des graphes dont les nœuds sont des objets-attributs et dont les arcs sont des relations entre les objets-attributs. Nous avons distingué trois types de graphes. Les graphes du premier type sont les arbres de décomposition. Il existe un de ces arbres pour chaque attribut. Ils créent la hiérarchie des attributs. C'est ce qui permet d'obtenir un modèle hiérarchique. Les graphes du second type expriment des relations, autre que la décomposition, entre les objets-attributs d'un même attribut. Il y en a donc potentiellement un par attribut. Il y a au plus un seul graphe du troisième type : il exprime des relations entre les objets-attributs des divers attributs. Les objets-attributs et les relations sont décrits qualitativement d'une part et quantitativement d'autre part. Un formalisme permettant de décrire entre autres les objets-attributs, les relations entre ceux-ci, la quantification des objets-attributs et des relations a été présenté. Ce formalisme est basé sur le formalisme de base de la théorie des ensembles.

Nous avons ensuite présenté GNOMine, un modèle de mines souterraines qui est une instance de GNOME. GNOMine permet la modélisation d'attributs des mines nécessaires à diverses opérations minières telles que la gestion du trafic, des conditions environnementales, du personnel ou de l'équipement, la navigation autonome ou encore la planification des activités minières. Les attributs représentés sont la géométrie des excavations, l'utilisation des excavations, l'équipement minier et, enfin, les structures rocheuses. Tous ces attributs, pourtant de natures très différentes, sont représentés utilisant le même formalisme, celui de GNOME. Les attributs sont aussi liés par des relations. Ce sont le positionnement de pièces d'équipement dans les excavations, l'attribution d'utilisations aux excavations et le positionnement des excavations dans les structures rocheuses. Ceci permet une intégration des différentes

informations relatives à une mine dans un cadre unique et centralisé qui permet aux différentes opérations minières d'utiliser les données dont elles ont besoin d'une façon uniforme. Cette intégration/uniformisation tend à devenir un sujet important pour les compagnies minières qui doivent automatiser leurs opérations afin de rester compétitives. Pourtant, celle-ci n'avait pas encore été réalisée, du moins pas au niveau structurel. En effet, des bases de données centralisant toutes les informations ont déjà été créées, mais celles-ci avaient des inconvénients. Par exemple, la même information pouvait être représentée sous des formes différentes ce qui rendait difficile la maintenance. Ou encore, les différents types d'information étaient représentés de façon non-uniforme ce qui imposait la création de plusieurs méthodes d'accès aux informations. Des applications commerciales récentes permettent de représenter les veines de minerais tandis que d'autres permettent de représenter les excavations. L'intégration, quand elle est faite, consiste en l'utilisation d'une méthode de représentation appliquée à l'autre type de données (représentation des excavations avec un modèle de bloc) ou en la simple juxtaposition des différentes représentations. GNOMine, quant à lui, uniformise les méthodes de représentation, structure les données, impose la représentation unique des informations et explicite les relations entre les différents types d'information. De plus, grâce à la modularité de GNOME, il est possible d'ajouter à GNOMine de nouveaux attributs.

Nous avons ensuite décrit comment nous pouvons construire des représentations d'excavation (l'un des attributs de GNOMine) à partir de données d'arpentage. Ceci est une partie d'une opération en laquelle l'industrie minière est actuellement intéressée : l'arpentage automatique des mines. En effet, cette opération est coûteuse car longue, répétitive et mobilisant du personnel et de l'équipement à cette seule fin. La partie exploratoire de l'arpentage automatique n'est actuellement qu'à l'état de recherche (par exemple dans le Groupe de Recherche en Perception et Robotique de l'École Polytechnique de Montréal). Des logiciels commerciaux réalisent déjà l'interprétation des données d'arpentage pour construire une description des excavations.

Toutefois, ces descriptions sont généralement non structurées (elles sont de « simples » modèles CAD) et peu utiles à des opérations telles que la navigation autonome de véhicules miniers. Notre modèle d'excavations présente les mêmes caractéristiques que les modèles classiques mais possède aussi des caractéristiques nouvelles utiles à la navigation : topologie hiérarchique des excavations, description quantitative sous forme de clothoïdes pour les galeries et représentation explicite des faits saillants que sont les angles dans les intersections. La méthode de reconstruction est basée sur le modèle et consiste en deux étapes. La première détermine le nombre de tronçons (de chaque galerie et mur d'intersection ou chambre) et calcule une estimation initiale des paramètres des galeries ou murs. La seconde étape est l'optimisation des paramètres. Elle minimise la distance euclidienne au carré entre les mesures d'arpentage et la galerie ou le mur estimé. Nous avons vu que même dans des conditions de relief important ou de mesures éparses, les résultats de reconstruction sont bons mais que quelques problèmes subsistent quand même. Notamment, pour les galeries, la détermination du bon nombre de tronçons n'est pas nécessairement facile et un trop grand nombre est préférable à un trop petit nombre du point de vue de la qualité de la reconstruction. Aussi, les galeries reconstruites ont tendance à s'approcher des mesures extrêmes, ce qui est un problème quand ces mesures correspondent à des trous des parois. Enfin, pour les murs d'intersections ou de salles, les angles tels que donnés par la reconstruction ne sont pas nécessairement placés au bon endroit des parois. Inversement, de faux angles peuvent apparaître. Ceci pose un problème dans l'utilisation des représentations pour la navigation dans la mesure où les angles peuvent servir de points de repère. L'utilisation d'un modèle de mur plus complexe, par exemple des NURBS au lieu des polynômes de degré 3 actuellement utilisés, devrait permettre de résoudre ce problème.

Lors de sa description, GNOME a été appliqué à un exemple simple de modélisation d'automobiles. Il a aussi été comparé à STEP ce qui nous a permis de montrer que, d'une part, GNOME peut être utilisé pour décrire STEP et, d'autre part, que GNOME

peut aussi décrire les modèles développés dans le cadre de STEP. Enfin, GNOME a été utilisé pour développer un modèle de mine souterraine. Tous ces exemples montrent que le caractère générique recherché a été atteint.

Outre la formalisation d'un modèle générique d'objets qui satisfait des critères importants dans le cadre de la modélisation générique, nous nous sommes attaché à définir des règles qui permettent de satisfaire ces critères. Ce sont par exemple la séparation des attributs, la description explicite de relations, la représentation de la hiérarchie, etc. Notre contribution comprend donc un modèle qui permet d'intégrer de façon homogène de l'information très variée et surtout de bonnes pratiques à appliquer lorsque nous voulons représenter un système complexe. Ce modèle et ces règles ont été appliqués au domaine des mines ce qui nous a permis de réaliser l'intégration dans un même cadre d'information variée pertinente à ce domaine.

Nous avons déjà montré un exemple de raisonnement générique sur la propagation des connexions en utilisant le formalisme de GNOME. Il serait maintenant intéressant de développer cet aspect de GNOME aussi bien d'un point de vue générique que d'un point de vue propre à des applications particulières. Notamment, il faudrait décrire une transformation permettant d'exprimer le formalisme de GNOME en des expressions d'un langage de raisonnement (du type de PROLOG par exemple). Ceci permettrait à GNOME de constituer la base de données de logiciels de simulation. Notamment, nous avons déjà décrit un module permettant la construction de représentations d'excavations. Il faudrait maintenant utiliser ces représentations par exemple pour planifier des chemins de véhicules, simuler et implanter la gestion du trafic ou de la ventilation, ou plus généralement simuler une mine en activité afin d'étudier les problèmes d'automatisation minière.

Bibliographie

- ALLEN, P. K. (1988). Integrating vision and touch for object recognition tasks. *International Journal of Robotics Research* 7(6), 15-33.
- ALLISON, J. E., BILODEAU, M. L. et DIMITRAKOPOULOS, R. G. (1995). 'The mine manager' — an application of computer gaming to mineral project decision making, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Montréal, QC, Canada, pp. 67-76.
- ATIYA, S. et HAGER, G. D. (1993). Real-time vision-based robot localization. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 9(6), 785-800.
- BARTIER, P. et KELLER, C. (1991). A taxonomy of GIS analytical capabilities for the geosciences, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Vancouver, BC, Canada, pp. 41-52.
- BEDELL, R. L. (1992). Digital mapping in mining: An African example. *Mining Magazine* pp. 86-89.
- BÉRANGER, V. (1996). Construction et reconnaissance de vues panoramiques pour la localisation dans un environnement inconnu. Master's thesis, Département de Génie Électrique et Génie Informatique, École Polytechnique, Montréal, QC, Canada.

- BERGEVIN, R. et LEVINE, M. D. (1993), Generic object recognition: Building and matching coarse descriptions from line drawings. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **15**(1), 19-36.
- BEUS, M. et ORR, T. (1992), Application of real-time monitoring to an underground mining environment, dans *Proceedings of the Canadian Symposium on Mining Automation*, pp. 68-77.
- BIEDERMAN, I. (1985), Human image understanding: Recent research and a theory. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* **32**(1), 29-73.
- BIGGS, N. L. (1985), *Discrete Mathematics*, Clarendon Press, Oxford.
- BINFORD, T. O. (1982), Survey of model-based image analysis systems. *International Journal of Robotics Research* **1**(1), 18-64.
- BINFORD, T. O., LEVITT, T. S. et MANN, W. B. (1989), Bayesian inference in model-based machine vision, dans L. N. Kanal, T. S. Levitt et J. F. Lemmer, éditeurs, *Uncertainty in Artificial Intelligence 3*, Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), pp. 73-95.
- BLAKE, A. et ZISSERMAN, A. (1987), *Visual Reconstruction*, The M.I.T. Press, Cambridge, MA.
- BOOTH, D. (1990), Digital geological mapping, *Mining Magazine* pp. 366-367.
- BRADY, M. (1983), Criteria for representations of shape, dans J. Beck, B. Hope et A. Rosenfeld, éditeurs, *Human and Machine Vision*, Academic Press, New York, NY, USA, pp. 39-84.
- BROOKS, R. A. (1981), Symbolic reasoning among 3-D models and 2-D images. *Artificial Intelligence* **17**(1-3), 285-348.

- BROOKS. R. A. (1983a), Model-based three-dimensional interpretations of two-dimensional images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **PAMI-5**(2), 140-149.
- BROOKS. R. A. (1983b), Solving the find-path problem by good representation of free space. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **SMC-13**(3), 190-197.
- BULLOCK. R. L. (1982), General mine planning, dans W. A. Hustrulid, éditeur, *Underground Mining Methods Handbook*, Society of Mining Engineers, New York, NY, USA, pp. 113-137.
- CAMPBELL. P. et SMITH. B. (1991), An integrated mine planning system for geology, surveying, and engineering, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Vancouver, BC, Canada, pp. 115-126.
- CHAN. K. et GU. P. (1993), A STEP-based generic product model for concurrent engineering, dans P. Gu et A. Kusiak, éditeurs, *Concurrent Engineering: Methodology and Applications*, Elsevier Science Publishers B.V., pp. 249-275.
- CHAN. S., MAK. H. et CLOUTIER, N. (1993), Product data sharing with STEP, dans P. Gu et A. Kusiak, éditeurs, *Concurrent Engineering: Methodology and Applications*, Elsevier Science Publishers B.V., pp. 277-298.
- CHATILA. R. et LAUMOND. J.-P. (1985), Position referencing and consistent world modeling for mobile robots, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 138-145.
- CHUEKE. M. et ARMONY. M. (1988), Geological data flow and structure at BPM-Brazil, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Québec, QC, Canada, pp. 659-670.

- CLÉMENT, A. et RIVIÈRE, A. (1993). Tolerancing versus nominal modeling in next generation CAD/CAM system, dans *Proceedings of the CIRP Seminar on Computer-aided Tolerancing*, Cachan, France, pp. 97-113.
- CLÉMENT, A., RIVIÈRE, A. et SERRÉ, P. (1995). A declarative information model for functional requirements, dans *Proceedings of the CIRP Design Seminar on Computer-aided Tolerancing*, Tokyo, Japan, pp. 3-16.
- CONNELL, J. H. et BRADY, M. (1987). Generating and generalizing models of visual objects, *Artificial Intelligence* **31**(1-3), 159-183.
- COX, I. J. (1991). Blanche—an experiment in guidance and navigation of an autonomous robot vehicle, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **7**(2), 193-204.
- CROCKER, N. P. et BROPHEY, D. G. (1994). Methods of traffic control for underground mines and their associated benefits, dans *Proceedings of the Canadian Symposium on Mining Automation*, Montréal, QC, Canada, pp. 68-76.
- CROWLEY, J. L. et RAMPARANY, F. (1987). Mathematical tools for representing uncertainty in perception, dans *Proceedings of the 1987 Workshop on Spatial Reasoning and Multi-sensor Fusion*, pp. 293-302.
- DEBANNÉ, P., HERVÉ, J.-Y. et COHEN, P. (1997). Global self-localization of a robot in underground mines, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Orlando, FL, USA, pp. 4400-4405.
- DEVINE, M. et BROGDEN, I. (1994). Information technology planning: Critical for implementing advanced manufacturing automation, dans *Proceedings of the Canadian Symposium on Mining Automation*, Montréal, QC, Canada, pp. 239-256.

- DICKMANNS, E. D., MYSLIWETZ, B. D. et CHRISTIANS, T. (1990). An integrated spatio-temporal approach to automatic visual guidance of autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **20**(6), 1273-1284.
- DUDEK, G. et TSOTSOS, J. K. (1991). Shape representation and recognition from curvature, dans *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 35-41.
- DURRANT-WHYTE, H. F. (1988), Uncertain geometry in robotics. *IEEE Journal of Robotics and Automation* **4**(1), 23-31.
- DURRANT-WHYTE, H. F. (1989), Uncertain geometry, dans D. Kapur et J. L. Mundy, éditeurs. *Geometric Reasoning*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- FLEURY, S., SOUÈRES, P., LAUMOND, J.-P. et CHATILA, R. (1995). Primitives for smoothing mobile robot trajectories, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **11**(3), 441-448.
- FRANKLIN, P. J. (1988), PC-XPLOR — the application of a microcomputer based data management and graphics system in exploration, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Québec, QC, Canada, pp. 693-704.
- GILL, P. E., MURRAY, W. et WRIGHT, M. H. (1981). *Practical Optimization*. Academic Press, New York, NY, USA.
- GONZALEZ, J., OLLERO, A. et REINA, A. (1994), Map building for a mobile robot equipped with a 2D laser rangefinder, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1904-1909.

- GREEN, W. R. (1988). Computers in exploration in the 80's. dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*. Québec. QC, Canada. pp. 653-658.
- GU, P. et NORRIE, D. H. (1995), *Intelligent Manufacturing Planning*. Chapman & Hall.
- HARDCASTLE, S., HACKWOOD, J. et LAMBERT, L. (1995). An integrated mine ventilation management system, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*. Vol. 2. Montréal. QC. Canada. pp. 1-13.
- HENLEY, S. et WHEELER, A. (1988), The use of solid modelling in underground mine design. dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Québec. QC. Canada. pp. 359-364.
- HERMAN, M. et KANADE, T. (1984), The 3D MOSAIC scene understanding system: Incremental reconstruction of 3D scenes for complex images. dans *Proceedings of DARPA Image Understanding Workshop*. pp. 137-148.
- HINZ, W. et DAGENAIS, A. (1995), MINE AUTONET — a mine-wide automation system. dans *Proceedings of the International Symposium on Mine Mechanization and Automation*. Golden. CO, USA. pp. 4-13-4-22.
- HORST, J. A. et TSAI, T.-M. (1995). Building and maintaining computer representations of two-dimensional mine maps. dans *Proceedings of the International Symposium on Mine Mechanization and Automation*. Vol. 2. pp. 22-1-22-11.
- HUANG, X., HASSANI, F. et DANESHMEND, L. (1995). An integrated approach towards automated knowledge process in mine design and planning, dans *Proceedings of the International Symposium on Mine Mechanization and Automation*. Golden. CO, USA. pp. 11-25-11-37.

- INGBER, L. (1996). Adaptive simulated annealing (ASA): Lessons learned. *Control and Cybernetics* **25**(1), 33-54.
- JUNEAU, L., HURTEAU, R., FREEDMAN, P. et CHEVRETTE, G. (1993). Using laser range data to model tunnel curvature for the automatic guidance of a mining vehicle, dans *Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications*, pp. 643-648.
- KAVOURAS, M., MASRY, S. E., SMART, J. R. et REELER, E. C. (1988). An advanced geo-information system for mining applications, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Québec, QC, Canada, pp. 511-515.
- KOSAKA, A. et KAK, A. C. (1992). Fast vision-guided mobile robot navigation using model-based reasoning and prediction of uncertainties. *CVGIP: Image Understanding* **56**(3), 271-329.
- KUIPERS, B. J. et BYUN, Y. (1987). A qualitative approach to robot exploration and map-learning, dans *Proceedings of the 1987 Workshop on Spatial Reasoning and Multi-sensor Fusion*, pp. 390-404.
- LABROSSE, F. (1995). Modélisation de l'Objet et application à ses représentations, rapport technique GRPR-RT-9507, Groupe de Recherche en Perception et Robotique, École Polytechnique, Montréal, QC, Canada.
- LABROSSE, F. (1996). Modélisation de l'objet et application à ses représentations, dans *Actes du 64^e congrès de l'Association Canadienne Française pour l'Avancement des Sciences*, Montréal, QC, Canada.
- LABROSSE, F., DEBANNÉ, P., HERVÉ, J.-Y. et COHEN, P. (1998). Virtual environments for planning underground mining operations, dans *Proceedings of the Centennial Meeting of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and*

Petroleum/XVth Congress of the Council of Mining and Metallurgical Institutions, Montréal, QC, Canada.

LABROSSE, F., HERVÉ, J.-Y. et COHEN, P. (1996a), Modélisation de mines avec un modèle générique d'objets, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Calgary, AB, Canada.

LABROSSE, F., HERVÉ, J.-Y. et COHEN, P. (1996b), GNOMine: An application of the generic GNOME model to the representation of mines, rapport technique GRPR-RT-9611, Groupe de Recherche en Perception et Robotique, École Polytechnique, Montréal, QC, Canada.

LABROSSE, F., HERVÉ, J.-Y. et COHEN, P. (1996c), GNOME : un modèle générique d'objets, rapport technique GRPR-RT-9608, Groupe de Recherche en Perception et Robotique, École Polytechnique, Montréal, QC, Canada.

LABROSSE, F., HERVÉ, J.-Y. et COHEN, P. (1997), Constructing virtual mines for navigation, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 4, Orlando, FL, USA, pp. 3709-3714.

LACROIX, S., CHATILA, R., FLEURY, S., HERRB, M. et SIMÉON, T. (1994), Autonomous navigation in outdoor environment: Adaptive approach and experiment, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 426-432.

LAGANIÈRE, R., LABROSSE, F. et COHEN, P. (1992), A parallel network for the computation of structure from long-range motion, dans *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, Vol. 3, Baltimore, MD, USA, pp. 278-285.

LOVEJOY, M. E. (1995), Modelling a soda ash deposit with Techbase, *Mining Magazine* pp. 293-295.

- LUNDER, P. J. (1995). AutoVENT — autoCAD based ventilation modelling software, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Montréal, QC, Canada, pp. 706-712.
- MACINTYRE, D. G. (1991). Computer assisted mapping in the british columbia geological survey — progress to date and predictions for the future, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Vancouver, BC, Canada, pp. 61-68.
- MACKENZIE, P. et DUDEK, G. (1994). Precise positioning using model-based maps, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1615-1621.
- MARCHAND, F. et RIVIÈRE, A. (1996). Un modèle d'information intégré pour les gammes d'usinage, dans *Proceedings of the International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Nantes, France, pp. 857-866.
- MARLON-LAMBERT, J. (1988). Mine-survey — a microcomputer package for operational mines, dans *Proceedings of the 5th International (FIG) Symposium on Deformation Measurement and 5th Canadian Symposium on Mining Surveying and Rock Deformation Measurements*, Fredericton, NB, Canada, pp. 320-329.
- MARR, D. (1982), *Vision*, W. H. Freeman and Company.
- MARR, D. et NISHIHARA, H. K. (1978), Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes, *Proceedings of the Royal Society of London B* 200(1140), 269-294.
- MASRY, S. E., LEE, Y., KAVOURAS, M. et REELER, E. C. (1988). Digital mapping for mining applications, dans *Proceedings of the 5th International (FIG) Symposium on Deformation Measurement and 5th Canadian Symposium on Min-*

- ing Surveying and Rock Deformation Measurements*. Fredericton, NB, Canada, pp. 330-338.
- MEAGHER, D. J. (1995), Solid modeling database structures, dans D. E. LaCourse, éditeur. *Handbook of Solid Modeling*, McGraw-Hill, Inc.
- MITCHELL, J. S. (1989). An algorithmic approach to some problems in terrain navigation, dans D. Kapur et J. L. Mundy, éditeurs. *Geometric Reasoning*, The MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- MORTENSON, M. E. (1985), *Geometric Modeling*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- MOTTOLA, L., SCOBLE, M. J., PECK, J. P. et BAIDEN, G. R. (1995). Systems analysis for robotic mining, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, pp. 595-604.
- MOUNT, W. H. (1982), Basic underground ventilation principles, dans W. A. Hustrulid, éditeur. *Underground Mining Methods Handbook*, Society of Mining Engineers, New York, NY, USA, pp. 1604-1628.
- NADER, B., BASTOS FONSECA, M. et PEREIRA DE ABREU, M. (1995). Computer application at Sabará mining project, *Mining Magazine* pp. 107-110.
- NADER, B., VALADAO, C. S. et FERREIRA, A. F. (1994). Computer application in a mining project, *Mining Magazine* pp. 297-299.
- NASHASHIBI, F., FILLATREAU, P., DACRE-WRIGHT, B. et SIMÉON, T. (1994). 3-D autonomous navigation in a natural environment, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 433-439.
- NISHIHARA, H. K. (1981). Intensity, visible-surface, and volumetric representations. *Artificial Intelligence* 17, 265-284.

- OWEN, J. (1993), *STEP: An Introduction*, Information Geometers Ltd, Winchester, UK.
- PAREJA, L. D. et PELLEY, C. W. (1995), Solid modelling techniques for underground hard-rock mine design and planning, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, pp. 149–158.
- PEITGEN, H.-O. et SAUPE, D., éditeurs (1988), *The Science of Fractal Images*, Springer-Verlag.
- PETERSON, J. L. (1981), *Petri net theory and the modeling of systems*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- PLUMMER, R. W. (1991), Geographic information system technology, a tool for the exploration geologist, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Vancouver, BC, Canada, pp. 53–60.
- POGGIO, T. et KOCH, C. (1985), Ill-posed problems in early vision: from computational theory to analogue networks, *Proceedings of the Royal Society of London B* **226**, 303–323.
- RACZKA, V. (1991), Open pit mine planning with AutoCAD and QuickSurf, *Mining Magazine* pp. 330–331.
- RAMIS, E., DESCHAMPS, C. et ODOUX, J. (1983), *Cours de mathématiques spéciales : algèbre*, Masson.
- REQUICHA, A. A. (1980), Representations for rigid solids: Theory, methods, and systems, *ACM Computing Surveys* **12**(4), 437–464.
- RIVLIN, E., DICKINSON, S. J. et ROSENFELD, A. (1994), Recognition by functional parts, dans *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 267–274.

- ROGHANI, F. (1991). Application of variable zone modeling, a step-by-step case study, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Vancouver, BC, Canada, pp. 69-84.
- SALOMONS, O. W. (1995), Computer Support in the Design of Mechanical Products. Thèse de doctorat, University of Twente, Netherlands.
- SAS, J. A. (1994). Central control with distributed information in the mining industry, dans *Proceedings of the Canadian Symposium on Mining Automation*, Montréal, QC, Canada, pp. 205-208.
- SCHOFIELD, D., DENBY, B. et MCCLARNON, D. (1994). Computer graphics and virtual reality in the mining industry, *Mining Magazine* pp. 284-286.
- SCHUMACHER, T. et HÜNEFELD, R. (1995), Development of a database and graphic aided software system for planning and analysis of mining equipment, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, pp. 631-637.
- SHAFFER, G. et STENTZ, A. (1992). A robotic system for underground coal mining, dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France, pp. 633-638.
- SMITH, R. C. et CHEESEMAN, P. (1986). On the representation and estimation of spatial uncertainty, *International Journal of Robotics Research* 5(4), 56-68.
- STEELE, J. P., KING, R. et STRICKLAND, W. (1991). Modeling and sensor-based control of an autonomous mining machine, dans *Proceedings of the International Symposium on Mine Mechanization and Automation*, Vol. 1, pp. 6-55-6-67.
- STOKES, W. (1993). Mining software -- the current challenge, *Mining Magazine* pp. 76-77.

- STRUICK, L., ATRENS, A. et HAYNES, A. (1991). Handheld computer ASCII editor as field notebook, and a compiler for immediate use of the digital data in database and CAD applications, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Vancouver, BC, Canada, pp. 15-25.
- SU, Y., VONGPAISAL, S. et SMITH, H. (1995). Development of a knowledge-based automatique stope scheduling model, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Montréal, QC, Canada, pp. 567-576.
- SUTHERLAND, K. T. et THOMPSON, W. B. (1994). Localizing in unstructured environments: Dealing with the errors. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **10**(6), 740-754.
- TAYLOR, R. et PAANANEN, R. (1991). The evolution of computerised mine planning at Falconbridge Limited, Kidd Creek Division, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Vancouver, BC, Canada, pp. 143-153.
- VANCE, J. B., WALMSLEY, J. R. et BÉTOURNAY, M. C. (1995). Application of the inactive mines database, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, pp. 380-389.
- WEINSHALL, D. (1993). A hierarchy of invariant representations of 3D shape, dans *Proceedings of the IEEE Workshop on Qualitative Vision*, New York, NY, USA, pp. 97-106.
- WHAITE, P. et FERRIE, F. P. (1991). From uncertainty to visual exploration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **13**(10), 1038-1049.
- WHEELER, A. (1993). Developments in computerised underground mine planning, *Mining Magazine* pp. 279-280.

- WILKE, F. L., FABIAN, J. et VOGT, R. (1995). Treating of production planning tasks in surface and underground hard rock mine operations by means of knowledge-based techniques, dans *Proceedings of the International Symposium on Mine Mechanization and Automation*, Golden, CO, pp. 18-39- 18-48.
- WILLIAMS, W. R. (1983), *Mine Mapping and Layout*, Prentice-Hall.
- WU, K. (1996), Computing Parametric Geon Descriptions of 3D Multi-part Objects, Thèse de doctorat, Department of Electrical Engineering, McGill University, Montréal, Québec, Canada.
- YETTER, A. et HUGHES, W. G. (1988), The modernization of underground surveying at Kidd Creek Mines Ltd, dans *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Québec, QC, Canada, pp. 517-527.
- ZHANG, T. et SUEN, C. (1984), A fast parallel algorithm for thinning digital patterns, *Communications of the ACM* **27**(3), 236-239.

Annexe A

L'équation paramétrique d'une clothoïde

A.1 La détermination de l'équation

La courbure d'une courbe plane est donnée par :

$$\kappa = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta \tau}{\Delta s} = \frac{d\tau}{ds},$$

où s est l'abscisse curviligne le long de la courbe et τ l'angle entre la tangente à la courbe et l'axe des abscisses. Cet angle est donc donné par :

$$\tan \tau = \frac{\dot{y}}{\dot{x}},$$

où $\dot{y} = \frac{dy}{ds}$ et $\dot{x} = \frac{dx}{ds}$. Ainsi, nous avons :

$$\dot{x} = \lambda \cos \tau,$$

$$\dot{y} = \lambda \sin \tau.$$

λ est un paramètre qui peut être, par exemple, une vitesse de déplacement le long de la courbe et que nous allons prendre égal à 1. Donc :

$$\begin{aligned}x(s) &= \int_0^s \cos(\tau(u)) \, du + x_0 \\y(s) &= \int_0^s \sin(\tau(u)) \, du + y_0.\end{aligned}$$

Pour une clothoïde, nous avons $\kappa(s) = \kappa_0 + ks$. Ceci donne

$$\tau(s) = \kappa_0 s + \frac{1}{2} k s^2 + \tau_0 \quad (\text{A.1})$$

et

$$\begin{aligned}x(s) &= \operatorname{sgn}(k) \sqrt{\frac{\pi}{|k|}} \left[+ \cos \left(\frac{-\kappa_0^2 + 2|k|\tau_0}{2|k|} \right) \operatorname{FresnelC} \left(\frac{|k|s + \kappa_0}{\sqrt{|k|\pi}} \right) \right. \\&\quad \left. - \sin \left(\frac{-\kappa_0^2 + 2|k|\tau_0}{2|k|} \right) \operatorname{FresnelS} \left(\frac{|k|s + \kappa_0}{\sqrt{|k|\pi}} \right) \right] + x_0 \\y(s) &= \sqrt{\frac{\pi}{|k|}} \left[+ \cos \left(\frac{-\kappa_0^2 + 2|k|\tau_0}{2|k|} \right) \operatorname{FresnelS} \left(\frac{|k|s + \kappa_0}{\sqrt{|k|\pi}} \right) \right. \\&\quad \left. + \sin \left(\frac{-\kappa_0^2 + 2|k|\tau_0}{2|k|} \right) \operatorname{FresnelC} \left(\frac{|k|s + \kappa_0}{\sqrt{|k|\pi}} \right) \right] + y_0.\end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

pour un k quelconques mais différent de 0. Dans les équations précédentes, $\operatorname{FresnelC}(u)$ et $\operatorname{FresnelS}(u)$ sont respectivement les cosinus et sinus de Fresnel et leur expression est

$$\begin{aligned}\operatorname{FresnelC}(u) &= \int_0^u \cos \frac{\pi t^2}{2} dt \\ \operatorname{FresnelS}(u) &= \int_0^u \sin \frac{\pi t^2}{2} dt.\end{aligned}$$

En pratique, les équations (A.2) ne sont pas utilisées pour calculer les points des clothoïdes. Elles ont en effet plusieurs inconvénients. Le premier est qu'elles ne

peuvent pas représenter ni les cercles ni les droites qui ont un k nul. Ensuite, le calcul de chaque point nécessite une intégration numérique. Ceci, en soi, n'est pas un problème quand un seul point est à calculer. Mais étant donné que généralement il faut calculer une succession de points d'une même clothoïde, il est préférable de procéder comme suit. L'abscisse curviligne s est échantillonnée avec un incrément de Δs . On a alors :

$$x_s = x_{s-1} + \dot{x}_{s-1} \Delta s. \quad (\text{A.3})$$

$$y_s = y_{s-1} + \dot{y}_{s-1} \Delta s. \quad (\text{A.4})$$

avec :

$$\dot{x}_s = \cos \tau_s, \quad (\text{A.5})$$

$$\dot{y}_s = \sin \tau_s.$$

τ_s peut être calculé de façon exacte (équation (A.1)) ou par intégration :

$$\tau_s = \tau_{s-1} + \kappa_{s-1} \Delta s. \quad (\text{A.6})$$

A.2 Le changement de sens de parcours

Afin de pouvoir exprimer l'équation d'un tronçon de galerie dans ses deux référentiels (section 3.4.3.3), il faut pouvoir donner la variation de la courbure d'une clothoïde en fonction de l'abscisse curviligne dans ses deux direction de parcours. Soit $\kappa(s) = \kappa_0 + ks$ l'équation de la courbure dans une des directions, nommons la *la première*. Nous cherchons κ'_0 et k' tels que $\kappa'(s) = \kappa'_0 + k's$ soit l'équation de la *même* clothoïde parcourue dans l'autre direction, *la seconde*.

Dans *la seconde direction*, la clothoïde « tourne dans l'autre sens » par rapport à l'autre direction. Ceci implique donc un changement de signe de la courbure. Nous

devons donc obtenir :

$$\kappa'(0) = -\kappa(L),$$

$$\kappa'(L) = -\kappa(0).$$

où L est la longueur de la clothoïde. Ceci donne :

$$\kappa'_0 = -\kappa_0 - kL,$$

$$k' = k.$$