



HAL
open science

Généralisation automatique pour la prise en compte de thèmes champ : le modèle GAEL

Julien Gaffuri

► **To cite this version:**

Julien Gaffuri. Généralisation automatique pour la prise en compte de thèmes champ : le modèle GAEL. Autre [cs.OH]. Université Paris-Est, 2008. Français. NNT : 2008PEST0209 . tel-01128243

HAL Id: tel-01128243

<https://theses.hal.science/tel-01128243>

Submitted on 9 Mar 2015

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

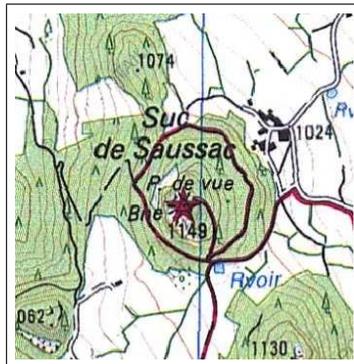
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse

Présentée pour obtenir le grade de docteur de l'université Paris-Est
Spécialité : sciences de l'information géographique

Julien Gaffuri

Généralisation automatique pour la prise en compte de thèmes champ : le modèle GAEL



Soutenue le 1 juillet 2008 devant le jury composé de :

M. Alexis Drogoul	Rapporteur
Mme Cécile Duchêne	Encadrante
M. Hervé Martin	Président
Mme. Annabelle Mas	Examineur
M. Jean-Pierre Müller	Examineur
Mme Anne Ruas	Directrice
M. Robert Weibel	Rapporteur

Résumé

La généralisation de données géographiques est l'opération de simplification de ces données effectuée lors de la diminution de leur échelle de représentation. Cette thèse s'appuie sur le modèle de généralisation automatique à base d'agents de (Ruas et Duchêne, 2007), qui a été mis en œuvre avec succès pour la généralisation des objets géographiques discrets (bâtiments, routes, etc.). L'objectif est de permettre une prise en compte d'un nouveau type de thèmes, appelés « thèmes champ », comme le relief ou l'occupation du sol. Ces thèmes ont pour particularité d'être définis en tout point de l'espace. Nous souhaitons permettre une préservation des relations pouvant exister entre les objets géographiques et les champs, comme par exemple le fait qu'un cours d'eau s'écoule sur le relief.

Pour répondre à cet objectif, nous proposons le modèle de généralisation GAEL (Généralisation à base d'Agents ELastiques) qui permet d'appliquer des déformations aux champs pour préserver les relations objet-champ. Les champs sont modélisés comme des agents, dits élastiques, qui ont la capacité de se déformer pour amortir les opérations de généralisation appliquées aux objets géographiques (bâtiments, routes, etc.). Ces déformations sont obtenues en s'appuyant sur une décomposition des champs en petits éléments contraints (points, segments, triangles, etc.) et sur une modélisation des points composant les champs sous forme d'agents. Couplé au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007), le modèle GAEL permet de disposer d'un modèle de généralisation hybride, capable d'effectuer à la fois des opérations discrètes et continues.

Mots clefs : généralisation cartographique, système multi-agents, déformation, champ, modèle GAEL, submicro, géomatique, SIG.

Abstract

Automated generalisation to take fields into account : the GAEL model

Geographic data generalisation is the process of simplification of these data when their representation scale decreases. This thesis is based on the automated generalisation model of (Ruas et Duchêne, 2007), which has been successfully applied to the generalisation of discrete geographic objects (buildings, roads, etc.). Our purpose is to take into account a new kind of themes, the "field themes", such as the relief and the land use cover. These themes have the specificity to be defined at each point of the space. We aim at preserving the relationships between geographic objects and fields, such as for example, the fact that a river should flow down on the relief.

To reach this goal, we propose a generalisation model called GAEL (Generalisation based on Agents and ELasticity). This model allows to apply deformations to the fields in order to preserve the object-field relationships. Fields are modelled as "elastic agents", which are able to deform themselves to propagate the generalisation operations applied on the geographic objects (buildings, roads, etc.). These deformations are performed by using a decomposition of the fields into small constrained elements (points, segments, triangles, etc.) and by modelling the points composing the fields as agents. Because it is merged with the model of (Ruas et Duchêne, 2007), the GAEL model offers a hybrid generalisation model, able to manage both discrete and continuous operations.

Keywords : map generalisation, multi-agents system, deformation, field, GAEL model, submicro, geoinformatics, GIS.

Remerciements

Je remercie les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer cette thèse.

Je remercie Anne Ruas et Cécile Duchêne pour m'avoir permis de me lancer dans ce travail passionnant en leur compagnie.

Je remercie les relecteurs de mon rapport : Sidonie Christophe, Olivier Passalacqua et Julien Perret, ainsi que les nombreuses personnes ayant assisté à mes répétitions de soutenance : Nathalie Abadie, Mickael Brasebin, Elodie Buard, Catherine Domingues, Eric Grosso, Laurence Jolivet, Sébastien Mustière, Anna-Maria Olteanu-Raimond, Patrick Taillandier et Guillaume Touya.

Je remercie l'ensemble des membres du COGIT, présents et passés, pour leur amitié. Je remercie toutes les personnes ayant bravé la grève surprise du RER A pour assister à ma soutenance de thèse. Un grand merci à Xavier Collilieux pour son aide.

Enfin, je remercie Anne-Laure, ma famille et mes Amis pour leur soutien.

Table des matières

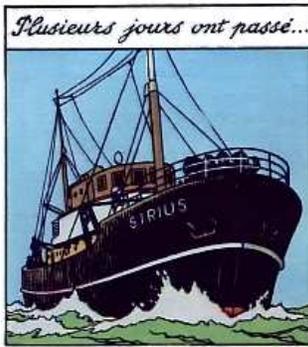
Introduction	13
1 La généralisation et son automatisaion	19
1.1 Généralisation de données géographiques	19
1.1.1 L'information géographique	19
1.1.1.1 Représentation de l'information géographique	19
1.1.1.2 Les bases de données géographiques	20
1.1.1.3 Cartographie numérique	22
1.1.2 La généralisation de l'information géographique	24
1.1.2.1 Échelle de perception	24
1.1.2.2 Niveau de détail d'une base de données géographique	25
1.1.2.3 Généralisation de données géographiques	26
1.1.2.4 Généralisation cartographique	27
1.1.2.5 Opérations de généralisation	30
1.1.2.6 Généralisations de modèle, graphique et cartographique	31
1.1.2.7 Bases de données géographique et cartographique	33
1.2 Automatisation de la généralisation	37
1.2.1 Besoin en généralisation et enjeux de son automatisaion	37
1.2.1.1 Évolution des besoins en données géographiques	37
1.2.1.2 Progrès des méthodes de généralisation automatique	39
1.2.1.3 Bénéfices de la production automatique de données gé- ralisées	40
1.2.2 Algorithmes de généralisation	41
1.2.2.1 Des algorithmes à plusieurs niveaux	41
1.2.2.2 Le problème de l'orchestration	44
1.2.3 Méthodes d'analyse spatiale pour la généralisation	45
1.2.4 Le problème de la traduction des besoins utilisateur	46
1.2.5 Approches pour l'automatisaion du processus	47
1.2.5.1 Approche par séquence prédéfinie systématique	47
1.2.5.2 Approches globales	48
1.2.5.3 Approches locales	52
1.2.5.4 Synthèse sur les approches	54
1.3 Généralisation et systèmes multi-agents	57
1.3.1 Agents et systèmes multi-agents	57
1.3.1.1 Définitions	57
1.3.1.2 Exemple : simulation d'une colonie de fourmis	59
1.3.2 Systèmes multi-agent et information géographique	61

1.3.2.1	Systèmes multi-agent et géographie	61
1.3.2.2	Systèmes multi-agent et généralisation automatique	61
1.3.3	Le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007)	62
1.3.3.1	Les principes	63
1.3.3.2	Les contraintes	63
1.3.3.3	Les agents géographiques	67
1.3.3.4	Les niveaux micro, meso, macro	70
1.3.3.5	Le modèle CartACom	72
1.3.3.6	Résultats	74
1.4	Synthèse et objectifs	75
2	Vers un modèle hybride de généralisation	77
2.1	Les champs	77
2.1.1	Définition et types de champs	77
2.1.2	Modèles conceptuels objet et champ	80
2.1.3	Méthodes de représentation des champs	82
2.1.3.1	Représentation numérique des champs en géomatique	82
2.1.3.2	Représentation cartographique des champs	83
2.1.4	Les champs en généralisation	85
2.1.4.1	Particularité des champs en généralisation	85
2.1.4.2	Généralisation propre des champs	86
2.1.4.3	Prise en compte des relations objet-champ	87
2.2	Améliorations nécessaires à la prise en compte des champs dans le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007)	93
2.2.1	Premier besoin : les relations objet-champ	93
2.2.1.1	Prise en compte des relations objet-champ	93
2.2.1.2	Champs et agents situés	94
2.2.2	Deuxième besoin : utilisation concomitante d'opérations discrètes et continues	95
2.2.2.1	Opérations discrètes et continues en généralisation	95
2.2.2.2	Les facteurs influençant le choix du type d'opération	96
2.2.2.3	Généralisation hybride dans le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007)	100
2.3	Vers un modèle de généralisation hybride à base d'agents	103
2.3.1	Limites des méthodes de déformation actuelles	103
2.3.1.1	Méthodes de déformation	103
2.3.1.2	Caractéristiques de méthode de déformation pour une utilisation hybride en généralisation	105
2.3.2	Vers un modèle agent de déformation	107
	Conclusion	108
3	Le modèle GAEL	109
3.1	Un modèle pour la gestion d'opérations continues	109
3.1.1	Les principes	110
3.1.2	Le niveau submicro	110
3.1.2.1	Nécessité d'un niveau interne	110
3.1.2.2	Les objets du niveau submicro	111
3.1.3	Les contraintes submicro	113

3.1.3.1	Les contraintes internes submicro	113
3.1.3.2	Propositions de contraintes internes submicro	114
3.1.3.3	Les contraintes relationnelles submicro	120
3.1.3.4	Propositions de contraintes relationnelles submicro	120
3.1.3.5	Bilan sur les contraintes submicro et retour sur l'exemple	128
3.1.4	Les agents-point	130
3.1.4.1	Modélisation des points sous forme d'agents	130
3.1.4.2	La classe agent-point	132
3.1.4.3	Le cycle de vie de l'agent-point	136
3.1.5	Le moteur élastique	138
3.1.5.1	Importance de la méthode d'activation	139
3.1.5.2	Fonctionnement du moteur élastique	139
3.1.5.3	Cycle de vie modifié de l'agent-point	140
3.1.6	Illustration sur un exemple simple	143
3.1.6.1	Déformation de l'objet exemple	143
3.1.6.2	Évolution d'un agent-point	145
3.2	Un modèle pour la gestion d'opérations continues intégré au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007)	149
3.2.1	Les contraintes élastiques	149
3.2.2	Les agents élastiques	150
3.2.3	Application à l'objet exemple	152
3.2.4	Bilan	155
3.3	Un modèle pour la prise en compte de relations objet-champ	157
3.3.1	Les agents-champ	158
3.3.1.1	L'agent-champ relief	158
3.3.1.2	L'agent-champ occupation du sol	160
3.3.2	Les relations objet-champ et leurs contraintes	161
3.3.2.1	Modélisation des contraintes relationnelles objet-champ	162
3.3.2.2	Les relations agent géographique-champ	164
3.3.2.3	Les contraintes relationnelles agent géographique-champ	164
3.3.2.4	Les contraintes élastiques relationnelles champ-agent géographique	164
3.3.3	Introduction des relations objet-champ dans le processus de généralisation	165
3.3.3.1	Prise en compte des relations objet-champ par les agents géographiques	165
3.3.3.2	Un exemple simple de dynamique	166
3.4	Bilan	170
4	Mise en œuvre et résultats	173
4.1	Cas de mise en œuvre et résultats	173
4.1.1	Description des cas d'application	173
4.1.2	Cas d'application avec le champ relief	174
4.1.2.1	Contraintes de préservation de l'agent-champ relief	174
4.1.2.2	Relation d'altitude de bâtiment	175
4.1.2.3	Relation d'écoulement de tronçon hydrographique	189
4.1.3	Cas d'application avec le champ occupation du sol	199

4.1.3.1	Contraintes de préservation de l'agent-champ occupation du sol	199
4.1.3.2	Relation d'appartenance de bâtiment à une zone d'occupation du sol	200
4.1.4	Autres cas d'application du modèle GAEL	203
4.1.4.1	Application au déplacement en généralisation	203
4.1.4.2	Application à la mise en cohérence hydrographie-relief . . .	205
4.1.4.3	Application à la généralisation de courbes de niveau	206
4.2	Critique et discussion	209
4.2.1	GAEL comme modèle de généralisation	212
4.2.1.1	GAEL comme méthode de déformation	212
4.2.1.2	Couplage au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007)	214
4.2.1.3	Comparaison avec des modèles de généralisation basés sur la même approche	217
4.2.2	GAEL pour la prise en compte des relations objet-champ	218
4.2.2.1	Généricité	219
4.2.2.2	Stratégie de satisfaction des relations objet-champ	221
4.2.2.3	Nécessité d'une instanciation judicieuse des contraintes objet-champ	223
4.2.2.4	Modélisation des agents-champ	223
Conclusion		225
A Exemples de relations objet-champ		231
A.1	Relations avec le relief	231
A.1.1	Relations entre relief et bâti	231
A.1.2	Relations entre relief et réseau routier	232
A.1.3	Relations entre relief et hydrographie	235
A.1.4	Relations complexes avec le relief	235
A.2	Relations avec l'occupation du sol	238
A.2.1	Relations entre occupation du sol et bâti	238
A.2.2	Relations entre occupation du sol et réseaux	239
B Analogies		241
C Détail du déplacement de la contrainte d'aire de triangle		245
C.1	Direction du vecteur déplacement	245
C.2	Longueur du vecteur déplacement	246
D A propos de la convergence		249
D.1	Convergence de chaque agent-point	249
D.2	Convergence d'un ensemble d'agents-point	250
E Choix de la stratégie d'activation des agents-point		253
E.1	Importance du choix de la stratégie d'activation des agents	253
E.2	Stratégies d'activation possibles des agents-point	254
E.3	Choix	255
Table des figures		256

Liste des tableaux	262
Bibliographie	265
Publications	289
Glossaire	291



(Tintin et le Trésor de Rackham Le Rouge, ©Hergé/Moulinsart 2008)

Introduction

« Imagine a gorge with a river and a road and a railway. First we plot the river, then we display the road. The railway is displaced further and finally the contours are moved. This presents a very difficult problem for the machine to solve ». d'après un auteur anonyme, 1965, rapporté par (Mackaness, 2006).

Contexte

Depuis la fin des années 1990, le développement des nouvelles technologies de l'information a facilité l'accès à une grande quantité d'information. Cette information est désormais accessible de quasiment n'importe quel lieu. L'accès à cette masse d'information ne suffit pourtant pas à satisfaire tous les besoins. L'information disponible doit être traitée afin d'en extraire la « bonne » information, c'est-à-dire celle utile, pour un besoin particulier. Il nous semble ainsi que le besoin en méthodes d'analyse de l'information soit au moins aussi important que celui en infrastructures d'accès à cette information.

Le traitement de l'information géographique a fortement évolué dans ce contexte. L'information géographique, qui était auparavant essentiellement stockée sous forme de cartes papier, est désormais stockée sous la forme de bases de données géographiques numériques. Cette évolution a permis une amélioration de la diffusion de l'information géographique et le développement de nombreuses méthodes de traitement informatique spécifiques utilisant cette information géographique. Le besoin en données géographiques a fortement évolué quantitativement (de plus en plus de données géographiques sont utilisées) et qualitativement (de nouvelles données géographiques sont utilisées). En conséquence de l'évolution de ce besoin, les méthodes d'acquisition de données géographiques ont fortement évolué et permettent désormais de produire des bases de données dont les niveaux de détail sont de plus en plus fins. La disponibilité d'une information géographique numérique ayant un niveau de détail très fin ne résout cependant pas tous les problèmes de ses utilisateurs. Des méthodes d'analyse et de traitement de ces données géographiques doivent être mises au point pour permettre de les adapter à un besoin particulier et d'obtenir, là aussi, la « bonne » information.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à un traitement particulier de l'information géographique : la généralisation. La généralisation est une opération de simplification de données ; elle permet une diminution du niveau de détail de ces données afin de les adapter à un besoin particulier. Notre travail concerne l'automatisation de ce processus à partir de données géographiques vectorielles.

Depuis plusieurs décennies, de nombreux travaux de recherche ont contribué à progresser vers un degré d'automatisation toujours meilleur de ce processus. Cette thèse s'inscrit à la suite de certains de ces travaux, effectués au laboratoire COGIT de l'IGN.

Objectifs de la thèse

Cette thèse se base sur le modèle de généralisation automatique à base d'agents de (Ruas et Duchêne, 2007), issu des travaux de (Ruas, 1999a), (Lamy *et al.*, 1999a) et (Duchêne, 2004). Ce modèle a été conçu pour la généralisation de thèmes composés d'objets géographiques dont l'emprise spatiale est limitée, comme par exemple les bâtiments. Il a été mis en œuvre avec succès pour la généralisation des thèmes bâti et routier.

Notre objectif est d'aller plus loin dans le degré d'automatisation de la généralisation en permettant la prise en compte d'un nouveau type de thèmes dans ces modèles : les thèmes champ. Les thèmes champs ont pour particularité d'être définis en tout point de l'espace géographique. Le relief et l'occupation du sol sont deux exemples de tels thèmes que nous proposons de traiter. Du fait de leur présence en tout point de l'espace, ces thèmes partagent des relations particulières avec les autres objets (bâtiments, routes, cours d'eau, etc.). Par exemple, un cours d'eau s'écoule sur le relief et chaque bâtiment est situé dans une zone d'occupation du sol particulière. Lors du processus de généralisation des objets, ceux-ci changent de forme et sont déplacés. En conséquence, les relations qu'ils partagent avec des champs peuvent être altérées. Par exemple, un cours d'eau qui est déformé peut ne plus couler dans sa vallée, et un bâtiment peut sortir de sa zone d'occupation du sol. Notre objectif est de permettre une préservation des relations pouvant exister entre les objets et les champs pendant le processus de généralisation de (Ruas et Duchêne, 2007).

Nous montrons que cet objectif nécessite la mise au point d'un modèle de généralisation qui permette :

- de gérer à la fois des opérations discrètes et continues de généralisation,
- et de prendre en compte des contraintes portant sur des relations entre objets et champs.

Plan

Le chapitre 1 présente un état de l'art en généralisation. Nous présentons tout d'abord la généralisation de données géographiques et montrons en quoi l'automatisation de cette tâche est complexe. Nous présentons ensuite les enjeux de la généralisation ainsi que différents travaux visant à automatiser ce processus. Enfin, nous présentons en particulier les travaux à base d'agents. Nous insistons particulièrement sur le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) sur lequel se base ce travail de thèse.

Le chapitre 2 présente la problématique de cette thèse. Nous présentons tout d'abord les particularités des thèmes champ dans le processus de généralisation. Nous montrons que la prise en compte des relations objet-champ en généralisation manuelle nécessite l'utilisation d'opérations de déformation. Nous présentons ensuite comment le modèle de (Ruas et

Duchêne, 2007) doit être complété pour permettre une prise en compte des relations objet-champ. Puis, nous justifions notre proposition d'utiliser une méthode à base d'agents pour permettre une déformation des champs pendant le processus de généralisation

Au chapitre 3, nous proposons le modèle GAEL (Généralisation à base d'Agents ELastiques) pour répondre à notre objectif. Nous présentons comment ce modèle permet d'effectuer des opérations continues de généralisation. Puis, nous détaillons comment ce modèle est couplé au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007). Enfin, nous présentons comment les relations objet-champ sont modélisées et intégrées au sein du processus de généralisation.

Le chapitre 4 présente plusieurs mises en œuvre du modèle GAEL, ainsi que des résultats obtenus sur des données géographiques de l'IGN, pour des échelles topographiques. Ces mises en œuvre concernent des relations objet-champ et des traitements de généralisation particuliers. Pour finir, nous critiquons le modèle GAEL et donnons des pistes pour son amélioration future.

Remarques Le modèle proposé dans cette thèse est décrit à l'aide de diagrammes de classes UML (Booch *et al.*, 1999). Nous conseillons par ailleurs d'imprimer cette thèse en couleur.

Chapitre 1

La généralisation et son automatisatisation

1.1 Généralisation de données géographiques

Dans cette partie, nous présentons la notion de généralisation de données géographiques. Nous commençons par une présentation de l'information géographique et de ses différents modes de représentation. Nous insistons sur la représentation de l'information géographique sous forme numérique vectorielle qui nous intéresse plus particulièrement dans cette thèse. Nous présentons ensuite la généralisation de données géographiques en détaillant en particulier la généralisation à but cartographique.

1.1.1 L'information géographique

1.1.1.1 Représentation de l'information géographique

Définition L'information géographique est définie par (Denègre et Salgé, 1996, p.12) comme :

- « un ensemble reliant :
- une **information** relative à un objet ou un phénomène du monde terrestre, décrit plus ou moins complètement par sa nature, son aspect et ses attributs (...),
 - et **sa localisation** sur la surface terrestre, décrite dans un système de référence explicite (par exemple, un système de référence ou une adresse postale) ».

L'information géographique peut prendre différentes formes. Une première forme est la description littérale. Elle consiste à exprimer directement l'information géographique dans le langage naturel, par exemple en décrivant un certain lieu. Cette représentation sous forme de récit de voyage a longtemps été utilisée par les géographes de l'antiquité avant le développement de la cartographie (cf. figure 1.1 a.). Elle est encore utilisée de nos jours pour des besoins simples, mais ses possibilités et son efficacité sont limitées.

L'information géographique est le plus souvent représentée sous forme graphique (cf. figure 1.1 b.). Cette représentation graphique s'appuie sur des conventions plus ou moins

formalisées qui facilitent la compréhension du lecteur. La carte est une représentation graphique particulière. Elle est définie par l'association cartographique internationale comme « une représentation conventionnelle, généralement plane, en positions relatives, de phénomènes concrets ou abstraits, localisables dans l'espace ». (Association Cartographique Internationale, 1973). (cf. figure 1.1 c.)

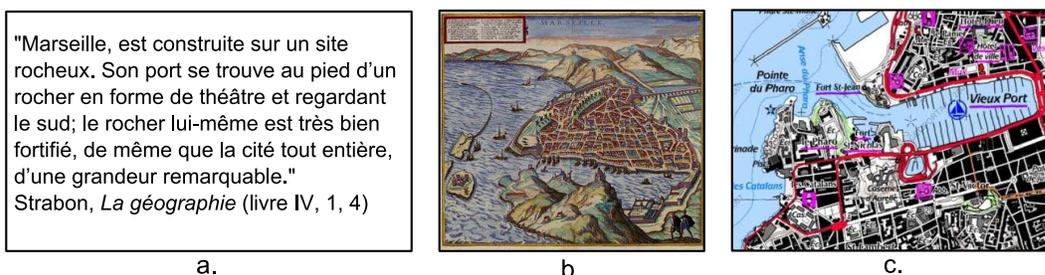


FIGURE 1.1 – Trois représentations de Marseille.

De nos jours, l'information géographique est en grande partie représentée sous forme numérique. Elle est codée suivant un mode particulier, sous forme de suites de bits stockés sur des supports informatiques. Il existe essentiellement deux modes de représentation de données graphiques numériques :

- **Le mode grille** (ou maillé, ou encore raster, cf. figure 1.2 a.) : ce mode s'appuie sur un maillage de l'espace géographique, le plus souvent composé de carrés. Les éléments composant ce maillage sont appelés *pixels* (de *picture element*). Les objets géographiques sont représentés par des ensembles de pixels. C'est le mode utilisé, par exemple, pour les photographies numériques ou les documents scannés.
- **Le mode vecteur** (cf. figure 1.2 b.) : ce mode consiste à représenter la géométrie des objets géographiques sous forme de suites structurées de coordonnées de points. Ces points sont reliés entre eux par des segments ou éventuellement un autre type de courbe paramétrique. Par exemple, une surface peut être représentée par la suite des points de son contour, une ligne par les coordonnées des points la composant, et un point par un unique couple de coordonnées. Ce mode est utilisé par la plupart des logiciels de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur).

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons uniquement aux données géographiques représentées sous forme vectorielle. Nous utilisons donc le terme *base de données géographique* pour désigner une base de données géographique vectorielle plane. Nous présentons comment ces bases de données géographiques sont organisées.

1.1.1.2 Les bases de données géographiques

Dans les bases de données géographiques, le monde réel est représenté par un ensemble d'objets organisés en classes d'objets de même nature (cf. figure 1.3).

Chaque objet de la base de données est décrit par (cf. figure 1.4) :

- une *géométrie* : cette géométrie est représentée en mode vectoriel, c'est-à-dire sous la forme d'une suite structurée de coordonnées de points. Par exemple, une surface peut être représentée par la suite des points de son contour,

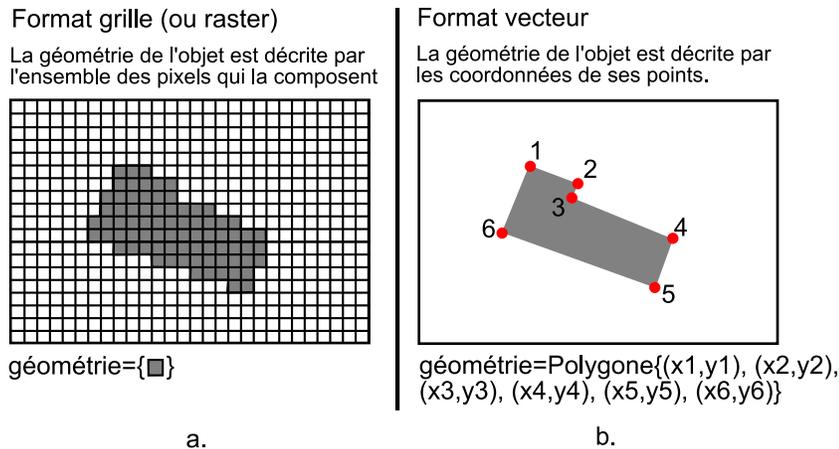


FIGURE 1.2 – Représentation en modes grille et vecteur

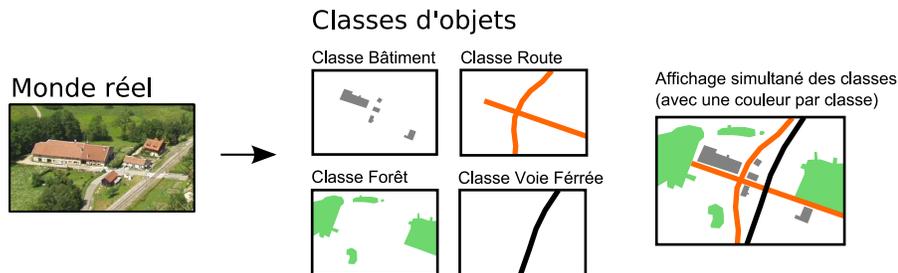


FIGURE 1.3 – Organisation des bases de données géographiques en classes d'objets

– et des *données attributaires* (ou *champs*, ou *données sémantiques*) : ces données attributaires permettent de compléter la description de l'objet. Par exemple, un objet bâtiment peut être décrit par son type (industriel, d'habitation, agricole ou quelconque).

La géométrie d'un objet peut être vue comme un attribut particulier qui décrit la localisation de l'objet dans l'espace. Usuellement, tous les objets d'une même classe ont le même type de géométrie (ponctuel, linéaire ou surfacique).

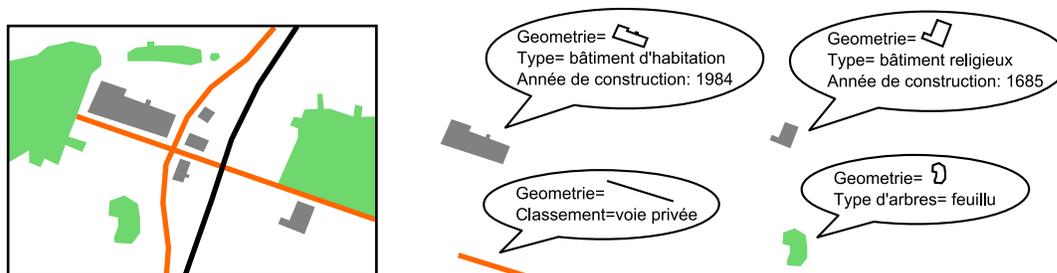


FIGURE 1.4 – Exemples de données attributaires d'objets géographiques

La façon de représenter le monde réel sous forme de base de données géographique n'est pas unique : une base de données géographique représente certaines facettes de la réalité en fonction de l'usage que l'utilisateur souhaite en faire. C'est un modèle, conformément à la définition de (Minsky, 1965) :

« To an observer B, an object A^* is a model of an object A to the extent that B can use A^* to answer questions that interest him about A ».

La définition des classes ainsi que des règles permettant de choisir et représenter les objets de la base à partir des entités du monde réel sont des étapes essentielles préalables à l'acquisition de données. Cette étape, appelée *abstraction*, définit la façon dont le monde réel est perçu et représenté par la base de données (Mustière *et al.*, 2000), (Mustière, 2001, p.102). Elle dépend de l'utilisation visée de la base de données.

Le développement de l'informatique et la constitution de bases de données géographiques a permis le développement de méthodes de traitement informatique spécifiques aux données géographiques (Obermeyer, 2007). La **géomatique** désigne cette discipline particulière, placée à la rencontre de l'informatique et de la géographie. Elle a pour but de fournir des méthodes de traitement de l'information géographique pour répondre aux besoins de la société. Ces méthodes sont utilisées au sein de systèmes d'information géographique (ou *SIG*).

Plus spécifiquement en cartographie, l'apparition de nouveaux moyens informatiques a provoqué une forte remise en cause des méthodes traditionnelles de production de cartes. Le terme de *révolution numérique* est parfois employé pour désigner la naissance de la cartographie numérique (Béguin et Pumain, 2001, p.25).

1.1.1.3 Cartographie numérique

Symbolisation automatisée Les méthodes de confection de cartes traditionnelles sont basées sur le dessin manuel de symboles cartographiques à l'aide d'outils graphiques (rotorings, couteaux à graver, etc.) sur un support physique. Les logiciels de cartographie numérique permettent de s'affranchir de cette étape longue et fastidieuse en permettant de faire des cartes à partir de bases de données géographiques. Ces logiciels permettent d'appliquer automatiquement des symboles aux objets géographiques à partir d'une légende prédéfinie (cf. figure 1.5). Ces symboles peuvent prendre en compte la nature des objets et les valeurs de leurs attributs (par exemple, un bâtiment peut être symbolisé différemment selon son type). Cette étape de symbolisation peut être par ailleurs plus ou moins élaborée.

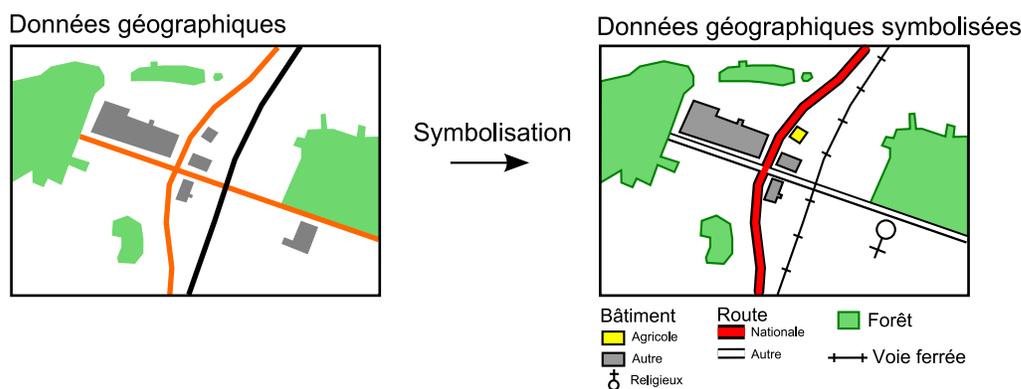


FIGURE 1.5 – Symbolisation automatique de données géographiques

L'utilisation de moyens informatiques en cartographie présente de nombreux avantages et rend de nouvelles applications possibles. Cependant, ces nouveaux moyens ne résolvent

pas tous les problèmes. En particulier, ils ne permettent pas de s'affranchir des règles de conception cartographique telles que celles présentées dans (Bertin, 1967; Denègre, 2005). Un logiciel de cartographie numérique performant devrait disposer d'outils efficaces dédiés à la conception cartographique. (Buckley et Hardy, 2007) présente des fonctionnalités essentielles qui devraient être disponibles sur les logiciels de cartographie (fonctionnalités de transferts de données efficaces, de DAO, de symbolisation, de placement automatique d'écritures, de cartographie 3D, d'impression, etc.). De plus, de nombreux nouveaux logiciels de cartographie s'adressent à des utilisateurs non cartographes qui ignorent le plus souvent les règles de conception cartographique. De telles fonctionnalités permettraient d'assister ces utilisateurs novices (Edsall, 2007).

Dans cette thèse, nous nous intéressons à une étape particulière de la confection d'une carte : la généralisation cartographique. Afin de définir la notion de généralisation, nous présentons tout d'abord la notion de niveau de détail de données géographiques. Nous définissons ensuite la notion de généralisation de données géographiques, puis le cas particulier de la généralisation cartographique.

1.1.2 La généralisation de l'information géographique

1.1.2.1 Échelle de perception

Échelle de perception : l'exemple du pull de ma grand mère Chaque hiver, ma grand-mère met son beau pull marron. Il s'agit d'un pull relativement normal, en laine, avec deux manches de même longueur (cf. figure 1.6 a.). Quand je regarde ce pull porté par ma grand-mère, je me le représente comme une surface marron de faible épaisseur (un demi centimètre environ) qui permet à ma grand-mère de se couvrir pour ne pas avoir froid. Quand je me rapproche du pull à une vingtaine de centimètres, je peux percevoir que la surface du pull est tricotée ; elle est composée d'un maillage de fils de laine (cf. figure 1.6 b.). A cette distance, le pull m'apparaît non plus comme une surface, mais comme un ensemble de fils de laine enchevêtrés. En me rapprochant encore et en imaginant la façon dont un petit insecte d'environ 0.1mm de long (un acarien par exemple) capable de se déplacer sur le pull le perçoit, le pull apparaît plutôt comme un volume foisonnant de filaments de laine composant les fils de laine (cf. figure 1.6 c.). De ce point de vue, il n'est même pas possible de percevoir qu'il s'agit d'un pull. L'acarien peut encore moins percevoir que le pull a des manches, et que celles-ci ont la même longueur. En sens inverse, lorsque je regarde ma grand-mère dans son pull depuis le haut d'un immeuble, il m'apparaît comme un petit point marron parmi une multitude d'autres pulls portés par les personnes autour de ma grand-mère (cf. figure 1.6 d.). Si je m'éloigne encore, à partir d'une certaine distance, le pull disparaît (cf. figure 1.6 e.).

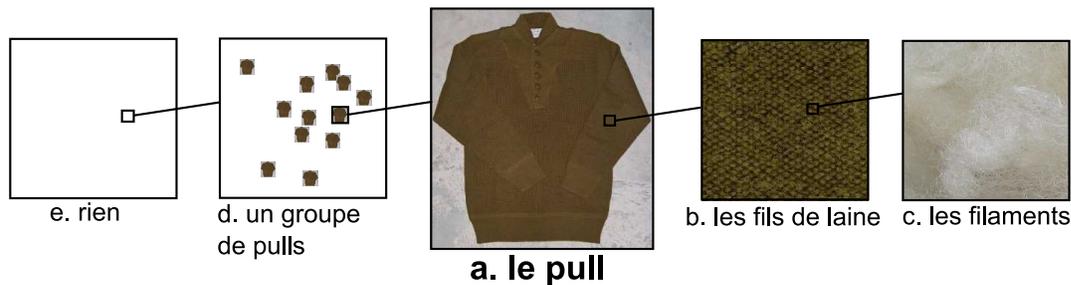


FIGURE 1.6 – Un pull, perçu à différentes échelles

Suivant l'échelle à laquelle le pull est perçu, la façon de le représenter change. A certaines échelles de perception, le pull est perçu comme une surface ou un volume. A d'autres échelles, le concept de pull n'est plus perceptible et semble remplacé par ceux de fil de laine, filament, molécule etc. Une perception proche implique une représentation avec un niveau de détail fin, alors qu'une perception éloignée implique une représentation avec un niveau de détail plus grossier. Pourtant, c'est toujours le même pull.

Échelle de perception et niveau de détail de données géographiques Le même phénomène existe pour l'espace géographique : les concepts et le niveau de détail avec lequel ils sont représentés évoluent en fonction de l'échelle à laquelle ils sont perçus. (Mackaness et Chaudhry, 2005) illustrent ce phénomène en affirmant : « you cannot tell you are on an island by looking at the pebbles on a beach ». Il est impossible de savoir que l'on se trouve sur une île en regardant les galets de la plage, de la même façon que l'acarien ne peut pas voir qu'il est sur un pull. Les concepts de galet et de plage traduisent la même réalité,

mais à des échelles de perception différentes. Ainsi, le processus d'abstraction présenté partie 1.1.1.2 page 22 est fortement lié à l'échelle à laquelle l'espace géographique est perçu.

Pour les bases de données géographiques, le terme d'*échelle caractéristique* est utilisé pour désigner « l'échelle la plus appropriée pour rendre sensible un phénomène en fonction de son étude ». (Ruas, 2004, p. 29). Autour de cette échelle, la visualisation des données géométriques semble particulièrement adaptée. Comme pour le pull, les concepts représentés dans les bases de données géographiques seront différents suivant cette échelle caractéristique. Par exemple, pour des échelles allant du 1 :5 000 au 1 :70 000 environ, le concept de bâtiment est perçu (il est possible de représenter les bâtiments). Au-delà, les bâtiments ne peuvent plus être perçus et représentés ; ils sont remplacés par une forme agrégée, les surfaces bâties, qui émerge du changement d'échelle de perception. Pour des échelles au delà du 1 :250 000, le concept de surface bâtie est à son tour remplacé par le concept de ville qui devient plus pertinent. Une échelle caractéristique grande implique une représentation de certains concepts, avec un grand niveau de détail, et inversement. La figure 1.7 présente un exemple de deux bases de données géographiques ayant des niveaux de détail différents : la BDTopo®(figure a.) a une échelle caractéristique proche de 1 :15 000 ; celle de la BDCarto®(figure b.) est environ 1 :50 000. Les concepts représentés par les deux bases et leur niveau de détail sont différents.

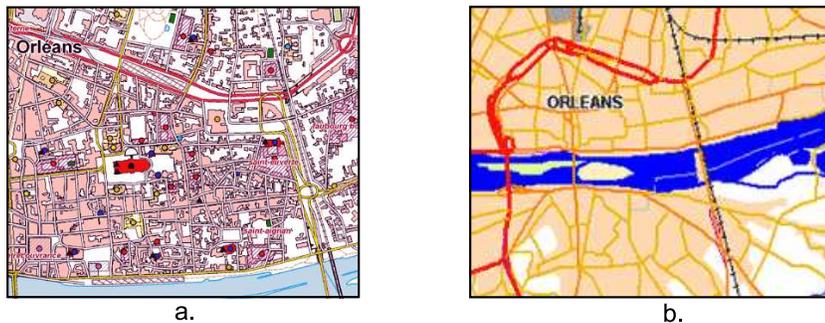


FIGURE 1.7 – Deux bases de données géographiques ayant des niveaux de détail différents. (a.) la BDTopo®de l'IGN et (b.) la BDCarto®de l'IGN

1.1.2.2 Niveau de détail d'une base de données géographique

Niveaux de détail sémantique et géométrique Le niveau de détail d'une base de données géographique est lié à son échelle caractéristique. Le niveau de détail traduit la finesse de contenu d'une base de données géographique. (Ruas, 2004; Ruas et Mustière, 2005) distinguent les niveaux de détail sémantique et géométrique :

- Le niveau de détail **sémantique** traduit la finesse du processus d'abstraction. Ce niveau de détail est visible sur le schéma de la base de données (Quelles classes sont présentes? Avec quels attributs?). Il concerne aussi le niveau de détail des règles de saisie des données (Quels objets du monde réel sont sélectionnés pour être représentés dans la base de données? Comment sont-ils représentés?).
- Le niveau de détail **géométrique** traduit la finesse de description de la géométrie des objets. Il est lié au type d'implantation choisi pour représenter les géométries (ponctuelle, linéaire, surfacique, etc.), à la précision des données géométriques (écart

entre la position des objets et leur position réelle) ainsi qu'à leur granularité (taille du plus petit détail de forme).

Les moyens d'acquisition de données géographiques sont de plus en plus performants et permettent d'acquérir des données dont le niveau de détail est de plus en plus fin. Ces progrès permettent ainsi de décrire de mieux en mieux l'espace. Cependant, une base de données avec un niveau de détail très fin n'est pas toujours meilleure. Suivant l'utilisation cherchée, un niveau de détail plus faible est souvent plus adapté, car il fait apparaître des concepts nécessaires à l'utilisation. Des méthodes, dites *de généralisation*, que nous présentons maintenant sont nécessaires pour permettre de diminuer le niveau de détail de données géographiques.

1.1.2.3 Généralisation de données géographiques

La généralisation est un processus de simplification de données, pour les adapter à une nouvelle échelle caractéristique. C'est un processus de diminution de niveau de détail. La généralisation peut être comparée au résumé de texte (Ruas, 2004, p.32) :

« La généralisation est un processus de synthèse d'information. Ce processus peut être comparé avec celui d'un résumé de texte dont les objectifs sont de réduire le nombre de mots, de retenir les idées principales, de ne pas faire de faux sens et si possible conserver le style de l'auteur (...). Pour bien généraliser des données géographiques, il faut également :

- réduire la quantité d'information,
- mettre en valeur l'information la plus importante,
- rester fidèle à l'information initiale,
- et dans le cas d'une carte, respecter les règles de sémiologie qui permettent une bonne lecture de l'information ».

Pour une base de données géographique, la généralisation permet une diminution des niveaux de détail :

- sémantique : des opérations sont appliquées sur le schéma de la base de données. Par exemple, des classes similaires peuvent être agrégées (deux classes route et chemin peuvent être fusionnées en une unique classe route) ou changer de mode d'implantation (des classes de bâtiments peuvent être remplacées par une classe surface bâties), des attributs peuvent être éliminés, regroupés, d'autres avoir leurs valeurs simplifiées etc. Également, les règles de sélection des objets peuvent être changées. Par exemple, il peut être choisi de ne plus représenter les objets ayant une valeur d'attribut particulière (supprimer toutes les routes de type "communale") ou un critère de taille particulier (supprimer tous les bâtiments dont l'aire est inférieure à $20m^2$).
- et géométrique : des opérations sont appliquées sur les géométries des objets pour simplifier leur forme.

La figure 1.8 présente un exemple de généralisation de base de données géographique. Le niveau de détail sémantique a changé. La classe *bâtiment* a été remplacée par la classe *surface bâtie*, et seules les routes de type *nationale* ont été conservées. Le niveau de détail géométrique a également changé : la géométrie des objets est moins granuleuse (par exemple, celles des forêts). L'échelle caractéristique de la base de données généralisée est plus petite que celle de la base de données initiale.

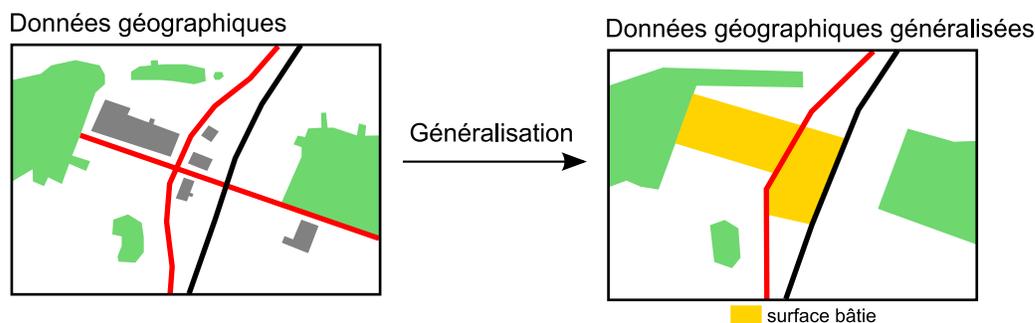


FIGURE 1.8 – Généralisation d'une base de données géographique

Nous avons présenté la généralisation de données géographiques. Nous présentons maintenant un cas particulier de généralisation : la généralisation à but cartographique.

1.1.2.4 Généralisation cartographique

Définition La généralisation cartographique est un cas particulier de généralisation. Elle est définie par (Cuenin, 1972, p. 168) comme « l'opération qui, par sélection, schématisation et harmonisation, reconstitue sur une carte la réalité de la surface représentée dans ses traits essentiels en fonction du but de la carte, de son thème, de son échelle et des particularités de la région cartographiée ». La généralisation cartographique est nécessaire lorsque, par exemple, on souhaite faire une carte à partir d'une autre dont l'échelle est plus grande. Cette opération ne se résume pas à une simple réduction (cf. figure 1.9). Les objets de la carte initiale doivent être transformés pour être adaptés à l'échelle de la nouvelle carte.

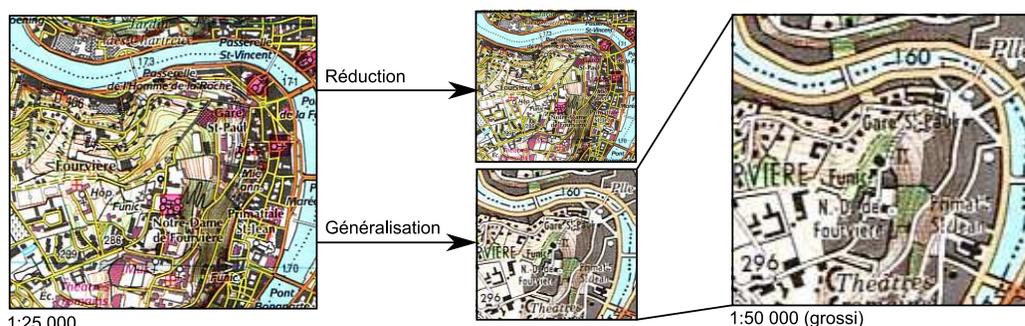


FIGURE 1.9 – Généralisation cartographique du 1 :25 000 au 1 :50 000 (cartes : IGN)

La généralisation cartographique doit prendre en compte des contraintes particulières, appelées **contraintes de lisibilité** :

- des contraintes de **visibilité** (cf. figure 1.10) : l'œil humain est caractérisé par des seuils d'acuité qui limitent notre perception visuelle. Les symboles cartographiques doivent prendre en compte ces seuils pour être perçus, séparés et différenciés facilement et correctement.
- des contraintes d'**interprétation** : le cerveau humain analyse plus facilement et plus rapidement les faibles quantités d'information. Si l'œil humain était capable de percevoir clairement des symboles infiniment petits, le message de la carte resterait tout de même difficile à lire, car difficile à analyser. La suppression d'information est

donc nécessaire, même lorsque le message peut être vu. Satisfaire cette contrainte permet de rendre le message de la carte plus facile et plus rapide à saisir.

CONTRAINTES VISUELLES	REPRÉSENTATION GRAPHIQUE
Acuité visuelle de discrimination	
Acuité visuelle d'alignement	
Seuil de perception	Ponctuel ● 0,2 mm ■ 0,4 mm ○ 0,3 mm □ 0,5 mm △ 1 mm ~ 0,5 mm ~ 0,6 mm Linéaire ——— 0,1 mm
Seuil de séparation	Linéaire Ponctuel
Seuil de différenciation	Ponctuel ● ● entre 2 paliers le rapport des surfaces doit être au moins de 2 Linéaire

FIGURE 1.10 – Seuils de visibilité (d'après (Weger, 1998))

Contraintes et conflits cartographiques La généralisation cartographique peut être vue comme un processus de satisfaction de contraintes. Il consiste à satisfaire au mieux les contraintes de lisibilité des objets (être suffisamment gros, ne pas se superposer, avoir une distance suffisamment grande, etc.) tout en préservant au mieux les traits caractéristiques importants (préservé au mieux les formes, les densités, les positions, etc. des objets). Lorsqu'une contrainte est violée (par exemple, un objet trop petit, ou trop loin de sa position initiale), le terme de *conflit cartographique* est utilisé. La généralisation est le résultat d'un compromis entre les différentes contraintes cartographiques des objets.

Complexité de la généralisation cartographique La figure 1.11 présente deux paires d'extraits de cartes ayant des échelles différentes. Ces extraits illustrent la complexité du processus de généralisation cartographique. Pour généraliser des données, l'information à représenter doit être analysée afin de déterminer les caractéristiques importantes des données et détecter les conflits cartographiques éventuels. Il faut également appliquer convenablement des opérations aux géométries des objets. De plus, les objets sont généralisés différemment suivant leur contexte. Même s'il existe de nombreux manuels de généralisation (comme par exemple (IGN; Bertin, 1967; Cuenin, 1972; Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, 1977; Imhof, 1982a; Skinberg, 1982; Weger, 1997a; Béguin et Pumain, 2001; Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, 2002)), il est difficile de déterminer des règles précises et suffisamment génériques de généralisation cartographique (Rieger et Coulson, 1993). Chaque ensemble de données à généraliser étant (presque) unique, seul un processus de généralisation adapté à ces données permet une bonne généralisation.

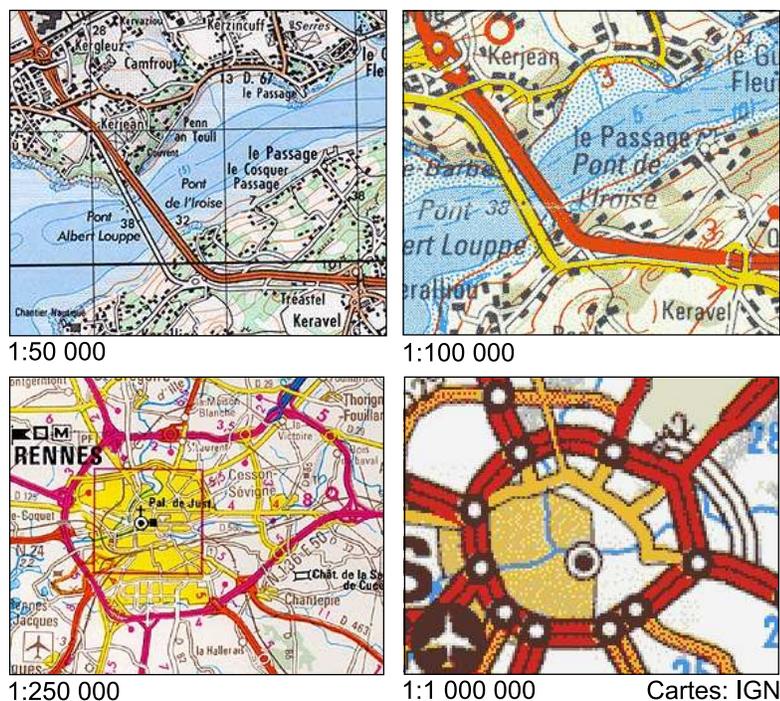


FIGURE 1.11 – Exemples de généralisation cartographique

Qualité de généralisation La généralisation cartographique est caractérisée par le fait qu'il n'existe pas une façon unique de généraliser des données pour un même objectif : un même extrait de carte généralisé par deux cartographes peut donner deux résultats différents mais acceptables. Pendant le processus de généralisation, le cartographe est amené à faire des choix entre différentes possibilités. Certains de ces choix sont plus importants que d'autres (par exemple, des objets devront impérativement être mis en valeur, alors que d'autres pas obligatoirement). Ces choix dépendent du but de la carte et de l'intention du cartographe (Monmonier, 1996; Koch, 2004). L'application de toute opération de généralisation doit ainsi être effectuée en prenant en compte ce but. Par exemple, les règles de généralisation de cartes aéronautiques présentées dans (Horvat *et al.*, 2003) sont différentes de celles présentées par (Haberkhorn, 2004) pour les cartes de course d'orientation. La qualité se définissant comme « l'aptitude à répondre à un besoin » (Institut géographique national, 1997), une généralisation de qualité est celle qui permet une représentation adaptée au mieux aux besoins de l'utilisateur (Edsall, 2007).

Généralisation cartographique et cartographie numérique Quel que soit le procédé utilisé pour produire une carte, la généralisation cartographique est une étape nécessaire à la conception de cartes de qualité. Elle est souvent négligée en cartographie numérique, en particulier depuis le développement des outils informatiques de visualisation de données géographiques. Les conflits cartographiques pouvant apparaître lors de la symbolisation des données doivent être résolus en appliquant des opérations de généralisation cartographique. Ces conflits ont d'autant plus de chance d'apparaître que l'échelle de symbolisation est éloignée de l'échelle caractéristique de la base de données symbolisée. Par exemple, la figure 1.12 a. montre une base de données dont l'échelle caractéristique est environ 1 :10 000. Une symbolisation pour une visualisation au 1 :10 000 (cf. figure 1.12 b.)

est satisfaisante : aucun conflit cartographique n'est présent. Pour une visualisation à plus petite échelle comme au 1 :50 000 (cf. figure 1.12 c.), la taille des symboles doit être supérieure pour satisfaire les contraintes de visibilité. En conséquence, de nombreux conflits cartographiques apparaissent : des symboles se superposent, d'autres semblent trop petits. Des opérations de généralisation doivent être appliquées pour obtenir une carte sans conflit (cf. figure d.). La figure 1.13 montre un autre exemple de symbolisation concernant le réseau routier non généralisé avec des conflits cartographiques.

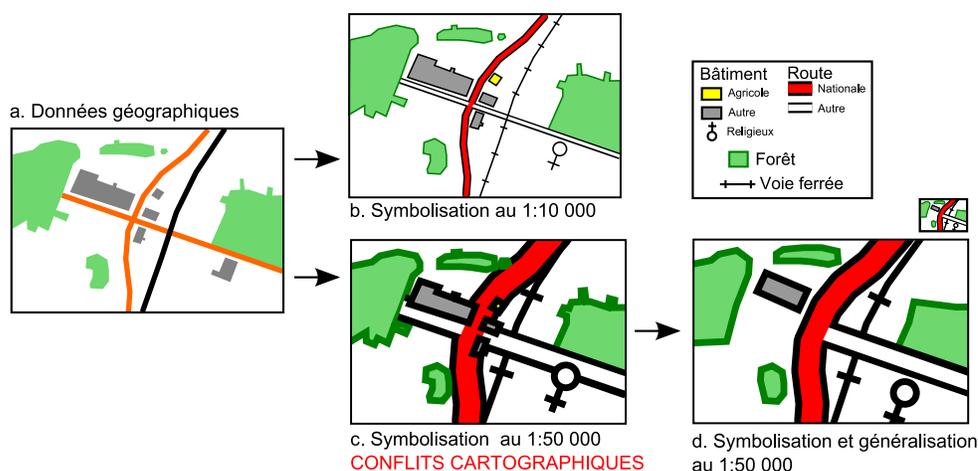


FIGURE 1.12 – Conflits cartographiques en cartographie numérique



FIGURE 1.13 – Conflits cartographiques en cartographie numérique

Pendant le processus de généralisation, de nombreuses opérations doivent être appliquées à la fois sur le schéma et sur les données. Nous présentons maintenant une classification de ces opérations.

1.1.2.5 Opérations de généralisation

Il existe de nombreuses classifications d'opérations de généralisation (McMaster et Shea, 1992; Jones, 1997; Weibel et Dutton, 1999; Ruas, 1999a; Bader, 2001; Li, 2007; Foerster et Stöter, 2007). Le tableau 1.1 présente la classification proposée par (Mustière, 2001, chap.A2).

Grandes familles d'opérations	Sous-familles	Actions effectuées pour réaliser l'opération
Simplifier <i>Éliminer de l'information</i>	Généralisation de modèle <i>Rendre les objets similaires</i>	Reclassification thématique Fusion Squelettiser/couvrir
	Sélection / élimination <i>Diminuer le nombre d'objets</i>	Suppression d'objets
	Lissage / filtrage <i>Atténuer ou éliminer des parties d'objet</i>	Déformation d'objet Suppression de parties d'objet
Caricaturer <i>Exagérer des caractères</i>	Amplification <i>Exagérer la forme et la taille</i>	Dilatation Déformation
	Structuration <i>Exagérer la structure</i>	Sélection, fusion, translation Typification, schématisation
	Agrégation <i>Exagérer la forme de l'ensemble</i>	Fusion Amalgamation
	Déplacement <i>Exagérer les distances</i>	Translation / décalage Déformation / érosion
	Différenciation <i>Exagérer les différences</i>	Dilatation Élimination
	Amélioration de la géométrie <i>Exagérer la nature de l'objet</i>	Lissage Fractalisation Équarrissage
Harmoniser <i>Gommer les différences</i>	Équilibrage <i>Atténuer les différences</i>	Lissage, élimination, fusion, etc. . .
	Rééquilibrage <i>Corriger les différences créées</i>	Lissage, élimination, fusion, etc. . .

TABLE 1.1 – Classification des opérations de généralisation (d'après (Mustière, 2001, chap.A2))

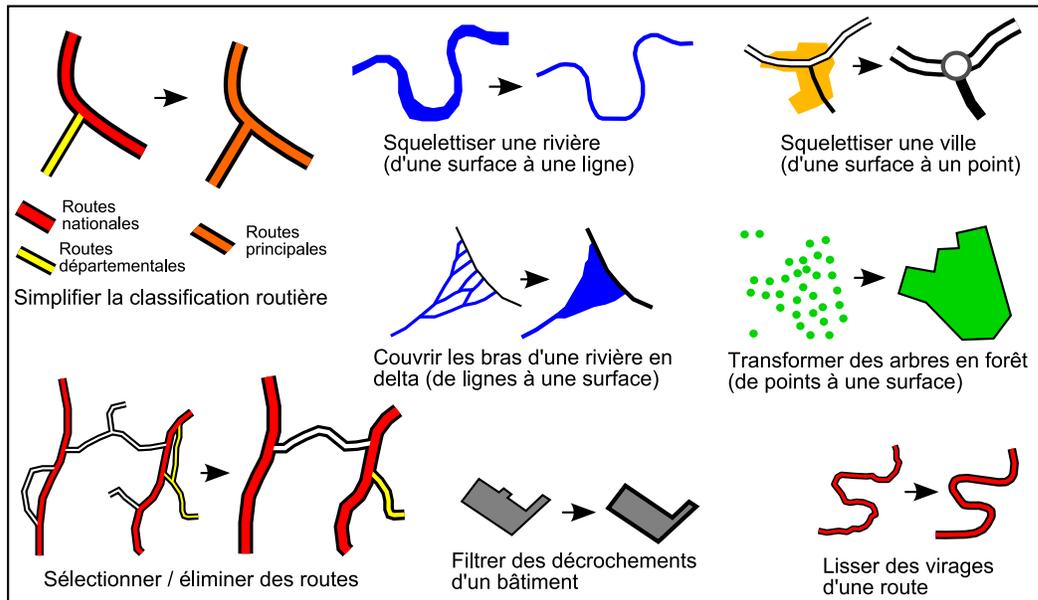
Cette classification s'appuie sur trois grandes familles d'opérations :

- les opérations de **simplification** (cf. figure 1.14 a.) : ces opérations réduisent la quantité d'information. L'information jugée peu ou pas importante est éliminée,
- les opérations de **caricature** (cf. figure 1.14 b.) : ces opérations mettent en valeur l'information. L'information jugée importante est mise en valeur,
- et les opérations d'**harmonisation** (cf. figure 1.14 c.) : ces opérations éliminent des différences entre objets.

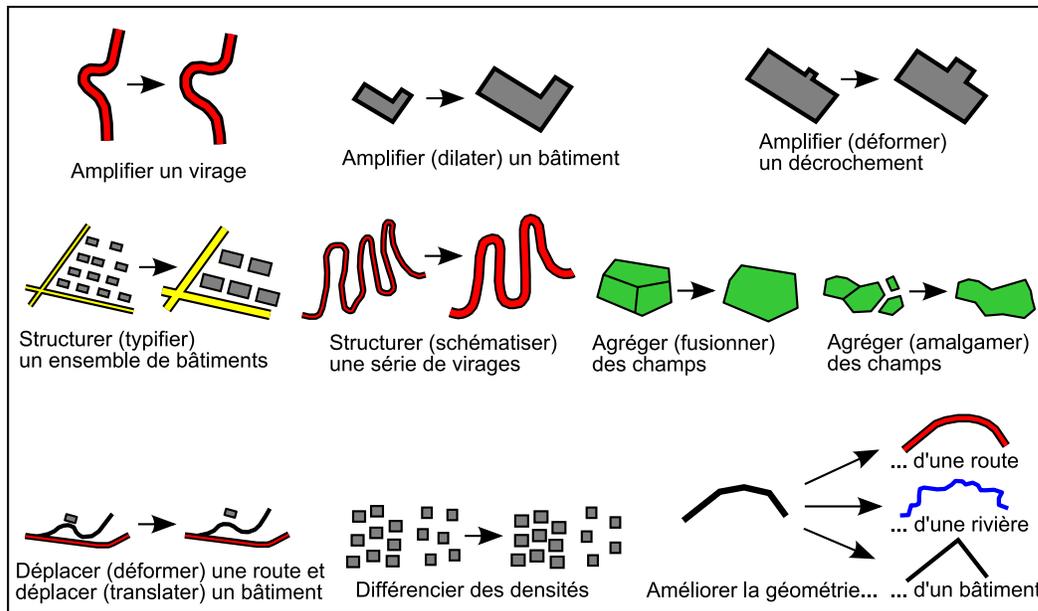
1.1.2.6 Généralisations de modèle, graphique et cartographique

Le processus de généralisation cartographique est différent selon que l'échelle caractéristique des données initiales est proche ou non de l'échelle désirée de la carte. Lorsque l'échelle de la carte est proche de l'échelle caractéristique, des déplacements d'objets peuvent suffire pour résoudre les conflits cartographiques. Lorsque l'échelle de la carte est inférieure à une certaine valeur seuil, il devient nécessaire de supprimer des objets, voire de changer le schéma de la base de données géographique. Une distinction entre les trois types de généralisation suivants est communément admise :

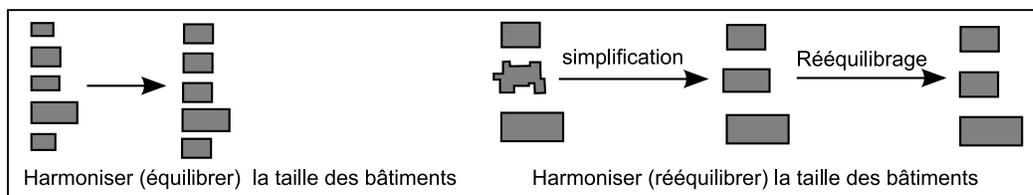
- La **généralisation de modèle** (également appelée *généralisation conceptuelle* dans (Bertin, 1967, p.300) et (Skinberg, 1982, p.64) ou encore *généralisation BD conforme* dans (Ruas, 2004, p.39,40)) : cette généralisation implique un changement dans la



a. Opérations de simplification



b. Opérations de caricature



c. Opérations d'harmonisation

FIGURE 1.14 – Exemples d'opérations de généralisation (d'après (Mustière, 2001, chap.A2))

façon de modéliser le monde réel. Ses effets ont lieu sur le schéma. Elle concerne les changements de classes (suppression, agrégation, émergence de nouvelles classes...), les changements d'attributs ainsi que les changements de règles de représentation des objets (représentation des bâtiments sous forme de surfaces bâties, représentation des rivières surfaciques par leur axe...).

- La généralisation **graphique** (également appelée *généralisation structurale* dans (Bertin, 1967, p.300) et (Skinberg, 1982, p.64)) : cette généralisation concerne la prise en compte des contraintes de lisibilité dans le cas où l'échelle cartographique est proche de l'échelle caractéristique des données. Dans ce cas, les concepts représentés par les données sont adaptés à l'échelle de la carte. Elle n'implique donc pas d'opération sur le schéma. La généralisation graphique est effectuée par des opérations de dilatation, de déplacement et de suppression.
- La **généralisation cartographique** : La généralisation cartographique intègre à la fois la généralisation de modèle et la généralisation graphique, comme par exemple lors de la généralisation d'une carte pour une échelle nettement inférieure à l'échelle caractéristique des données d'origine.

Ambiguïté Des ambiguïtés sur la limite entre généralisations de modèle et graphique peuvent être constatées : des auteurs comme (Harrie et Sarjakoski, 2002) considèrent en effet les opérations de suppression, même lorsque qu'elles sont utilisées pour la satisfaction de contraintes de lisibilité, comme ne faisant pas partie de la généralisation graphique, mais de la généralisation de modèle.

1.1.2.7 Base de données géographique, base de données cartographique

Lors du processus de généralisation graphique, les objets sont simplifiés et/ou déplacés pour permettre la satisfaction de contraintes de lisibilité (cf. figure 1.12 d). En conséquence, la géométrie du symbole d'un objet est souvent différente de celle de l'objet d'origine. Une distinction est faite entre la géométrie de l'objet (cf. figure 1.15 a.) et celle de l'objet cartographique (cf. figure 1.15 b.).

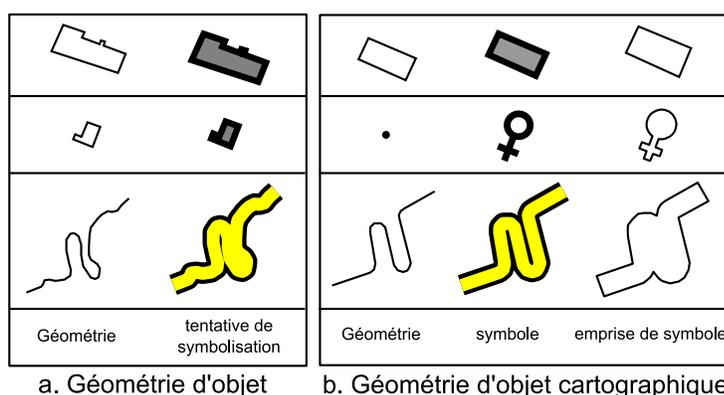


FIGURE 1.15 – Distinction entre géométrie d'un objet et celle d'un objet cartographique

Ces différents types de géométries permettent d'introduire une distinction entre les bases de données géographiques en général et un cas particulier, les bases de données cartographiques. Ces termes ont été introduits par (Brügge-man, 1985).

- Une **base de données géographique** est une modélisation du monde réel conforme à un schéma de données et certaines règles de conception. La géométrie des objets ainsi que leur position est conforme à une certaine précision. Contrairement à une carte, une base de données géographique n'a pas d'échelle de visualisation propre. Elle possède cependant une échelle caractéristique adaptée à sa visualisation.
- Une **base de données cartographique** est une base de données géographique particulière. Elle est construite en fonction d'une échelle cartographique et d'une légende prédéterminée. Les géométries des objets respectent les contraintes de lisibilité pour l'échelle définie et la symbolisation décrite par la légende. Ce sont des objets cartographiques (cf. figure 1.15 b.). Dans ce cas, les attributs des objets servent uniquement à construire le symbole de chaque objet.

Cependant, nous constatons que la distinction entre bases de données géographique et cartographique est souvent négligée. Il est fréquent d'utiliser une base de données géographique pour faire des cartes, et, de même, une base de données cartographique pour faire des analyses. Nous pouvons imaginer les conséquences de cette confusion. Nous avons déjà présenté l'inadaptation de l'utilisation de bases de données géographiques pour la conception de beaucoup de cartes (cf. figure 1.12 page 30). A l'inverse, sachant que la géométrie d'un objet cartographique peut être parfois très différente de celle de l'objet géographique associé, le résultat d'un traitement peut être moins précis, voire faux. Par exemple, la longueur de la portion de route du symbole cartographique représenté en figure 1.15 b. est différente de celle de l'objet associé (figure a.). En conséquence, des calculs d'itinéraires sont forcément moins précis.

Dérivation de base de données La généralisation cartographique consiste à construire une base de données cartographique à partir d'une base de données géographique, d'une légende et d'un but particulier (cf. figure 1.16). Il est d'usage de séparer la généralisation cartographique en généralisation de modèle et généralisation graphique (cf. figure 1.17, d'après (Weibel et Dutton, 1999, p.127)) : la base de données géographique d'origine subit une éventuelle généralisation de modèle afin d'obtenir une nouvelle base de données géographique dont l'échelle caractéristique est proche de l'échelle de la carte à produire. La base de données cartographique voulue est obtenue à partir de cette nouvelle base de données géographique par généralisation graphique. L'action de produire une nouvelle base de données à partir d'une autre est appelée *dérivation*. La base de données produite est appelée *base de données dérivée*.

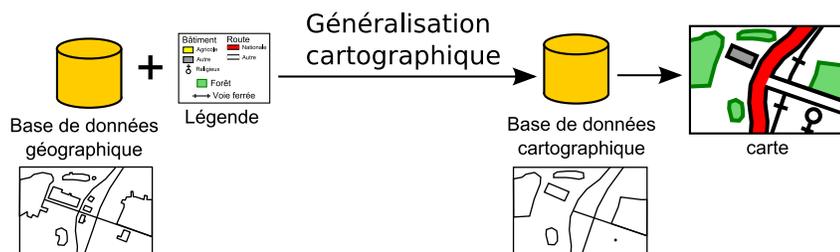


FIGURE 1.16 – La généralisation cartographique numérique : dérivation d'une base de données cartographique à partir d'une base de données géographique

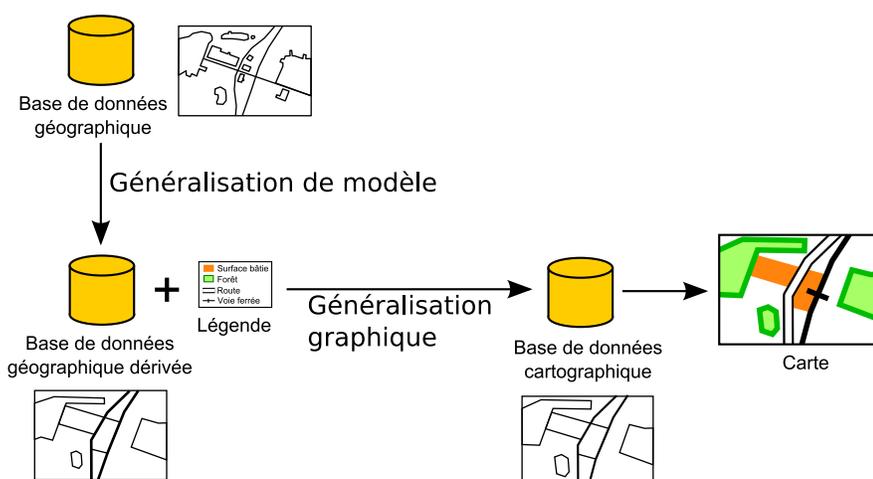


FIGURE 1.17 – Décomposition du processus de généralisation cartographique en généralisation de modèle et généralisation graphique

1.2 Automatisation de la généralisation

Nous avons présenté précédemment la notion de généralisation de données géographiques. Nous avons vu que le processus de généralisation est un processus important et complexe, en particulier dans le cas de la généralisation cartographique. Beaucoup de cartographes insistent sur la nécessité de disposer de méthodes de généralisation en cartographie numérique (Spiess, 1995). A ce propos, (Buckley et Hardy, 2007, p.156) affirment :

« The ideal database would allow data to be derived for all scales from a single high-resolution database, or a small set of databases at specified resolutions through automation processes that do not require constant human intervention ».

Après une présentation des enjeux de la généralisation et de son automatisation, nous présentons différents travaux visant à automatiser le processus de généralisation. Nous insistons particulièrement sur les travaux à base d'agents du laboratoire COGIT sur lesquels se base ce travail de thèse.

1.2.1 Besoin en généralisation et enjeux de son automatisation

Dans cette première partie, nous présentons l'importance de la généralisation dans un contexte de forte évolution des besoins en données géographiques. Nous présentons ensuite les enjeux de son automatisation.

1.2.1.1 Évolution des besoins en données géographiques

Besoin en données à différents niveaux de détail Avec le développement de la géomatique, les besoins en données géographiques sont de plus en plus forts et de plus en plus variés. Les progrès des moyens d'acquisition, de stockage et de diffusion de données permettent de disposer de données de plus en plus nombreuses et diversifiées, avec des niveaux de détail de plus en plus fins (Egels, 2002). Des données très détaillées ne sont cependant pas forcément meilleures que des données moins détaillées. En fonction des besoins de l'utilisateur, des données avec un niveau de détail plus général sont nécessaires, car elles font apparaître des concepts utiles qui ne sont pas explicites dans les données les plus fines. De nombreux travaux montrent que le choix du niveau de détail peut avoir un fort impact sur le résultat de l'utilisation des données (François et Ribardièrre, 2004; Charleux, 2005; Manley *et al.*, 2006). Les données géographiques ne révèlent pas la même information suivant leur niveau de détail. Ce niveau de détail dépend de l'échelle caractéristique qui répond le mieux au besoin de l'utilisateur. Par exemple, le Massif Central n'est pas explicitement représenté dans la BDTopo® de l'IGN (IGN, 2002) (il n'existe aucun objet portant ce nom) alors que cette entité peut être très utile à un grand nombre d'applications. (Toth, 2007) illustre la nécessité de disposer de différentes représentations cohérentes d'objets géographiques à différentes échelles dans le cadre de la directive INSPIRE (Directive INSPIRE, 2007). (Purves *et al.*, 2007) illustre également la nécessité de disposer de données structurées à différents niveaux de détail dans le cadre d'un moteur de recherche géographique sur Internet.

Besoin en visualisation à différentes échelles Parallèlement aux progrès d'acquisition, les outils de visualisation de données ont fortement évolué. La carte papier reste

un support encore très utilisé malgré l'utilisation de nombreux moyens numériques de visualisation (écrans divers : ordinateurs, téléphones portables, assistants personnels, écrans de GPS, papier électronique, etc.). Les fonctions de zoom disponibles sur la majorité des logiciels de visualisation de données géographiques sont de plus en plus performantes et ergonomiques et permettent une visualisation aisée à différents niveaux de zoom. Il est facile de naviguer d'une échelle locale (par exemple, le 1 : 10 000, échelle à laquelle les bâtiments sont perçus) à des échelle plus globales (1 : 1 000 000, un département français peut être perçu sur quelques dizaines de centimètres). Ces outils de zooms donnent l'illusion que différentes échelles de visualisation sont à portée de main de l'utilisateur. Cependant, les outils qui affichent des données dont le niveau de détail est réellement adapté au niveau de zoom choisi par l'utilisateur sont rares et peu satisfaisants. Un outils de zoom ergonomique ne permet pas de s'affranchir de la généralisation. Le processus de généralisation de données pourtant essentiel est trop souvent négligé. Beaucoup de cartes disponibles en particulier sur Internet souffrent ainsi d'un manque d'efficacité dû à un défaut de prise en compte des règles cartographiques de base, en particulier en ce qui concerne la généralisation (cf. figure 1.18). Ces problèmes propres à la cartographie sont souvent négligés au profit d'autres problèmes souvent techniques supposés plus importants. Disposer de méthodes et d'outils de généralisation automatique est indispensable pour répondre à ce besoin.

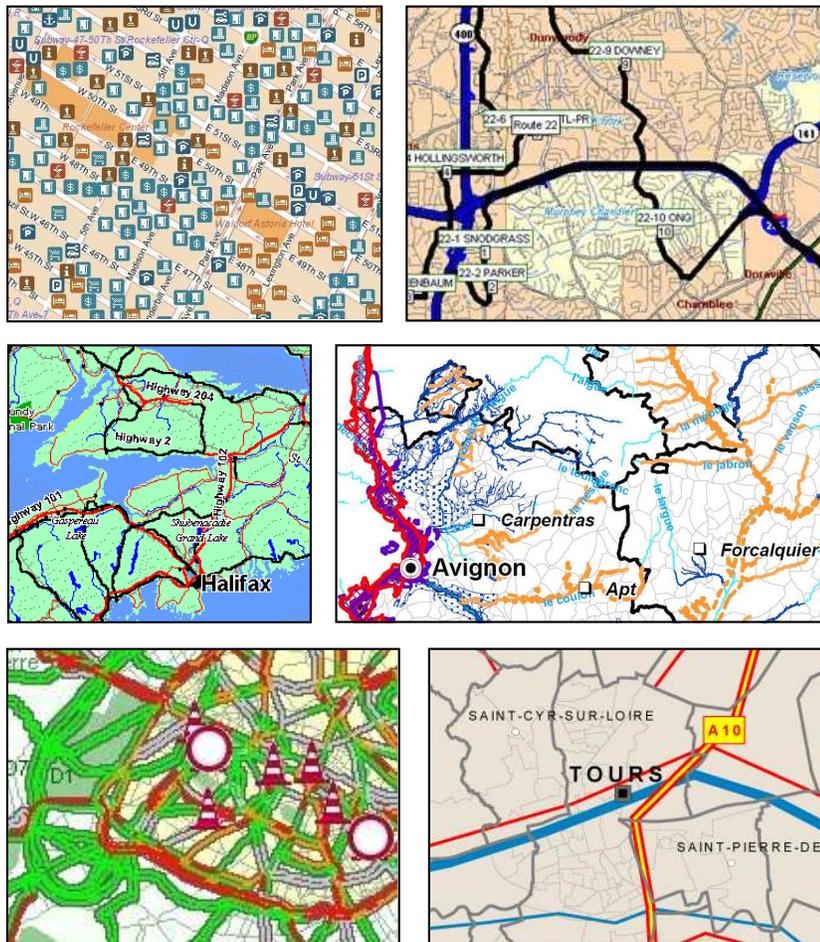


FIGURE 1.18 – Exemples de cartes comportant des défauts de conception cartographique

Démocratisation de l'accès à l'information géographique Le besoin en visualisation est d'autant plus important que les outils de visualisation de données géographiques sont désormais démocratisés, en particulier depuis le développement d'Internet et des portails géographiques. L'essor de la diffusion de données géographiques est stimulé par un engouement du grand public pour l'information géographique. Les succès du lancement du Géoportail¹ en France ou encore de nombreux livres de photographies aériennes de la planète montrent que l'information géographique est très appréciée. Le grand public aime « prendre du dessus » pour avoir un autre point de vue sur son cadre de vie, un point de vue plus global qui lui donne une autre perception de son environnement. Cette utilisation divertissante de l'information géographique peut aussi avoir des fins plus utiles : les données géographiques peuvent permettre une prise de conscience de problèmes globaux importants par le grand public. Plusieurs problèmes globaux (par exemple écologiques), ne peuvent être perçus à l'échelle de l'individu. L'accès à des informations géographiques à une échelle globale peuvent permettre une prise de conscience individuelle. Permettre l'accès à des données à différents niveaux de détail représente ainsi un enjeu « citoyen » dans la mesure où il permet à chaque individu d'élargir son champ de perception et donc son champ de réflexion. L'importance de ce point de vue est illustrée dans *Micromégas* de Voltaire : le géant *Micromégas* en visite dans notre système solaire parvient, du fait de sa très grande taille, à percevoir l'humanité dans son ensemble et ainsi à souffler aux hommes quelques réflexions sur eux-même : « Il se figurait alors les hommes tels qu'ils sont vraiment : de petits insectes se dévorant sur un petit atome de boue ».

Ainsi, il est nécessaire de pouvoir disposer de données géographiques à différents niveaux de détail pour répondre au mieux aux besoins potentiels des utilisateurs. La production de ces données est devenue d'autant plus complexe que les besoins ont évolué et les données géographiques produites ont des niveaux de détail fins. Pouvoir disposer de méthodes de généralisation automatique représente donc un enjeu important pour les producteurs et les utilisateurs de données.

1.2.1.2 Progrès des méthodes de généralisation automatique

La généralisation est une tâche complexe dont l'automatisation est considérée comme impossible par beaucoup de cartographes. La généralisation fait en effet appel à des facultés d'analyse et de représentation pointues. Il est difficile d'extraire des règles consensuelles de généralisation (Rieger et Coulson, 1993). La généralisation est souvent présentée comme une tâche ayant une part artistique (McMaster et Shea, 1992, p.17) et par conséquent impossible à automatiser.

Beaucoup des recherches entreprises pour l'automatisation de la généralisation ont montré que, même si les systèmes de généralisation automatique actuellement disponibles ne peuvent permettre d'atteindre des résultats cartographiques équivalents à ceux obtenus par généralisation manuelle, ces outils permettent aujourd'hui d'automatiser un grand nombre de tâches complexes. Des tâches de généralisation paraissant impossibles à automatiser il y a quelques années le sont aujourd'hui. Des objectifs plus ambitieux deviennent envisageables. Ainsi, de plus en plus de méthodes automatiques de généralisation sont utilisées par de nombreuses agences cartographiques nationales, majoritairement européennes, pour la production de séries de cartes (Stöter, 2005). Nous pouvons citer des travaux en France

1. <http://www.geoportail.fr/>

(Le Men, 1996; Lemarié, 2003; Lecordix *et al.*, 2005a, 2007a,b; Touya, 2007b), au Royaume-Uni (Revell, 2004; Revell *et al.*, 2005; Regnauld, 2007; Regnauld *et al.*, 2007), en Russie (Rozhkov *et al.*, 2007), en Turquie (Bildirici, 2004), en Pologne (Iwaniak et Paluszynsky, 2003), en Suisse (Bobzien *et al.*, 2007), en Espagne (Baella et Pla, 2003), etc. Des pays s'organisent pour permettre l'émergence de solutions méthodologiques et logicielles plus performantes (Lecordix *et al.*, 2005b). Le degré d'automatisation est variable et beaucoup de lignes de production utilisant ces techniques automatisées nécessitent un contrôle humain du résultat de la généralisation automatique. En perfectionnant les systèmes actuellement utilisés, des progrès vers un degré d'automatisation toujours plus élevé sont envisageables.

Même si les méthodes de généralisation automatique ne permettent pas de produire des cartes dont la qualité de généralisation égale celle de cartes généralisées manuellement, les avancées effectuées sont incontestables. Actuellement, la baisse de qualité des cartes produites automatiquement est relativement faible et peut dans de nombreux cas être nettement compensée par les immenses gains en efficacité que procure la mise au point de lignes de production automatiques. Nous présentons maintenant les avantages de la production automatique.

1.2.1.3 Bénéfices de la production automatique de données généralisées

Le but de la généralisation automatique est de permettre la production de bases de données cartographiques automatiquement à partir d'une unique base de données géographique (Weibel et Dutton, 1999, p.127). La figure 1.19 présente un exemple de hiérarchie entre bases de données géographique dérivées. A partir d'une unique base de données géographique très détaillée dite *de référence* au sommet de la hiérarchie, plusieurs bases de données géographiques peuvent être dérivées par généralisation de modèle (flèches jaunes). De ces bases de données géographiques peuvent être dérivées d'autres bases de données géographiques ou bien des bases de données cartographiques par généralisation graphique (flèches bleues). L'avantage principal de cette architecture est la facilité d'entretien de toutes les bases de données qui sont ainsi cohérentes entre elles. Usuellement, les bases de données et cartes sont mises à jour séparément. Avec une telle architecture, seule la base de données géographique de base peut être mise à jour. Ces mises à jour peuvent ensuite être propagées aux autres bases de données géographiques et cartographiques (Badard, 2000; Haunert et Sester, 2005; Lecordix *et al.*, 2005a).

Cette architecture est possible par la mise au point de processus de généralisation automatique (représentés par des flèches). Disposer de méthodes de généralisation automatique présente ainsi pour avantage de pouvoir produire plus vite et plus efficacement des données géographiques. Les mises à jour sont également plus rapides. Ces méthodes permettent non seulement d'améliorer la production de données produites jusqu'à présent sans automatisation, mais permet aussi d'envisager la production de nouvelles données pour des besoins plus spécifiques et plus ponctuels, à partir de données diverses. Les systèmes de généralisation automatique doivent ainsi être suffisamment paramétrables pour pouvoir s'adapter en amont, à différents types de données en entrées, et en aval à différents besoins d'utilisateurs (Edsall, 2007; Regnauld, 2007).

Nous avons présenté ici les enjeux de l'automatisation de la généralisation. Nous présentons maintenant un état de l'art en généralisation automatique.

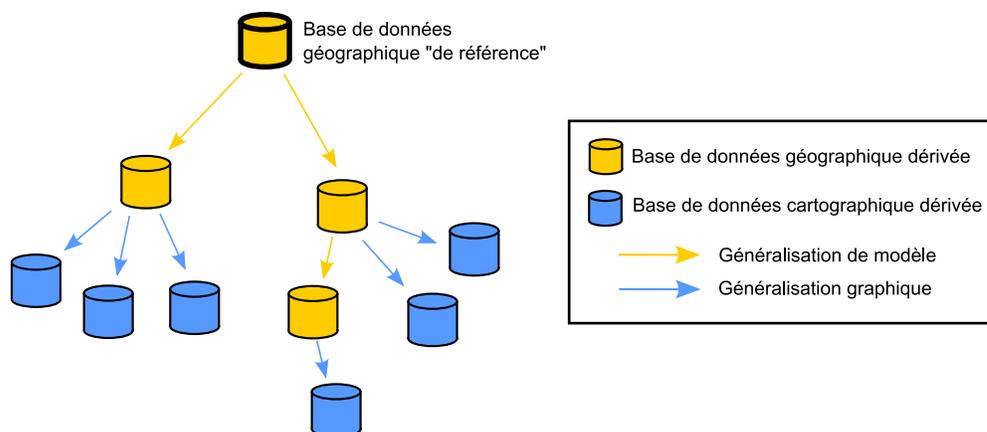


FIGURE 1.19 – Dérivation des bases de données géographiques et cartographiques à partir d'une base de données de référence

1.2.2 Algorithmes de généralisation

1.2.2.1 Des algorithmes à plusieurs niveaux

La généralisation est un processus de transformation utilisant des opérations présentées en partie 1.1.2.5 page 30. Une grande partie des opérations de généralisation sont automatisées sous forme d'algorithmes géométriques. Ces algorithmes prennent en entrée un ou plusieurs objet(s) et permettent d'obtenir en sortie une ou plusieurs représentation(s) différente(s) du ou des objet(s). Ces algorithmes opèrent à plusieurs niveaux : certains algorithmes permettent de transformer des objets pris individuellement (comme par exemple, un bâtiment, un tronçon de route, etc.), d'autres s'appliquent sur des groupes d'objets (un ensemble de petits objets à typifier, deux objets trop proches, etc.) ou enfin sur des parties d'objets (un virage de route, une partie de limite de bâtiment, etc.). Nous présentons ici certains de ces algorithmes suivant le niveau auquel ils opèrent.

Algorithmes sur un objet (cf. figure 1.20) Parmi ces algorithmes, certains s'appliquent à un objet linéaire (comme un tronçon routier) comme par exemple l'algorithme plâtre (Fritsch, 1997), le lissage gaussien, les algorithmes de simplification ligne de (Ying *et al.*, 2003), (Zhou et Jones, 2004) ou (Nakos et Mitropoulos, 2003), l'algorithme de filtrage de (Douglas et Peucker, 1973), l'algorithme de lissage à base de snakes de (Burghardt, 2002, 2005). D'autres algorithmes s'appliquent à un bâtiment comme les algorithmes de dilatation, d'équarrissage (Airault, 1996) ou de simplification de bâtiment (Lichtner, 1979; Wang *et al.*, 2005). Des algorithmes concernent le relief et permettent de le lisser (Carvalho, 1995; Gabor, 1999; Gökgöz et Selçuk, 2004; Zaksek et Podobnikar, 2005; Danovaro *et al.*, 2006) ou bien de supprimer un talweg (Ai, 2004).

Algorithmes sur un groupe d'objets (cf. figure 1.21) Les opérations de généralisation ne s'appliquent pas seulement à des objets pris individuellement mais également à des groupes d'objets. Des algorithmes ont été mis au point pour la généralisation de ces groupes. Cette notion de groupe est explicitée dans (Ruas, 2000) sous forme d'objets meso que nous présenterons plus tard. Parmi ces algorithmes, plusieurs s'appliquent à des groupes de bâtiments comme par exemple :

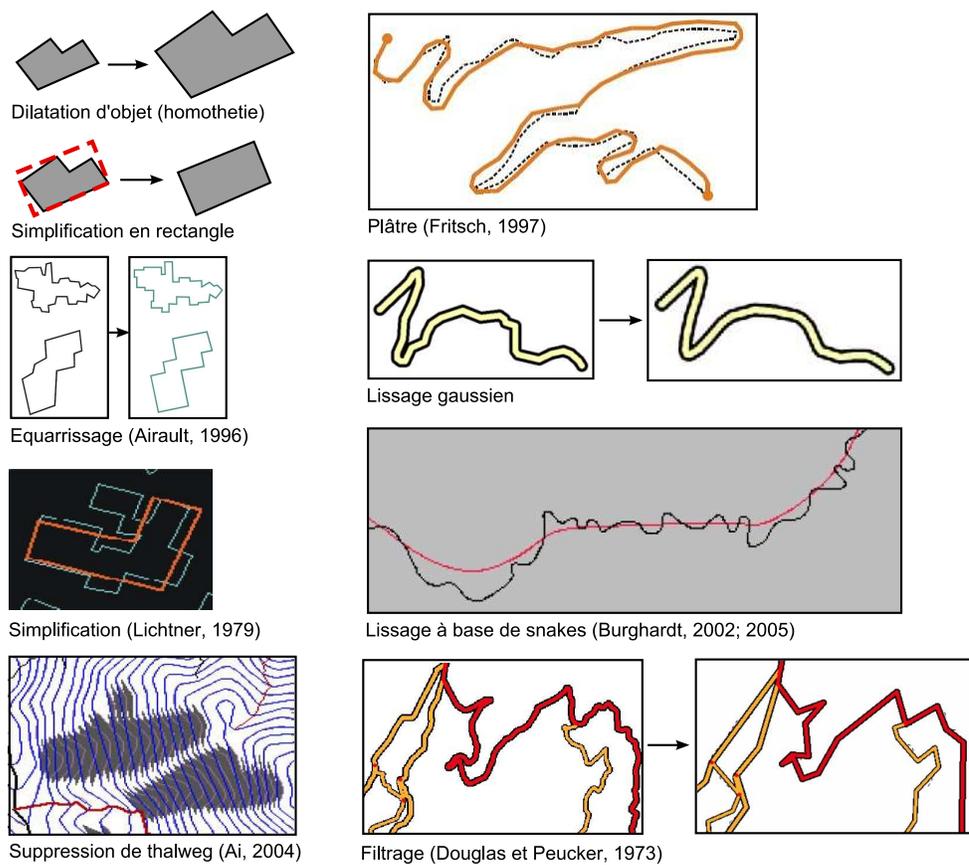


FIGURE 1.20 – Exemples de résultats d'algorithmes sur objets

- les algorithmes de typification (Anders et Sester, 2000; Burghardt et Cecconi, 2003; Li *et al.*, 2004) dont plusieurs qui concernent particulièrement les alignements de bâtiments (Hangouët, 1998, chap. D.3), (Gaffuri et Trevisan, 2004),
- les algorithmes de suppression contextuelle de bâtiments (Ruas, 1999a),
- les algorithmes de déplacement de bâtiments d'un îlot urbain (Ruas, 1998; Ai et Van Oosterom, 2002; Grosso et Regnaud, 2005; Bader *et al.*, 2005),
- les algorithmes d'agrégation/amalgamation de bâtiments en groupes de bâtiments (Regnaud, 1998, chap. III.2.2), (Regnaud, 2003) ou en villes (Chaudhry et Mackaness, 2007),
- les algorithmes de généralisation de bâtiments composant un îlot urbain (Camara *et al.*, 2005).

D'autres algorithmes concernent les opérations de sélection et suppression de tronçons au sein de réseaux (Mackaness et Beard, 1994; Ruas, 1999a; Christensen, 2003; Touya, 2007b,a; Qian *et al.*, 2007) ou de déformation de réseaux (Bader, 2001). Enfin, certains concernent la généralisation de parcelles d'occupation du sol (Bader et Weibel, 1997; Galanda, 2001; Galanda et Weibel, 2002; Haunert, 2007) ou de sélection de points cotés (Baella *et al.*, 2007).

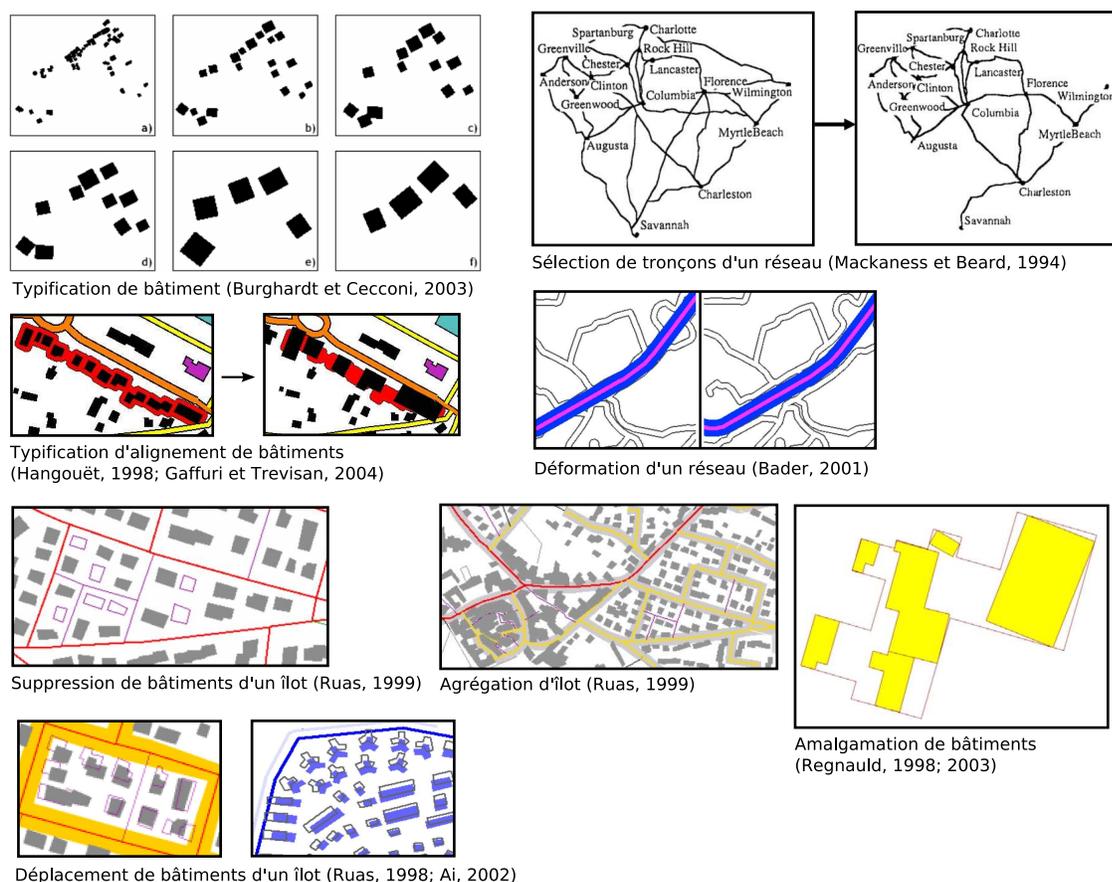


FIGURE 1.21 – Exemples de résultats d'algorithmes sur des groupes d'objets

Algorithmes sur les parties d'objets (cf. figure 1.22) Enfin, des algorithmes s'appliquent spécifiquement à des parties d'objets. Ces algorithmes concernent surtout les objets étendus pour lesquels il est parfois nécessaire d'agir localement pour résoudre un conflit cartographique. C'est le cas des algorithmes faille-min et faille-max (Mustière, 2001, 2005) ou encore schématisation et accordéon (Plazanet, 1996; Lecordix *et al.*, 1997) qui agissent sur des parties de tronçons routiers dans le but de résoudre des conflits d'empâtement. D'autres algorithmes s'appliquent sur des parties de surfaces, comme l'algorithme d'élargissement de partie étroite d'un bâtiment.

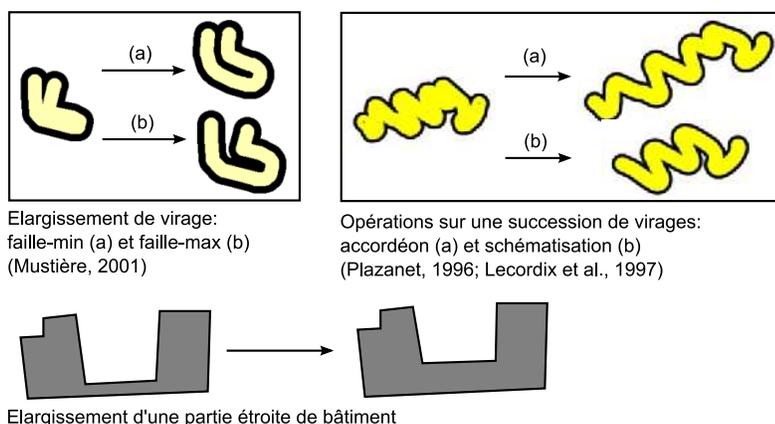


FIGURE 1.22 – Exemples de résultats d'algorithmes sur des parties d'objets

Chronologiquement, la conception d'algorithmes a constitué la première phase de l'automatisation du processus de généralisation. De nombreux travaux visent encore à concevoir de nouveaux algorithmes. Curieusement, les algorithmes disponibles dans la majorité des logiciels SIG restent peu nombreux et peu élaborés. De nombreux travaux visent à rendre disponible un grand nombre de ces algorithmes à l'aide de *services web* (Burghardt *et al.*, 2005; Neun et Burghardt, 2005; Foerster et Stöter, 2006). Cependant, nous constatons que la mise au point de bons algorithmes de généralisation n'est plus aujourd'hui la difficulté essentielle à l'automatisation du processus de généralisation. Nous présentons maintenant le problème de l'orchestration du déclenchement des algorithmes.

1.2.2.2 Le problème de l'orchestration

Les algorithmes permettent d'automatiser les opérations de généralisation. Leur déclenchement permet d'obtenir des représentations d'objets généralisées a priori plus satisfaisantes. Cependant, ils ne suffisent pas à eux seuls à l'automatisation du processus de généralisation : un système permettant l'orchestration du déclenchement de ces algorithmes est nécessaire. Un système de généralisation doit être capable de déterminer à quel(s) objet(s) appliquer quel(s) algorithme(s) et avec quel paramétrage (Shea et McMaster, 1989). Ce processus d'orchestration nécessite l'utilisation de méthodes d'analyse qui permettent une caractérisation des données géographiques à généraliser. (Ruas et Plazanet, 1996) proposent également d'utiliser des méthodes, appelées *algorithme de focalisation* par (Mustière, 2001, p.63), permettant un découpage de l'espace géographique pour le généraliser par parties. Un algorithme de focalisation permet de déterminer une situation sur

laquelle appliquer un traitement particulier. De nombreux travaux que nous présentons maintenant visent à caractériser les données géographiques dans le but de les généraliser.

1.2.3 Méthodes d'analyse spatiale pour la généralisation

Les algorithmes de généralisation doivent être appliqués aux « bons endroits ». Pour déterminer ces bons endroits, il est nécessaire d'analyser les données à généraliser. Cette analyse a pour but de rendre explicites des informations utiles au processus de généralisation et qui sont implicitement contenues dans les données. Un système de généralisation automatique doit ainsi être capable de comprendre les données à généraliser (Neun *et al.*, 2004; Mackaness, 2007). Dans (Mackaness et Edwards, 2002), la carte est comparée à un palimpseste de structures organisées que le cartographe est capable de percevoir. Des méthodes d'analyse spatiale doivent être utilisées pour *révéler* ce palimpseste au système de généralisation. Cette étape est parfois appelée *enrichissement de donnée*. Le but des méthodes d'analyse spatiale est de permettre de mesurer l'espace géographique selon la définition de (Perdijon, 1998, p.9) :

« La mesure est l'opération qui permet de passer de l'espace continu du Réel à l'espace discret (discontinu) du Connu ».

Difficultés (Barillot, 2002) présente les difficultés propres à la mise au point de méthodes de mesure en analyse spatiale. Les deux difficultés principales sont :

- la difficulté de formaliser le concept mental ou visuel à mesurer, et à le traduire sous forme d'un algorithme,
- et la difficulté d'interpréter le résultat de la mesure.

Cette deuxième difficulté est souvent négligée. Une mesure dont le résultat ne peut être interprété est pourtant inutile.

Exemples de méthodes d'analyse spatiale pour la généralisation Parmi les méthodes d'analyse spatiale dédiées à la généralisation, nous pouvons mentionner :

- des méthodes d'analyse de l'urbain (Ruas et Mackaness, 1997; Regnaud, 1998; Anders et Sester, 2000; Boffet, 2001; Gaffuri et Trevisan, 2004; Steiniger, 2006). Le but de ces travaux est de permettre de caractériser l'espace urbain pour pouvoir effectuer des traitements de généralisation spécifiques. (Christophe, 2001; Christophe et Ruas, 2002; Holzapfel et Ruas, 2004) proposent une méthode de détection et de caractérisation des alignements de bâtiments dans le but de les conserver pendant le processus de généralisation du bâti, (Duchêne *et al.*, 2003) propose une méthode de mesure d'orientation de bâtiment.
- des méthodes d'analyse de forme de ligne (Marino, 1979; Buttenfield, 1991; Plazanet, 1996; Barillot et Plazanet, 2002; Mitropoulos *et al.*, 2005),
- des méthodes d'analyse de réseaux (Mackaness et Beard, 1994; Zhang, 2004; Heinze *et al.*, 2005; Garcia Balboa *et al.*, 2005; Thomson, 2006; Touya, 2007b,a). Ces travaux permettent de mesurer certaines caractéristiques des réseaux pour les généraliser,
- des méthodes d'analyse dédiées aux cartes catégorielles (Peter, 2001; Neun et Steiniger, 2005; Steiniger *et al.*, 2006),
- des méthodes d'analyse du relief (Weibel, 1989, 1992; Monier *et al.*, 1996; Monier, 1997; Plazanet et Spagnuolo, 1998; Fisher *et al.*, 2004b; Wood, 1996).

Plusieurs méthodes permettent également de détecter les conflits cartographiques (Mustière, 1998; Bader et Weibel, 1997; Mustière, 2001; Guilbert, 2002; Guilbert *et al.*, 2006). Le projet AGENT (Projet AGENT, 2001) a également permis de répertorier et de mettre au point de nombreuses mesures (Department of geography, university of Zurich, 1999; University of Edinburgh, IGN, university of Zurich, 1999; University of Edinburgh, IGN, 1999). Nous pouvons aussi noter que la plupart des méthodes d'analyse spatiale présentées ici ne sont pas utiles qu'à la généralisation et pourraient être utilisées pour d'autres objectifs.

Utilisation de structures d'analyse Beaucoup de méthodes d'analyse spatiale utilisent des structures qui aident à la conception de méthodes d'analyse :

- les triangulations (Regnauld, 2005),
- les diagrammes de Voronoï (Hangouët, 1998, 2000),
- les squelettes (Gold et Thibault, 2001; Haunert et Sester, 2004; Matuk *et al.*, 2005, 2006; Regnauld et Mackaness, 2006; Hasthorpe et Mount, 2007),
- etc.

Nous avons présenté des méthodes d'analyse spatiale permettant de caractériser les données géographiques pour leur appliquer des traitements de généralisation adéquats. Nous présentons maintenant une autre difficulté de l'automatisation de la généralisation : la traduction des besoins de l'utilisateur des données généralisées.

1.2.4 Le problème de la traduction des besoins utilisateur

Importance de la traduction des besoins utilisateur dans le processus de généralisation Nous avons vu lors de la présentation du processus de généralisation que celui-ci doit prendre en compte les besoins de l'utilisateur final des données pour permettre de déterminer quelle est l'information importante à préserver, voire à mettre en valeur, et celle de moindre importance qui pourra être simplifiée. La prise en compte des besoins de l'utilisateur est importante car elle permet d'assurer la qualité du résultat du processus de généralisation. Un système de généralisation performant doit être suffisamment ouvert et paramétrable pour permettre de répondre à des besoins variés de ses utilisateurs. Ces besoins de l'utilisateur final influencent le choix des algorithmes à appliquer lors du processus ainsi que leur paramétrage. La difficulté consiste à capturer et formaliser les besoins utilisateur et à permettre au système de généralisation automatique de prendre en compte ces besoins formalisés.

Traduction des besoins utilisateur sous forme de contraintes Un moyen de prendre en compte des besoins utilisateur consiste à traduire ces besoins sous la forme d'un ensemble de contraintes explicites, comme proposé par (Beard, 1991). Les contraintes permettent de décrire l'état dans lequel les données géographiques devraient être à la fin du processus de généralisation. La généralisation est ainsi traduite en un problème de satisfaction de contraintes. (Ruas, 1999a, Glossaire) définit une contrainte comme *une propriété imposée à un caractère*. Une contrainte porte sur un caractère d'un objet ou d'un groupe d'objets. Il est nécessaire de disposer de mesures telles que celles présentées précédemment pour permettre l'évaluation de l'état de satisfaction d'une contrainte. Par exemple, pour un utilisateur souhaitant une carte avec des symboles de bâtiments suffisamment gros, il est possible de traduire ce besoin sous la forme d'une contrainte portant sur le caractère *taille*

des objets *bâtiment* et ayant une valeur but spécifiée par l'utilisateur. Le caractère *taille* peut être mesuré par l'aire des bâtiments. La traduction de besoins utilisateur sous forme de contraintes n'est pas facile, en particulier pour des utilisateurs non spécialistes. Dans sa thèse de doctorat, (Hubert, 2003) propose une méthode d'aide à la saisie de spécifications utilisateur pour un processus de généralisation automatique.

Nous avons présenté des éléments nécessaires au processus de généralisation : algorithmes, méthodes d'analyse spatiale et traduction de besoins sous forme de contraintes. Nous présentons maintenant différentes approches proposées pour la mise au point de modèles de généralisation.

1.2.5 Approches pour l'automatisation du processus

Nous présentons maintenant différentes approches pour l'automatisation du processus de généralisation. Cette classification est largement inspirée de celle proposée par (Duchêne, 2004, chap.A3).

1.2.5.1 Approche par séquence prédéfinie systématique

L'approche par séquence prédéfinie systématique consiste à prédéfinir des séquences figées d'algorithmes à déclencher pour chaque classe d'objets. Les algorithmes sont ensuite appliqués automatiquement les uns après les autres aux objets de chaque classe. Dans cette approche, les algorithmes appliqués prennent en compte uniquement le type des objets et éventuellement certaines de leurs valeurs attributaires.

(Lee, 2003) présente un outil permettant la construction de telles séquences de traitements (cf. figure 1.23). Cet extrait présente un processus de généralisation de courbes de niveau. La séquence d'algorithmes est composée d'une opération de sélection (seules les courbes de niveau équidistantes de 50m sont conservées), d'une opération de filtrage, puis d'une autre de lissage. Le concepteur du processus de généralisation peut ainsi mettre au point des chaînes d'algorithmes à déclencher sur les objets des différents thèmes.

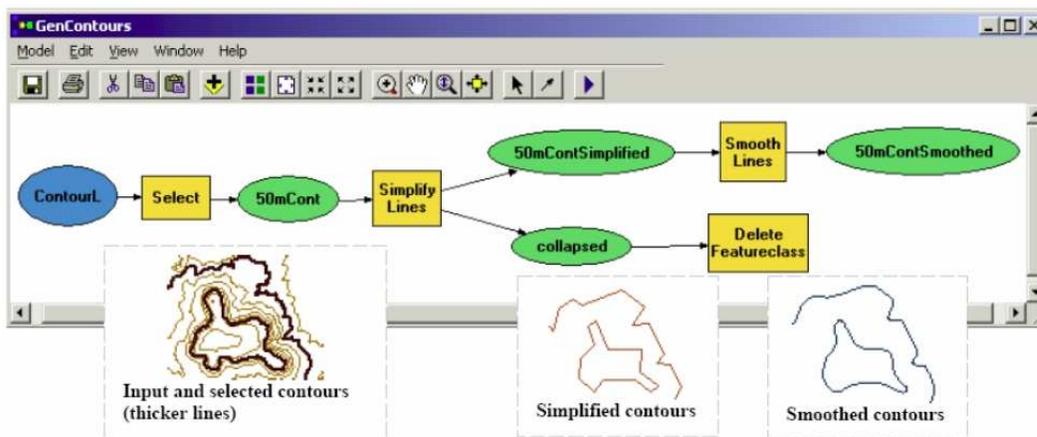


FIGURE 1.23 – Mise au point d'une suite de traitements prédéfinis (outils ModelBuilder du logiciel ArcGIS 9.1, d'après (Lee, 2003))

Cette approche nécessite de disposer d'algorithmes de généralisation. Son avantage essentiel est sa simplicité de mise en œuvre : les algorithmes sont déclenchés les uns après les autres. Les résultats obtenus en suivant cette approche sont cependant peu satisfaisants en terme de qualité cartographique. Cela s'explique principalement par le fait que les algorithmes sont appliqués de façon systématique aux objets sans prendre en compte ni leurs caractéristiques propres, ni celles de leur contexte.

1.2.5.2 Approches globales

Le principe de cette approche est de traduire le problème de généralisation comme un problème de recherche d'extremum d'une fonction d'évaluation (parfois appelée *fonction de coût*). La valeur de cette fonction d'évaluation traduit l'état global de généralisation des données. Cette approche prend en compte l'aspect *holistique* de la généralisation. Pour une valeur extrême de cette fonction (un maximum ou un minimum suivant sa définition), l'état de généralisation est considéré comme meilleur. Le principe de cette approche est de parvenir à trouver un état des données le meilleur possible, c'est-à-dire qui permette de rendre optimum la valeur de la fonction d'évaluation.

Nous présentons maintenant plusieurs travaux basés sur cette approche. Ces travaux sont classés en fonction de la méthode de résolution qu'ils utilisent pour trouver une configuration maximisant la fonction de coût.

Généralisation basée sur la méthode d'estimation par moindres carrés La méthode des moindres carrés est une méthode d'estimation très utilisée en métrologie (topographie, géodésie etc.). Elle permet d'estimer la solution moyenne d'un système sur-contraint d'équations linéaires (c'est-à-dire un système comportant plus d'équations que d'inconnues) (Coulot, 2002). La méthode des moindres carrés permet de trouver une valeur du vecteur inconnu qui minimise la norme du vecteur des résidus. La fonction donnant cette valeur peut être considérée comme la fonction d'évaluation. Cette résolution est effectuée par calcul matriciel.

De nombreux travaux parmi lesquels (Sarjakoski et Kilpeläinen, 1999; Harrie, 1999; Sester, 2000; Harrie, 2001; Harrie et Sarjakoski, 2002; Sester et Brenner, 2004; Sester, 2005) visent à adapter cette méthode au processus de généralisation automatique. Le principe de ces méthodes est de traduire chaque contrainte par une équation dont les inconnues sont les coordonnées des points composant les géométries des objets à représenter. Par exemple, pour contraindre l'orientation d'un segment composé de deux points $P_1(x_1, y_1)$ et $P_2(x_2, y_2)$ de coordonnées initiales respectives (x_{10}, y_{10}) et (x_{20}, y_{20}) à être préservée, l'équation correspondante est :

$$\arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \arctan \frac{y_{20} - y_{10}}{x_{20} - x_{10}}$$

D'autres équations sont établies pour d'autres types de contraintes. Ces contraintes peuvent concerner un ou plusieurs points. (Sester, 2000) propose ainsi de contraindre les longueurs des segments, ainsi que les distances entre points proches pour permettre soit des répulsions, soit des rapprochements d'objets. (Harrie et Sarjakoski, 2002) propose également une contrainte de lissage de ligne, ainsi qu'une autre de conservation de valeur d'angle. Les coordonnées des points composant les géométries des objets de la carte

peuvent ainsi être contraintes par un ensemble d'équations. Après avoir été linéarisé, ce système d'équations est résolu par itérations successives ((Harrie et Sarjakoski, 2002) utilise la méthode du gradient conjugué) pour trouver une position des points qui satisfasse au mieux toutes les contraintes. Cette nouvelle position correspond à un équilibre entre les différentes contraintes. Cet équilibre peut être pondéré par l'intermédiaire de la matrice des poids de la méthode des moindres carrés.

Les figures 1.24 a. et b. présentent un résultat de cette méthode. Par exemple, en figure a., les objets initiaux (bâtiments, routes et lacs) sont représentés en couleurs claires : de nombreux conflits cartographiques sont présents (le bâtiment en haut à gauche se superpose au lac et à une route). Les objets généralisés représentés en couleurs foncées ont été déplacés et déformés de façon à résoudre les conflits cartographiques présents.

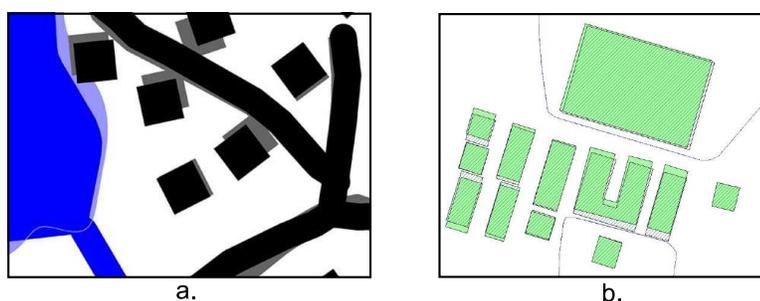


FIGURE 1.24 – Exemple de généralisation par moindres carrés. D'après a. (Harrie, 2001) et b. (Sester, 2000)

Généralisation basée sur la méthode des éléments finis La méthode des éléments finis est une méthode de résolution de problèmes très utilisée en physique. Elle permet de déterminer une solution approchée à un problème physique posé sous la forme d'une équation différentielle ou aux dérivées partielles à satisfaire en tout point d'un objet (Garrigues, 2002b; Oudin, 2002). Cette méthode est utilisée en particulier en mécanique des solides déformables pour déterminer une position d'équilibre (Garrigues, 2002a). Le principe de cette méthode est de traduire l'équation différentielle à satisfaire au niveau de petites parties composant l'objet (ces parties sont appelées *éléments finis*). Le problème est discrétisé au niveau des éléments finis pour être résolu (Garrigues, 2002b, p.9) via une inversion de matrice.

De nombreux travaux visent à adapter cette méthode à la généralisation. Le but est de permettre de conférer aux objets géographiques des comportements déformables comparables à ceux d'objets réels. Ainsi, (Højholt, 1998, 2000) propose de modéliser une carte comme une surface élastique déformable. Des paramètres de raideur sont alloués aux objets de la carte non visibles afin de les forcer à grossir (comme par exemple les tronçons routiers). L'espace vide entre les objets est aussi modélisé comme une surface déformable. La carte est ensuite décomposée sous forme d'une partition triangulaire (cf. figure 1.25 a.) et une position d'équilibre est calculée par la méthode des éléments finis (cf. figure 1.25 b.). L'ensemble des objets ont été déformés pour résoudre les conflits cartographiques.

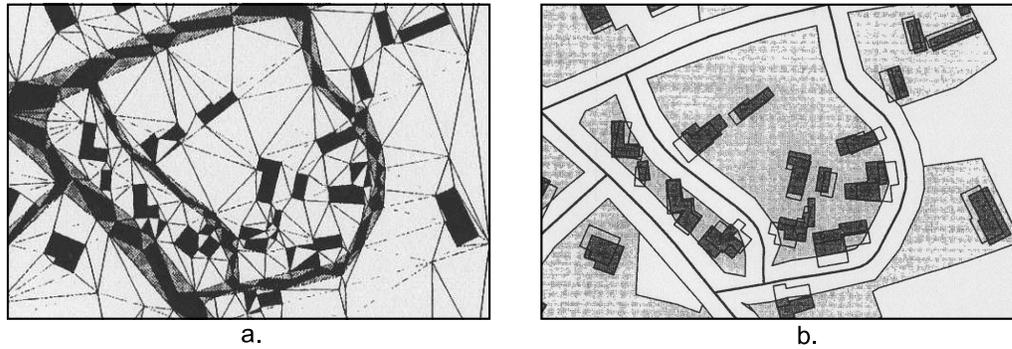


FIGURE 1.25 – Exemple de généralisation par la méthode des éléments finis. D’après (Højholt, 1998)

La méthode des éléments finis a été appliquée à la déformation de réseaux et au déplacement de bâtiments (Bader, 2001; Bader *et al.*, 2005). Cette adaptation est basée sur les principes de la statique des poutre élastiques, ou *beams* (Garrigues, 1999). La modélisation d’objets linéaires sous forme de *snakes* proposée par (Burghardt et Meier, 1997; Bader, 2001; Steiniger et Meier, 2004; Burghardt, 2005; Guilbert *et al.*, 2006; Galanda, 2001, 2003; Galanda et Weibel, 2003) utilise les mêmes principes. Une déformation d’objets linéaires est obtenue par éléments finis : le but est de trouver une configuration des éléments linéaires équilibrant des forces externes (qui poussent l’objet à conserver sa forme) et des forces internes (qui poussent l’objet à se déformer pour satisfaire des contraintes cartographiques).

La figure 1.26 montre un résultat de ces travaux issus de (Bader, 2001). En figure a., des conflits de superposition et d’empâtement sont visibles sur le réseau affiché. Dans l’état final figure b., le réseau a été déformé et la plupart des conflits cartographiques ont été résolus. La figure c. présente un résultat de déformation de bâtiments basé sur ce travail.

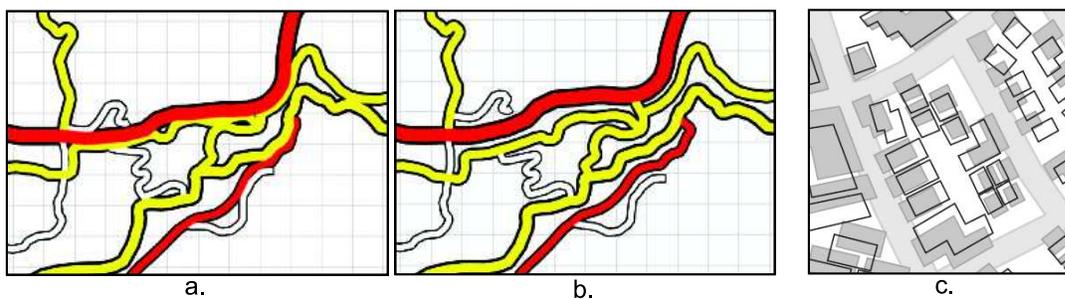


FIGURE 1.26 – Exemple de généralisation par déformation par poutres élastiques (Bader, 2001)

Généralisation basée sur les algorithmes d’exploration par escalade et recuit simulé Les algorithmes d’exploration par escalade et par recuit simulé sont deux algorithmes d’exploration locale utilisés en résolution de problèmes d’optimisation. Ces algorithmes permettent d’atteindre un état maximisant une fonction de coût en changeant d’état petit à petit. La méthode d’exploration par escalade (encore appelée exploration par

descente de gradient ou par *hill-climbing*) consiste à progresser vers l'état voisin qui permet la meilleure progression de la fonction de coût (Ferber, 1997, chap. 4.9, p.216), (Russell et Norvig, 2006, chap. 4.3.1, p.126). Une progression dans le sens de la plus grande pente de la fonction de coût est ainsi effectuée. Cette progression est comparable à celle d'un marcheur souhaitant atteindre le sommet d'une montagne en plein brouillard, et qui marche en suivant pas à pas la ligne de plus grande pente. Le processus s'arrête lorsque la fonction de coût atteint un maximum, c'est-à-dire lorsque l'état courant est meilleur que tous ses états voisins. Un inconvénient de ce processus est la possibilité de rester bloqué au niveau d'un maximum local. L'algorithme du recuit simulé présenté dans (Russell et Norvig, 2006, chap.4.3.2 p.130) permet de pallier ce défaut en autorisant une dégradation maîtrisée de la fonction de coût pour permettre au processus de « sortir » d'un maximum local.

De nombreux travaux visent à adapter ces méthodes à la généralisation automatique. (Ware et Jones, 1998; Ware *et al.*, 2003) proposent une première adaptation. La fonction d'évaluation traduit l'état de généralisation des données. Elle est calculée comme une agrégation de l'état de généralisation de tous les objets. De nouveaux états sont générés en utilisant des opérations de déplacement, dilatation, réduction et suppression sur des objets tirés au sort. Ces états voisins sont ensuite évalués par la fonction de coût et le meilleur est gardé. La figure 1.27 a. présente un résultat de ce travail. (Monnot *et al.*, 2007; Hardy *et al.*, 2007) utilisent également l'algorithme du recuit simulé pour la résolution de conflits de superposition entre des objets ponctuels (cf. figure 1.27 b. et c.). Cet algorithme a également été adapté pour la construction automatique de cartes schématiques comme les plans de métro (Ware *et al.*, 2006; Thomas *et al.*, 2003; Anand *et al.*, 2007).

Beaucoup de travaux adoptant une approche mécanique utilisent également l'algorithme d'exploration par escalade (Bundy *et al.*, 1995; Bobrich, 1996; Fritsch, 1997; Baeijs, 1998; Joubran Abu Daoud et Doytsher, 2004, 2005). Dans ces travaux, une position d'équilibre de points est recherchée. Les points sont déplacés afin d'annuler une somme de forces ou minimiser une énergie.

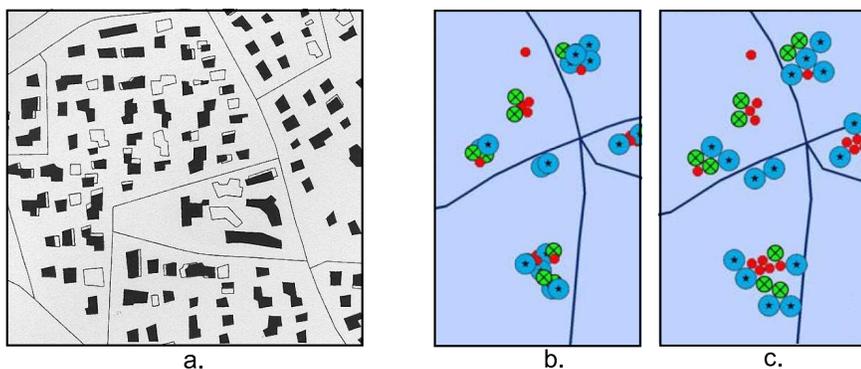


FIGURE 1.27 – Exemple de généralisation par recuit simulé; d'après (Ware *et al.*, 2003) (a.) et (Monnot *et al.*, 2007) (b. et c.)

L'obstacle principal de l'utilisation de ces méthodes à base d'exploration par escalade et de recuit simulé à la généralisation automatique est la difficulté de mettre au point une fonction de coût permettant une évaluation efficace de la qualité de généralisation d'un état

courant. De plus, la fonction d'évaluation est globale (elle concerne l'ensemble des objets de la carte), alors que les opérations sont appliquées localement (sur des objets individuels) : il peut paraître plus pertinent d'évaluer le résultat d'une opération uniquement sur les objets l'ayant subie. Également, les objets traités, les opérations utilisées ainsi que leurs paramètres éventuels sont tirés au sort, alors que ce choix pourrait être en partie guidé par l'état de l'objet subissant l'opération.

Généralisation basée sur les algorithmes génétiques Comme les méthodes d'exploration par escalade ou recuit simulé, les algorithmes génétiques reposent sur une fonction de coût permettant d'évaluer la qualité de chaque état (Russell et Norvig, 2006, chap. 4.3.1 p.126). La différence provient du fait que plusieurs états sont considérés, et que les états successifs sont produits par recombinaison d'états courants. Les meilleurs états courants, au sens de la fonction de coût, sont favorisés lors de cette recombinaison.

Plusieurs travaux ont pour objectif d'appliquer ces algorithmes à l'automatisation de la généralisation (Qian *et al.*, 2003; Deng *et al.*, 2003; Brosset et Devogele, 2004; Wilson *et al.*, 2003). L'obstacle principal à l'utilisation de tels algorithmes vient de la difficulté à définir la fonction de coût et l'opération de recombinaison.

1.2.5.3 Approches locales

Nous avons présenté précédemment divers travaux se basant sur une approche globale : dans ces travaux, diverses méthodes de résolution sont utilisées dans le but de maximiser une fonction d'évaluation traduisant l'état global de généralisation de la carte. Nous présentons maintenant des travaux pour lesquels la généralisation est vue comme un problème de résolution progressive de conflits locaux.

Principe général de l'approche locale Pour résoudre un problème complexe, il est souvent utile de le décomposer en plusieurs problèmes plus simples à résoudre. Cette règle, souvent désignée sous la forme « diviser pour mieux régner », est l'une des 4 règles formulées par René Descartes dans *le discours de la méthode*. De nombreuses méthodes de généralisation automatique conformes à cette règle permettent de voir la généralisation non pas comme un processus global ayant comme objet l'ensemble de données à généraliser, mais comme une somme de processus agissant localement sur certaines parties des données. Par exemple, la généralisation d'un groupe de bâtiments dans cette approche peut être décomposée en une suite d'opérations adéquates appliquées sur chacun des bâtiments. Contrairement aux travaux de l'approche globale pour laquelle une méthode de résolution est utilisée pour minimiser une fonction globale d'évaluation, la plupart des travaux de l'approche locale cherchent souvent à minimiser une fonction d'évaluation locale. Il n'existe pas d'unique fonction d'évaluation pour toutes les données, mais plusieurs définies sur des parties.

Une difficulté propre aux approches locales réside dans la nécessité de disposer de méthodes permettant de décomposer le processus de généralisation, c'est-à-dire de savoir sur quelles parties des données agir, et comment. Cette difficulté est présentée dans (Shea et McMaster, 1989; McMaster et Shea, 1988). Ils constatent que des méthodes sont nécessaires pour déterminer automatiquement :

- **où** généraliser : ce problème consiste à déterminer quels sont les objets, parties d'objet ou groupes d'objet à généraliser à un moment donné du processus. Pour cela, il

est nécessaire de disposer de méthodes d'analyse spatiale permettant d'analyser les données afin de les partitionner pour les généraliser par partie, et de détecter des conflits cartographiques éventuels. Nous avons présenté plusieurs de ces méthodes partie 1.2.3 page 45.

- et **comment** généraliser : pour chaque ensemble de données, il est nécessaire de pouvoir déterminer quel traitement appliquer. Ce choix doit être fait en fonction des caractéristiques des données. Il est nécessaire de disposer de connaissances de généralisation pour répondre à cette question.

Les modèles de (Brassel et Weibel, 1988) et (Ruas et Plazanet, 1996) (Brassel et Weibel, 1988) proposent un modèle de généralisation basé sur cette approche. Le processus de généralisation est décomposé en cinq phases :

1. Analyse des données (explicitier les structures et les relations des données, les caractériser).
2. Reconnaissance de processus (savoir quels algorithmes appliquer en fonction des données et de leur état).
3. Modélisation des processus (déterminer la succession des algorithmes et leur paramètres).
4. Traitement des données (exécuter les processus reconnus).
5. Affichage des données (en leur appliquant le symbole spécifié).

Le modèle de (Ruas et Plazanet, 1996) (cf. figure 1.28) s'appuie sur le modèle précédent. Il comporte une étape de contrôle (e.) qui permet de valider ou non le résultat de chaque opération si le résultat de l'algorithme a permis d'améliorer l'état de l'objet traité.

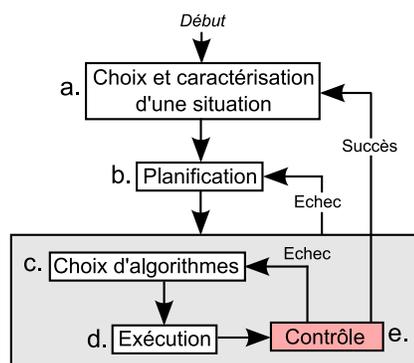


FIGURE 1.28 – Le modèle de (Ruas et Plazanet, 1996)

Plusieurs travaux sont basés sur cette approche. Parmi ces travaux, nous pouvons citer le modèle GALBE (Mustière, 1998), (Mustière, 2001, chap.B), (Mustière, 2005). Ce modèle s'applique à la généralisation de tronçons routiers. Il utilise une mesure permettant de détecter les parties empâtées d'un tronçon routier (ce sont les parties du tronçon où le symbole se superpose à lui-même ; cf figure 1.29 en vert). Le tronçon est découpé en parties, en fonction des conflits d'empâtement détectés. Un algorithme spécifique est appliqué localement à chacune des parties du tronçon. La figure 1.29 présente le résultat de ce processus sur un tronçon.

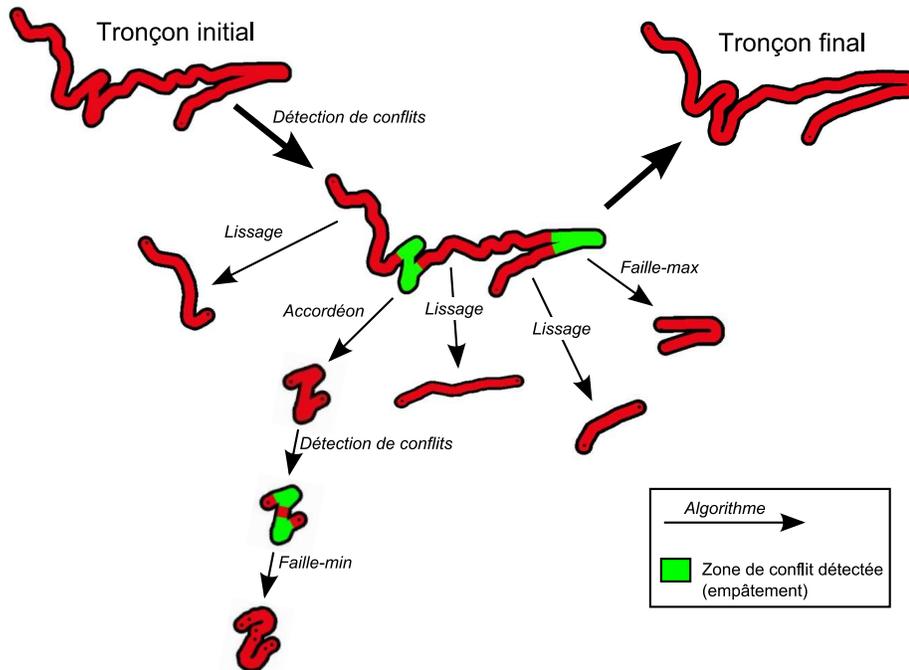


FIGURE 1.29 – Généralisation d’un tronçon routier avec le modèle GALBE, d’après (Mustièrre, 2001, chap.B)

D’autres travaux utilisent cette approche. (Steiniger et Weibel, 2005) proposent une méthode de généralisation appliquée aux cartes géologiques et basée sur une analyse des différentes structures présentes sur la carte. (Weibel, 1989, 1992) propose une méthode de généralisation du relief en fonction des caractéristiques de celui-ci. Les opérations appliquées sur des zones du relief doivent prendre en compte leurs caractéristiques.

Enfin, des modèles de généralisation à base de systèmes multi-agents proposés par (Ruas et Duchêne, 2007) d’après les travaux de (Ruas, 1999a; Duchêne, 2004) et ceux du projet AGENT s’inscrivent dans cette approche. Dans ces modèles, les objets géographiques sont considérés comme des *agents* et s’appliquent à eux-même des opérations de généralisation dans le but de maximiser une fonction locale dépendant de leur état (appelée *satisfaction*). Nous présentons plus en détail en partie 1.3 page 57 ces modèles sur lesquels nous nous basons.

1.2.5.4 Synthèse sur les approches

Nous avons présenté des travaux visant à orchestrer le processus de généralisation. Nous avons choisi de distinguer les travaux adoptant une approche globale de ceux adoptant une approche locale. Parmi les travaux se basant sur l’approche globale, nous avons présenté différents travaux en fonction de la méthode de résolution qu’ils utilisent. Il existe de nombreuses autres façons différentes de classer ces travaux :

- approches *continues* VS *discontinues* : pour certains travaux, la généralisation est vue comme une opérations continue (déformation). Pour d’autres travaux, la généralisation est un processus composé de plusieurs opérations discontinues. Nous reviendrons sur cette distinction en partie 2.2.2.1 page 95.

-
- approches itératives directes, ou par essais VS en une passe : dans des travaux, le processus de généralisation est composé d’une suite d’itérations successives. L’état généralisé est obtenu à la fin d’un processus de changement d’état progressif. Dans d’autres travaux, l’état généralisé est obtenu en une seule fois. Parmi les travaux basés sur une approche itérative, certains qui se basent sur le modèle de (Ruas et Plazanet, 1996) procèdent par essais successifs : les itérations ne sont validées que si elles permettent effectivement de progresser suffisamment vers un état meilleur.
 - approches stochastiques VS déterministes : parmi les travaux présentés, plusieurs voient le processus de généralisation comme un processus stochastique ou déterministe. La part de hasard dans l’évolution de l’état des données varie.
 - approches stochastiques VS basées sur des heuristiques : Pour d’autres travaux, l’exploration des états des données peut être soit complètement aléatoire (un état suivant est tiré au sort et validé s’il est meilleur), soit en partie guidé par des heuristiques (l’état suivant est choisi en fonction de certaines connaissances).
 - approches ouvertes VS opaques (ou *boîtes noires*) : plusieurs travaux visent à produire des méthodes de généralisation opaques, qui ne permettent pas d’observer et de comprendre le processus de généralisation alors que d’autres peuvent permettre aux cartographes de maîtriser en grande partie le processus de généralisation.
 - approches s’appuyant sur des méthodes de résolution particulières : comme nous l’avons vu, de nombreuses méthodes de résolution sont utilisées (exploration par escalade, par recuit simulé etc.).
 - et enfin approches globales VS locales : comme présenté précédemment, plusieurs travaux considèrent la généralisation comme un processus global (toutes les données sont considérées, d’un seul tenant) ou bien comme un processus local (des parties des données sont considérées les unes après les autres). Nous pouvons constater que cette dichotomie global/local peut non seulement concerner le niveau d’évaluation de la généralisation, mais aussi le niveau d’action du processus : le processus peut permettre d’agir au niveau global (toutes les données sont transformées, d’un seul tenant, comme par exemple lors de la généralisation par moindre carrés) ou bien au niveau local (certaines parties des données sont transformées).

Chacun des travaux présentés précédemment adopte certaines de ces approches qui sont duales. Nous pouvons cependant constater des corrélations entre certaines approches. Par exemple, les approches globales sont le plus souvent continues, en une seule passe, opaques et déterministes.

Critique des approches globales Les méthodes de l’approche globale permettent d’obtenir de très bons résultats pour de nombreux cas. Elles permettent d’obtenir des opérations de déformation globale de la carte qui conviennent principalement aux faibles changements d’échelle. Elles comportent cependant des limites sérieuses et difficiles à dépasser. Elles ne permettent pas toutes d’intégrer des opérations de suppression pourtant essentielles au processus de généralisation, en particulier lors de grands changements d’échelle. De plus, dans les approches globales, la carte dans son ensemble est prise en considération pendant le processus de généralisation. Ce point de vue permet de prendre en compte l’aspect *holistique* de la généralisation, à savoir qu’il ne faut pas généraliser les objets indépendamment les uns des autres. Cependant, ce point de vue peut être considéré comme extrême, puisque chaque objet n’est pas toujours généralisé en fonction de la totalité de la carte. Son contexte à prendre en compte pour le généraliser peut parfois être plus restreint. Les objets qui lui

sont proches auront certainement une plus grande influence sur sa façon d'être généralisée que ceux plus éloignés. Ce phénomène est illustré par la loi de Tobler citée par (Mackaness et Chaudhry, 2005) :

« everything is related to everything else, but near things are more related than distant ones ».

Les méthodes locales, en particulier celles à base d'agents de (Ruas et Duchêne, 2007) qui permettent de s'appuyer sur différents niveaux d'analyse utiles au processus de généralisation nous semblent les plus pertinentes.

Critique de la modélisation des contraintes Tous les travaux précédents utilisent la notion de contrainte. Ces contraintes sont traduites de différentes façons. Dans certains travaux, la façon de traduire les contraintes est fortement conditionnée par la méthode de résolution utilisée. Plusieurs types de contraintes semblent également difficiles voire impossibles à prendre en compte. En conséquence, des contraintes proposées dans des travaux de l'approche globale n'ont pas un sens géographique. Conformément à (Beard, 1991), nous pensons que la spécification des contraintes de généralisation doit rester la plus compréhensible et la plus facile possible afin de permettre des éventails de spécialisation des modèles les plus grands possibles. Ce n'est pas à l'utilisateur d'un système d'adapter ses besoins (formulés sous forme de contraintes pour notre cas) mais au contraire au système de s'adapter aux besoins de l'utilisateur.

Dans cette partie, nous avons présenté un état de l'art en automatisation de la généralisation. Nous avons donné différents travaux adoptant des approches différentes. Nous présentons maintenant en détail les travaux à base d'agents sur lesquels se base ce travail de thèse.

1.3 Généralisation et systèmes multi-agents

Nous avons précédemment présenté divers travaux visant à automatiser le processus de généralisation. Nous présentons dans cette partie plus en détail les travaux basés sur l'utilisation de systèmes multi-agents. Nous présentons d'une part les systèmes multi-agents et certaines applications, en particulier en généralisation automatique. Nous insistons particulièrement sur le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) sur lequel se base ce travail de thèse.

1.3.1 Agents et systèmes multi-agents

1.3.1.1 Définitions

Dans le langage courant, un agent désigne une personne ou une chose qui exerce une action. *Agent* vient du latin *agere* qui signifie « agir ». Dans le domaine de l'intelligence artificielle, un agent désigne une entité particulière. Nous donnons ici la définition proposée par (Ferber, 1997, p.13) :

« On appelle agent une entité physique ou virtuelle

1. qui est capable d'agir dans un environnement,
2. qui peut communiquer directement avec les autres agents,
3. qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),
4. qui possède des ressources propres,
5. qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,
6. qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),
7. qui possède des compétences et offre des services,
8. qui veut éventuellement se reproduire,
9. dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit ».

Nous donnons également une définition plus succincte issue de (Chaib-Draa *et al.*, 2001) :

« Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multi-agent, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents ».

Il existe de nombreuses autres définitions d'un agent comme celles données par (Weiss, 1999, p.29) et (Russell et Norvig, 2006, chap.I-2, p.37). Un agent peut également être défini comme un objet amélioré qui possède des capacités de communication, de perception, et surtout d'autonomie. Un agent peut être vu comme un objet *vivant* qui décide lui-même de s'appliquer des méthodes particulières en fonction de son but et de son environnement. Cette distribution du pouvoir de décision permet de donner à l'ensemble des agents un

comportement particulier. Cet ensemble, appelé système multi-agent, est défini par (Ferber, 1997, p.15) comme suit :

« On appelle système multi-agent (ou SMA), un système composé des éléments suivants :

1. un environnement E, c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.
2. un ensemble d'objets O. Ces objets sont situés, c'est-à-dire que, pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E. Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
3. un ensemble A d'agents, qui sont des objets particuliers (A inclus dans O), lesquels représentent les entités actives du système.
4. un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
5. Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers ».

On peut compléter la définition précédente par les conditions nécessaires suivantes (Ferber, 1997, p.63) :

Pour qu'un système puisse être considéré comme un système multi-agent, il faut :

1. qu'il dispose d'agents autonomes fonctionnant en parallèle et cherchant à satisfaire un but ou une fonction de satisfaction (ce que nous appellerons des tendances),
2. que ces agents possèdent un mécanisme d'interaction de haut niveau indépendant du problème à résoudre (protocoles de communication ou mécanismes d'interaction avec l'environnement).

Lorsque les agents évoluent de façon autonome et interagissent, le système dans son ensemble peut avoir des comportements globaux complexes. Le fonctionnement d'un système multi-agent repose sur le principe selon lequel la capacité du système est supérieure à la somme des capacités de ses composants. Le gain en capacité du système réside dans les effets des interactions entre les agents composant le système. Un concepteur de système multi-agent tente souvent de donner au système un comportement global complexe à partir de comportements parfois très simples de ses composants (Chevrier et Saint-Dizier, 2005). Certaines manifestations de ce comportement global du système peuvent prendre la forme de phénomènes structurés identifiables, appelés *phénomènes émergents*.

Nous présentons maintenant un exemple de système multi-agent illustrant le phénomène d'émergence.

1.3.1.2 Exemple : simulation d'une colonie de fourmis

Nous présentons ici une simulation à base d'agents d'une colonie de fourmis (Wilensky, 1998). Ce modèle simule la tâche de recherche de nourriture et illustre le fait que malgré des capacités d'action et de perception simples, les fourmis peuvent effectuer des tâches complexes grâce à des capacités d'interaction simples et adéquates.

Dans ce modèle, chaque fourmi a la capacité de se déplacer de façon aléatoire aux alentours de la fourmilière. Dès qu'elle trouve une source de nourriture, elle en rapporte à la fourmilière en déposant une substance chimique (de l'acide formique) sur son chemin de retour. Chaque fourmi est capable de détecter la présence de cette substance chimique et, dans ce cas, de suivre la trace chimique pour se rendre soit à la source de nourriture, soit à la fourmilière (si elle porte déjà de la nourriture).

La figure 1.30 présente quelques images extraites d'une simulation d'une colonie de fourmis à la recherche de nourriture. Cette simulation permet de reproduire et ainsi comprendre des mécanismes ayant lieu au sein de colonies de fourmis réelles.

- *figure 1* : les fourmis sont dans la fourmilière (en violet). Autour de la fourmilière se trouvent 3 sources de nourriture (en bleu).
- *figure 2* : chaque fourmi explore les alentours de la fourmilière de façon aléatoire jusqu'à trouver une source de nourriture.
- *figure 3* : des fourmis ont trouvé deux sources de nourriture. D'autres fourmis commencent à suivre la trace de substance chimique laissée au sol (affichée en blanc). Une structure de file se forme. La source de nourriture au nord a été trouvée par deux autres fourmis mais leur trace n'est pas perçue par suffisamment de fourmis pour rester visible. La majorité des fourmis est attirée par les deux autres traces plus visibles qui correspondent aux deux sources de nourriture les plus proches.
- *figure 4* : La quasi totalité des fourmis forme deux files entre les deux sources de nourriture et la fourmilière. Elles effectuent des allers-retours pour rapporter la nourriture à la fourmilière en suivant les deux traces de substance chimique. La source de nourriture à droite est épuisée : quelques fourmis continuent à effectuer des allers-retours puisque la substance chimique est encore présente. Ne trouvant plus de nourriture, ces fourmis ne déposent plus de substance chimique sur cette trace qui, par conséquent, disparaît progressivement par évaporation.
- *figure 5* : Les deux sources de nourriture du bas ont été épuisées. Les fourmis s'occupent alors de la source de nourriture du haut de la même façon.
- *figure 6* : Toutes les sources de nourriture ont été épuisées et les traces chimiques se sont évaporées. Les fourmis reprennent leur recherche de nourriture autour de la fourmilière.

Cette simulation illustre la capacité d'un système composé d'agents simples à réaliser des tâches complexes. Les capacités de chaque fourmi sont particulièrement simples. Aucune d'elle n'a de capacité pour calculer ni mémoriser un plus court chemin. Elles ne possèdent pas de langage évolué leur permettant d'échanger des informations sur la localisation d'une source de nourriture et le chemin pour s'y rendre. Aussi, toutes les fourmis ont des rôles identiques (aucune d'elle n'est spécialisée dans une tâche particulière), et chacune a des performances très faibles sans les autres. Malgré ces faibles capacités, les fourmis parviennent à s'organiser pour ramener de la nourriture. Les aller-retours à la source de nourriture la

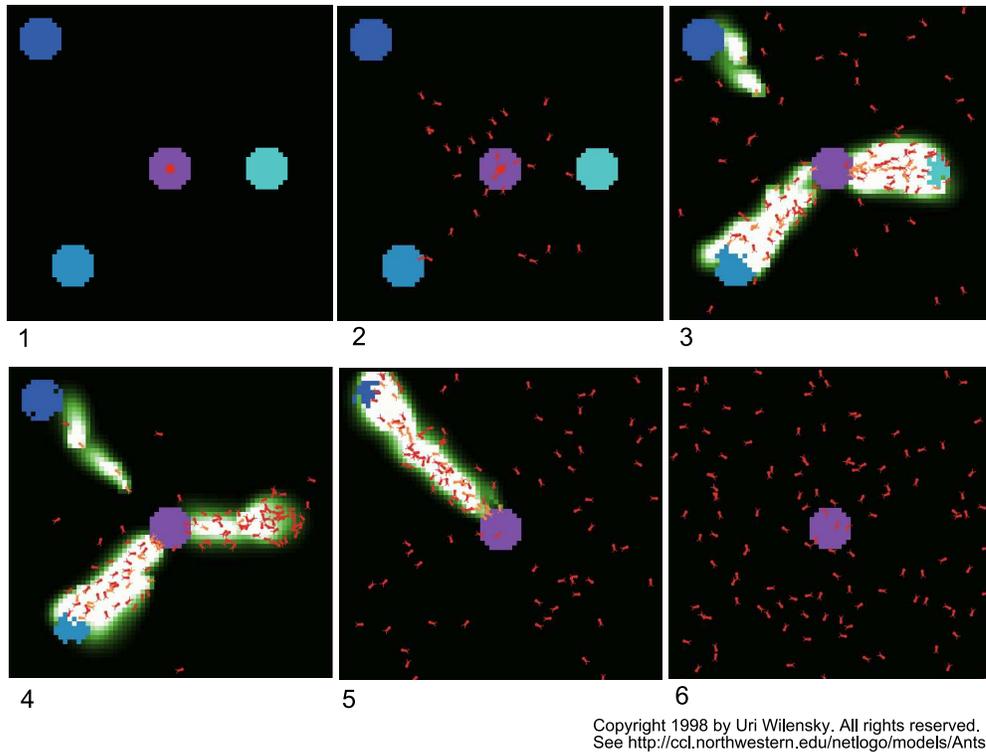


FIGURE 1.30 – Exemple de simulation multi-agent : une colonie de fourmi (d’après (Wilensky, 1998))

plus proche sont favorisés, et elles empruntent le chemin le plus court entre la source de nourriture et la fourmilière. Ces tâches semblent effectuées tout naturellement, sans recours à une entité supérieure qui coordonne les actions des fourmis ou planifie leur trajectoire. Pourtant, la complexité constatée peut laisser penser le contraire.

Cet exemple permet d’illustrer comment l’approche agent peut être utilisée pour simuler un système réel. L’approche agent est également utilisée pour la résolution de certains problèmes (Ferber et Drogoul, 1992), en particulier certains problèmes spatialisés comme la généralisation (Ferrand, 1998). Ces problèmes sont caractérisés par le fait que leur formalisation et leur résolution n’ont pas lieu au même niveau. Pour résoudre un problème formalisé au niveau d’un ensemble d’objets (par exemple, une base de données géographique), il peut être plus facile de le résoudre au niveau de ses composants (par exemple, les objets géographiques) en modélisant ces composants sous forme d’agents dont les interactions permettent la résolution du problème.

Cette approche est aussi appliquée à la modélisation de nombreux phénomènes complexes, en particulier de phénomènes spatiaux. De nombreux phénomènes géographiques concernant la relation entre des objets et l’espace, l’approche agent est de plus en plus utilisée en géographie (Treuil *et al.*, 2001) car elle permet de modéliser directement un système à partir des entités géographiques le composant. Nous présentons plusieurs de ces travaux de modélisation.

1.3.2 Systèmes multi-agent et information géographique

1.3.2.1 Systèmes multi-agent et géographie

De nombreux travaux de géographie utilisent les principes de l'approche agent. Nous pouvons par exemple citer des travaux de simulation de trafic routier (Chabrol et Sarramia, 2001; El Adouaj *et al.*, 2000), de simulation urbaine (Vanbergue et Drogoul, 2002; Hammam *et al.*, 2005), de simulation de comportement de piétons (Torrens, 2005), de dynamique de population (Holmes *et al.*, 2002), de prévision de feux de forêt (Sahli et Moulin, 2003; Maillé et Espinasse, 2007). Beaucoup de simulations utilisent des modélisations sous forme d'automates cellulaires (Langlois et Phipps, 1997; Li et Gar-On Yeh, 2000; Ellerkamp, 2001; Chen *et al.*, 2002). Des travaux visent à permettre un rapprochement étroit entre systèmes multi-agent et systèmes d'information géographique (Benenson et Torrens, 2003; Agarwal et Abrahart, 2003; Benenson et Torrens, 2005).

Nous présentons maintenant l'application de l'approche agent en généralisation.

1.3.2.2 Systèmes multi-agent et généralisation automatique

La capacité d'un agent à évoluer pour répondre à un but en fonction de la perception de son contexte et en particulier des organisations auxquelles il appartient est très proches des préoccupations de la généralisation comme présenté dans (Barrault *et al.*, 2001). La modélisation agent nous semble particulièrement adaptée au processus de généralisation. Un système multi-agents a aussi le grand avantage d'être ouvert – il est possible de modifier, ajouter des comportements, des actions, des capacités de perception aux agents, ou bien des agents ayant un nouveau rôle - et observable – l'évolution d'un système multi-agents est progressive, tout comme le processus de généralisation, et peut donc être étudiée et contrôlée pour être améliorée.

L'utilisation de l'approche agent en généralisation est suggérée dans (Langran, 1991) et (McMaster et Shea, 1992, p.118), sous forme de modèles parallèles.

« Cartographic generalization appears especially suited to parallel software models, since the holistic, highly visual manual process is difficult to replicate by standard (i.e. sequential) programming methods ». (Langran, 1991, p.205).

Nous présentons maintenant des travaux de généralisation automatique utilisant des modélisations à base d'agents. Le modèle agent de (Ruas et Duchêne, 2007) est présenté plus en détail après.

(Baeijs *et al.*, 1995), (Baeijs, 1998, chap. 10) proposent le modèle agent SIGMA dédié à la généralisation cartographique. Dans ce modèle, les agents sont les points composant les géométries des objets. Chaque agent A perçoit d'autres agents à travers cinq types de champs :

- le champ d'*objet géographique* : ce sont tous les agents appartenant au même objet que A,
- le champ de *classe* : ce sont tous les agents composant des objets appartenant à la même classe que celle de l'objet auquel A appartient,
- le champ de *perception* : ce sont tous les agents situés à une distance inférieure à un certain seuil de A,

- le champ de *proximité* : ce champ est défini comme le champ de perception mais avec une autre valeur du seuil (à priori plus petite),
- et le champ de *groupe* : ce sont les agents appartenant à un même groupe que l'agent A. Ces groupes sont créés manuellement par l'utilisateur du système en fonction de besoins particuliers.

En fonction de ce qu'il perçoit, un point subit des forces. Quatre types de forces sont définies :

- des forces de *répulsion* : lorsque deux points sont trop proches, ils se repoussent,
- force de *suivi proportionnel* : lorsque le point d'un objet est déplacé, ce déplacement peut être diffusé aux autres points appartenant au même objet à travers cette force. Cette force diminue proportionnellement à la distance au point déplacé,
- force de *suivi intégral* : lorsqu'un point d'un objet est déplacé, ce déplacement peut être affecté à tous les points de l'objet (dans le but de le déplacer tout entier),
- force de *symbolisation* : c'est une force qui traduit le changement de symbolisation au niveau d'une classe.

Chaque point cherche à atteindre une position d'équilibre entre ses forces en se déplaçant. Tous les agents se déplacent progressivement. Ce modèle permet de déclencher de faibles déformations d'objets. Mentionnons que ce système a été conçu comme un système de généralisation semi-automatique. Quelques actions spécifiques sont à effectuer par l'utilisateur comme la formation de groupes.

(Jabeur *et al.*, 2003; Jabeur, 2006) présente un modèle de généralisation basé sur la compétition entre agents. Les agents sont des objets géographiques (par exemple, les bâtiments). La généralisation est vue comme un processus de compétition entre les objets de la carte qui luttent les uns contre les autres pour obtenir une place suffisante. Le but de chaque agent est d'avoir suffisamment de place pour s'afficher sans superposition avec un autre agent. Les buts des agents étant opposés (il n'y a pas de place pour tous), les agents forment des coalitions pour forcer l'élimination d'autres, ou bien pour s'agréger.

Enfin, nous pouvons également mentionner l'existence de travaux en mode raster visant à utiliser des automates cellulaires. Par exemple, (Li *et al.*, 2001) proposent une méthode de généralisation de l'occupation du sol. Cette méthode est comparable à une opération de lissage : chaque cellule change d'état pour acquérir l'état moyen de ses cellules voisines.

Nous présentons maintenant le modèle (Ruas et Duchêne, 2007).

1.3.3 Le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007)

Ce modèle s'appuie sur le travail de thèse de (Ruas, 1999a) progressivement enrichi par divers travaux parmi lesquels ceux du projet AGENT (Lamy *et al.*, 1999b; Barrault *et al.*, 2001; Projet AGENT, 2001) et le modèle de (Duchêne, 2004). Ces travaux ont permis la mise au point d'un modèle de généralisation à base d'agents de plus en plus performants et utilisé de nos jours à l'Institut Géographique National français pour la production de plusieurs séries de cartes. Nous présentons dans cette partie les principes de ce modèle.

1.3.3.1 Les principes

Le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) repose sur les trois principes suivants :

1. **Les contraintes sont explicites.** Les spécifications de la carte finale sont traduites sous forme de contraintes explicitées. Par exemple, si les bâtiments de la carte finale doivent être suffisamment gros, alors ils porteront chacun une contrainte sur leur taille. Chaque contrainte est explicitée sous forme d'objet (conformément à (Beard, 1991)) et permet de traduire l'état final des données cherché. Elle est utilisée pendant le processus pour guider le choix des algorithmes en déterminant quel traitement appliquer pour la satisfaire, et contrôler l'évolution de la généralisation, c'est-à-dire savoir si un traitement a effectivement permis d'améliorer la satisfaction de cette contrainte.
2. **Les objets géographiques sont des agents.** Ces agents ont pour but leur propre généralisation, c'est-à-dire de satisfaire au mieux toutes leurs contraintes. Pour cela, chaque agent possède des capacités lui permettant d'analyser son état (c'est-à-dire celui de ses contraintes), puis, de s'appliquer des algorithmes de généralisation adéquats pour améliorer l'état de ses contraintes insatisfaites. Chaque agent choisit donc lui-même sa propre généralisation en fonction de son état et de son but.
3. **Trois niveaux d'analyse (micro, meso et macro) sont utilisés.** Pendant le processus de généralisation, il est nécessaire de considérer non seulement la généralisation des objets pris individuellement, mais aussi celle des groupes d'objets. La généralisation a lieu à plusieurs niveaux, au niveau individuel et au niveau collectif. Le niveau individuel est appelé *niveau micro*, le niveau collectif, *niveau meso*. Le *niveau macro* désigne le niveau des populations d'objets et sert à préserver des proportions de types d'objets. Les objets du *niveau meso* sont des groupes d'autres objets. Ils sont aussi considérés comme des agents géographiques : ils ont pour rôle de gérer les contraintes relatives aux groupes (comme par exemple, la conservation de la densité d'un îlot ou d'un alignement de bâtiments). Les agents meso sont composés d'autres agents (meso ou micro). L'ensemble des agents géographiques peut ainsi être hiérarchisé sous la forme d'une ou plusieurs structures en arbre. Par exemple, pour la généralisation de l'espace urbain, une description hiérarchique de l'espace est utilisée. Des agents meso *ville*, sont composés d'autres agents meso *îlots*, eux-mêmes composés d'agents micro *bâtiments*. Chaque agent meso a un rôle de contrôle de ses composants. Le modèle de (Duchêne, 2004) permet en plus de conférer aux agents micro des capacités de communication deux à deux qui leur permettent de se généraliser sans être contrôlés par un agent meso. Cette communication permet aux agents micro de satisfaire des contraintes portant sur des relations entre eux (comme par exemple une contrainte de proximité).

Les agents du système effectuent ainsi leur propre généralisation en s'appliquant des algorithmes afin de satisfaire progressivement leurs contraintes. Nous détaillons maintenant chacun de ces principes.

1.3.3.2 Les contraintes

Une contrainte porte sur un caractère d'un agent. Elle est définie par (Ruas, 1999a, Glossaire) comme « une propriété imposée à un caractère ». Elle traduit l'état que doit

avoir ce caractère pour être conforme aux spécifications finales de la carte. Nous distinguons les contraintes *de généralisation*, qui incitent les agents à changer un caractère, des contraintes *de maintien*, qui incitent au contraire à préserver un caractère. Par exemple pour un bâtiment, les deux contraintes suivantes sont utilisables :

$$Taille(bâtiment) \geq 300m^2$$

$$|Forme(bâtiment - initial) - Forme(bâtiment - généralisé)| \leq \varepsilon$$

La première contrainte incite le bâtiment à changer (par exemple, en grossissant), alors que la deuxième l'incite à garder une forme similaire à sa forme initiale.

Les contraintes sont utilisées durant le processus de généralisation pour :

- contrôler l'évolution du processus : un pas du processus est validé lorsqu'il permet d'améliorer la satisfaction d'une ou plusieurs contraintes sans trop dégrader les autres. La généralisation est effectuée lorsque toutes les contraintes sont satisfaites,
- guider l'évolution du processus : les algorithmes sont appliqués en fonction des contraintes non satisfaites. Pour chaque contrainte, des algorithmes appropriés sont proposés en fonction de son état de violation. Par exemple, pour satisfaire une contrainte de taille, l'algorithme de dilatation est proposé.

A chaque agent sont attachées les contraintes auxquelles il est soumis (cf. figure 1.31). Chaque contrainte est caractérisée par :

- sa **valeur courante** : c'est la valeur au cours de la généralisation du caractère contraint. Elle est calculée grâce à une mesure appropriée qui peut être plus ou moins complexe et dont la valeur n'est pas forcément qu'un simple entier. Par exemple, dans le cas d'une contrainte de taille de bâtiment, il s'agit de l'aire initiale du bâtiment,
- sa **valeur initiale** : c'est la valeur initiale du caractère contraint, calculée comme la valeur courante,
- sa **valeur but** : c'est la valeur visée du caractère,
- sa **satisfaction** : la satisfaction de la contrainte traduit l'état de violation de la contrainte. C'est une interprétation qualitative de l'écart entre la valeur courante et la valeur but. Elle a pour valeur un entier entre 0 et 10 (0=contrainte pas du tout satisfaite ; 10=contrainte parfaitement satisfaite). Dans (Ruas et Duchêne, 2007), le terme *sévérité* est utilisé et traduit la grandeur inverse. Le terme *gravité* est également utilisé dans (Ruas, 1999b),
- son **importance** : cette valeur traduit l'importance relative de cette contrainte à être satisfaite par rapport à d'autres,
- sa **priorité** : la priorité traduit l'urgence de traitement d'une contrainte. Il existe des cas pour lesquels le traitement des contraintes dans un certain ordre de priorité permet d'améliorer le processus. Traiter d'abord les contraintes les plus importantes n'est pas forcément la meilleure stratégie. Par exemple, il est plus judicieux de satisfaire une contrainte de densité avant une contrainte de proximité, même si celle-ci est moins importante.

Les contraintes ont par ailleurs les méthodes suivantes (cf. figure 1.31) :

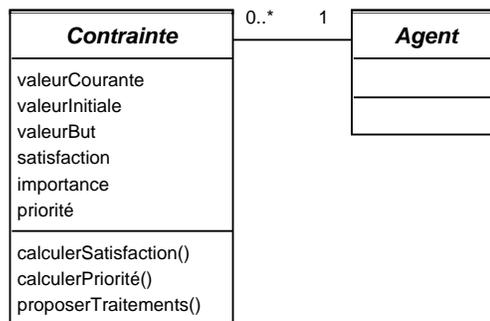


FIGURE 1.31 – La classe contrainte

- **calculer satisfaction** et **calculer priorité** : ces méthodes permettent de mettre à jour les valeur de satisfaction et de priorité de la contrainte. Ces valeurs varient tout au long du processus.
- **proposer traitements** : cette méthode permet d’obtenir une liste pondérée d’algorithmes appropriés pour tenter d’améliorer la satisfaction de la contrainte. Par exemple, la contrainte de taille peut proposer l’algorithme de *dilatation*. Cette méthode est utilisée par l’agent afin de guider ses choix d’action en fonction du type et de l’état de ses contraintes. La liste des algorithmes ainsi que leur poids dépend de la satisfaction de la contrainte. Une contrainte peut également déconseiller des algorithmes particuliers. Notons par ailleurs que cette méthode n’est pas définie pour certaines contraintes (en particulier des contraintes de maintien), qui ne proposent aucun traitement mais dont la satisfaction doit être prise en compte pour rejeter certaines solutions.

Les méthodes *proposer traitements* et *calculer priorité* nécessitent l’utilisation de connaissances de généralisation que nous appellerons *connaissances procédurales*. Ces règles permettent de fournir les traitements possibles ainsi que la valeur de priorité d’une contrainte en fonction de l’état de l’agent. Ces règles sont incluses dans le système par le concepteur des contraintes en fonction de ses connaissances cartographiques et des algorithmes concernés. Ces règles sont de la forme :

SI la satisfaction de la contrainte *Taille* est *faible*, ALORS proposer comme traitements l’algorithme *dilatation*, avec un paramètre (coefficient=aireBut/aireCourante) et un poids 0.8, puis l’algorithme *algoMagiqueX*, avec un paramètre (paramètreMagique=3.1415) et un poids 0.1.

Les figures 1.32 et 1.33 présentent des exemples de contraintes sur un agent micro (un bâtiment) et un agent meso (un îlot composé d’agents-bâtiment). Plusieurs de ces contraintes sont des contraintes de généralisation (comme par exemple la contrainte d’équarrité d’un bâtiment) et d’autres des contraintes de maintien (comme la contrainte de densité d’un îlot). La contrainte de l’agent meso îlot *contrainte de satisfaction des agents composant* est une contrainte meso particulière sur laquelle nous reviendrons partie 1.3.3.4 page 70. Ces contraintes ainsi que leur valeur but sont définies sur les objets en fonction des spécifications souhaitées des données finales.

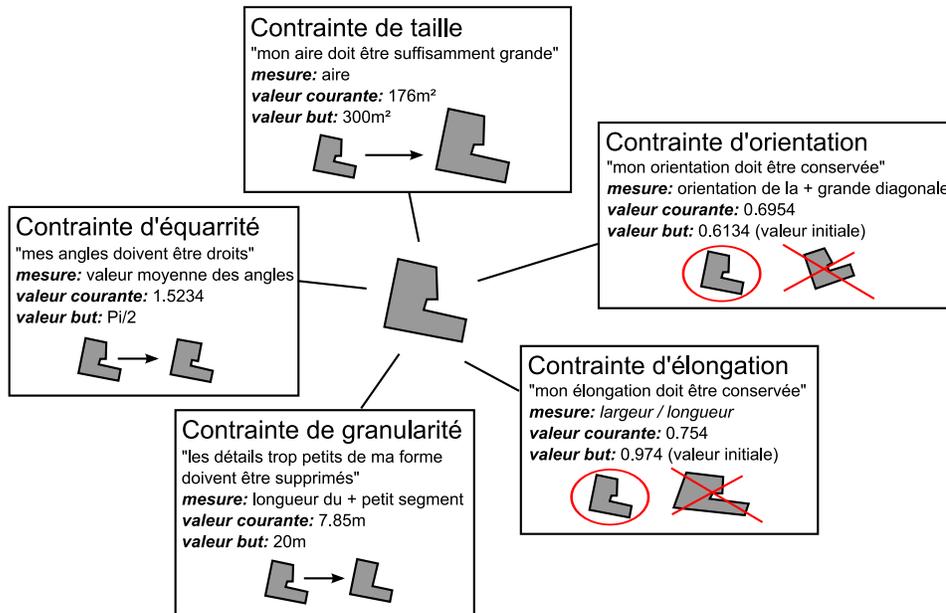


FIGURE 1.32 – Exemples de contraintes sur un agent micro bâtiment

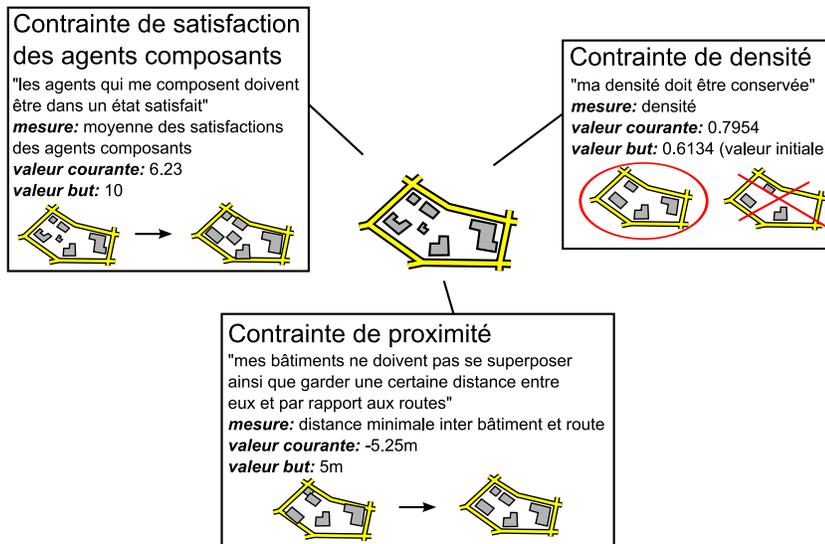


FIGURE 1.33 – Exemples de contraintes sur un agent meso îlot

Nous avons présenté la modélisation des contraintes du modèle (Ruas et Duchêne, 2007). Chaque agent est attaché à un ensemble de contraintes traduisant son état cherché. Nous présentons maintenant comment l'agent tente de satisfaire ses contraintes.

1.3.3.3 Les agents géographiques

Chaque agent effectue sa propre généralisation en suivant le cycle de vie présenté figure 1.34.

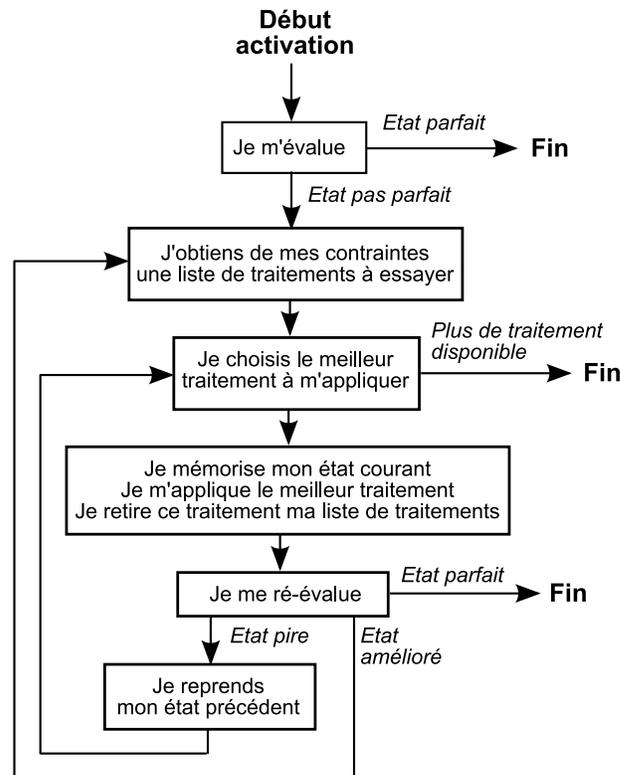


FIGURE 1.34 – Cycle de vie d'un agent géographique d'après (Ruas, 1999a)

La classe *agent* est présentée figure 1.35. Les méthodes d'un agent sont les suivantes :

- **calculer satisfaction** : cette méthode permet à l'agent d'évaluer son état de généralisation. Cet état est traduit sous la forme d'une valeur de satisfaction, qui est le résultat d'une agrégation des valeurs de satisfaction de ses contraintes (pas nécessairement la moyenne). Cette valeur est un entier compris entre 0 (état pas du tout satisfait) et 10 (état parfaitement satisfait).
- **calculer traitements** : cette méthode permet à l'agent de récupérer les traitements proposés par ses contraintes (qu'il stocke dans une liste). Elle consiste à appeler la méthode *proposer traitement* de chacune des contraintes de l'agent. Plusieurs contraintes peuvent proposer le même plan avec des poids différents.
- **choisir meilleur traitement** : cette méthode permet à l'agent de choisir le traitement *a priori* le meilleur à s'appliquer pour améliorer sa satisfaction. Ce choix est effectué à partir des priorités des contraintes, des poids des traitements proposés, ainsi que des valeurs de satisfaction des contraintes.

- **calculer évolution** : l’agent réévalue son état après s’être appliqué un traitement. Cet état est adopté uniquement s’il a une satisfaction meilleure que la satisfaction de l’état précédent.

Durant ce cycle de vie, l’agent s’applique des traitements lui permettant en principe d’améliorer son état de généralisation. Il s’applique donc un processus de généralisation propre, composé d’une suite de traitements adaptés à son état. Conformément au modèle de (Ruas et Plazanet, 1996), l’agent contrôle le résultat de chaque traitement après l’avoir déclenché et peut éventuellement l’annuler. Ce contrôle permet d’assurer une progression de la satisfaction de l’agent.

Deux issues sont possibles pour ce cycle de vie. Une première issue est celle où l’agent parvient à atteindre un état parfait grâce aux traitements proposés par ses contraintes. Dans ce cas, le système a permis une généralisation « parfaite » de l’agent. Une deuxième issue est celle où l’agent a essayé tous les traitements proposés par ses contraintes et n’est pas parvenu à atteindre un état parfait. Dans ce cas, le système n’aura pas permis de généraliser parfaitement l’agent. Cette limite peut être dépassée par l’ajout d’un nouvel algorithme ou un changement des connaissances procédurales.

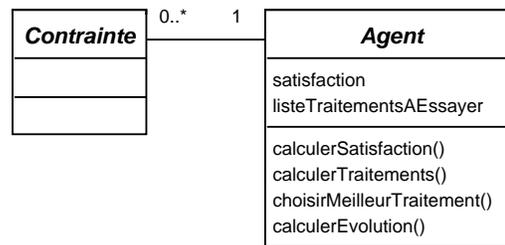


FIGURE 1.35 – La classe agent

Pendant le projet AGENT, le cycle de vie d’un agent a été perfectionné. La limite du cycle de vie présenté figure 1.34 provient du fait qu’un agent abandonne la liste de traitements qu’il était en train d’essayer dès qu’un traitement lui a permis de faire progresser sa satisfaction. Dans certains cas où l’agent n’a pas pu atteindre un état parfait, il peut être utile de retourner à un état précédent pour finir d’essayer ces listes de traitements proposés. Ces essais peuvent permettre d’obtenir un état meilleur que l’état obtenu, voire même un état parfait. Le cycle de vie présenté figure 1.36 améliore le cycle de vie précédent en donnant à chaque agent la possibilité de mémoriser non seulement son dernier état atteint, mais tous ses états précédents. Il peut ainsi, au cas où il atteint un état non parfait après avoir essayé tous ses traitements, retourner à des états précédents pour essayer de trouver un état meilleur. Les états successifs d’un agent forment un arbre. Chaque noeud est un état et a pour fils les états correspondants à l’application des traitements dans cet état. Cette technique d’exploration *en arbre* est un cas particulier de l’exploration locale en faisceau présentée dans (Russell et Norvig, 2006, chap. 4.3, p.131).

Nous avons présenté le cycle de vie d’un agent géographique du modèle (Ruas et Duchêne, 2007). Nous présentons maintenant comment les différents niveaux sont gérés.

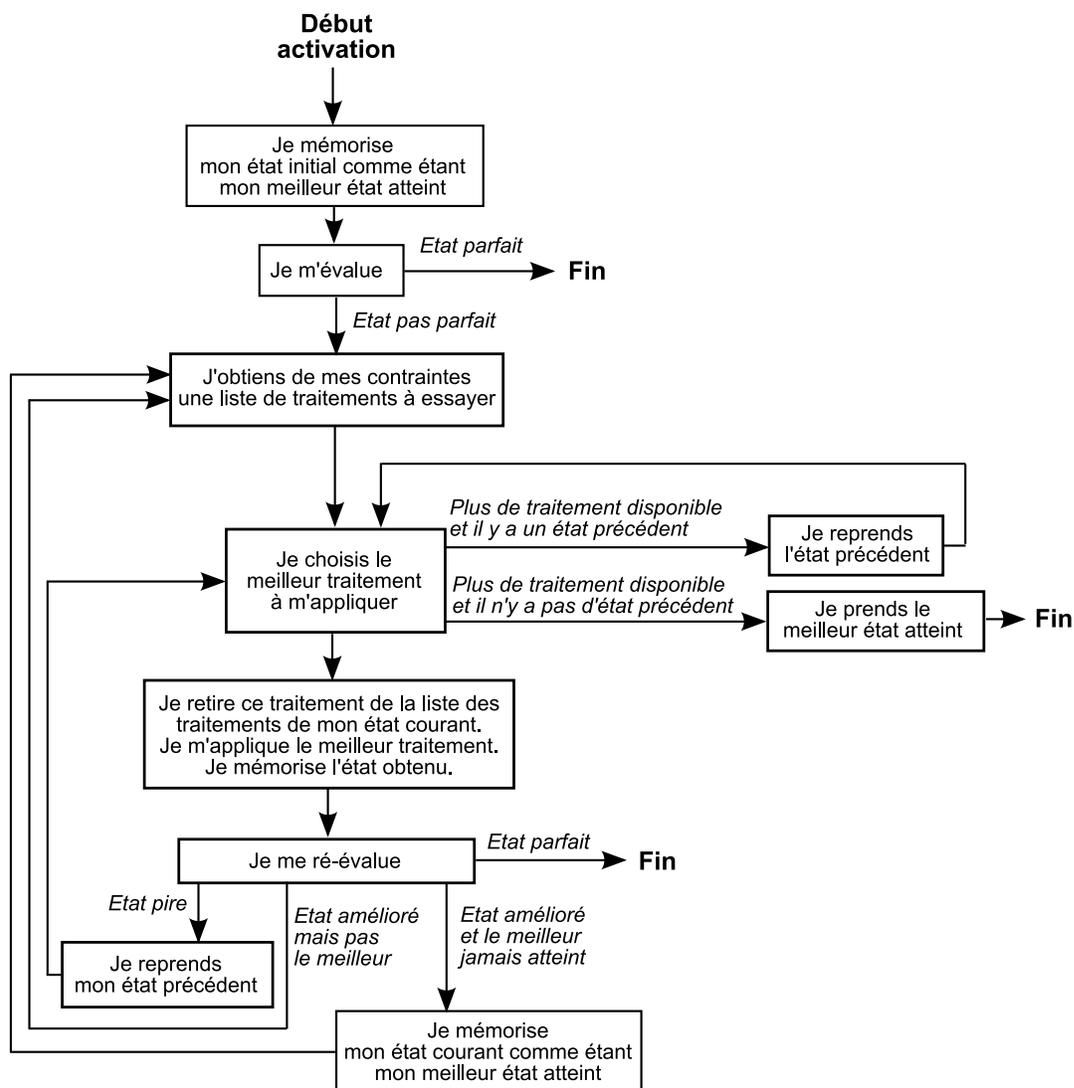


FIGURE 1.36 – Cycle de vie d'un agent géographique, avec exploration en arbre

1.3.3.4 Les niveaux micro, meso, macro

Certaines contraintes ainsi que certains algorithmes sont relatifs à des groupes. Le modèle (Ruas et Duchêne, 2007) permet de raisonner à différents niveaux : au niveau des groupes d'objets, des objets individuels et des populations d'objets. Ces niveaux sont respectivement appelés *micro*, *meso* et *macro*. Un agent meso est composé d'autres agents (micro ou meso) afin d'obtenir une structure en arbre permettant de décrire l'espace géographique et ses hiérarchies éventuelles. Par exemple, pour le cas du bâti en milieu urbain, différents groupes imbriqués permettent de décrire la structure du bâti pour sa généralisation (Ruas et Mackaness, 1997; Boffet, 2000; Gaffuri et Trevisan, 2004). La figure 1.37 donne un exemple d'une telle structure composée d'une ville, d'îlots, d'un alignement et de bâtiments.

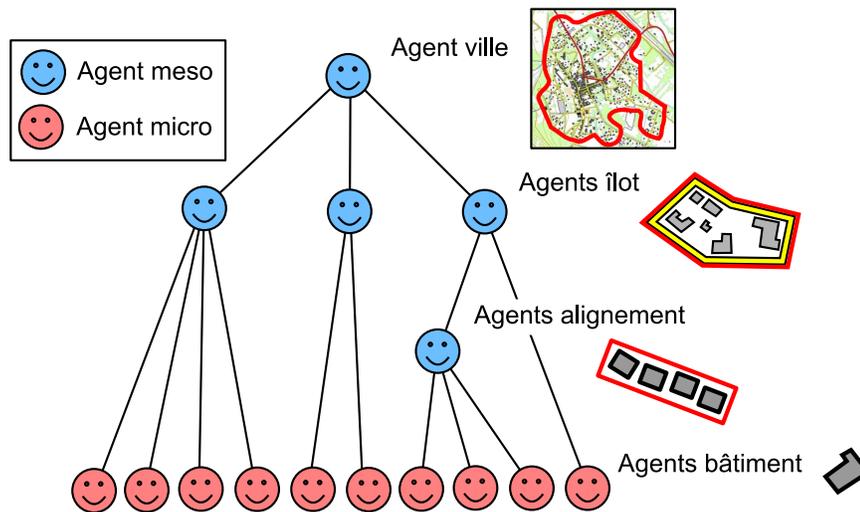


FIGURE 1.37 – Hiérarchie de l'espace urbain pour la généralisation

La figure 1.38 présente les classes d'agents du modèle. Un agent géographique est soit micro, soit meso. Un agent meso est composé de plusieurs agents, meso ou micro ou les deux. Ce modèle est spécialisé par héritage en fonction des classes d'agents meso et micro à inclure à un processus de généralisation (comme par exemple les types d'agents de la figure 1.37).

La contrainte de satisfaction des agents composants Les agents meso sont dotés d'une contrainte particulière appelé *contrainte de satisfaction des agents composants* que nous avons mentionnée lors de la présentation des contraintes d'un îlot (cf. figure 1.33, page 66). Cette contrainte permet à l'agent meso de connaître l'état de satisfaction des agents le composant. Un agent meso sera satisfait lorsque ses contraintes seront satisfaites, ainsi que celles de ses composants. Cette contrainte propose un unique traitement appelé *activation des composants*, qui consiste à activer les agents composant l'agent meso comme présenté en figure 1.39. Pendant ce cycle, l'agent meso choisit le meilleur de ses composants à activer, prépare son activation (en adaptant éventuellement des paramètres de leurs contraintes), l'active, et contrôle le résultat de son activation. Durant la phase d'activation (représentée par un rectangle rouge en figure 1.39), chaque agent composant effectue son propre cycle de vie.

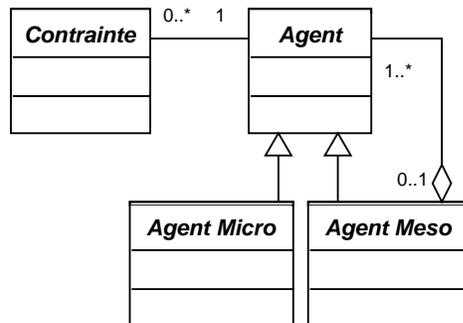


FIGURE 1.38 – Les agents meso

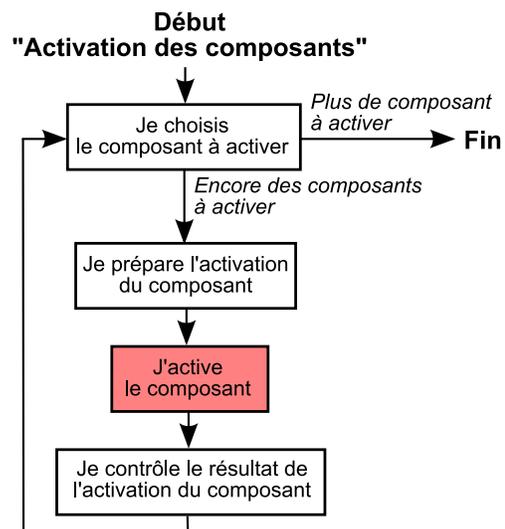


FIGURE 1.39 – Opération d'activation des composants d'un agent meso

L'agent meso a quatre rôles dans le processus de généralisation (Ruas, 1999b, chap.E-3, p.222), (Ruas, 2000) :

- un rôle d'ordonnateur : pendant sa généralisation propre, l'agent meso impose des transformations à ses composants (comme par exemple un agent meso îlot qui impose un déplacement ou une suppression à un des agents-bâtiment le composant).
- un rôle de législateur : l'agent meso adapte certaines valeurs but de contraintes de ses composants pour préserver ou mettre en valeur certaines relations. Par exemple, un agent meso îlot composé de trois petits bâtiments ayant des tailles ordonnées peut adapter la valeur but de la contrainte de taille de chaque bâtiment afin de préserver (ou accentuer) cet ordre.
- un rôle de coordinateur : l'agent meso détermine l'ordre d'activation de ses agents composants.
- un rôle de contrôleur : après la généralisation de chaque composant, l'agent meso vérifie l'impact de cette généralisation sur son état. Il effectue des traitements appropriés. Il peut en particulier invalider certaines généralisations de ses composants.

Activation en cascade Chaque agent meso est responsable de l'activation de ses composants via la contrainte de *satisfaction des agents composants*. Lors de l'activation de l'agent meso placé au sommet de la hiérarchie, celui-ci active ses composants qui, à leur tour, activent les leurs. Ainsi, tous les agents de l'arbre sont activés en cascade. Par exemple, pour le cas de la généralisation du bâti présenté en figure 1.37, l'agent meso ville active ses agents meso îlot composants, qui eux-même activent leurs alignements et leurs bâtiments. L'activation des agents est ainsi récursive, de haut en bas. Ce type de système multi-agent a été formalisé dans (Mezura *et al.*, 1999).

Décomposition d'agents micro Dans le cadre du projet AGENT, le comportement des agents micro a été enrichi d'une capacité leur permettant, pour des besoins particuliers, de se décomposer et de devenir un agent meso. Ce mécanisme est utile lorsque les agents du niveau micro ne sont pas suffisamment partitionnés pour être généralisés efficacement. Ainsi, un agent micro peut, en fonction de ses contraintes, invoquer un traitement de décomposition qui fait de lui un agent meso gérant ses parties. Ce mécanisme de décomposition a été rendu nécessaire pour la généralisation de tronçons routiers. Cette généralisation nécessite en effet, comme pour le modèle GALBE présenté figure 1.29 page 54, des opérations de décomposition des tronçons routiers.

Les objets du niveau macro Le rôle des contraintes macro est de préserver des proportions au niveau des populations d'objets. Par exemple, dans le cas de la généralisation du bâti, la répartition des bâtiments par type (résidentiel, commercial, industriel, etc.) doit être préservée. Les objets du niveau macro ne sont pas des agents. Ils ont, comme les agent meso, un rôle de législateur et de contrôleur (Ruas, 1999b, p.229). Le modèle sur lequel nous nous basons ne prend pas en compte ces objets.

1.3.3.5 Relations bilatérales micro et communication : le modèle CartACom (Duchêne, 2004)

Un modèle dédié aux espaces peu denses L'utilisation d'agents meso est adaptée lorsque le processus de généralisation doit gérer des groupes d'objets. Ce cas se présente lorsque la densité en objets à généraliser est trop élevée comme par exemple pour le bâti en

milieu urbain (cf. figure 1.37 page 70). Pour les zones de l'espace géographique peu denses ne nécessitant pas de traitements de généralisation sur des groupes d'objets, l'utilisation d'agents meso n'est pas optimale. La généralisation peut être modélisée comme un processus résultant d'interactions entre agents micro deux à deux. (Duchêne, 2004) propose le modèle CartACom qui permet de conférer aux agents micro la capacité de se généraliser sans avoir recours à un agent meso.

Relations et contraintes relationnelles Dans les espaces peu denses, les contraintes de généralisation portent non plus sur les groupes d'objets, mais sur des relations entre objets. Ces contraintes peuvent porter par exemple sur la distance entre deux objets proches (ils ne doivent ni se superposer ni être trop proches), sur la position relative de deux objets, etc. La figure 1.40 présente la modélisation de ces relations et de leurs contraintes. Deux agents partagent la même relation, mais ont chacun une contrainte qui porte sur cette relation. Par soucis d'interopérabilité, les méthodes et attributs de ces classes sont analogues à ceux de la figure 1.31 du modèle de (Ruas, 1999a).

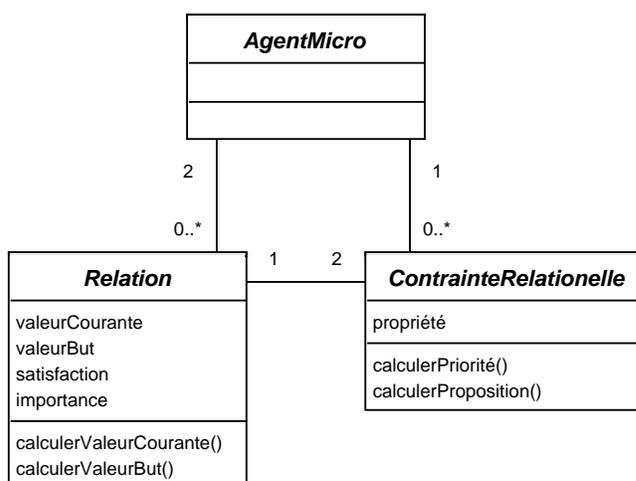


FIGURE 1.40 – Les classes du modèle CartACom

Satisfaction des contraintes relationnelles par communication Un agent micro effectue sa propre généralisation via le cycle de vie générique présenté figure 1.36. Pour satisfaire ses contraintes relationnelles, il est capable en plus de s'appliquer des transformations adéquates et, en cas d'échec, de demander aux agents avec lesquels il partage des contraintes relationnelles non satisfaites d'agir en conséquence. Par exemple, un objet qui ne parvient pas à trouver un déplacement adéquat lui permettant de satisfaire une contrainte relationnelle de proximité avec un autre objet voisin a la possibilité de demander à cet objet de se déplacer.

Le langage utilisé s'appuie sur la théorie des actes de langage. Le langage mis au point permet à un agent micro :

- de demander à un agent micro avec lequel il partage une relation de **faire quelque chose**. Celui-ci peut accepter ou refuser.
- d'informer un agent micro avec lequel il partage une relation qu'il a effectué une action.

La figure 1.41 présente le cycle de vie d'un agent micro. Le but d'un agent micro est de satisfaire non seulement ses contraintes micro mais aussi ses contraintes relationnelles. Après sa généralisation micro (représentée par un rectangle rouge), l'agent analyse ses messages reçus et tente d'effectuer des traitements pour répondre favorablement à ces messages. Il informe les agents à l'origine de ces messages des échecs ou réussites de ces traitements. Ensuite, il essaie de satisfaire ses contraintes relationnelles en effectuant des traitements adaptés. Parmi ces traitements, il peut être amené à demander une action à un autre agent. Dans ce cas, il attend une réponse.

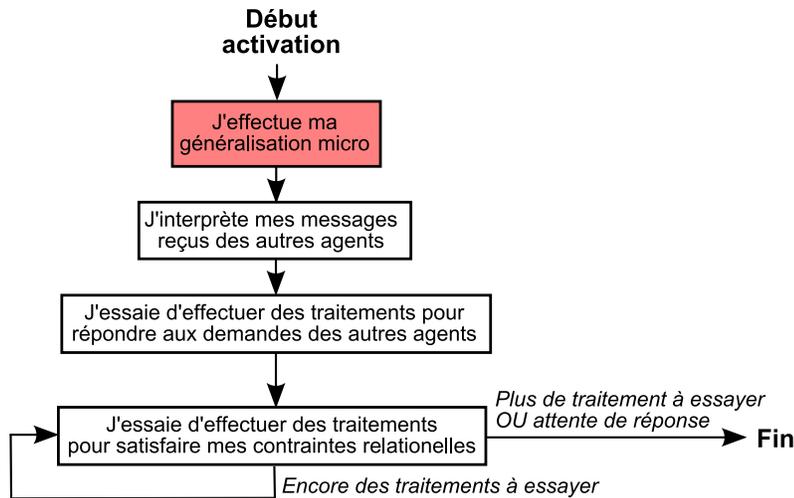


FIGURE 1.41 – Le cycle de vie d'un agent micro CartACom

Les agents sont activés suivant ce cycle les uns après les autres. Les agents les plus contraints ainsi que ceux ayant des messages à traiter sont activés en priorité. Les agents étant liés deux à deux de proche en proche par des relations contraintes, ils changent progressivement d'état pour satisfaire leurs propres contraintes relationnelles ainsi que celles de leur voisins.

Ce mécanisme d'activation est indépendant de celui basé sur l'utilisation d'agents meso. Il est adapté à la généralisation d'espaces peu denses. Des travaux en cours visent à permettre une utilisation conjointe des deux mécanismes d'activation au sein d'un unique processus.

1.3.3.6 Résultats

Le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) présenté précédemment a été mis en œuvre pour la généralisation du bâti et de tronçons routiers. Les principes de ce modèle ont été en partie utilisés lors du projet AGENT. Le résultat de ce projet a été un prototype de logiciel de généralisation automatique. Ce prototype a évolué et est aujourd'hui commercialisé par la société *Ispatial* sous le nom de *Clarity*TM. Ce logiciel est utilisé par plusieurs producteurs de données pour la production de plusieurs séries de cartes.

La figure 1.42 présente quelques résultats :

- Figure a. : un résultat de généralisation du bâti en zone urbaine (Lecordix *et al.*, 2007a).

- Figure b. : un résultat de généralisation du bâti en zone rurale (Duchêne, 2004).
- Figure c. : un résultat de généralisation du routier (Lecordix *et al.*, 2005a).



FIGURE 1.42 – Quelques résultats du modèle (Ruas et Duchêne, 2007)

Ce modèle a été conçu de façon à pouvoir être mis en œuvre pour un ensemble large de processus de généralisation, cartographiques ou non, à des niveaux de détail divers. Les classes d'*agent* et de *contrainte* sont génériques et peuvent être spécialisées en fonction d'un besoin particulier. Le modèle peut être adapté en concevant de nouvelles classes d'agents, de nouvelles contraintes, ou de nouveaux algorithmes.

1.4 Synthèse et objectifs

Nous avons présenté précédemment différents travaux visant à automatiser le processus de généralisation. Les différents modèles sont basés sur des approches différentes. Leur genericité est variable : certains peuvent être spécialisés pour de nombreux processus de généralisation, d'autres sont adaptés à des cas d'application bien particuliers. Dans le cadre de cette thèse, nous nous basons sur le modèle (Ruas et Duchêne, 2007). Notre objectif n'est pas de proposer un nouveau modèle, mais de le compléter.

Le modèle (Ruas et Duchêne, 2007) ainsi que la majorité de travaux de généralisation automatique ont été mis en œuvre pour la généralisation des objets bâti et routier, compte tenu de leur nombre et de leur importance sur les cartes et dans la plupart des applications

géographiques. Les autres thèmes et leur prise en compte dans le processus de généralisation ont souvent été laissés de côté pour simplifier un problème déjà compliqué. Par exemple, dans (Mustière, 2001, p.52) :

« Nous nous restreignons au traitement de chaque route prise isolément (...). Nous ne cherchons pas à résoudre les problèmes liés (...) à la représentation des routes conjointement à d'autres thèmes (l'hydrographie, l'orographie, l'occupation du sol...) ».

Ces restrictions ont permis de mettre au point des modèles de généralisation performants sur les thèmes bâti et routier. Nous estimons maintenant que le modèle (Ruas et Duchêne, 2007) sur lequel nous nous basons est suffisamment abouti pour la généralisation de ces thèmes. Notre objectif est de le compléter pour la prise en compte de thèmes tels que le relief et de l'occupation du sol. Si plusieurs travaux ont eu pour but de proposer des modèles de généralisation automatique des thèmes relief (Weibel, 1989; Firkowski *et al.*, 2003) et occupation du sol (Müller et Zeshen, 1992; Galanda, 2003), aucun n'a proposé de méthode pour permettre une prise en compte de ces thèmes lors de la généralisation des thèmes bâti et routier. Pourtant, le fait que tous les objets partagent le même espace implique l'existence de relations entre eux qu'il est nécessaire de considérer pendant le processus de généralisation. Ils ne peuvent être considérés séparément pendant le processus de généralisation.

Au chapitre suivant, nous présentons la problématique de la prise en compte de ces thèmes de type *champ* dans le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007). Pendant le processus de généralisation, les champs subissent des déformations afin de permettre une préservation des relations qu'ils partagent avec les objets (routes, bâtiments, etc.). La prise en compte des champs dans le processus de généralisation nécessite donc l'utilisation conjointe d'opérations *discrètes* sur les objets et *continues* sur les champs. Le but de notre travail est de mettre au point un modèle de généralisation permettant une gestion *hybride* d'opérations discrètes et continues pour la prise en compte des champs. Nous détaillons maintenant cette problématique.

Chapitre 2

Vers un modèle hybride de généralisation

Notre objectif est de prendre en compte des thèmes comme le relief ou l'occupation du sol dans le processus de généralisation. Dans ce chapitre, nous présentons le fait que cette prise en compte nécessite la mise au point d'un modèle de généralisation *hybride*, c'est-à-dire permettant la gestion d'opérations *discrètes* et *continues*.

Dans la première partie de ce chapitre nous présentons les particularités de ces thèmes de type *champ*. Nous présentons pourquoi et comment ils sont usuellement traités en généralisation. Dans une seconde partie, nous montrons en quoi le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) sur lequel nous nous basons n'est pas adapté à la prise en compte des champs. Enfin, dans une troisième partie, nous verrons en quoi l'approche agent peut permettre de répondre à ce nouveau besoin.

2.1 Les champs

Les champs permettent de représenter certains phénomènes du monde réel. Après une définition des champs, nous présentons en quoi la représentation sous forme de champ complète celle sous forme d'objet. Nous donnons ensuite des méthodes usuelles de représentation de champs, en particulier en cartographie. Nous présentons enfin le rôle des champs dans un processus de généralisation.

2.1.1 Définition et types de champs

Un champ est l'ensemble des valeurs prises par une grandeur en tout point de l'espace. La représentation d'information sous forme de champ est très utilisée en géomatique pour des phénomènes étendus tels que le relief, la partition d'occupation du sol, la température, etc. pour lesquels « *for every point in the space, there is a value* ». (Frank et Mark, 1991, p. 151). Le terme *champ* est assez peu utilisé en géomatique : le nom de la méthode de représentation de ce champ (grille, triangulation etc.) ou celui de la grandeur représentée par le champ sont souvent utilisés directement. Le terme *couverture*, issu de l'anglais *coverage*, est aussi parfois utilisé.

Exemples La figure 2.1 montre des exemples de champs en géomatique. En fonction du type de leur variable, nous pouvons distinguer différents types de champs. Nous présentons maintenant une classification des champs suivant leur variable.

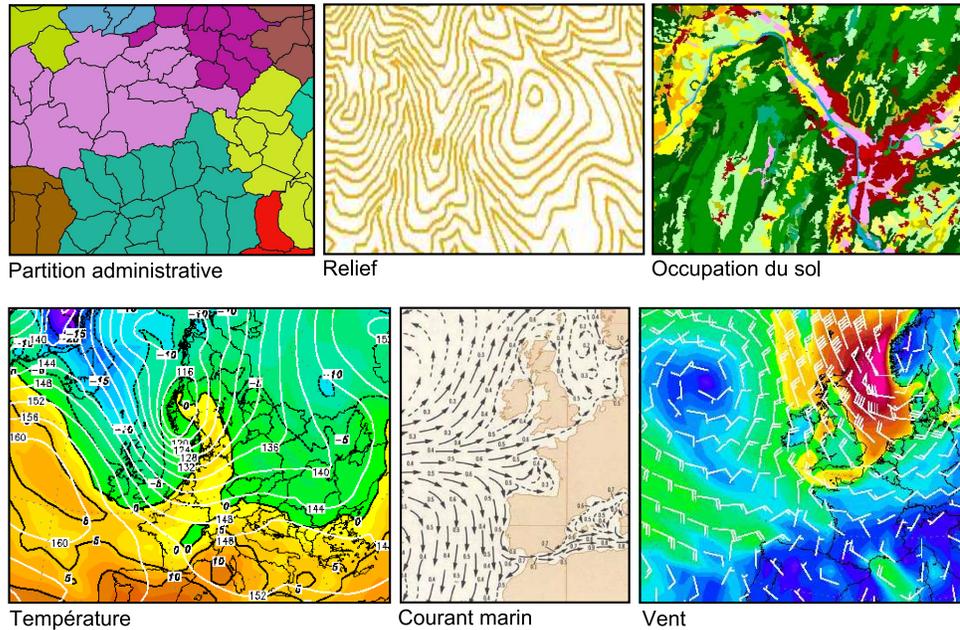


FIGURE 2.1 – Exemples de représentations de thèmes champ

Types de champ Il existe de nombreuses classifications de champs. (Goodchild, 1997) propose une classification des champs en quatre types, en fonction de la nature de leur variable :

- Les champs à valeur **nominales** : les valeurs du champ sont dans un ensemble fini (exemple : champ d'occupation du sol représentant des surfaces de types d'occupation du sol différents, etc.).
- Les champs à valeur **ordinales** : le champ est à valeur dans un ensemble fini ou non pour lequel une relation d'ordre est définie (exemple : champ d'aléa, représenté par des surfaces d'aléa fort, moyen ou faible, etc.).
- Les champs à valeur **intervalle** : le champ est à valeur dans un ensemble ordonné pour lequel il est possible de quantifier les écarts entre valeurs (exemple : champ de température. L'écart entre les valeurs 10 °C et 20 °C est le même que celui entre 35 °C et 45 °C).
- Les champs à valeur **ratio** : les valeurs du champ peuvent être divisées entre elles. Il est possible de quantifier le rapport entre deux valeurs du champ. Cette propriété nécessite l'existence d'une valeur zéro. (exemple : champ d'altitude. L'altitude 200m est deux fois supérieure à l'altitude 100m).

Les champs peuvent également être classés en fonction de la dimension de leur variable : ils peuvent être à valeurs scalaires (par exemple, la température, l'altitude etc.), vectorielles de dimension quelconque (par exemple, la pente, l'orientation du vent etc.), voire même tensorielles. Aussi, plusieurs champs peuvent être dérivés à partir d'un champ. Par exemple, il est possible de définir un champ de pente à partir d'un champ d'altitude. Le tableau 2.1

présente des exemples de champs avec, pour chacun d’eux, différentes grandeurs possibles. Certaines de ces grandeurs sont calculées à partir d’une grandeur de base qui est souvent celle mesurée lors de l’acquisition des données. Le dernier exemple de champ (desserte routière) du tableau illustre le fait qu’un champ peut être défini à partir de données objet.

Champ	Variable
Altitude	Valeur d’altitude Pente (gradient d’altitude) Courbure Type de relief (sommet, vallée, etc.)
Aléa d’inondation	Valeur de l’aléa Gradient de l’aléa
Température	Valeur de température Gradient de température Partition en zones froides et zones chaudes
Partition d’occupation du sol	Identifiant de zone Type de zone Plus petite distance à la frontière de la zone
Partition en zones administratives	Nom de la zone administrative Nombre d’habitants de la zone
Desserte routière	Plus courte distance au réseau routier Identifiant du tronçon routier le plus proche Coordonnées du point du réseau routier le plus proche

TABLE 2.1 – Exemples de champs et de différentes variables associées

Ambiguïté sur la notion de continuité Il existe une ambiguïté sur le caractère continu d’un champ : certaines définitions posent comme condition nécessaire la *continuité* de la grandeur dans l’espace. Dans ces définitions, la continuité du champ dans l’espace signifie que celui-ci est défini en tout point : il s’agit donc de la *continuité de la définition* du champ en tout point de l’espace. Cette définition de la continuité diffère de celle utilisée en mathématique : la continuité mathématique d’une fonction désigne la propriété selon laquelle des points voisins ont des valeurs voisines. Ainsi, les champs à grandeur nominale ne sont pas continus au sens mathématique mais sont considérés comme des champs car ils sont définis en tout point. Nous utiliserons le terme de continuité au sens mathématique. Nous considérerons le champ d’occupation du sol comme un champ, mais non continu.

Propriétés de continuité et dérivabilité De la même façon qu’il existe des champs continus ou non, il existe des champs ayant des propriétés de dérivabilité différentes. Ces propriétés de continuité et de dérivabilité sont fortement liées au niveau de détail auquel le champ est perçu et représenté : un champ peut apparaître comme continu et dérivable à un certain niveau de détail, et perdre ces propriétés à un autre niveau de détail. Nous illustrons ce phénomène sur deux exemples :

1. Sur un champ d’altitude : à un niveau de détail de l’ordre de celui donné par les cartes au 1 :25000, le relief apparaît comme une surface lisse dérivable (sauf au niveau de certaines discontinuités naturelles comme des falaises, des talus ou des lignes de rupture de pente comme par exemple des crêtes tranchantes). A un niveau de détail plus fin, certains détails très fins du relief (comme par exemple des aspérités) qui

n'étaient pas visibles au niveau de détail plus grossier peuvent influencer les propriétés de continuité et de dérivabilité du champ. Le champ n'apparaît plus comme dérivable.

2. Sur un champ de vents : sur les cartes représentant des courants comme par exemple la direction et la force des vents (champs vectoriels) à l'échelle d'un pays comme la France, des discontinuités laissent apparaître des limites entre des zones de vents différents. A un niveau de détail plus fin, des variations locales continues des vents très différentes de celles données à un niveau de détail plus grossier peuvent être observées.

Ainsi, lorsque le niveau de détail de perception et de représentation d'un champ change, celui-ci peut apparaître comme plus ou moins lisse. Ce lissage provoque un changement des propriétés de continuité et de dérivabilité du champ. Les propriétés de continuité et de dérivabilité des champs dépendent donc du niveau de détail auquel ils sont perçus et représentés.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous limiterons au traitement de deux champs particuliers :

- **un champ représentant le relief** : ce champ représente l'altitude en tout point de l'espace. Il est modélisé comme une fonction continue et dérivable. Nous verrons comment prendre en compte les éventuelles discontinuités présentes sur ce champ (talus, etc.),
- **un champ représentant l'occupation du sol** : ce champ permet de représenter le type d'occupation du sol en tout point de l'espace. Ce champ est modélisé comme une partition de l'espace composée de surfaces adjacentes sur lesquelles le type d'occupation du sol est constant.

Nous nous restreignons à ces deux thèmes particuliers car ils sont particulièrement importants sur les cartes topographiques. Nous considérons ces deux champs comme suffisamment représentatifs des différents types de champs les plus utilisés. Notre objectif est de fournir une méthode de prise en compte de champ au relief et à l'occupation du sol qui soit suffisamment générique pour être généralisable à d'autres champs.

Nous avons présenté le concept de champ. Nous présentons maintenant la relation existant entre les représentations sous forme d'objet et de champ.

2.1.2 Modèles conceptuels objet et champ

Les représentations sous forme d'objets et de champs sont deux méthodes différentes de modélisation du réel (Frank et Mark, 1991, p. 151), (Laurini et Thompson, 1994, chap. 3.5, p. 87) (Goodchild, 1997), (Cova et Goodchild, 2002). Ils sont souvent appelés *modèles conceptuels* objet et champ. Les principes de ces modèles conceptuels sont les suivants :

- **Le modèle objet** : dans ce modèle, l'espace géographique est un espace vide peuplé d'entités discrètes appelées *objets*. Les objets sont identifiables et caractérisés par plusieurs valeurs attributaires permettant de les décrire. Ils ont chacun une géométrie (point, ligne, surface) et peuvent éventuellement se superposer. Les objets sont organisées sous forme de classes comme présenté partie 1.1.1.2 page 20.
- **Le modèle champ** : comme présenté précédemment en partie 2.1.1, ce modèle conceptuel permet d'attribuer une valeur à chaque point de l'espace.

Modèles complémentaires Une même information géographique peut être représentée en utilisant l'un des deux modèles conceptuels objet ou champ. Aucun des deux modèles conceptuels n'est a priori meilleur que l'autre. Ils correspondent à deux façons différentes de modéliser le réel qui peuvent se révéler plus ou moins adaptées suivant les applications. Par exemple, concernant la représentation du bâti, il est possible d'utiliser le modèle conceptuel objet en représentant les bâtiments sous forme d'objets surfaciques. Il est également possible de représenter le bâti sous forme d'un champ donnant pour tout point la densité bâtie. Même s'il est possible d'utiliser chacun de ces deux modèles conceptuels pour représenter un même thème, certains thèmes ont des natures qui rendent l'utilisation de l'un de ces modèles conceptuels plus pertinente. Certains thèmes sont par nature composés d'objets discrets, géométriquement bien délimités, alors que d'autres sont définis en tout point de l'espace. Usuellement les deux modèles conceptuels sont utilisés pour représenter des thèmes différents. Les recommandations données par la directive INSPIRE (Directive INSPIRE, 2007, Annexes) illustrent cette nécessité d'utiliser conjointement champs et objets.

La notion d'objet de champ Même si un champ n'a pas pour objectif de représenter des objets discrets, il permet souvent d'en représenter implicitement : certaines variations du champ dans l'espace peuvent être identifiables sous forme d'objets. Il peut être utile, suivant l'utilisation visée des données champ, d'expliciter ces objets. Par exemple, les variations des données météorologiques représentées sous forme de champs (pression, température etc.) sont souvent interprétées pour permettre d'expliciter des objets (dépressions, anticyclones, fronts chauds et froids etc.) traduisant certains types de variations des champs dans l'espace (cf. figure 2.2). Ces objets sont appelés *objets de champ* (Goodchild, 1997; Cova et Goodchild, 2002). Ils explicitent certains modèles de variation de la grandeur représentée par le champ dans l'espace. Leur prise en compte est importante lors du traitement de leur champ associé.



FIGURE 2.2 – Exemples d'objets de champ : anticyclones, dépressions et fronts d'une carte météorologique

Expliciter les objets de champ pertinents est une étape souvent nécessaire lors de l'utilisation de données représentées sous forme de champs. Il est en effet plus facile de raisonner sur des objets que sur des champs. Par exemple, pour le cas particulier du relief, il est souvent utile d'expliciter les zones de relief particulières (sommets, cols, vallées etc.). (Monier, 1997, p. 26) illustre cette nécessité en considérant le relief comme « un phénomène continu à discrétiser ».

Afin d'exploiter l'information fournie par les champs, il est nécessaire de disposer de méthodes permettant de les représenter. Nous présentons maintenant des méthodes usuelles de représentation des champs en géomatique.

2.1.3 Méthodes de représentation des champs

Dans cette partie, nous donnons des méthodes utilisées en géomatique pour représenter les champs (Goodchild, 1997; Massasati, 2000). Nous distinguons les représentations numériques en général de celles utilisées particulièrement en cartographie.

2.1.3.1 Représentation numérique des champs en géomatique

Dans le modèle conceptuel objet, une composante spatiale (point, ligne ou surface) est associée à chaque objet. Un champ doit permettre de représenter une valeur pour tout point de l'espace. L'ensemble des points de l'espace étant infini (quelle que soit la portion d'espace considérée), il n'est possible ni de mesurer ni de stocker cette infinité de valeurs. « Representation of fields must always be approximate, as we cannot store an infinite number of locations ». (Cova et Goodchild, 2002). Ainsi, la représentation d'un champ s'appuie forcément sur la connaissance des valeurs de ce champ au niveau de certains points de l'espaces. Usuellement, ces points correspondent aux points de l'espace où la grandeur du champ a été acquise dans la réalité par mesure. Pour permettre d'estimer la valeur du champ en tout point de l'espace à partir des valeurs connues au niveau de certains points, des méthodes d'interpolation sont utilisées (Arnaud et Emery, 2000; Zaninetti, 2005). Ces méthodes d'interpolation permettent de représenter la valeur du champ en tout point de l'espace. Nous présentons les méthodes usuelles de représentation des champs (cf. figure 2.3) :

Représentation sous forme de fonction d'interpolation explicite : (cf. figure 2.3 a.) : un champ peut être représenté sous la forme d'un échantillonnage de mesures au niveau de certains points, ainsi que d'une fonction d'interpolation explicite s'appuyant sur les valeurs connues et permettant de calculer à la volée la valeur du champ en tout point de l'espace. (Arnaud et Emery, 2000; Zaninetti, 2005) présentent les méthodes usuelles d'interpolation (spline, krigeage, etc.). Cette représentation n'explique pas la valeur du champ au niveau de chaque point, mais permet de la calculer.

Représentation sous forme de grille (ou maillée, ou cellulaire, ou raster) : (cf. figure 2.3 b.) : Cette représentation consiste à s'appuyer sur un maillage régulier. Les valeurs du champ sont définies soit au niveau des noeuds de ce maillage, soit sur les cellules définies par ce maillage (appelées *pixel* lorsqu'elles sont carrées). La valeur du champ sur chaque cellule est supposée constante. La taille des cellules est appelée *résolution*. La résolution traduit le niveau de détail avec lequel le champ est représenté. Notons que ces cellules ne sont pas forcément carrées. Usuellement, le calcul des valeurs des cellules s'appuie sur l'utilisation d'une fonction d'interpolation et de points d'échantillonnage ; la représentation sous forme de grille permet de stocker explicitement les valeurs du champ au niveau de certains points régulièrement répartis.

Représentation sous forme de tessellation : (cf. figure 2.3 c.) : Cette représentation s'appuie sur une partition de l'espace en surfaces. La valeur du champ a certaines propriétés

sur chacune de ces surfaces (usuellement, il est constant). Cette représentation est souvent utilisée pour les champs à valeurs nominales (comme par exemple, les cartes d'occupation du sol). Les diagrammes de Voronoï sont un cas particulier de tessellation (les surfaces sont les cellules de Voronoï). Ces tessellations sont souvent représentées sous la forme d'un ensemble d'objets surfaciques adjacents. Cette représentation se rapproche ainsi du modèle conceptuel objet. Il est plus pertinent selon les besoins de représenter ces tessellations sous la forme d'un graphe dont les surfaces sont les domaines afin d'explicitier les propriétés d'adjacence des surfaces. Les surfaces sont définies implicitement à partir du graphe.

Représentation sous forme de réseau de triangles (ou triangulation, ou TIN en anglais) : (cf. figure 2.3 d.) : Une triangulation est une partition de l'espace sous forme de triangles. La valeur du champ est définie sur chaque triangle. Usuellement, la variation de la valeur du champ est linéaire dans chaque triangle. Une triangulation peut être vue comme une tessellation particulière sous forme d'un ensemble de triangles, ou bien aussi comme une méthode d'interpolation particulière puisqu'elle permet d'explicitier une fonction linéaire par morceaux de l'espace.

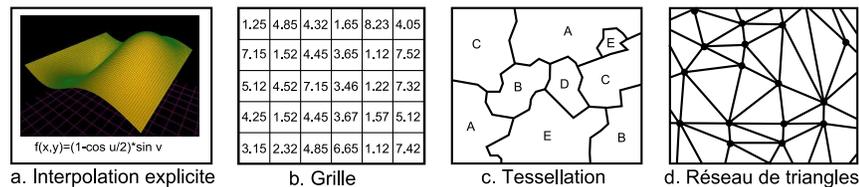


FIGURE 2.3 – Méthodes usuelles de représentation de champs

La méthode utilisée pour représenter un champ est fortement liée à son type : certaines méthodes de représentation ne sont pas utilisables pour certains types de champs. Par exemple, un champ à grandeur nominale est usuellement représenté par une tessellation. Plusieurs représentations sont souvent possibles pour un même type de champ. Le choix de la représentation dépend de l'utilisation visée du champ. Notons par ailleurs qu'il existe des normes et des formats concernant les représentations sous forme de grilles et triangulation (Open GIS Consortium, 2001; Donnay, 2005; Open GIS consortium).

Les représentations que nous avons présentées ici sont utilisées en géomatique pour exploiter l'information portée par un champ. Ces représentations ne sont a priori pas faites pour des besoins de visualisation cartographique. Nous présentons maintenant des méthodes de représentation cartographique des champs, que nous distinguons volontairement de méthodes présentées ici.

2.1.3.2 Représentation cartographique des champs

Il existe de nombreuses méthodes de représentation cartographique des champs. Nous présentons ci-dessous les plus courantes.

Représentation sous forme de semis de points (cf. figure 2.4 a.) : le champ est représenté sous la forme d'un ensemble de points pour lesquels la valeur du champ est renseignée. Ces points donnent un échantillonnage des valeurs du champ qui permettent au

lecteur d'interpoler visuellement ses valeurs en tout point. Par exemple, pour le relief, cette représentation correspond à l'utilisation de points cotés. Les points ne sont pas forcément répartis de façon homogène dans l'espace : ils sont habituellement plus denses là où le champ varie le plus.

Représentation sous forme de dégradé de couleurs (cf. figure 2.4 b.) : Le champ est représenté sous la forme d'une image dont la coloration varie en fonction de sa valeur. Par exemple, pour un champ de température, un dégradé allant du rouge (couleurs chaudes) au bleu (couleurs froides) peut être utilisé. Cette représentation est particulièrement utilisée pour la représentation des champs continus. En cartographie numérique, ce dégradé est stocké sous forme de grille (raster) dont la résolution est adaptée pour que les cellules ne soient pas visibles à l'œil nu et donnent ainsi un aspect continu à la représentation.

Représentation sous forme de tessellation (cf. figure 2.4 c.) : Chaque surface composant la tessellation est représentée de façon à suggérer l'état du champ sur celle-ci (en utilisant une trame adéquate). Les limites entre surfaces peuvent également être symbolisées. Cette représentation est utilisée pour les cartes dites *zonales*. Les termes *catégorielle*, *partition*, ou *cloroplèthe* peuvent également être trouvés. (ministère de l'équipement, du logement, des transports et de l'espace et ministère de l'environnement, 1991) fournit de nombreux exemples de telles cartes.

Représentation sous forme de surfaces hypsométriques (cf. figure 2.4 d.) : Une surface hypsométrique est une partie connexe de l'espace sur laquelle la valeur du champ est dans un certain intervalle. Les valeurs bornes de cet intervalle sont atteintes au niveau de la frontière de cette surface. Cette représentation est adaptée aux champs dont la valeur est de type intervalle. Elle peut être vue comme un cas particulier de dégradé de couleur discontinu, ou de tessellation.

Représentation sous forme d'isohypses (cf. figure 2.4 e.) : Une isohypse est une courbe reliant les points ayant une même valeur de champ (par exemple, les courbes de niveau dans le cas du relief). Cette représentation est adaptée aux champs scalaires continus, comme le relief, la température ou la pression. Elle permet de représenter les champs sous forme d'objets linéaires permettant au lecteur une interpolation visuelle des valeurs du champ en tout point. Elle est caractérisée par une certaine valeur d'*équidistance* qui est la différence de valeur entre deux isohypses consécutives. Cette valeur d'équidistance est choisie de façon adéquate : une faible valeur d'équidistance permet de représenter davantage les faibles variations locales du champ, mais peuvent provoquer un manque de lisibilité.

Représentation combinée libre : Le cartographe est libre d'utiliser le procédé qu'il souhaite pour permettre une représentation du champ adaptée. Sa représentation peut être une combinaison de plusieurs des représentations présentées précédemment. Par exemple, une représentation sous forme d'isohypses peut être accompagnée d'un semis de points donnant les valeurs du champ en certains points caractéristiques (usuellement, les maxima locaux) comme sur les carte bathymétriques. (Imhof, 1982b) présente des règles de combinaison pour le cas de la représentation du relief. Il peut également utiliser des procédés graphiques divers (hachures, ombrages, vues obliques, etc.). Il est par ailleurs fréquent que

le cartographe explicite et représente de façon adéquate les objets de champ de façon à les mettre en valeur. Par exemple, sur la carte météorologique de la figure 2.2, les objets de champ de type dépression et anticyclone ont été explicités et symbolisés.

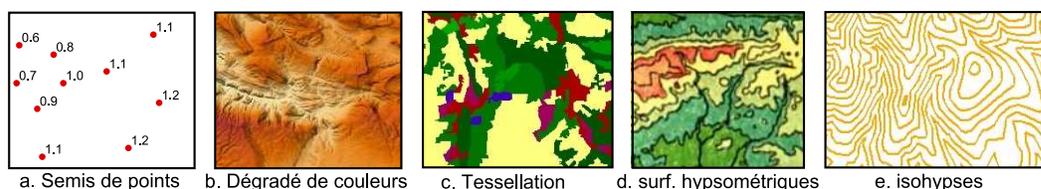


FIGURE 2.4 – Méthodes usuelles de représentation cartographique de champs

Chacune des représentations présentées précédemment est adoptée par le cartographe en fonction du type de champ, de son niveau de détail, ainsi que de l'importance qu'il souhaite lui donner. Les champs étant par nature définis en tout point de l'espace, leur affichage provoque des superpositions avec les autres thèmes de la carte. Usuellement, les champs sont affichés soit en tant que fond de carte (comme par exemple le relief de la plupart des cartes topographiques), soit en transparence au dessus d'autres objets (comme par exemple les courbes d'isothermie d'une carte météorologique).

Certaines des représentations cartographiques des champs sont proches de représentations numériques (comme par exemple la représentation sous forme de dégradé qui est souvent directe à partir de données de type grille). Cependant, de la même façon qu'il existe une confusion entre les notions de bases de données géographique et cartographique (cf. page 34) qui peut être dommageable, la distinction entre représentations numériques et cartographique des champs est également souvent négligée. Des représentations numériques sont utilisées pour visualiser des champs, et des représentations cartographiques sont utilisées pour effectuer des analyses. Par exemple, le relief est souvent représenté dans les bases de données géographiques sous forme de courbes de niveau alors que cette représentation ne permet pas d'obtenir telle quelle la valeur d'altitude en tout point.

Tout comme pour les représentations sous forme d'objets, les champs doivent être pris en compte lors du processus de généralisation. Nous présentons maintenant leur rôle dans le processus de généralisation.

2.1.4 Les champs en généralisation

2.1.4.1 Particularité des champs en généralisation

Les objets géographiques ont des natures différentes qui leur confèrent un comportement particulier lors du processus de généralisation. (Van Smaalen, 2003; Duchêne, 2004) proposent une classification de ces objets en fonction de leur comportement pendant le processus de généralisation. Ils distinguent trois types d'objets :

- les **petits objets** (cf. figure 2.5 a.) : ce sont les objets qui ont une faible emprise spatiale (bâtiments, objets ponctuels divers, etc.). Pendant le processus de généralisation, ils peuvent être supprimés, déplacés, et/ou généralisés individuellement. Ils peuvent être organisés sous forme de groupes et subir des opérations de typification. Parmi ces objets, (Duchêne, 2004) introduit une distinction entre les objets *linéaires*

indépendants et les autres, appelés *objets petits compacts*. Les objets linéaires indépendants (les talus, lignes de faille, etc.) ont pour particularité d'être éventuellement déformés durant leur généralisation.

- les **réseaux** (cf. figure 2.5 b.) : les réseaux sont composés d'objets linéaires connectés entre eux. Ils structurent l'espace en domaines. Certaines propriétés topologiques doivent être préservées durant le processus de généralisation.
- et enfin, les **champs** (cf. figure 2.5 c.), que nous avons présentés précédemment, et dont nous présentons maintenant les particularités en généralisation.

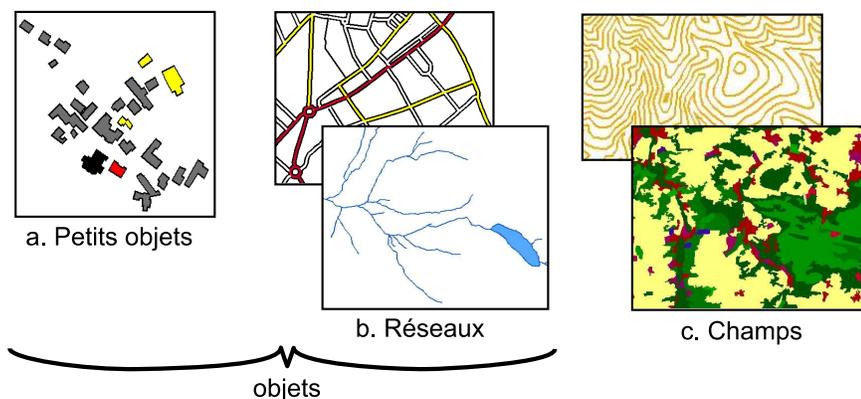


FIGURE 2.5 – Classification d'objets en fonction de leur comportement en généralisation

A présent, nous désignerons par le terme *objet*, tous les objets appartenant aux deux premières familles présentées précédemment, par opposition au terme *champ*.

Les champs interviennent lors du processus de généralisation pour essentiellement deux raisons que nous présentons maintenant : leur généralisation propre, ainsi que la prise en compte des relations qu'ils partagent avec les autres objets de la carte.

2.1.4.2 Généralisation propre des champs

Les champs ont des contraintes de généralisation propres : le niveau de détail avec lequel ils sont représentés doit être adapté à leur utilisation. Comme pour les objets, le processus de généralisation des champs a pour but de simplifier leur représentation en mettant en valeur certaines de leurs caractéristiques. Les objets de champ doivent être pris en compte pendant ce processus, car ils représentent une information qui peut être importante. Dans ce cas, il est fréquent de préserver leur forme, voire de les mettre en valeur.

Par exemple, pour le cas de la représentation du relief, des formes caractéristiques peuvent être mises en valeur (talwegs profonds, sommets pointus, etc.), et des symboles particuliers peuvent servir à expliciter des objets de champ (talus, falaise etc.). Il peut ainsi être nécessaire de créer de tels objets grâce à une analyse du relief. Certains ouvrages détaillent les méthodes de généralisation manuelle de généralisation du relief (Maugenest, 1949; Imhof, 1982a; Weger, 1997b). La figure 2.6 montre un exemple de généralisation cartographique du champ relief représenté sous forme de courbes de niveaux : la forme des courbes de niveau est simplifiée, tout en préservant certains caractères de la forme générale du relief ; les courbes de niveau sont déformées afin d'éviter qu'elles ne se touchent.

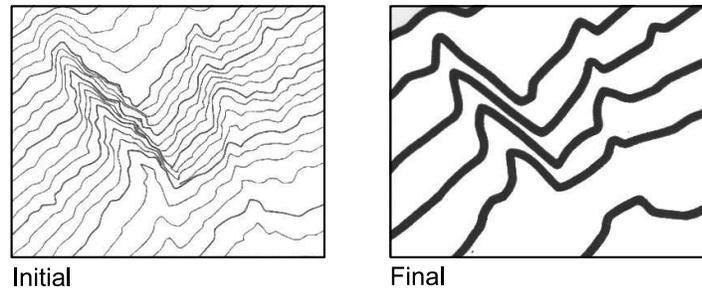


FIGURE 2.6 – Généralisation de courbes de niveau (Imhof, 1982b, p. 129)

De nombreux travaux ont pour objectif d’automatiser la généralisation de certains champs, en particulier le relief et l’occupation du sol. Par exemple, (Saux, 1999; Saux *et al.*, 2002; Saux, 2003) proposent une méthode de lissage d’isohypses à base de splines appliquée aux courbes bathymétriques. (Carvalho, 1995; Firkowski *et al.*, 2003) proposent des méthodes de lissage de la surface topographique. (Weibel, 1989) propose un modèle permettant d’appliquer des traitements de généralisation adéquats suivant les zones du relief. (Müller et Zeshen, 1992; Li *et al.*, 2001; Galanda, 2003) proposent des modèles de généralisation de champ occupation du sol. Ces méthodes de généralisation de champs sont appliquées sans tenir compte des autres objets de la carte. En conséquence, de nombreuses relations pouvant exister entre objets et champs peuvent être altérées. Nous présentons maintenant l’importance de la prise en compte des relations entre objets et champs lors du processus de généralisation.

2.1.4.3 Prise en compte des relations objet-champ

Objets géographiques et champs partagent des relations importantes à préserver durant le processus de généralisation. La figure 2.7 présente des exemples de telles relations : un bâtiment a une valeur d’altitude (figure a.), il se trouve dans une zone d’occupation du sol particulière (figure b.), un cours d’eau s’écoule sur le relief (figure c.), et une route suit des limites de parcelles d’occupation du sol (figure d.). Une relation objet-champ est caractérisée par la valeur du champ au niveau de la position de l’objet. Elle est une conséquence de la définition du champ en tout point de l’espace.

L’annexe A page 231 présente d’autres exemples de relations objet-champ sur des extraits de cartes et illustre leur préservation lors du processus de généralisation manuelle. Ces exemples montrent que ces relations doivent être prises en compte lors du processus de généralisation car elles sont porteuses de sens géographique : l’existence et la position des objets dans la réalité est contrainte par les champs. Par exemple, le réseau hydrographique s’écoule sur le relief, les zones bâties sont denses au fond des vallées, les routes passent par des cols, gravissent des montagnes, les réseaux séparent les parcelles foncières et les zones d’occupation du sol, etc. Ces relations doivent donc être préservées en généralisation. Durant le processus de généralisation appliqué aux objets, une non-prise en compte des relations objet-champ peut avoir pour conséquence de les rompre. Nous verrons au chapitre suivant comment évaluer ces ruptures.

Les exemples présentés dans l’annexe A page 231 permettent de constater des différences entre les relations objet-champ décrites :

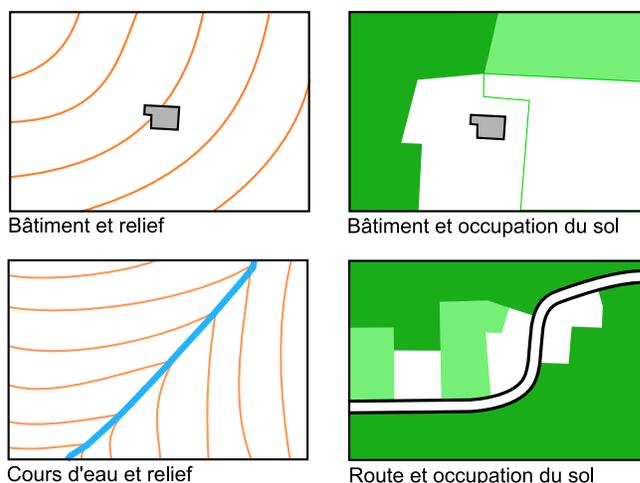


FIGURE 2.7 – Exemples de relations objet-champ

- des relations concernent la valeur du champ (exemple : l'altitude d'un bâtiment), d'autres la valeur de sa variation (exemple : la pente d'une route), ou encore l'appartenance à une certaine zone (exemple : un bâtiment dans un champ).
- des relations concernent des objets individuels (exemple : le type d'occupation du sol d'un bâtiment), des groupes d'objets (exemple : un village sur un sommet), ou des parties d'objets (exemple : une partie de route à pente constante)
- enfin, nous pouvons constater que certaines relations semblent plus importantes que d'autres à préserver. Par exemple, l'écoulement du réseau hydrographique sur le relief et les relations topologiques existantes entre tronçons routiers et parcelles d'occupation du sol sont des relations particulièrement fortes entre objets et champs.

Les figures 2.8, 2.9, 2.10, 2.11 et 2.12 montrent des exemples d'opérations de généralisation manuelle ayant pour objectif de prendre en compte des relations objet-champ. Ces exemples sont issus de manuels de généralisation. Les figures 2.8 et 2.9 montrent une opération d'élargissement de vallée, qui vise à déformer le relief pour laisser davantage de place aux objets congestionnés du fond de vallée. Cette opération est utilisée dans les espaces contraints par le relief, comme décrit par (Imhof, 1982b, p. 331) :

« In narrow valleys, gorges and ravines, along steeply sloping ocean shores, along sea coasts, etc., streams or shorelines, sloping roads, railways, settlements, and often even cliff steps or sections of slopes are crowded together into very narrow spaces ».

La figure 2.10 présente un exemple de généralisation concomitante du relief et de l'hydrographie dans le but de préserver la relation d'écoulement qui les lie. A chaque talweg correspond un cours d'eau et inversement. La figure 2.11 présente un exemple de généralisation concomitante du relief et du thème routier. Sur les figures 2.11 a. et c., les courbes de niveau sont déformées sous les tronçons routiers afin d'empêcher une trop grande superposition entre les deux symboles linéaires. Cette opération a pour effet d'amplifier la largeur des terrasses creusées par les tronçons routiers visibles sur la coupe figure 2.11 c.). Cette interaction entre le réseau routier et le relief est décrite par (Barillot et Plazanet, 2002, p. 331) :

« Les routes de plaine ne suivant pas les rivières sont généralement rectilignes ; les routes de plaine suivant les rivières épousent à peu près leur forme ; les routes de petite montagne suivant les courbes de niveau épousent à peu près leur forme ; les routes de haute montagne possèdent des lacets étroits (virages à 180°) ».

Enfin, la figure 2.12 présente un exemple de préservation de relations topologiques d'adjacence entre tronçons routiers et parcelles d'occupation du sol pendant le processus de généralisation.

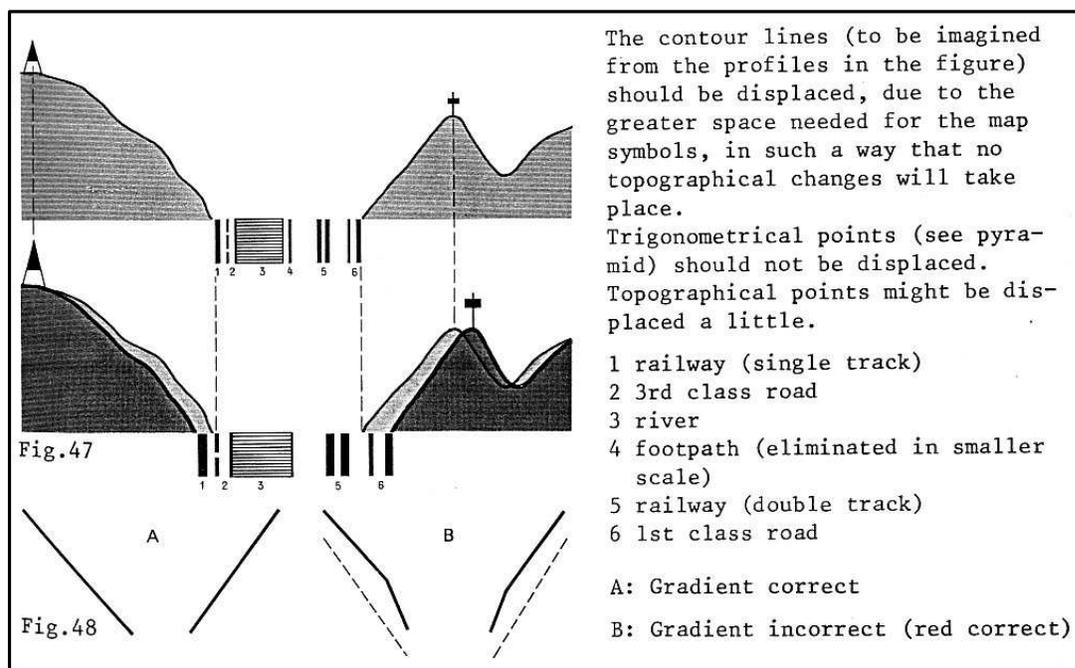


FIGURE 2.8 – Opération d'élargissement de talweg (Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, 1977, p. 27)

Ainsi, en généralisation manuelle, il existe de nombreuses interactions entre objets et champs ayant pour but de préserver les relations qu'ils partagent. Nous pouvons constater que les champs subissent des déformations provoquées par la généralisation des objets. Ils semblent être considérés par les cartographes comme des nappes élastiques déformées sous l'action des objets.

En généralisation automatique, peu de travaux concernent la préservation de ces relations. S'il existe beaucoup de travaux concernant la généralisation des thèmes objets et champs séparément, peu prennent en compte les relations entre objets et champ. (Kreimeike, 2004; Filin *et al.*, 2007) propose une méthode de déformation du relief provoquée par l'élargissement des symboles d'un réseau routier. Cette méthode permet d'obtenir une opération analogue à celle présentée figure 2.11. Nous pouvons également mentionner le travail de (Song *et al.*, 2006) qui propose une méthode de déformation de réseau routier à base de snakes dans le but de le recaler sur une image aérienne. Cette méthode peut être

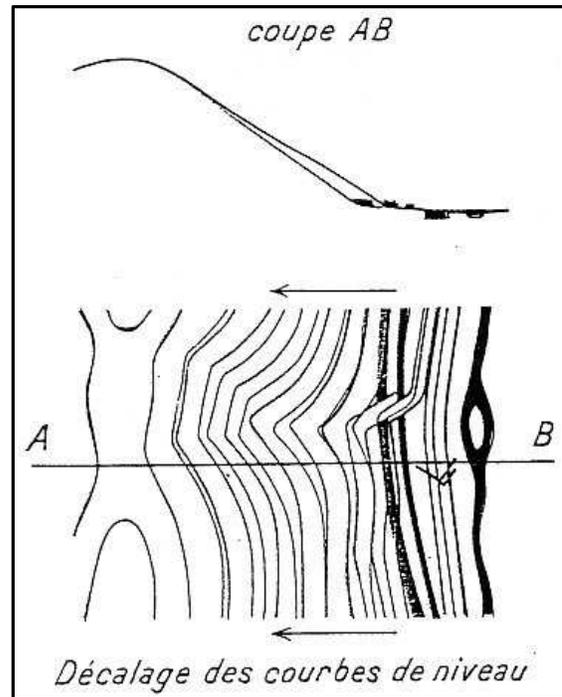


FIGURE 2.9 – Opération d'élargissement de talweg (IGN)

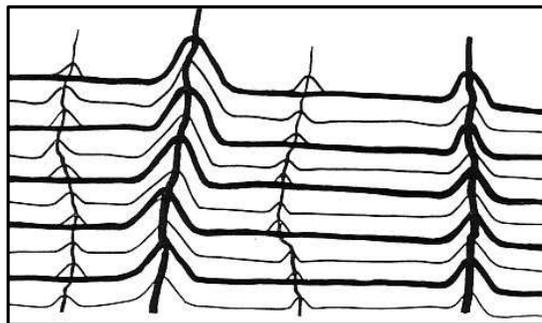


FIGURE 2.10 – Généralisation conjointe de l'hydrographie et du relief (la représentation initiale est en trait fin ; la représentation généralisée est en trait épais) (Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, 1977, p. 42)

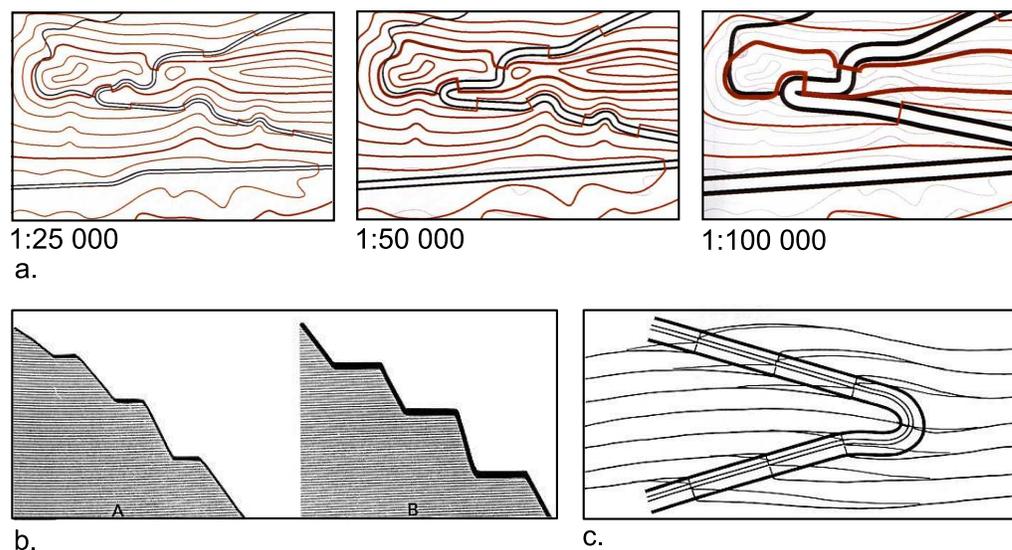


FIGURE 2.11 – Généralisation conjointe du routier et du relief. a. (Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, 2002, p. 97), b. et c. (Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, 1977, p. 27)

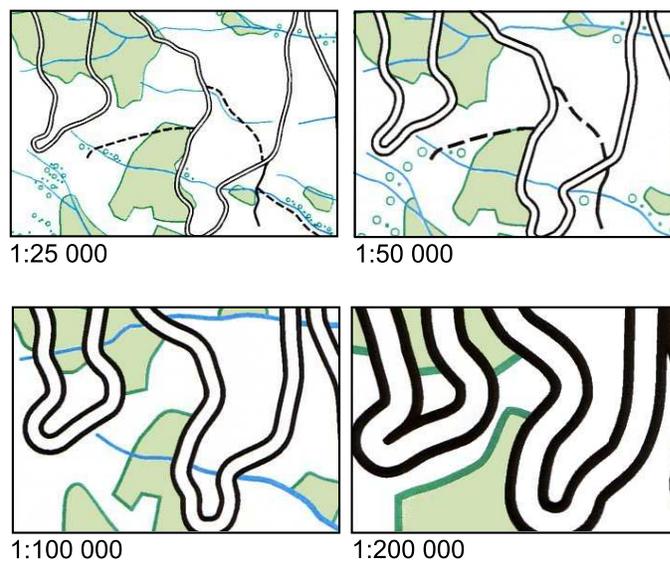


FIGURE 2.12 – Généralisation conjointe du routier et de l'occupation du sol (Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, 2002, p. 111)

vue comme une interaction entre un champ (l'image) et des objets (les tronçons routiers). Si ces travaux permettent de progresser vers une prise en compte des relations objet-champ, aucun modèle de généralisation ne permet de les prendre en compte de façon générique. Le traitement de la généralisation des champs indépendamment des objets néglige le fait qu'objets et champs partagent le même espace.

Dans cette partie, nous avons présenté les particularités des champs dans le processus de généralisation. Nous avons vu que ces thèmes doivent être pris en compte lors du processus de généralisation pour leur généralisation propre d'une part, et pour la prise en compte des relations qu'ils partagent avec les autres objets de la carte d'autre part.

Notre objectif est de compléter le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) afin de permettre la prise en compte des champs. Nous ne traitons pas la généralisation propre des champs comme présenté en partie 2.1.4.2 page 86, mais uniquement le cas de la préservation des relations objet-champ. Nous souhaitons automatiser les opérations du type de celles présentées partie 2.1.4.3 page 87. Nous présentons maintenant les améliorations nécessaires du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) pour permettre une prise en compte des relations objet-champ.

2.2 Améliorations nécessaires à la prise en compte des champs dans le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007)

Dans cette partie, nous présentons en quoi le modèle (Ruas et Duchêne, 2007) sur lequel se base notre travail doit être complété pour permettre une prise en compte générique et efficace des relations objet-champ. Nous présentons :

- d’une part, le besoin de prendre en compte un nouveau type de relation : les relations objet-champ,
- et d’autre part, le besoin d’utiliser un nouveau type d’opération : les déformations, que nous désignerons par le terme *opération continue*.

2.2.1 Premier besoin : les relations objet-champ

Nous présentons ici en quoi le modèle (Ruas et Duchêne, 2007) ne permet pas de prendre en compte les relations objet-champ. Nous présentons ensuite certains travaux en systèmes multi-agent traitant de la gestion des relations objet-champ.

2.2.1.1 Prise en compte des relations objet-champ

Notre objectif est de permettre une prise en compte des relations entre objets et champs. Une prise en compte de ces relations dans le modèle (Ruas et Duchêne, 2007) consisterait à s’appuyer sur une contrainte portant sur cette relation. Or, nous avons vu que ce modèle permet la gestion de contraintes :

- micro, meso ou macro : ces contraintes portent sur des caractères de ces agents (cf. partie 1.3.3.2 page 63). Les contraintes meso permettent de gérer les relations de groupes d’objets.
- relationnelles binaires : ces contraintes portent sur des relations entre deux objets (cf. partie 1.3.3.5 page 73).

Dans notre cas, les relations objet-champ concernent non plus des objets entre eux, mais un champ et un (éventuellement plusieurs) objet(s). Le champ et les objets ne sont pas au même niveau : les objets sont *sur* le champ. Le champ fait partie du *fond de carte*. De plus, pour un objet donné partageant une relation avec un champ, cette relation n’influence pas la totalité du champ, mais une partie de celui-ci proche de l’objet, plus ou moins grande suivant la nature du champ. Cette relation concerne donc des parties du champ.

A ce sujet, (Mustière et Moulin, 2002) distingue trois types de relations principales que peut avoir un objet avec son environnement dans le cadre en généralisation (cf. figure 2.13) :

1. *être composant* d’un groupe (cf. figure 2.13 a.). Par exemple, des tronçons de route composent un échangeur,
2. *être en relation binaire* avec des objets du même niveau (cf. figure 2.13 b.). Par exemple, une route et un bâtiment sont proches, une route traverse une rivière,
3. *être sur* une zone particulière (cf. figure 2.13 c.). Par exemple, une route est à l’intérieur d’une zone urbaine, rurale ou montagnaise.

Le modèle (Ruas et Duchêne, 2007) permet de traiter les deux premiers types de relations énoncées précédemment. Pour permettre la prise en compte des champs, il est donc nécessaire d’étendre ce modèle afin de permettre la gestion de ce troisième type de relation.

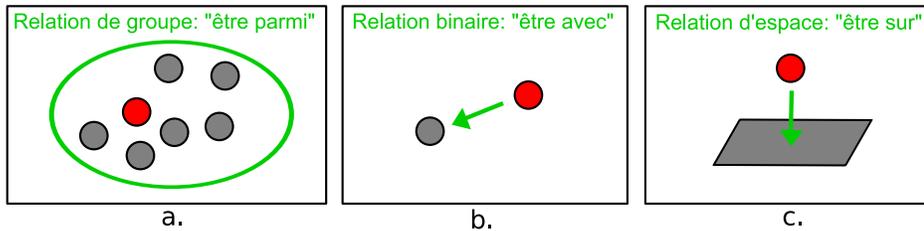


FIGURE 2.13 – Trois types de relations traduisant le contexte des objets en généralisation, d’après (Mustière et Moulin, 2002)

Nous présentons maintenant différents travaux en rapport avec la gestion de ce type de relation dans les systèmes multi-agent.

2.2.1.2 Champs et agents situés

Un système multi-agents est dit *situé* lorsque les agents qui le composent évoluent dans un espace métrique. Chaque agent évolue en fonction de son environnement. L’environnement de l’agent est composé de ses agents accointants (les autres agents qui l’influencent, qui sont souvent proches de lui), des autres objets passifs (non agents) éventuels et de l’espace proche de lui. Dans certains systèmes multi-agents, l’espace n’est pas homogène isotrope et ses variations influencent l’évolution des agents. Une représentation analogue à celle sous forme de champ en géomatique est souvent utilisée. Par exemple, lors de la simulation d’une colonie de fourmis présentée en partie 1.3.1.2 page 59, les fourmis laissent sur l’espace une substance chimique, qui rend l’espace hétérogène de leur point de vue. La concentration de substance chimique déposée sur l’espace est représentée sous forme de champ puisqu’il est possible de déterminer sa valeur en tout point de l’espace.

Dans une grande majorité des systèmes multi-agents situés, l’espace est représenté sous forme de grille (cf. figure 2.14 a.). Cette représentation est souvent suffisante. (Bandini *et al.*, 2002) proposent d’étendre cette modélisation de l’espace en utilisant une famille de grilles, traduisant plusieurs phénomènes de l’espace. Chaque agent est capable de percevoir dans quelle cellule de chacune des grilles il se trouve et évoluer en conséquence. (Sahli et Moulin, 2003) pointent les limites de la modélisation de l’espace sous forme de grille. En effet, dans certains de systèmes multi-agents situés, les agents évoluent dans un espace continu : ils ne se déplacent pas de cellule en cellule d’une grille, mais par des translations de longueurs et directions quelconques. Certains travaux utilisent cette modélisation continue de l’espace (cf. figure 2.14 b.). (Servat, 2000) propose un modèle de simulation agent de ruissellement : les agents sont des *boules d’eau* évoluant sur une surface topographique continue. Dans (Simonin et Ferber, 2003), des agents situés interagissent par répulsion et attraction dans un espace continu. De même, (Torrel *et al.*, 2005) modélisent le mouvement d’agents *astre* dans l’espace continu.

Dans notre cas, les agents géographiques évoluent dans un espace continu (non maillé), sur des champs. Les nombreuses méthodes de représentation des champs en géomatique présentées en partie 2.1.3.1 permettent de disposer d’une telle modélisation continue de l’espace.

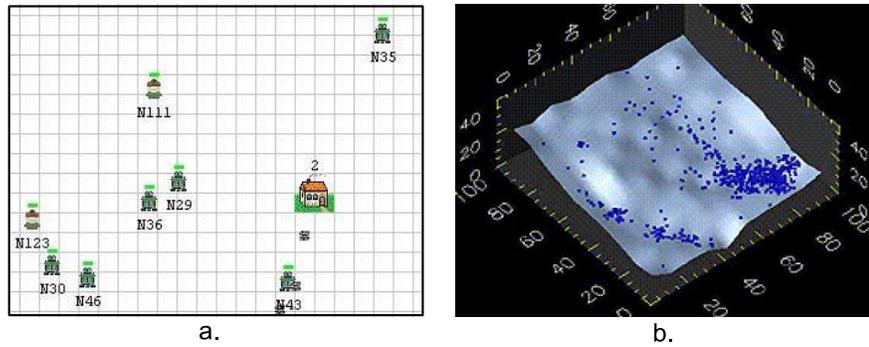


FIGURE 2.14 – Modélisation de l'espace en SMA : a. espace discontinu (d'après MadKit, <http://www.madkit.org/>) et b. continu (d'après RIVAGE (Servat, 2000))

2.2.2 Deuxième besoin : utilisation concomitante d'opérations discrètes et continues

En partie 2.1.4.3 page 87 nous avons montré la nécessité d'utiliser des opérations de déformations en généralisation manuelle : les champs subissent des déformations pendant le processus de généralisation pour préserver les relations objet-champ. La prise en compte des champs nécessite donc l'utilisation d'opérations continues de déformation. Dans cette partie, nous présentons la dualité entre opérations discrètes et continues en généralisation. Nous présentons le rôle de ces deux types d'opérations au sein du processus de généralisation, puis deux facteurs essentiels influençant leur utilisation. Nous présentons enfin en quoi le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) doit être complété pour pouvoir gérer ces deux types d'opérations.

2.2.2.1 Opérations discrètes et continues en généralisation

La généralisation est un processus de transformation résultant de l'application d'un ensemble d'opérations. En nous basant sur (Müller, 1991), nous proposons d'introduire une distinction entre deux sortes d'opérations :

- des **opérations discrètes** (ou *discontinues*, ou encore « catastrophiques » (Müller, 1991)) : une opération discrète provoque un changement brusque et relativement important des données traitées. Une telle opération fournit une nouvelle représentation des données. Cette transformation est irréversible : il n'est plus possible de retrouver la représentation initiale à partir du résultat ; une partie d'information est supprimée. Par exemple, le changement brusque de forme d'un bâtiment, la typification d'un groupe de bâtiments et la suppression d'un virage sont des opérations discrètes.
- et des **opérations continues** (ou *de déformation*) : une opération continue provoque un changement continu, diffus, relativement léger des données traitées. Une telle opération fournit une représentation des données relativement proche de celle d'origine. Cette nouvelle représentation semble pouvoir être obtenue par une suite de petites transformations. Ces opérations se distinguent des opérations discrètes par le fait qu'elles « semblent » réversibles. Par exemple, les opérations de déformations sont des opérations continues. Parmi certaines de ces opérations, (Bader, 2001) introduit une distinction entre propagation (amortissement sur la forme d'un objet) et diffusion (amortissement sur des relations spatiales entre objets comme proximité, topologie etc.).

Nous avons présenté en partie 1.1.2.5 page 30 une classification des opérations de généralisation. Chaque opération est classée en fonction de son but. Une telle classification pourrait également être faite entre opérations discrètes et continues. Nous pouvons cependant constater que la limite entre les deux types d'opérations est floue, car certaines opérations (par exemple, déplacement et dilatation) peuvent être vues comme discrètes ou continues suivant leur ampleur.

La figure 2.15 présente un exemple de généralisation cartographique du 1 :50 000 au 1 :100 000. Certaines des opérations utilisées pour passer d'une échelle à l'autre ont été entourées. Nous constatons l'utilisation conjointe d'opérations discrètes, entourées en rouge (1 : suppression d'un bâtiment, 2 : suppression d'un tronçon routier, 3 : dilatation d'un bâtiment, 4 : typification d'un groupe de bâtiments, 5 : typification d'un réseau routier, 6 : grossissement d'un échangeur) et continues, entourées en bleu (7 : déplacement de deux tronçons routiers, 8 : déformation du réseau routier, 9 : lissage de courbe de niveau).

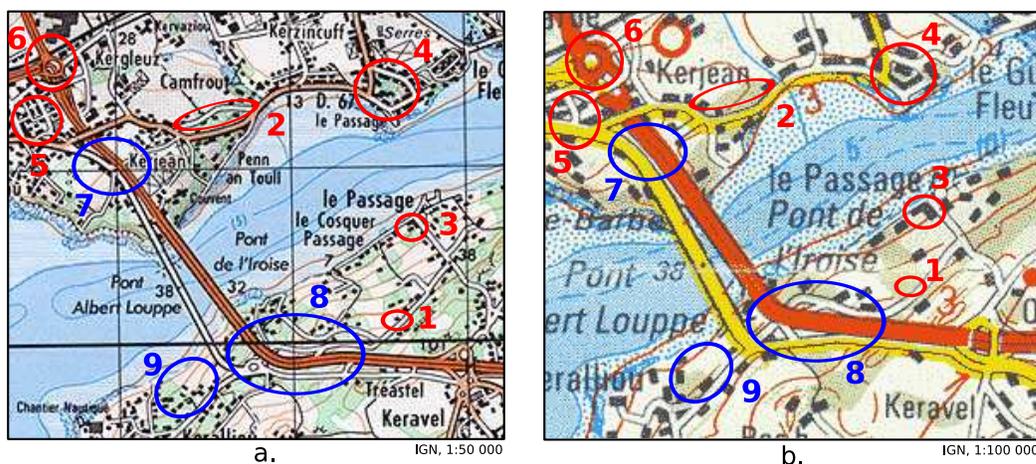


FIGURE 2.15 – Exemples d'utilisation d'opérations discrètes (en rouge) et continues (en bleu) en généralisation cartographique

Ainsi, les deux types d'opérations sont utilisées au sein du processus de généralisation. Nous présentons maintenant les facteurs qui influencent l'utilisation de l'un ou l'autre de ces types d'opérations.

2.2.2.2 Les facteurs influençant le choix du type d'opération

Nous présentons dans cette partie deux facteurs important influençant la fréquence de l'utilisation d'opérations discrètes ou continues pendant le processus de généralisation : l'amplitude du changement d'échelle et le type des objets.

Premier facteur : l'amplitude de changement d'échelle

Un facteur influençant le choix entre opérations discrètes et continues est l'amplitude du changement d'échelle : plus grande est cette amplitude, plus fréquent est le recours à des opérations discrètes. Par exemple, pour une généralisation du 1 :10 000 au 1 :15 000,

des opérations continues peuvent suffire : de faibles déplacements et déformations d'objets permettent d'obtenir une généralisation satisfaisante. Pour un changement d'échelle plus grand (par exemple, du 1 :15 000 au 1 :50 000), le recours à davantage d'opérations discrètes telles que des suppressions ou des typifications devient nécessaire. A partir de certains changements d'échelle (par exemple, du 1 :20 000 au 1 :100 000), des opérations au niveau des objets ne sont plus suffisantes : des opérations de généralisation de modèle au niveau des classes d'objets deviennent également nécessaires (comme par exemple, le remplacement de la classe *bâtiment* par la classe *surface bâtie* déjà évoquée au chapitre précédent). La nécessité de transformation des données de plus en plus importante en fonction de l'amplitude du changement d'échelle est présentée par (Müller, 1991). Il introduit la notion de *changement catastrophique* pour qualifier les forts changements que connaissent les données à partir de certains changements d'échelle.

La figure 2.16 issue de (Bertin, 1967) illustre ce phénomène. Elle présente l'exemple de la représentation de mines de charbon en fonction de l'échelle : en abscisse et en ordonnée sont représentés respectivement l'échelle des données (décroissante vers la droite) et leur niveau de détail de leur représentation (croissant vers le haut). Cette figure illustre que le niveau de détail diminue lorsque l'échelle diminue. Nous constatons également que des changements continus peuvent suffire lorsque l'amplitude du changement d'échelle est faible. Pour des amplitudes de changement d'échelle plus importants, des transformations plus importantes et discrètes (suppressions d'objets, représentation sous forme de nappe de gisement, etc.) sont nécessaires.

En figure 2.17, nous proposons de représenter schématiquement les types d'opérations utilisés en fonction de l'amplitude du changement d'échelle. Le lien existant entre ces types d'opérations et les trois types de généralisation présentés partie 1.1.2.6 page 31 est également mentionné. Les opérations continues sont les opérations utilisées en généralisation graphique. Les trois types d'opérations sont utilisées en généralisation de modèle. Plus l'amplitude du changement d'échelle est fort, plus le recours à des opérations discrètes sur les objets, voire au niveau des classes des objets, sera fréquent.

Ce lien existant entre changement d'échelle et importance des changements des données est observable à l'aide de certains outils de cartographie numérique permettant de naviguer de façon continue entre plusieurs échelles de visualisation. En naviguant d'une échelle à une autre, les changements de géométrie des objets paraissent continus jusqu'à certains points pour lesquels des changements discontinus plus importants surviennent : suppressions, typification, etc. Certains travaux parmi lesquels (Van Kreveld, 2001; Merrick *et al.*, 2007) ont pour objectif de rendre ces changements discrets plus continus de façon artificielle afin de fluidifier la visualisation de ces changements d'échelle.

L'amplitude du changement d'échelle n'est pas le seul facteur influençant l'utilisation d'opérations discrète ou continu. Nous présentons maintenant en quoi le type d'objet influence aussi cette utilisation.

Deuxième facteur : le type d'objet

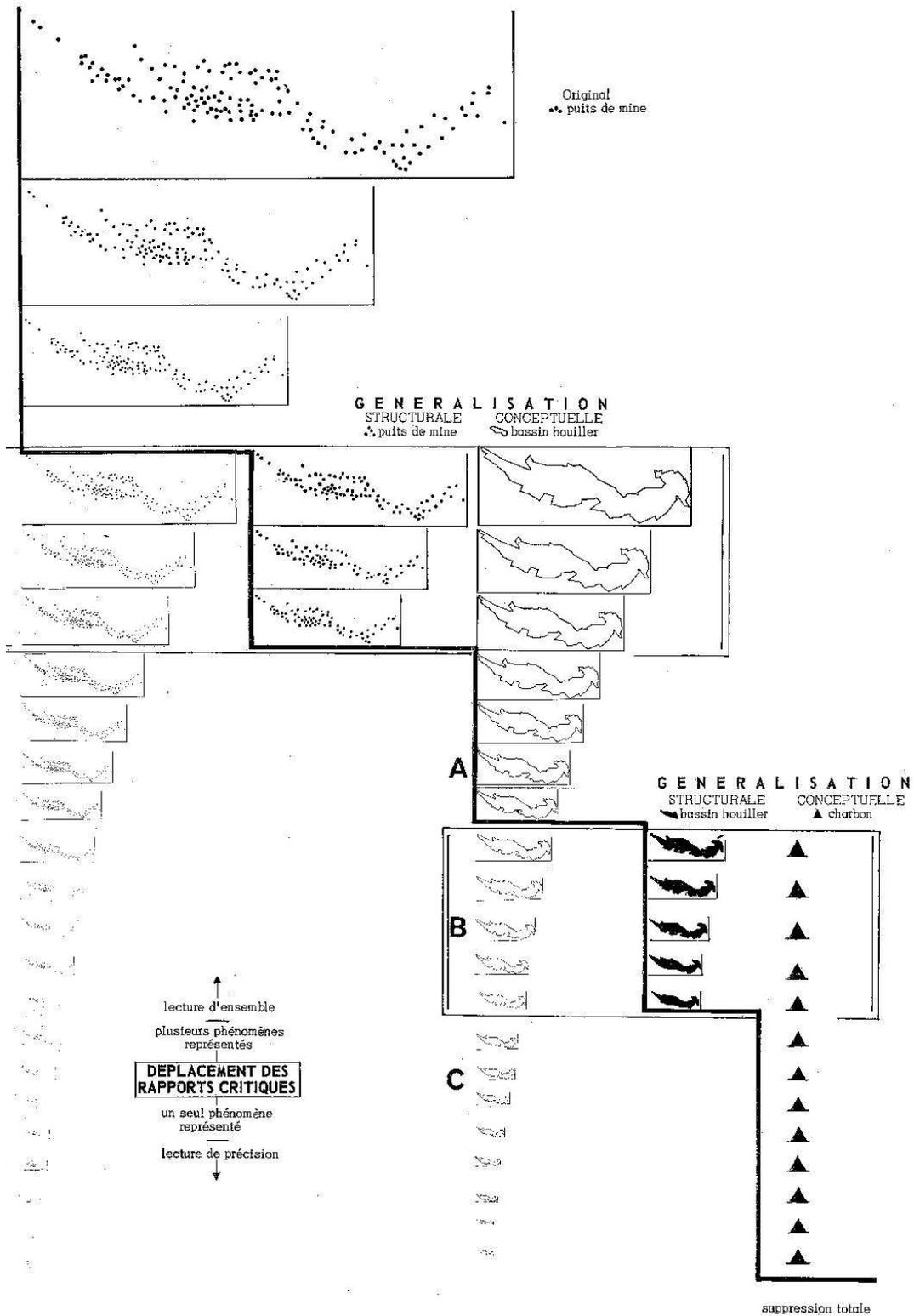


FIGURE 2.16 – Exemple d’opérations continues, discrètes et sur les classes pour la représentation de mines. (Bertin, 1967, p. 301)

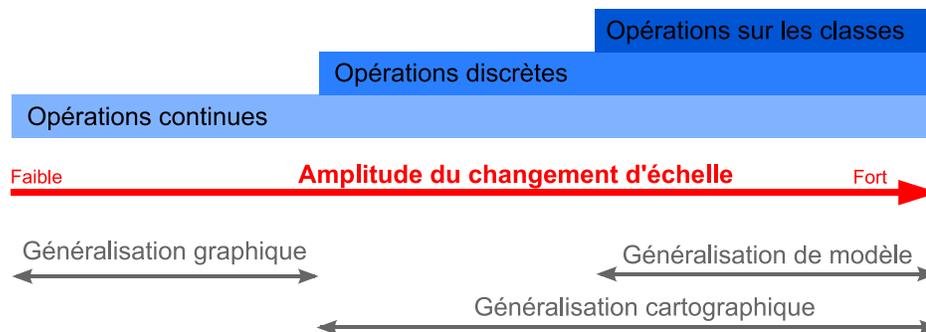


FIGURE 2.17 – Relation entre amplitude du changement d'échelle, types d'opérations et types de généralisation

Le type d'un objet influence le type des opérations nécessaires à sa généralisation. Selon leur type, la généralisation des objets géographiques nécessite plutôt des opérations discrètes ou continues. (Harrie et Sarjakoski, 2002, p. 244) introduit la distinction entre deux types d'objets :

- les **objets rigides** (ou durs), qui ont plutôt tendance à être généralisés avec des opérations discrètes,
- et les **objets élastiques** (ou déformables), qui ont plutôt tendance à être généralisés avec des opérations continues.

Les objets rigides sont ceux ayant une certaine régularité de forme à préserver (avec des angles droits, des répartitions spécifiques, etc.). Leurs géométries sont souvent composées d'un nombre relativement faible de points. Ce sont souvent des objets géographiques d'origine humaine (bâtiments, réseau d'irrigation, parcelles cadastrales, etc.). Au contraire, les objets élastiques ont des formes plus irrégulières, ce qui leur permet de pouvoir être déformés. Nous pouvons également mentionner que les grands objets auront davantage tendance à être déformés que les petits. En effet, les conflits portant sur les petits objets peuvent plus facilement être résolus par déplacements ou suppressions, alors que les grands objets ont des possibilités de déplacement plus restreintes et peuvent résoudre un conflit local par une déformation locale.

La faculté de certains types d'objets géographiques à être plutôt rigides ou élastiques dépend également de l'importance donnée aux propriétés de forme de ces types d'objets : si l'utilisateur final des données généralisées souhaite davantage préserver la forme des objets d'un type donné (parce qu'il estime que cette information est importante), alors ces objets devront avoir un comportement plus rigide. Également, nous pouvons constater que les propriétés de déformation d'objets sont différentes suivant leur nature. Par exemple, le réseau ferroviaire, du fait de sa forme particulière et des contraintes qui portent sur sa construction (nécessité d'avoir des variations de courbure linéaires), a des contraintes de formes différentes de celles du réseau routier. Cette élasticité des objets géographiques doit donc être paramétrable.

En conclusion, beaucoup d'objets, suivant le type de généralisation cherché, peuvent avoir des comportements tantôt rigides, tantôt élastiques. Par exemple, le réseau routier

de la figure 2.15 subit à la fois des opérations discrètes (suppression de tronçon, typification d'échangeur, etc.) et continues (déformations en divers endroits).

En s'appuyant sur la classification présentée partie 2.1.4.1 page 85, nous pouvons constater que les petits objets sont plutôt rigides, alors que les réseaux et champs sont plutôt élastiques (avec quelques comportements rigides lorsque le changement d'échelle est grand).

Nous venons de présenter deux facteurs influençant l'utilisation d'opérations discrètes et continues lors du processus de généralisation : l'ampleur du changement d'échelle et le type des objets. Cette dualité entre discret et continu n'est pas propre au processus de généralisation. Nous présentons en annexe B page 241 quelques analogies avec des processus de transformation composés eux aussi de transformations discrètes et continues.

Nous avons présenté dans cette partie le fait que le processus de généralisation doit permettre une gestion hybride d'opérations discrètes et continues. Nous présentons maintenant comment ce problème de la gestion hybride des opérations discrètes et continues est pris en compte actuellement dans le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007).

2.2.2.3 Généralisation hybride dans le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007)

Le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) présenté partie 1.3.3 page 62 permet d'orchestrer un processus de généralisation composé d'opérations discrètes : chaque agent s'applique une séquence d'algorithmes lui permettant de changer d'état progressivement pour améliorer sa satisfaction. Cette progression est discontinue : la différence entre deux états successifs est significative.

Plusieurs travaux ont eu pour objectif de permettre l'utilisation d'opérations continues au sein de ce modèle. Par exemple, lors de la généralisation du réseau routier que nous avons évoqué page 72, l'application d'une opérations discrètes (comme par exemple la suppression d'un virage, ou l'écartement d'une succession de virage via l'algorithme *accordéon* présenté figure 1.22 page 44) est suivie de l'application d'une opération continue de diffusion. Cette diffusion a pour but de reconnecter les parties du réseau routier s'étant appliqué des opérations discrètes. Elle est effectuée en déclenchant un algorithme de déformation sur l'agent meso *réseau* lors de l'étape « *je contrôle le résultat de l'activation du composant* » du cycle de vie meso présenté en figure 1.39 page 71. L'algorithme de diffusion utilisé s'appuie sur une modélisation du tronçon à déformer sous forme de *snakes* (Bader et Barrault, 2000). (Legrand *et al.*, 2005) proposent un autre algorithme de diffusion ayant le même objectif mais se basant sur une diffusion à vol d'oiseau (c'est-à-dire isotrope). (Duchêne, 2004, partie D.4.1.2, p. 127) propose également un moyen de gérer des opérations de diffusion via des *agents suiveurs* : ces agents suiveurs sont capables d'amortir des opérations discrètes en déformant leur contour. Cette déformation utilise également l'algorithme de (Bader et Barrault, 2000).

Ces travaux permettent le déclenchement d'opérations continues, mais pour des cas très particuliers (déformations d'objets linéaires). De plus, l'opération de déformation est traitée ici comme une opération discrète subie par l'objet sur lequel elle est appliquée. Son résultat n'est pas toujours contrôlé par l'objet qui la subit. Notre objectif est d'aller plus loin dans l'utilisation d'opérations continues au sein du modèle (Ruas et Duchêne, 2007)

en permettant de conférer aux agents des comportements déformables plus génériques, et contrôlables par eux-mêmes.

Notre objectif est de pouvoir disposer d'un modèle de généralisation hybride capable de gérer les deux types d'opérations. Nous pensons que le mélange d'opérations discrètes et continues pourra permettre d'améliorer le processus de généralisation pour les raisons suivantes :

- une opération discrète est souvent suivie d'une opération continue afin de gérer ses effets de bord (exemple : après une suppression de virage, il faut déformer le réseau routier, après le déplacement d'un cours d'eau, il faut déformer le relief, etc.). Ces opérations continues contribuent à améliorer le résultat de la généralisation.
- il n'est pas possible de savoir a priori si une opération continue peut suffire à obtenir un état satisfaisant des données ou si des opérations discrètes, plus importantes, sont nécessaires. Par exemple, la généralisation de bâtiments d'un îlot peut être effectuée par déformation lorsque la configuration le permet. Dans certains cas, des opérations discrètes (suppressions, agrégations, etc.) sont nécessaires. Ainsi, les opérations discrètes sont utilisées lorsque les opérations continues atteignent leur limite. C'est au système de généralisation de choisir et d'essayer différents types d'opérations (ces choix sont guidés par les contraintes) et d'évaluer leur résultat.
- enfin, comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, certains objets ont des comportements parfois rigides, parfois élastiques (comme par exemple, les réseaux ou les champs). Pour traiter ces objets, il est donc nécessaire de pouvoir gérer les deux types d'opérations.

Ce besoin de mélange entre opérations discrètes et continues est formulé par (Sester, 2005, p.872) :

« Least square adjustment as such can only model continuous changes of objects during generalisation (...). In order to also apply it for discrete changes (...), an underlying model for these changes has to be available that can be introduced in the adjustment process ».

Dans cette partie, nous avons présenté les limites du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) pour la prise en compte des relations objet-champ. Nous avons présenté la nécessité d'étendre ce modèle pour la prise en compte de ce nouveau type de relation, ainsi que pour la gestion d'opérations continues. Dans la partie suivante, nous présentons en quoi les méthodes actuellement disponibles pour effectuer des opérations continues sont limitées pour une utilisation hybride, puis en quoi l'approche agent nous semble pertinente pour notre objectif.

2.3 Vers un modèle de généralisation hybride à base d'agents

Dans cette partie, nous montrons en quoi la mise au point d'un tel modèle de généralisation hybride (c'est-à-dire capable de gérer à la fois des opérations discrètes et continues) est difficile avec les méthodes de déformation existantes. Nous justifions enfin notre choix d'utiliser une méthode de déformation à base d'agents pour permettre une gestion concomitante d'opérations discrètes et continues au sein du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007).

2.3.1 Limites des méthodes de déformation actuelles

Afin de permettre l'utilisation d'opérations continues au sein du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007), nous pouvons proposer de nous baser sur des travaux existants. Dans cette partie, nous présentons des méthodes de déformation issues de divers travaux en généralisation automatique, en géomatique, et en infographie. Nous présentons ensuite en quoi ces méthodes de déformation sont limitées pour une utilisation hybride.

2.3.1.1 Méthodes de déformation

En généralisation automatique : nous avons proposé en partie 1.2.5.4 page 54 de classer les différents travaux en généralisation automatique suivant une dichotomie continu-discontinu. En effet, parmi les travaux présentés, certains considèrent la généralisation comme un processus global de déformation des objets géographiques. Cette déformation est le résultat d'un équilibre entre des contraintes, obtenu par déplacement des points des géométries des objets. Ces travaux, que nous avons présentés en partie 1.2.5.2 page 48, ainsi qu'en partie 1.3.2.2 page 61, s'appuient sur différentes méthodes de résolution qui permettent un calcul des déplacements des points des géométries des objets :

- moindres carrés (Harrie et Sarjakoski, 2002; Sester, 2005),
- éléments finis (Burghardt et Meier, 1997; Højholt, 2000; Bader, 2001; Steiniger et Meier, 2004),
- exploration par escalade (Bundy *et al.*, 1995; Bobrich, 1996; Baeijs, 1998),

Ces méthodes de déformation permettent d'obtenir d'excellents résultats de généralisation graphique. Nous présentons maintenant d'autres méthodes de déformation utilisées en géomatique et en infographie.

En géomatique : plusieurs méthodes de déformation sont issues de travaux de cartographie en anamorphose. Une carte en anamorphose (ou *cartogramme*) donne une représentation déformée de l'espace. Cette déformation a pour but d'exagérer ou d'atténuer la taille de certains objets géographiques. La figure 2.18 donne un exemple d'une carte en anamorphose des États-Unis : la carte de droite est le résultat d'une déformation de la carte de gauche dans le but d'exagérer la taille des états les plus peuplés. De nombreux algorithmes existent pour construire des cartes en anamorphose. (Kocmoud, 1997, chapitre III) présente un état de l'art et une comparaison de ces méthodes. La figure 2.19 présente différents résultats de ces algorithmes. De nombreuses méthodes de déformation cartographique sont disponibles (Tobler, 1986; Cauvin *et al.*, 1989; Kocmoud, 1997; House et Kocmoud, 1998; Cauvin, 1998; Kocmoud et House, 1998; Langlois, 2003; Gastner et Newman, 2004; Inoue et Shimizu, 2006).

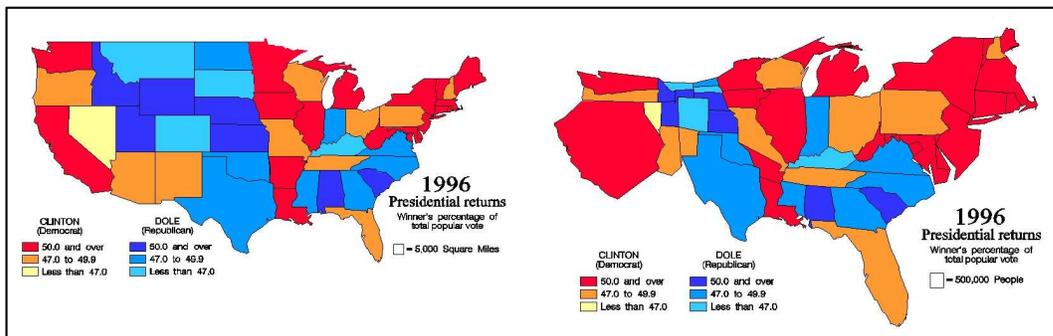


FIGURE 2.18 – Exemple de carte en anamorphose. D'après (Kocmoud, 1997)

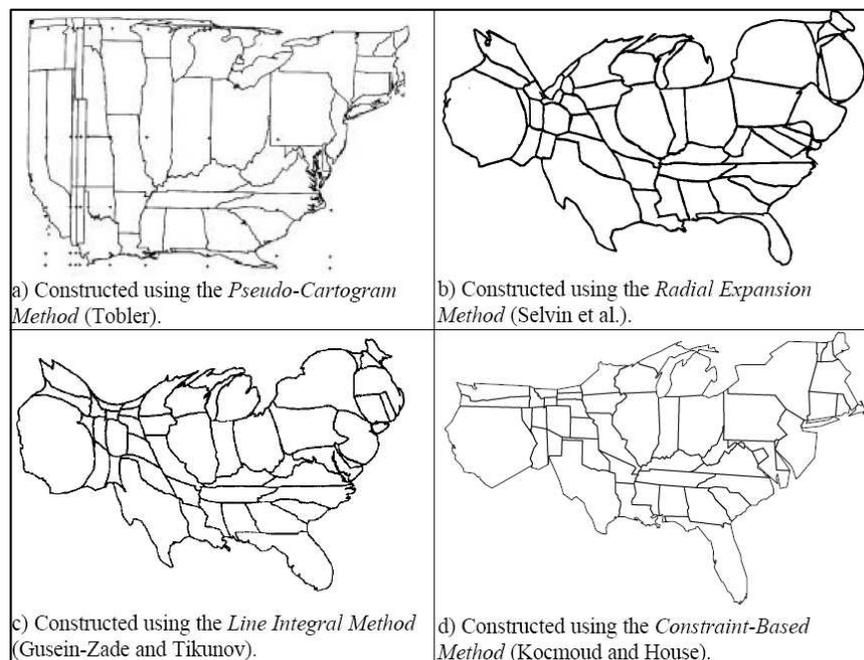


FIGURE 2.19 – Différentes cartes en anamorphose résultant de différentes méthodes. D'après (Kocmoud et House, 1998)

D'autres travaux fournissent des méthodes de déformation appliquées à la cartographie et se basant sur une déformation globale de l'espace modélisé sous la forme d'une grille (Harrie *et al.*, 2002; Edwardes, 2005). (Haunert, 2005) propose une méthode de déformation de l'espace pour permettre la propagation de mises à jour entre deux bases de données appariées. (Champion, 2007) propose une méthode de lissage de modèle numérique de terrain basé sur l'utilisation d'une grille élastique déformée par moindres carrés. Enfin, de nombreux travaux de modélisation en géophysique et géodynamique utilisent des méthodes de déformation basées majoritairement sur la méthode des éléments finis.

En infographie : de nombreux travaux en infographie permettent de simuler le comportement de solides déformables en 3D ou 2D. La plupart de ces méthodes appartiennent à la famille dites des *déformations libres*. Le principe de la déformation libre est de modéliser l'objet à déformer sous la forme d'une géométrie définie par des points de contrôle (parfois disposés suivant un maillage régulier de l'espace). La déformation de l'objet est obtenue en déplaçant ces points de contrôle. La majorité de ces travaux utilisent une modélisation des objets sous forme de splines (NURBS, courbes de Bézier, etc.) (Fisher *et al.*, 2004a; Hahman *et al.*, 2005). Parmi ces travaux, certains se basent sur l'utilisation de points de contrôle composant un squelette de l'objet à déformer (Singh et Kokkevis, 2000; Kry *et al.*, 2002; Guo et Wong, 2005). Les travaux de (Gold et Thibault, 2001) sur le lissage de courbes de niveau se rapprochent de cette méthode.

Enfin, certains travaux de simulation d'objets déformables adoptent une approche mécanique, à base de contraintes. Le principe de ces méthodes est de parvenir à déterminer un équilibre entre des contraintes externes s'appliquant à des parties d'objet et des contraintes internes résistant à ces contraintes externes. Cet équilibre est calculé en utilisant la méthode des éléments finis (Dequidt *et al.*, 2005), des moindres carrés (Schaefer *et al.*, 2006; Masuda *et al.*, 2006) ou d'exploration par escalade (Igarashi *et al.*, 2005).

Synthèse sur les méthodes de déformation : Nous constatons l'existence de nombreuses méthodes de déformation. Ces méthodes peuvent être classées suivant différentes dichotomies :

- déformations libres vs déformations à base de contraintes : dans une déformation libre, l'objet est déformé par manipulation de points de contrôle. Dans une déformation à base de contraintes, la déformation est le résultat d'un équilibre entre des contraintes internes de l'objet qui l'incitent à garder sa forme et des contraintes externes qui l'incitent à se déformer.
- déformations paramétrables vs déformations non paramétrables : la facilité de paramétrer une déformation afin de la contrôler varie d'une méthode à l'autre.
- déformations basées sur différentes méthodes de résolution : méthode des éléments finis, moindres carrés, exploration par escalade, etc.

2.3.1.2 Caractéristiques de méthode de déformation pour une utilisation hybride en généralisation

Nous présentons dans cette partie en quoi les méthodes de déformation présentées précédemment ne sont pas adaptées pour être utilisées conjointement aux opérations discrètes du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007). Nous présentons ensuite les caractéristiques de la méthode cherchée.

Une généralisation hybride pourrait être possible si l'on parvenait à unifier les approches à base d'opérations discrètes et continues, comme proposé dans (Gaffuri, 2006). Un obstacle important à cette unification réside dans le fait qu'une grande partie des travaux de l'approche à base d'opérations continues ne permet que des transformations globales : lors d'une déformation, toutes les données sont traitées d'un seul coup. Ce processus n'est pas composé d'une suite d'opérations continues locales, mais d'une unique opération continue globale. De plus, une grande partie de ces déformations sont calculées en utilisant des méthodes de résolution fermées en une seule passe (comme les moindres carrés et méthode des éléments finis) déclenchées comme des boîtes noires. Des travaux ont tenté de pallier ce défaut en permettant un déclenchement par partie de ces opérations continues globales. (Lemarié, 2003; Thom, 2007) proposent chacun une méthode de découpage de réseaux pour permettre une application locale de l'algorithme proposé par (Bader, 2001). Ces travaux ne permettent cependant pas de résoudre complètement ce problème.

Une solution utilisée actuellement pour permettre une utilisation de ces deux types de généralisation lors de la production de données généralisées est d'utiliser successivement un modèle à base d'opérations discrètes, puis un modèle d'opération continue globale (cf. figure 2.20 a.). Par exemple, le processus de généralisation du réseau routier proposé dans (Lecordix *et al.*, 2005a) se compose d'une généralisation à base d'opérations discrètes basée sur le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007), puis d'une déformation à l'aide de l'algorithme de (Bader, 2001) afin de résoudre les conflits résiduels éventuels par déformation. De même, (Harrie et Sarjakoski, 2002; Sester, 2005) proposent d'appliquer leur modèle de déformation globale après un autre traitement composé d'opérations discrètes (suppression, etc.). (Ai et Van Oosterom, 2002) proposent également un modèle de généralisation de bâtiments composé successivement d'opérations discrètes (suppressions et agrégations), puis d'une déformation globale. Cette proposition qui consiste à appliquer les opérations discrètes préalablement aux opérations continues est également présente dans (Zhang et Harrie, 2006) au sujet du placement automatique des écritures. La raison de cette chronologie entre opérations discrètes et continues provient du fait que les opérations discrètes sont des transformations de premier ordre par rapport aux opérations continues, comme illustré figure B.2 page 243.

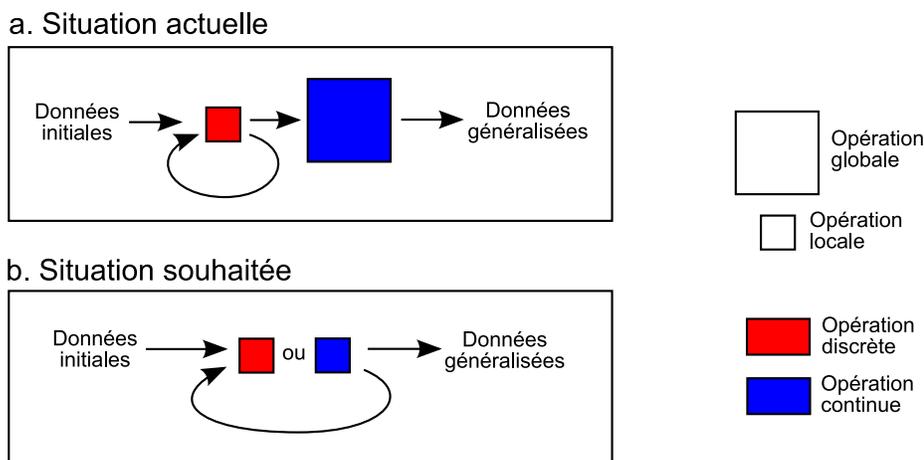


FIGURE 2.20 – Situations actuelle et souhaitée de généralisation hybride

Afin d'utiliser des opérations continues au sein du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007), nous souhaitons disposer d'une méthode de déformation ayant les caractéristiques suivantes :

- **être locale** : la méthode doit permettre une déformation locale d'objets. Par exemple, la déformation d'un champ dans le but de préserver une relation objet-champ ne doit nécessiter la manipulation que d'une partie du champ.
- **être générique** : la méthode doit être applicable à tout type d'objet (ligne, surface, réseau, champ, etc.) et pour tout type de déformation (comme par exemple la déformation de champ),
- **être à base de contraintes paramétrables** : le comportement d'un objet déformé doit être paramétrable par ajout de contraintes de différents types (conférant à l'objet déformé des comportements adaptés). Les paramètres de la déformation doivent être compréhensibles. Pour cela, nous retenons les principes des méthodes de déformations proposées par (Kocmoud et House, 1998; Inoue et Shimizu, 2006).

Aucune des méthodes de déformation présentées précédemment n'a ces caractéristiques. Nous présentons maintenant en quoi l'approche agent nous semble pertinente pour mettre au point une telle méthode de déformation.

2.3.2 Vers un modèle agent de déformation

L'approche agent a pour avantage de permettre la mise au point de modèles ouverts, capables de s'adapter à des domaines d'application toujours plus grands au fur et à mesure de leur perfectionnement. Le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) a été conçu dans ce but : l'ajout de nouveaux composants (mesures, algorithmes, agents, etc.) permet de le rendre applicable à un large éventail de cas de généralisation. Notre objectif est de l'enrichir pour permettre d'y intégrer des opérations continues. L'enjeu de notre travail est de parvenir à faire cohabiter les approches continue et discrète.

Plusieurs travaux proposent d'utiliser une approche agent pour simuler des phénomènes continus qui sont usuellement traités par résolution d'équations différentielles (souvent par la méthode des éléments finis) :

- (Breton *et al.*, 1999) présentent une simulation de phénomènes observés en milieu granulaire (par exemple, un silo à grains). Le comportement du volume de grains est simulé en modélisant chaque grain par un agent.
- (Servat, 2000, chap. 6) propose une méthode de simulation d'écoulement à base d'agents. Le fluide est modélisé sous la forme d'un ensemble d'agents *boules d'eau*. Les équations différentielles régissant l'écoulement sont traduites en terme d'interactions entre agents *boules d'eau*.
- (Dembélé et Cambier, 2006) proposent une simulation de phénomènes d'érosion côtière à base d'agents. Les courants marins et les sédiments sont modélisés sous forme d'agents ponctuels interagissant. Les agents marins se déplacent, et entraînent des agents sédiment.

Ces travaux illustrent le fait que l'approche agent peut être adaptée à des problématiques continues telles que la nôtre. (Breton *et al.*, 1999) insiste sur le fait que l'approche agent permet de traiter des problèmes continus habituellement traités par éléments finis.

Les comportements globaux de nature continue sont discrétisés en se plaçant au niveau microscopique.

Ainsi, l'approche agent peut être envisagée pour notre problématique. Les travaux de (Fritsch, 1997; Baeijs, 1998) adoptent cette approche pour déformer des objets en généralisation. Nous pensons que cette approche peut être utilisée pour permettre une généralisation hybride.

Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté les spécificités des champs en généralisation. Nous avons vu pourquoi ces champs sont à prendre en compte lors du processus de généralisation, pour leur généralisation propre d'une part, et pour la préservation des relations objet-champ d'autre part. Nous avons présenté la nécessité de disposer d'opérations continues pour les champs. Nous avons ensuite montré les limites du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) pour la prise en compte des champs. Nous avons vu que ce modèle ne permettait pas tel qu'il est une prise en compte des relations objet-champ, et qu'il était nécessaire de l'enrichir afin de permettre une meilleure gestion des opérations continues. Enfin, nous avons montré que l'approche agent pouvait être envisagée pour effectuer des déformations.

Notre objectif est donc de permettre la mise au point d'un modèle de généralisation hybride, c'est-à-dire capable de gérer à la fois des opérations discrètes et continues, puis d'appliquer ce modèle à la préservation des relations objet-champ.

Dans la prochaine partie, nous présentons notre proposition pour atteindre cet objectif. Nous proposons un modèle de généralisation permettant d'effectuer des opérations continues de généralisation, puis nous montrons comment l'adapter à la déformation des champs et à la prise en compte des relations objet-champ.

Chapitre 3

Le modèle GAEL

Au chapitre précédent, nous avons montré la nécessité de disposer d'un modèle de généralisation hybride, c'est-à-dire capable de gérer à la fois des opérations discrètes et continues pour la prise en compte des relations objet-champ. Dans ce chapitre, nous présentons le modèle GAEL (Généralisation à base d'Agents ELastiques) mis au point dans le cadre de cette thèse pour répondre à cette nécessité. Ce chapitre est organisé en trois parties :

- en partie 3.1, nous présentons comment le modèle GAEL permet d'obtenir des opérations continues de déformation,
- en partie 3.2, nous présentons comment ce modèle est intégré au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007), et permet une utilisation concomitante d'opérations discrètes et continues,
- en partie 3.3, nous présentons comment le modèle GAEL permet une modélisation des relations objet-champ, et leur prise en compte dans le processus de généralisation.

3.1 Un modèle pour la gestion d'opérations continues

Dans cette partie, nous présentons comment le modèle GAEL permet d'obtenir des opérations continues de généralisation. Cette présentation s'appuie sur l'exemple de la déformation de la figure 3.1. L'objet à déformer dans son état initial est représenté en figure 3.1 a. Nous supposons que nous souhaitons déformer cet objet de façon à avoir une bouche souriante (en demi-cercle) et plus grande, des yeux plus proches l'un de l'autre, tout en préservant au mieux les positions relatives et formes de la bouche, des yeux et de la tête. Le résultat de la déformation que nous obtenons est représenté en figure 3.1 b. Nous expliquons tout au long de cette partie comment ce résultat est obtenu.

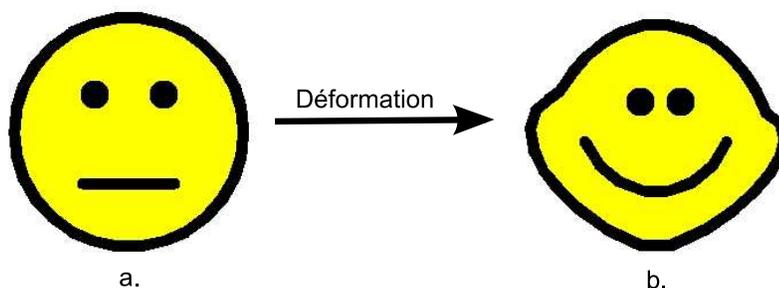


FIGURE 3.1 – Exemple d'objet à déformer : a. l'objet initial ; b. l'objet après déformation

NB : Nous utilisons maintenant principalement le terme de *déformation* pour désigner ces opérations continues. Nous utilisons également le terme d'*agent élastique* pour désigner un objet déformable. Nous justifierons l'utilisation de ce terme, avec en particulier la modélisation d'un objet à déformer sous forme d'agent, en partie 3.2.

Nous présentons tout d'abord les principes sur lesquels se base le modèle GAEL pour permettre des déformations d'objets.

3.1.1 Les principes

Le modèle GAEL permet de gérer des déformations d'objets en se basant sur les trois principes suivants :

- l'utilisation d'un niveau interne à l'objet à déformer appelé **niveau submicro** : ce niveau est le niveau des parties d'objets. Il complète la hiérarchie macro/meso/micro pour permettre la déformation d'objets au sein du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007). Les objets du niveau submicro sont des parties de l'objet à déformer. Ils sont construits par décomposition de l'objet. Un objet submicro est composé d'un faible nombre de points composant la géométrie de l'objet (par exemple, un segment ou un triangle). Il possède des caractères (par exemple, l'orientation et la longueur d'un segment),
- l'utilisation de **contraintes submicro** : ces contraintes portent sur les objets du niveau submicro. Elles incitent les points des objets submicro à se déplacer. Par exemple, un point appartenant à un segment dont la longueur est contrainte est incité à se déplacer pour permettre au segment d'atteindre une longueur but.
- l'utilisation d'**agents-point** : les points composant l'objet à déformer sont modélisés comme des agents : ils se déplacent de façon autonome pour permettent d'obtenir une déformation de l'objet. Le but de chaque agent-point est d'atteindre une position d'équilibre entre ses contraintes, c'est-à-dire les contraintes des objets submicro auxquels il appartient. Il cherche à homogénéiser l'état de violation de ses contraintes. Un point pouvant appartenir à plusieurs objets submicro contraints, les points voisins interagissent. Le déplacement d'un point peut entraîner le déplacement de ses points voisins. La déformation se propage de point en point.

Nous présentons maintenant plus en détail d'une part, le niveau submicro (cf. partie 3.1.2), puis les contraintes de ce niveau (cf. partie 3.1.3), et enfin les agents-point et leur mécanisme d'activation (cf. partie 3.1.4).

3.1.2 Le niveau submicro

3.1.2.1 Nécessité d'un niveau interne

Sur l'exemple de la figure 3.1, une déformation de l'objet a été obtenue de façon à satisfaire des contraintes qui traduisent notre but : avoir une bouche en demi-cercle et des yeux rapprochés, tout en préservant au mieux certains critères de forme de l'objet (forme de la tête, position relative des yeux, de la bouche et de la tête). Pour permettre d'obtenir un tel résultat, nous nous appuyons sur les éléments suivants :

- des contraintes qui incitent l'objet à changer de forme, que nous appellerons **contraintes de déformation** (comme par exemple des contraintes qui forcent les yeux à se rapprocher),

- des contraintes qui incitent l’objet à garder sa forme, que nous appellerons **contraintes de préservation de forme**,
- et un **équilibre** entre contraintes de préservation de forme et de déformation. La déformation voulue est obtenue lorsque cet équilibre est atteint.

Les contraintes de déformation et de préservation de forme sont portées par des parties de l’objet ; l’équilibre entre contraintes est également atteint en modifiant localement la forme de l’objet. La prise en compte d’opérations de déformation nécessite donc de raisonner au niveau des parties de l’objet à déformer. Par exemple, la déformation d’une bande de caoutchouc soumise à un étirement est le résultat du déplacement des molécules composant la bande pour atteindre un équilibre entre des contraintes de préservation de forme (qui sont l’effet des propriétés physiques du caoutchouc) et des contraintes de déformation (qui sont l’effet de l’étirement de la bande de caoutchouc au niveau de ses deux parties extrêmes).

Nous avons vu que le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) permet de gérer des contraintes et des opérations au niveau des populations d’objets (le niveau *macro*), des groupes d’objets (le niveau *meso*) et des objets individuels (le niveau *micro*). Afin de permettre des opérations de déformation, il est nécessaire d’ajouter un niveau interne aux objets. En effet, si les opérations discrètes peuvent être déclenchées en considérant les niveaux des objets et groupes d’objets, les opérations continues nécessitent de considérer un niveau interne aux objets. Nous appelons ce niveau le niveau **submicro**¹. Le rôle du niveau submicro est de compléter la hiérarchie macro/meso/micro (cf. figure 3.2) afin de permettre d’explicitier des contraintes sur les parties d’un objet pour le rendre déformable. Nous présentons maintenant des objets du niveau submicro sur lesquels nous proposons de nous appuyer.



FIGURE 3.2 – Hiérarchie entre les différents niveaux macro, meso, micro et submicro

3.1.2.2 Les objets du niveau submicro

Une déformation telle que celle de la figure 3.1 résulte d’un équilibre entre contraintes de déformation et de préservation de forme. Afin d’explicitier ces contraintes, nous proposons de nous appuyer sur une décomposition de l’objet à déformer en objets plus petits que nous appelons *objets submicro*. Un objet submicro est un ensemble composé d’un faible nombre de points dont la configuration peut être contrainte (par exemple, deux points composant un segment, ou trois points composant un triangle sont des objets submicro dont respectivement la distance et l’aire peuvent être contraintes). Les objets submicro portent les contraintes de déformation et de préservation de forme.

1. Le terme *submicro* a été choisi pour souligner que ce niveau concerne le niveau interne des objets. Il reste proche de la terminologie macro/meso/micro du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007). Le terme *nano* aurait aussi pu être utilisé mais nous a semblé moins pertinent. Le terme *moléculaire* (proposé par Patrick Revell) aurait permis de suggérer un parallèle entre les objets submicro, qui sont composés de points, et molécules qui sont composées d’atomes.

La figure 3.3 présente le modèle de données que nous proposons. Un agent élastique, c'est-à-dire un objet auquel nous souhaitons appliquer une déformation, est décomposé en objets submicro. Un objet submicro est composé d'agents-point et porte des contraintes submicro. Nous proposons de nous appuyer sur les objets submicro suivants :

- des **points singletons**, objets submicro composés d'un unique agent-point,
- des **segments**, composés de deux agents-point,
- des **angles**, composés de trois points, dont l'un est le sommet,
- et des **triangles**, composés de trois points.

Cette liste d'objets submicro n'est pas exhaustive. Il est possible d'en ajouter d'autres types selon les besoins.

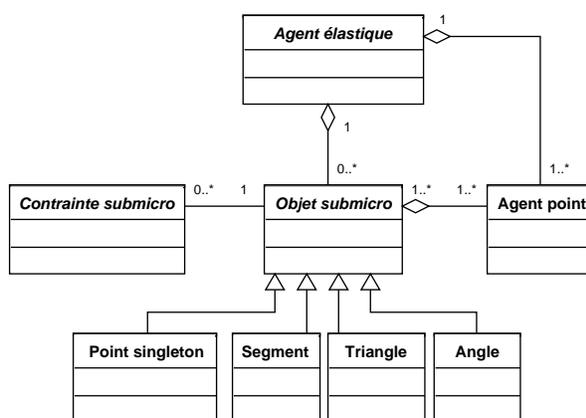


FIGURE 3.3 – Modèle de données pour la décomposition d'un agent élastique en objets submicro composés d'agents-point et portant des contraintes submicro

La décomposition d'un agent élastique en objets submicro le composant permet de s'appuyer sur des objets de son niveau interne pour le rendre déformable. Par exemple, pour rendre l'objet de la figure 3.1 a. déformable, nous proposons de le décomposer en points, segments et triangles (cf. figure 3.4). Les caractéristiques de la déformation voulue sont traduites sous la forme de contraintes portées par les objets submicro, que nous présentons maintenant.

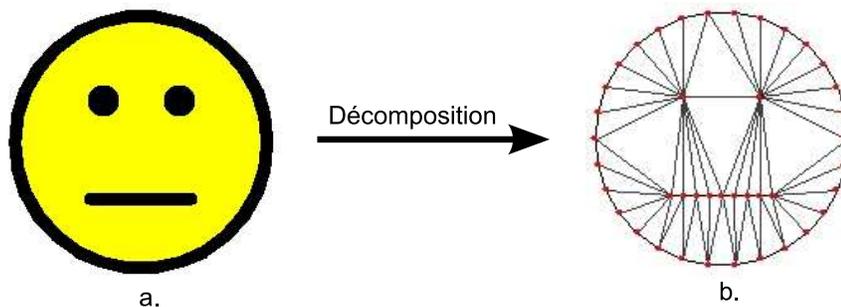


FIGURE 3.4 – Décomposition de l'objet à déformer sous forme d'objets submicro

3.1.3 Les contraintes submicro

Nous présentons dans cette partie la modélisation des contraintes du niveau submicro. Nous distinguons deux types de contraintes :

- les *contraintes internes submicro* qui portent sur un objet submicro,
- puis les *contraintes relationnelles submicro* qui portent sur une relation entre deux objets submicro.

Pour chacun de ces deux types de contrainte, nous présentons plusieurs propositions de contraintes.

3.1.3.1 Les contraintes internes submicro

La figure 3.5 présente la modélisation des contraintes internes submicro. Une contrainte interne submicro porte sur un caractère d'un objet submicro composé d'agents-point.

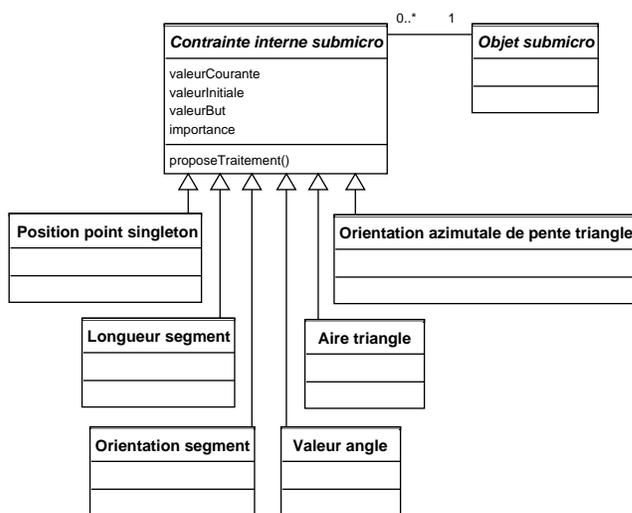


FIGURE 3.5 – Les contraintes submicro

Une contrainte interne submicro est caractérisée par les attributs suivants :

- sa **valeur courante** : c'est la valeur en cours de processus du caractère contraint de l'objet submicro. Cette valeur n'est pas forcément qu'un simple nombre.
- sa **valeur initiale** : c'est la valeur initiale du caractère contraint, calculée comme la valeur courante,
- sa **valeur but** : c'est la valeur visée du caractère,
- son **importance** : cette valeur traduit l'importance relative de cette contrainte à être satisfaite par rapport aux autres. C'est un nombre réel non nul.

La méthode proposeTraitement Cette méthode prend comme paramètre un agent-point (qui appartient à l'objet submicro contraint) ainsi qu'un nombre réel α (α est dans l'intervalle $[0, 1]$). Elle fournit à l'agent-point un vecteur de déplacement lui permettant d'atteindre une position pour laquelle la contrainte submicro est mieux satisfaite. Plus précisément :

- lorsque α vaut 1, ce déplacement permet à l'agent-point de satisfaire totalement la contrainte,
- lorsque α est nul, ce déplacement est nul,
- et pour d'autres valeur de α , ce déplacement permet à l'agent-point de réduire l'écart entre valeurs courante et but de la contrainte d'un facteur α .

Une variation de α entre 0 et 1 fait varier la position de l'agent-point obtenue en effectuant le déplacement entre sa position initiale et une position but donnée par la contrainte. L'ensemble des positions occupées par le point lorsque α varie entre 0 et 1 représente une trajectoire du point entre sa position courante et une position but pour laquelle la contrainte est totalement satisfaite (cf. figure 3.6). Précisons que cette trajectoire n'est pas forcément rectiligne. Par exemple, pour une contrainte portant sur l'orientation d'un segment, cette trajectoire est un arc de cercle pour chacun des deux points composant le segment. Nous verrons en partie 3.1.4.2 comment cette méthode permet à l'agent-point de calculer son état d'équilibre, ainsi qu'un déplacement lui permettant de progresser a priori vers cet équilibre.

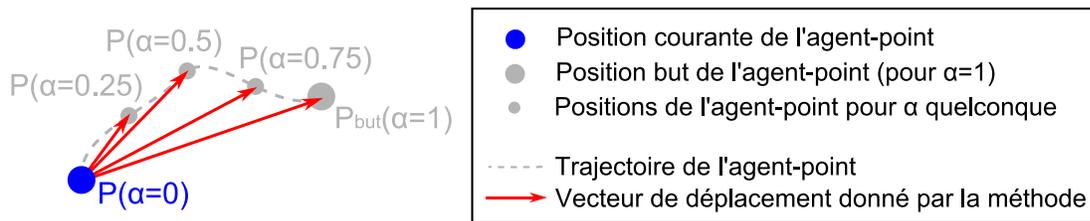


FIGURE 3.6 – Exemple de trajectoire d'un agent-point P lorsque α varie de 0 à 1

La modélisation des contraintes internes submicro est volontairement proche de celle des contraintes du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) présentée en partie 1.3.3.2 page 63. A la différence, une contrainte submicro n'a pas de valeur de satisfaction, ni de priorité. Nous reviendrons sur les raisons de cette différence en partie 4.2.1.3.

La figure 3.5 présente plusieurs exemples de classes de contraintes submicro portant chacune sur un caractère d'objet submicro particulier. Nous présentons maintenant ces différentes classes de contraintes internes submicro.

3.1.3.2 Propositions de contraintes internes submicro

Nous présentons dans cette partie différentes classes de contraintes internes submicro. Pour chacune d'entre elles, nous précisons comment sont calculées les valeurs du caractère submicro contraint, ainsi que le déplacement proposé par la contrainte. Ce déplacement dépend du paramètre α dont nous avons décrit le rôle précédemment.

Contrainte de position de point singleton Cette contrainte porte sur un objet submicro point singleton (c'est-à-dire un objet composé d'un unique agent-point). Elle contraint le point à avoir une position but qui n'est pas forcément sa position initiale. La valeur contrainte est la distance du point à sa position but (cette distance est contrainte à être nulle). La figure 3.7 présente cette contrainte : l'agent-point P est représenté en bleu. Le point gris est sa position but. Le vecteur rouge représente un déplacement proposé à

l'agent-point P par la contrainte. L'effet de cette contrainte est comparable à celui d'un ressort de longueur nulle qui relierait l'agent-point à une localisation but.

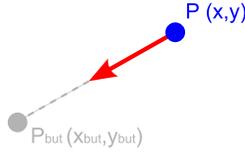


FIGURE 3.7 – Contrainte de position de point singleton

Le déplacement $\vec{d}(\Delta X, \Delta Y)$ proposé par la contrainte à P vaut :

$$\begin{aligned}\vec{d} &= \alpha \overrightarrow{PP_{but}} \\ \Delta X &= \alpha(x_{but} - x) \\ \Delta Y &= \alpha(y_{but} - y)\end{aligned}$$

où (x, y) et (x_{but}, y_{but}) sont respectivement les coordonnées courantes et but de P .

Contrainte de longueur de segment Cette contrainte porte sur un objet submicro de type segment. Elle permet de contraindre la longueur d'un segment à avoir une valeur but qui n'est pas forcément sa longueur initiale. La figure 3.8 présente cette contrainte. Les deux agents-point sont représentés en bleu. Les points gris représentent la position que pourraient avoir chacun de ces points pour satisfaire complètement la contrainte. Nous supposons en figure 3.8 que le segment est trop court. Les vecteurs rouges représentent des déplacements proposés à chacun des agents-point par la contrainte. Les deux points se partagent le chemin à faire pour obtenir l'allongement souhaité. L'effet de cette contrainte est comparable à celui d'un ressort qui relierait au repos les deux agents-point du segment.

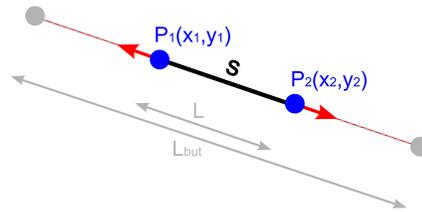


FIGURE 3.8 – Contrainte de longueur de segment

Le déplacement $\vec{d}_1(\Delta X_1, \Delta Y_1)$ proposé par la contrainte à l'agent-point P_1 vaut :

$$\begin{aligned}\vec{d}_1 &= \alpha \frac{L_{but} - L}{2L} \overrightarrow{P_1 P_2} \\ \Delta X_1 &= \alpha \frac{L_{but} - L}{2L} (X_1 - X_2) \\ \Delta Y_1 &= \alpha \frac{L_{but} - L}{2L} (Y_1 - Y_2)\end{aligned}$$

où (X_1, Y_1) et (X_2, Y_2) sont respectivement les coordonnées des points P_1 et P_2 , L_{but} désigne la longueur but du segment et L sa longueur courante. Le déplacement $\vec{d}_2(\Delta X_2, \Delta Y_2)$ proposé à l'agent-point P_2 est l'opposé de celui proposé à l'agent-point P_1 .

Contrainte d'orientation de segment Cette contrainte porte sur un objet submicro de type segment. Elle permet de contraindre l'orientation d'un segment à avoir une valeur but qui n'est pas forcément son orientation initiale. La figure 3.9 présente cette contrainte. Les deux agents-point sont représentés en bleu. Les points gris représentent une position que pourraient avoir chacun de ces points pour satisfaire complètement la contrainte. Les vecteurs rouges représentent des déplacements proposés à chacun des agents-point par la contrainte. L'effet de cette contrainte est comparable à celui d'un ressort d'angle qui force le segment à pivoter autour de son centre pour avoir une certaine orientation but.

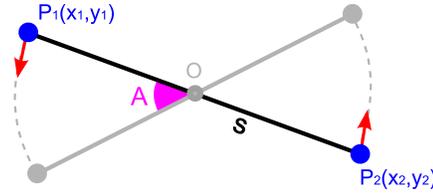


FIGURE 3.9 – Contrainte d'orientation de segment

Les déplacements $\vec{d}_1(\Delta X_1, \Delta Y_1)$ et $\vec{d}_2(\Delta X_2, \Delta Y_2)$ proposés par la contrainte respectivement aux agents-point P_1 et P_2 valent :

$$\vec{d}_1 = R_{\frac{\alpha A}{2}}(\overrightarrow{OP_1}) - \overrightarrow{OP_1}$$

$$\Delta X_1 = 1/2(X_2 - X_1) + \cos\left(\frac{\alpha A}{2}\right)(X_1 - X_2) + \sin\left(\frac{\alpha A}{2}\right)(Y_1 - Y_2)$$

$$\Delta Y_1 = 1/2(Y_2 - Y_1) - \sin\left(\frac{\alpha A}{2}\right)(X_1 - X_2) + \cos\left(\frac{\alpha A}{2}\right)(Y_1 - Y_2)$$

et

$$\vec{d}_2 = R_{\frac{\alpha A}{2}}(\overrightarrow{OP_2}) - \overrightarrow{OP_2}$$

$$\Delta X_2 = 1/2(X_1 - X_2) + \cos\left(\frac{\alpha A}{2}\right)(X_2 - X_1) + \sin\left(\frac{\alpha A}{2}\right)(Y_2 - Y_1)$$

$$\Delta Y_2 = 1/2(Y_1 - Y_2) - \sin\left(\frac{\alpha A}{2}\right)(X_2 - X_1) + \cos\left(\frac{\alpha A}{2}\right)(Y_2 - Y_1)$$

où O est le milieu du segment P_1P_2 , $R_{\frac{\alpha A}{2}}$ la rotation d'angle $\frac{\alpha A}{2}$, (X_1, Y_1) et (X_2, Y_2) les coordonnées respectives des points P_1 et P_2 , et A l'écart entre l'orientation courante et l'orientation but du segment (A est dans l'intervalle $[-\pi, \pi[$).

Contrainte de valeur d'angle Cette contrainte porte sur un objet submicro de type angle. Elle permet de contraindre la valeur de cet angle à avoir une valeur but qui n'est pas forcément sa valeur initiale. La figure 3.10 présente cette contrainte. Les trois agents-point sont représentés en bleu. Les points gris représentent des positions que pourraient avoir chacun de ces points pour satisfaire complètement la contrainte (nous supposons ici que

la valeur de l'angle est plus petite que la valeur but). Les vecteurs rouges représentent des déplacements proposés à chacun des agents-point par la contrainte. L'effet de cette contrainte est comparable à celui d'un ressort angulaire entre les segments PP_1 et PP_2 .

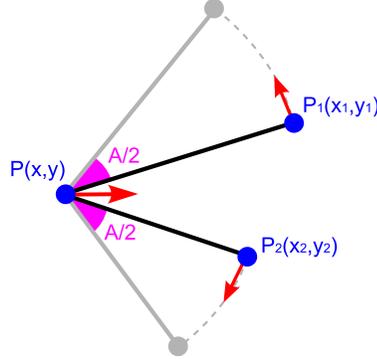


FIGURE 3.10 – Contrainte de valeur d'angle

Les déplacements $\vec{d}_1(\Delta X_1, \Delta Y_1)$, $\vec{d}_2(\Delta X_2, \Delta Y_2)$ et $\vec{d}(\Delta X, \Delta Y)$ proposés par la contrainte respectivement aux agents-point P_1 , P_2 et P valent :

$$\vec{d}_1 = R_{\frac{\alpha A}{2}}(\overrightarrow{PP_1}) - \overrightarrow{PP_1}$$

$$\Delta X_1 = X - X_1 + \cos(\alpha A/2)(X_1 - X) - \sin(\alpha A/2)(Y_1 - Y)$$

$$\Delta Y_1 = Y - Y_1 + \sin(\alpha A/2)(X_1 - X) + \cos(\alpha A/2)(Y_1 - Y)$$

,

$$\vec{d}_2 = R_{\frac{\alpha A}{2}}(\overrightarrow{PP_2}) - \overrightarrow{PP_2}$$

$$\Delta X_2 = X - X_2 + \cos(\alpha A/2)(X_2 - X) - \sin(\alpha A/2)(Y_2 - Y)$$

$$\Delta Y_2 = Y - Y_2 + \sin(\alpha A/2)(X_2 - X) + \cos(\alpha A/2)(Y_2 - Y)$$

et

$$\vec{d} = \frac{\vec{d}_1 + \vec{d}_2}{2}$$

$$\Delta X = -\frac{\Delta X_1 + \Delta X_2}{2}$$

$$\Delta Y = -\frac{\Delta Y_1 + \Delta Y_2}{2}$$

où $R_{\frac{\alpha A}{2}}$ est la rotation d'angle $\frac{\alpha A}{2}$, (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) et (X, Y) sont respectivement les coordonnées des points P_1 , P_2 et P , A désigne l'écart entre la valeur courante et la valeur but de l'angle.

Contrainte d'aire de triangle Cette contrainte porte sur un objet submicro de type triangle. Elle permet de contraindre l'aire de ce triangle à avoir une valeur but qui n'est pas forcément sa valeur initiale. La figure 3.11 présente cette contrainte. Les trois agents-point sont représentés en bleu. Les points gris représentent des positions que pourraient avoir chacun des points pour satisfaire complètement la contrainte. Nous supposons sur cette figure que la valeur courante de l'aire est plus petite que la valeur but. Les vecteurs rouges représentent des déplacements proposés à chacun des agents-point par la contrainte.

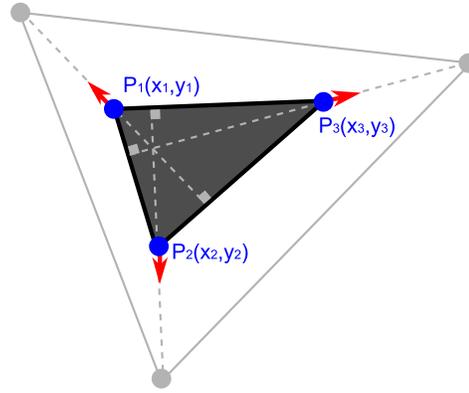


FIGURE 3.11 – Contrainte d'aire de triangle

Le déplacement $\vec{d}_1(\Delta X_1, \Delta Y_1)$ proposé par la contrainte à l'agent-point P_1 vaut :

$$\Delta X_1 = -\frac{2\alpha \Delta Aire (Y_3 - Y_2)}{3P_2 P_3^2} \quad (3.1)$$

$$\Delta Y_1 = \frac{2\alpha \Delta Aire (X_3 - X_2)}{3P_2 P_3^2} \quad (3.2)$$

où (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) et (X_3, Y_3) sont les coordonnées respectives des agents-point P_1 , P_2 et P_3 , $\Delta Aire$ désigne la différence entre l'aire but et l'aire courante du triangle. Nous supposons que les points P_1 , P_2 et P_3 sont ordonnés dans le sens direct. Le déplacement est dirigé selon la hauteur du triangle. Les détails de ce calcul sont données en annexe C page 245. Les déplacements $\vec{d}_2(\Delta X_2, \Delta Y_2)$ et $\vec{d}_3(\Delta X_3, \Delta Y_3)$ proposés par la contrainte respectivement aux agents-point P_2 et P_3 sont calculés de façon analogue.

Contrainte de préservation de distance au centre de gravité de triangle Cette contrainte porte sur un objet submicro de type triangle. Elle permet de contraindre chaque point du triangle à préserver sa distance au centre de gravité du triangle : sa distance but au centre de gravité du triangle est égale à la distance initiale. Cette contrainte contribue à préserver la forme du triangle. La figure 3.12 présente cette contrainte. Les trois agents-point sont représentés en bleu. Les points gris représentent des positions que pourraient avoir chacun des points pour satisfaire complètement la contrainte. Les vecteurs rouges représentent des déplacements proposés à chacun des agents-point par la contrainte.

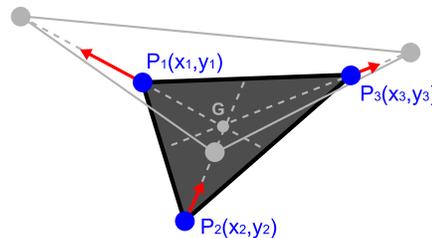


FIGURE 3.12 – Contrainte de préservation de distance au centre de gravité de triangle

Le déplacement $\vec{d}_1(\Delta X_1, \Delta Y_1)$ proposé par la contrainte à l'agent-point P_1 du triangle vaut :

$$\begin{aligned}\vec{d}_1 &= \alpha \frac{P_1G - D_{1ini}}{P_1G} \overrightarrow{P_1G} \\ \Delta X_1 &= \alpha \frac{P_1G - D_{1ini}}{P_1G} (X_G - X_1) \\ \Delta Y_1 &= \alpha \frac{P_1G - D_{1ini}}{P_1G} (Y_G - Y_1)\end{aligned}$$

où (X_1, Y_1) et (X_G, Y_G) sont les coordonnées respectives de l'agent-point P_1 et du centre de gravité du triangle G , D_{1ini} désigne la distance initiale entre le point P_1 et G . Les vecteurs $(\Delta X_2, \Delta Y_2)$ et $(\Delta X_3, \Delta Y_3)$ de déplacement respectifs des points P_2 et P_3 sont calculés de façon analogue.

Contrainte d'orientation azimutale de pente de triangle Cette contrainte porte sur un objet submicro de type triangle. Elle peut être portée par des triangles pour lesquels un vecteur de pente peut être défini (c'est-à-dire ceux dont les points ont une valeur d'altitude, et qui ne sont pas horizontaux). Elle permet de contraindre l'orientation azimutale (c'est-à-dire dans le plan horizontal) du vecteur de pente du triangle à avoir une certaine valeur (pas forcément la valeur initiale). La figure 3.13 présente cette contrainte. Les trois agents-point sont représentés en bleu. Les vecteurs orange et gris représentent respectivement les directions courante et but de la pente du triangle. A est la valeur de l'angle entre ces deux vecteurs. Les points gris représentent des positions que pourraient avoir chacun des points pour satisfaire complètement la contrainte (nous supposons ici que la valeur courante de l'aire est plus petite que la valeur but). Les vecteurs rouges représentent des déplacements proposés à chacun des agents-point par la contrainte. Cette contrainte incite le triangle à pivoter autour d'un axe vertical passant par son centre d'une valeur A .

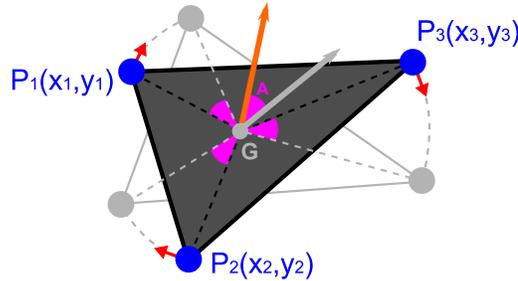


FIGURE 3.13 – Contrainte d'orientation azimutale de triangle

Le déplacement $\vec{d}_1(\Delta X_1, \Delta Y_1)$ proposé par la contrainte à l'agent-point P_1 vaut :

$$\begin{aligned}\vec{d}_1 &= R_{\alpha A}(\overrightarrow{GP_1}) - \overrightarrow{GP_1} \\ \Delta X_1 &= X_G - X_1 + \cos(\alpha A)(X_1 - X_G) + \sin(\alpha A)(Y_1 - Y_G) \\ \Delta Y_1 &= Y_G - Y_1 - \sin(\alpha A)(X_1 - X_G) + \cos(\alpha A)(Y_1 - Y_G)\end{aligned}$$

où $R_{\alpha A}$ est la rotation d'angle αA , (X_1, Y_1) et (X_G, Y_G) sont les coordonnées respectives de l'agent-point P_1 et du centre de gravité G du triangle, A est l'écart d'orientation. Les

vecteurs $(\Delta X_2, \Delta Y_2)$ et $(\Delta X_3, \Delta Y_3)$ de déplacement respectifs des points P_2 et P_3 sont calculés de façon analogue.

Autres contraintes internes submicro L'ensemble des contraintes internes submicro présentées ici n'est pas exhaustif. Beaucoup d'autres peuvent être mises au point suivant le type de déformation voulu. Nous verrons en particulier comment ajouter des contraintes particulières appliquées au traitement des relations objet-champ. Nous présentons maintenant un autre type de contrainte du niveau submicro : les contraintes relationnelles.

3.1.3.3 Les contraintes relationnelles submicro

Les contraintes submicro présentées précédemment portent sur un caractère d'un objet submicro. Il existe des cas pour lesquels il est nécessaire de spécifier des contraintes portant non plus sur un seul objet submicro, mais sur une relation entre deux. Par exemple, il peut être utile de contraindre deux objets submicro de type segment à être distants l'un de l'autre de plus d'une certaine distance but. Aussi, pour la déformation de la figure 3.1, une contrainte porte sur la distance séparant les points des yeux de l'objet à déformer. Nous présentons maintenant comment sont modélisées ces contraintes portant sur la relation entre deux objets submicro.

La modélisation des contraintes relationnelles submicro est présentée en figure 3.14. Une contrainte relationnelle porte sur deux objets submicro. Elle porte les mêmes attributs et méthodes que la classe *contrainte interne submicro* présentée figure 3.5 page 113. La méthode *proposeTraitements* a le même rôle que celle de la classe *contrainte interne submicro*, à la différence qu'elle s'applique à tous les points composant chacun des deux objets submicro concernés par la contrainte. La classe *contrainte relationnelle submicro* correspond à la transposition au niveau submicro des contraintes relationnelles micro du modèle de (Duchêne, 2004) présentées en figure 1.40 page 73.

Nous proposons maintenant des contraintes relationnelles submicro que nous avons mise au point. Elles sont présentés sur le diagramme UML en figure 3.14.

3.1.3.4 Propositions de contraintes relationnelles submicro

Contrainte relationnelle de distance minimale entre points Cette contrainte porte sur une relation entre deux points. Elle contraint la distance entre les deux points à être supérieure à un certain seuil D_{mini} . La figure 3.15 présente cette contrainte : les agents-point P_1 et P_2 composant la relation sont représentés en bleu. Le halo gris représente un cercle centré sur chacun des deux points et dont le rayon est égal à D_{mini} . La contrainte est totalement respectée lorsqu'aucun des deux points n'appartient au halo de l'autre. Les vecteurs rouges représentent des déplacements proposés à chacun des deux agents-point par sa contrainte relationnelle. Nous supposons sur cette figure que la distance courante entre les deux points est inférieure à D_{mini} . Lorsque la distance entre les deux points est supérieure à cette distance cherchée, le déplacement proposé par la contrainte est nul. L'effet de cette contrainte est comparable à celui d'une zone de répulsion entre deux objets : les objets submicro se repoussent lorsqu'ils deviennent trop proches, et cette répulsion est d'autant plus forte qu'ils sont proches l'un de l'autre (comme des ressorts).

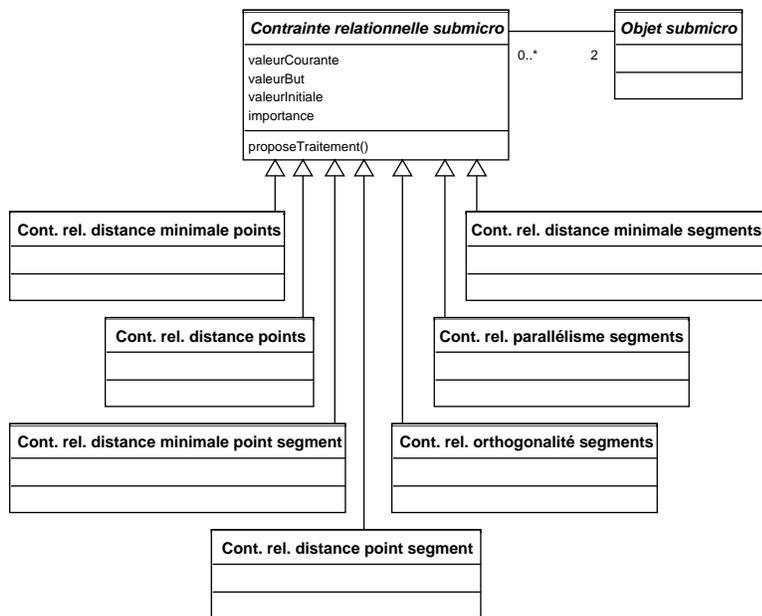


FIGURE 3.14 – Contraintes relationnelles submicro

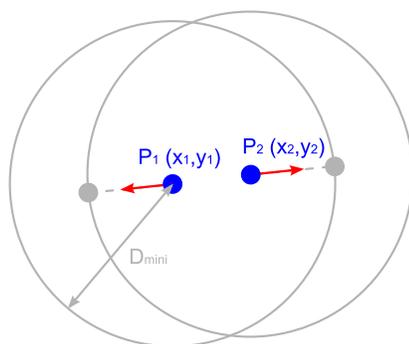


FIGURE 3.15 – Contrainte de distance minimale entre points

Le déplacement $\vec{d}_1(\Delta X_1, \Delta Y_1)$ proposé par la contrainte à P_1 vaut :

– si $P_1 P_2 \geq D_{mini}$:

$$\vec{d}_1 = \vec{0}$$

– sinon, lorsque $P_1 P_2 < D_{mini}$:

$$\vec{d}_1 = \alpha \frac{D_{mini} - P_1 P_2}{2P_1 P_2} \vec{P_2 P_1}$$

$$\Delta X_1 = \alpha \frac{D_{mini} - P_1 P_2}{2P_1 P_2} (X_1 - X_2)$$

$$\Delta Y_1 = \alpha \frac{D_{mini} - P_1 P_2}{2P_1 P_2} (Y_1 - Y_2)$$

où (x_1, y_1) et (x_2, y_2) sont respectivement les coordonnées de P_1 et P_2 , et D_{mini} désigne la distance minimale à respecter. Le déplacement $(\Delta X_2, \Delta Y_2)$ proposé par la contrainte à P_2 vaut $(-\Delta X_1, -\Delta Y_1)$.

Contraintes relationnelles de distance entre points Cette contrainte porte sur une relation entre deux points. Elle contraint la distance entre les deux points à avoir une certaine valeur qui n'est pas forcément sa valeur initiale. La valeur contrainte est la distance entre les deux points. Contrairement à la contrainte précédente qui n'a pas d'effet lorsque les deux points sont suffisamment éloignés l'un de l'autre, celle-ci incite non seulement les points à s'éloigner lorsqu'ils sont trop proches, mais aussi à se rapprocher lorsqu'ils sont trop éloignés.

Cette contrainte a le même effet sur les deux points composant la relation que celle de longueur de segment présentée page 115. L'utilisation d'une contrainte relationnelle ne nécessite pas la création d'un objet submicro segment.

Contrainte relationnelle de distance minimale entre un point et un segment

Cette contrainte porte sur une relation entre un point et un segment. Elle contraint la distance entre les deux objets submicro à être supérieure à un certain seuil D_{mini} . La valeur contrainte est la distance entre le point et le segment. La figure 3.16 présente cette contrainte pour deux cas de figure différents : pour chacun de ces deux cas, les agents-point P , P_1 et P_2 composant la relation sont représentés en bleu. Le halo gris représente un buffer centré sur chacun des deux objets submicro et dont la distance est égale à D_{mini} . La contrainte est totalement respectée lorsqu'aucun des deux objets n'appartient au halo de l'autre. Les vecteurs rouges représentent des déplacements proposés à chacun des agents-point par la contrainte relationnelle. Nous supposons sur ces figures que la distance courante entre le point et le segment est inférieure à la distance minimale cherchée. Lorsque la distance entre le point et le segment est supérieure à cette distance cherchée, le déplacement proposé par la contrainte est nul. L'effet de cette contrainte est comparable à celui d'une zone de répulsion entre deux objets : les objets submicro se repoussent lorsqu'ils deviennent trop proches, et cette répulsion est d'autant plus forte qu'ils sont proches (comme des ressorts).

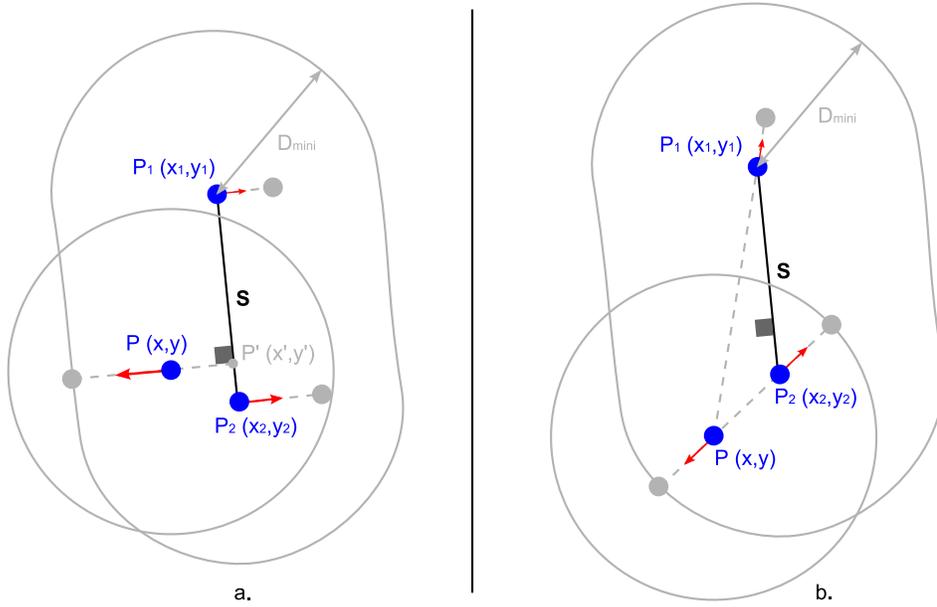


FIGURE 3.16 – Contrainte de distance minimale entre point et segment

Les déplacements proposés à chacun des points dépendent de la configuration entre le point et le segment. Si la distance entre le point et le segment est supérieure à D_{mini} , le déplacement proposé à chacun des points est nul. Sinon, les deux configurations a. et b. de la figure 3.16 sont possibles : dans le cas a., la distance minimale entre le point et le segment est atteinte au niveau d'un point intérieur du segment (elle vaut PP'). Dans le cas b., cette distance minimale est atteinte au niveau d'un des points P_1 ou P_2 extrémités du segment. Nous donnons ici le déplacement uniquement pour le cas où cette distance minimale est atteinte au niveau de P_2 (elle vaut PP_2), étant donné le rôle symétrique que jouent P_1 et P_2 pour ce cas. Ces configurations sont détectées en étudiant les signes des produits scalaires $\overrightarrow{P_1P_2} \cdot \overrightarrow{P_1P}$ et $\overrightarrow{P_2P_1} \cdot \overrightarrow{P_2P}$.

Le déplacement $\vec{d}(\Delta X, \Delta Y)$ proposé par sa contrainte au point P vaut :

– Dans le cas a. :

$$\vec{d} = \alpha \frac{D_{mini} - PP'}{2PP'} \overrightarrow{P'P}$$

$$\Delta X = \alpha \frac{D_{mini} - PP'}{2PP'} (X - X')$$

$$\Delta Y = \alpha \frac{D_{mini} - PP'}{2PP'} (Y - Y')$$

– Dans le cas b. :

$$\vec{d} = \alpha \frac{D_{mini} - PP_2}{2PP'} \overrightarrow{P_2P}$$

$$\Delta X = \alpha \frac{D_{mini} - PP_2}{2PP'} (X - X_2)$$

$$\Delta Y = \alpha \frac{D_{mini} - PP_2}{2PP'} (Y - Y_2)$$

Le déplacement $\vec{d}_1(\Delta X_1, \Delta Y_1)$ proposé par sa contrainte au point P_1 vaut :

– Dans le cas a. :

$$\begin{aligned}\vec{d}_1 &= \alpha \frac{P_1 P' - L D_{mini} - PP'}{2L} \frac{\overrightarrow{P'P}}{PP'} \\ \Delta X_1 &= \alpha \frac{P_1 P' - L D_{mini} - PP'}{2L} \frac{PP'}{PP'} (X - X') \\ \Delta Y_1 &= \alpha \frac{P_1 P' - L D_{mini} - PP'}{2L} \frac{PP'}{PP'} (Y - Y')\end{aligned}$$

– Dans le cas b. :

$$\begin{aligned}\vec{d}_1 &= \alpha \frac{D_{mini} - PP_2}{2PP'} \overrightarrow{PP_1} \\ \Delta X_1 &= \alpha \frac{D_{mini} - PP_2}{2PP'} (X_1 - X) \\ \Delta Y_1 &= \alpha \frac{D_{mini} - PP_2}{2PP'} (Y_1 - Y)\end{aligned}$$

Le déplacement $\vec{d}_2(\Delta X_2, \Delta Y_2)$ proposé par sa contrainte au point P_2 vaut :

– Dans le cas a. :

$$\begin{aligned}\vec{d}_2 &= \alpha \frac{P_2 P' - L D_{mini} - PP'}{2L} \frac{\overrightarrow{P'P}}{PP'} \\ \Delta X_2 &= \alpha \frac{P_2 P' - L D_{mini} - PP'}{2L} \frac{PP'}{PP'} (X - X') \\ \Delta Y_2 &= \alpha \frac{P_2 P' - L D_{mini} - PP'}{2L} \frac{PP'}{PP'} (Y - Y')\end{aligned}$$

– Dans le cas b. :

$$\begin{aligned}\vec{d}_2 &= \alpha \frac{D_{mini} - PP_2}{2PP_2} \overrightarrow{PP_2} \\ \Delta X_2 &= \alpha \frac{D_{mini} - PP_2}{2PP_2} (X_2 - X) \\ \Delta Y_2 &= \alpha \frac{D_{mini} - PP_2}{2PP_2} (Y_2 - Y)\end{aligned}$$

où (X, Y) , (X', Y') , (X_1, Y_1) et (X_2, Y_2) sont respectivement les coordonnées de P , P' , P_1 et P_2 , D_{mini} désigne la distance minimale à respecter, et L la longueur du segment S .

Contrainte relationnelle de distance entre point et segment Cette contrainte porte sur une relation entre un point et un segment. Elle contraint la distance entre ces deux objets submicro à valoir une certaine valeur but qui n'est pas forcément la valeur initiale. La valeur contrainte est la distance entre le point et le segment. La figure 3.17 présente cette contrainte là aussi pour les deux cas de figure différents : pour chacun de ces deux cas, les agents-point P , P_1 et P_2 composant la relation sont représentés en bleu. Les points gris représentent des positions des points pour lesquelles la contrainte est totalement satisfaite. Les vecteurs rouges représentent des déplacements proposés à chacun des agents-point par la contrainte relationnelle. Nous supposons sur ces figures que la distance courante entre le point et le segment est inférieure à la distance minimale cherchée. Contrairement à la contrainte précédente, lorsque la distance entre le point et le segment est supérieure à cette distance cherchée, le déplacement proposé par la contrainte n'est pas nul. L'effet

de cette contrainte est comparable à celui d'un ressort entre les deux objets : les objets submicro se repoussent lorsqu'ils deviennent trop proches et s'attirent dans le cas inverse. L'amplitude du déplacement est d'autant plus grand que leur distance est éloignée de leur distance but.

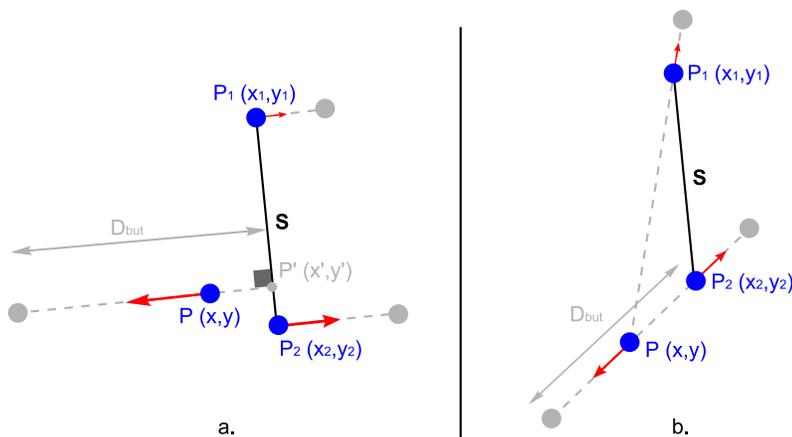


FIGURE 3.17 – Contrainte de distance entre point et segment

Les déplacements proposés par les deux contraintes de cette relation sont analogues à ceux de la contrainte précédente, en remplaçant D_{mini} par D_{but} , la valeur but de la contrainte. La différence provient du fait que le déplacement est proposé aussi lorsque la distance entre les deux objets submicro est supérieure à la distance but.

Cette contrainte a un effet particulier lorsque la distance but est nulle : elle a pour effet de forcer le point et le segment à être collés l'un à l'autre. Elle peut ainsi permettre de satisfaire des contraintes topologiques entre les objets auxquels appartient le point et le segment.

Contrainte relationnelle de distance minimale entre segments Cette contrainte porte sur une relation entre deux segments. Elle contraint la distance entre les deux objets submicro à être supérieure à un certain seuil D_{mini} . La valeur contrainte est la distance entre le point et le segment. La figure 3.18 présente cette contrainte pour deux cas de figure différents : pour chacun de ces deux cas, les agents-point P_1 , P_2 , P'_1 et P'_2 composant la relation sont représentés en bleu. Le halo gris représente un buffer centré sur chacun des deux objets submicro et dont la distance est égale à D_{mini} . La contrainte est totalement respectée lorsqu'aucun des deux objets n'appartient au halo de l'autre. Les vecteurs rouges représentent des déplacements proposés à chacun des agents-point par la contrainte relationnelle. Nous supposons sur ces figures que la distance courante entre le point et le segment est inférieure à la distance minimale cherchée. Lorsque la distance entre le point et le segment est supérieure à cette distance cherchée, le déplacement proposé par la contrainte est nul. L'effet de cette contrainte est comparable à celui d'une zone de répulsion entre deux objets : les objets submicro se repoussent lorsqu'ils deviennent trop proches, et cette répulsion est d'autant plus forte qu'ils sont proches (comme des ressorts).

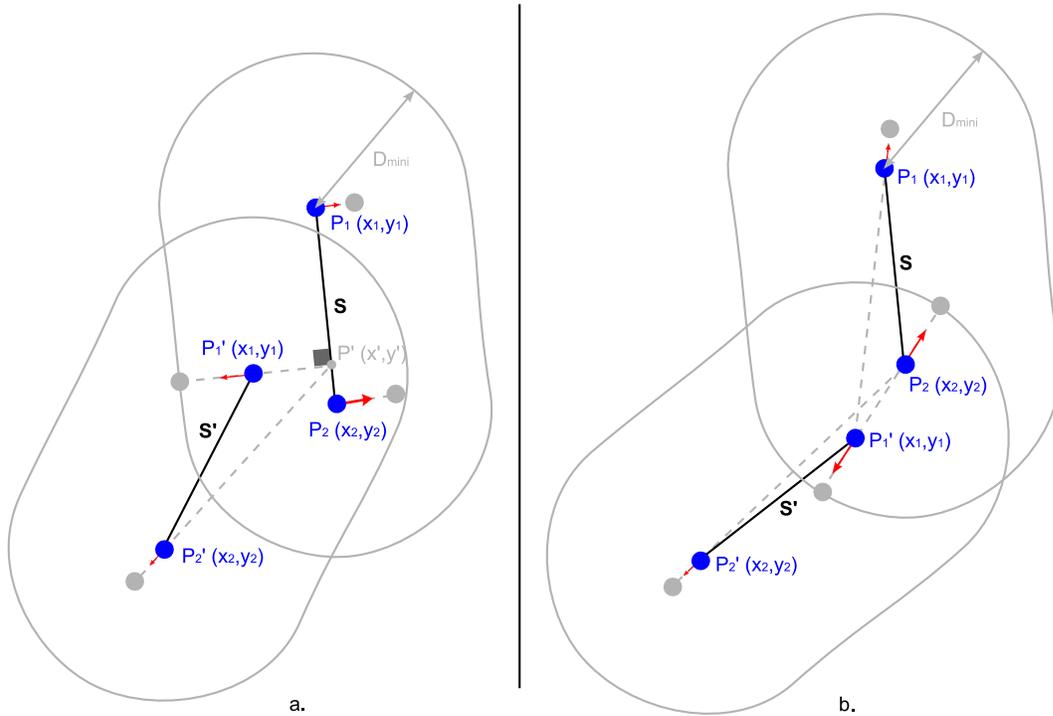


FIGURE 3.18 – Contrainte de distance minimale entre deux segments

Tout comme pour la contrainte précédente, le déplacement proposé à chacun des points des segments dépend de la configuration entre les deux segments. Si la distance entre les deux segments est supérieure à D_{mini} , le déplacement proposé à chacun des points est nul. Sinon, les deux configurations a. et b. de la figure 3.16 sont possibles : dans le cas a., la distance minimale entre le point et le segment est atteinte au niveau d'un point intérieur à l'un des segments et d'une extrémité de l'autre (elle vaut $P'_1P'_1$). Dans le cas b., cette distance minimale est atteinte au niveau de deux extrémités de chaque segment. Ces configurations sont détectées en étudiant les signes des produits scalaires $\overrightarrow{P_1P_2} \cdot \overrightarrow{P_1P'_1}$, $\overrightarrow{P_1P_2} \cdot \overrightarrow{P_1P'_2}$, $\overrightarrow{P'_1P'_2} \cdot \overrightarrow{P'_1P_1}$, et $\overrightarrow{P'_1P'_2} \cdot \overrightarrow{P'_1P_2}$.

Les déplacements sont calculés pour chacun des cas de façon analogue à ceux de la contrainte de distance minimale entre point et segment. Nous donnons uniquement le déplacement du point P'_1 pour chacun des deux cas a. et b. :

– dans le cas a. :

$$\begin{aligned} \vec{d}'_1 &= \alpha \frac{D_{mini} - P'_1P'_1}{2P'_1P'_1} (P'_1P'_1) \\ \Delta X'_1 &= \alpha \frac{D_{mini} - P'_1P'_1}{2P'_1P'_1} (X'_1 - X') \\ \Delta Y'_1 &= \alpha \frac{D_{mini} - P'_1P'_1}{2P'_1P'_1} (Y'_1 - Y') \end{aligned}$$

– et dans le cas b. :

$$\vec{d}'_1 = \alpha \frac{D_{mini} - PP_2}{2PP_2} (P_2P'_1)$$

$$\Delta X'_1 = \alpha \frac{D_{mini} - PP_2}{2PP_2} (X'_1 - X_2)$$

$$\Delta Y'_1 = \alpha \frac{D_{mini} - PP_2}{2PP_2} (Y'_1 - Y_2)$$

où (X'_1, Y'_1) , (X_2, Y_2) et (X', Y') sont respectivement les coordonnées de P'_1 , P_2 et P' , et D_{mini} désigne la distance minimale valeur but de la contrainte.

Contrainte relationnelle de distance entre segments De la même façon que l'on a défini une contrainte de distance entre un point et un segment à partir de celle de distance minimale, une contrainte de distance entre segments peut être définie à partir de la contrainte de distance minimale entre segments présentée précédemment. Dans le cas où la distance but de cette nouvelle contrainte est nul, les deux segments sont contraints à se coller.

Contrainte relationnelle d'angle entre segments Cette contrainte porte sur une relation entre deux segments. Elle contraint la valeur de l'angle entre les deux segments à avoir une certaine valeur but A ($A \in [0, 2\pi[$). La valeur contrainte est celle de l'angle entre les deux segments. La figure 3.19 présente cette contrainte. Les agents-point P_1 , P_2 , P'_1 et P'_2 composant la relation sont représentés en bleu. Les points gris représentent des positions des points pour lesquelles la contrainte est totalement satisfaite. Les vecteurs rouges représentent des déplacements proposés à chacun des agents-point par la contrainte relationnelle. L'effet de cette contrainte est comparable à celui d'une ressort d'angle entre les deux objets (sauf que ceux-ci ne sont a priori pas connectés). Chaque segment pivote autour de son centre pour satisfaire la contrainte.

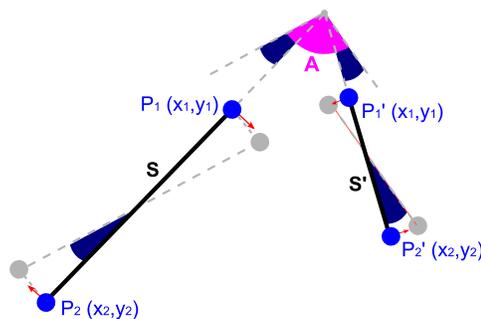


FIGURE 3.19 – Contrainte d'angle entre deux segments

Pour chacun des deux segments, cette contrainte est analogue à la contrainte interne d'orientation de segment présentée partie 3.1.3.2 page 116. La différence vient du fait que valeur but d'orientation de chacun des deux segments dépend non seulement de A mais aussi de l'orientation de l'autre segment. Les déplacements proposés par la contrainte à chacun des points sont analogues à ceux de la contrainte d'orientation de segment (cf. page 116).

Cette contrainte peut être utilisée en particulier pour trois cas :

- lorsque A est égal à la valeur initiale de l'angle entre les deux segments : dans ce cas, la contrainte est une contrainte de préservation de forme.

- lorsque A est égal à 0 , ou π : dans ce cas, la contrainte force les deux segments à être parallèles.
- lorsque A est égal à $\pm\pi/2$: dans ce cas, la contrainte force les deux segments à être orthogonaux.

Nous verrons différents cas pour lesquels ces trois cas particuliers peuvent être utilisés.

Autres contraintes Tout comme pour les contraintes portant sur un unique objet submicro, la liste de contraintes relationnelles submicro présentées ici n'est pas exhaustive. D'autres contraintes relationnelles concernant d'autres types d'objets submicro et d'autres types de relations peuvent être mises au point pour des but spécifiques. Par exemple, une contrainte entre un segment et triangle pourrait contraindre la valeur de l'angle entre le segment et la pente du triangle (si celle-ci peut être définie).

3.1.3.5 Bilan sur les contraintes submicro et retour sur l'exemple

Dans cette partie, nous avons présenté la modélisation des contraintes du niveau submicro. Nous avons proposé deux types de contraintes submicro (cf. figure 3.20) : des contraintes portant sur des caractères d'objets submicro ainsi que des contraintes portant sur des relations entre deux objets submicro. Suivant les propriétés cherchées de l'objet à déformer, il est possible de spécifier d'une part les objets submicro à utiliser, et d'autre part les contraintes à faire porter sur ces objets, ainsi que leur importance. Tout comme dans le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007), les contraintes sont explicites sous forme d'une classe générique qui peut être spécialisée suivant les besoins.

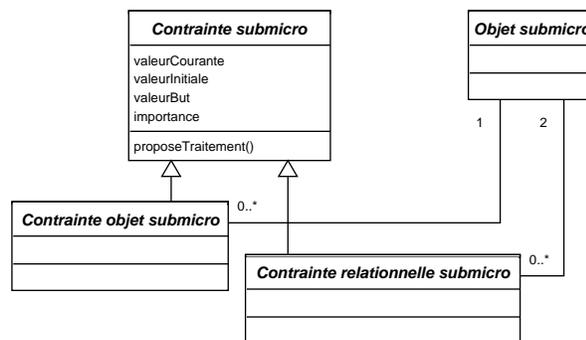


FIGURE 3.20 – Deux types de contraintes submicro : les contraintes internes et les contraintes relationnelles

Nous avons introduit précédemment une distinction entre *contraintes de préservation de forme* et *contraintes de déformation* (cf. page 110). En fonction de leur valeur but, les contraintes présentées dans cette partie peuvent être soit des contraintes de préservation de forme (lorsque leur valeur but est égale à leur valeur initiale ; ces contraintes incitent alors à préserver l'état de l'objet), soit des contraintes de déformation (lorsque leur valeur but est différente de leur valeur initiale ; ces contraintes incitent alors à changer l'état de l'objet). Ces contraintes permettent de traduire le besoin à satisfaire par la déformation. Elle permettent de spécifier les caractères submicro qui doivent être préservés et ceux qui doivent être changés.

Par exemple, pour le cas de l'objet à déformer de la figure 3.1 a. page 109 , notre objectif est de déformer l'objet pour avoir une bouche souriante (en forme de demi-cercle) et plus grande, des yeux plus proches, tout en préservant au mieux les positions relatives des yeux et de la bouche dans la tête, ainsi que la forme arrondie de la tête. Nous proposons de traduire ce besoin en utilisant les contraintes suivantes sur les objets submicro de la figure 3.21 :

- pour contraindre la bouche à être plus grande et en forme de demi-cercle, nous proposons de faire porter à chacun de ses segments une contrainte de longueur (avec une longueur but de 2.5 fois la longueur initiale) et une contrainte d'orientation (avec une orientation but de chacun des segments variant de $\pi/3$ à $-\pi/3$; les segments ont donc des orientations but différentes).
- pour contraindre les yeux à être plus proches, nous proposons d'utiliser une contrainte relationnelle de distance entre les points les composant, avec une distance but égale à la moitié de la distance initiale entre eux,
- pour contraindre l'objet à préserver la position relative des yeux et de la bouche dans la tête, nous proposons de contraindre les triangles à garder leur forme avec la contrainte de préservation d'écart des sommets au centre de gravité. Les segments composant le contour de la tête de l'objet sont également contraints à garder leur longueur et leur orientation.

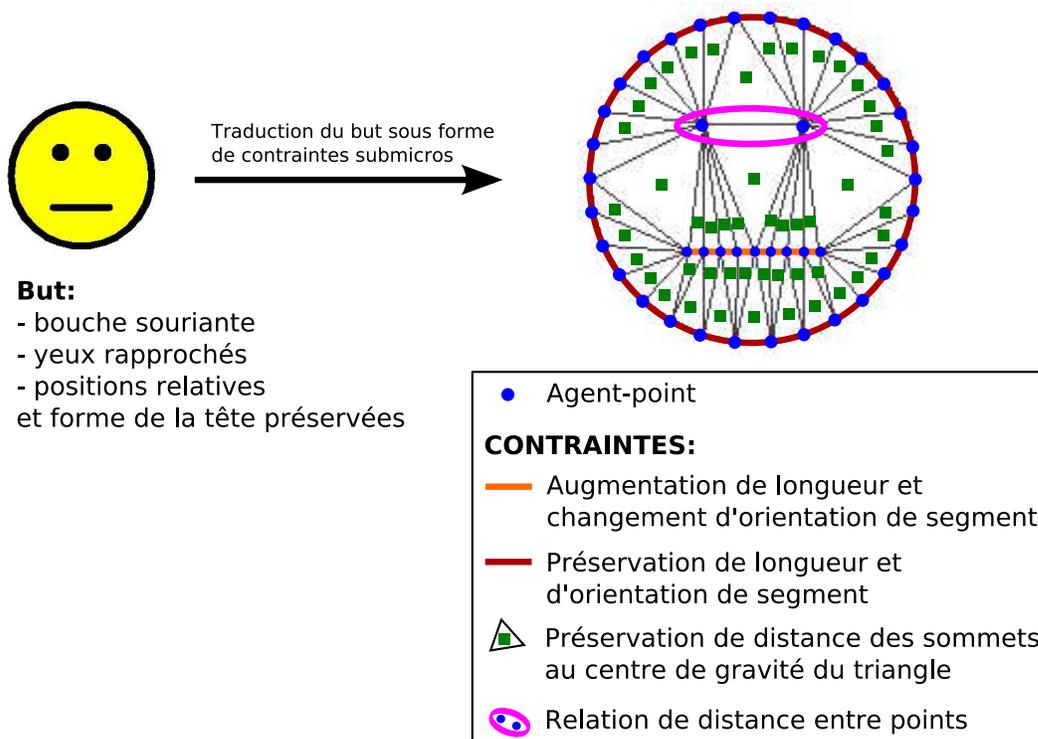


FIGURE 3.21 – Traduction du but sous la forme de contraintes du niveau submicro

Nous avons donc défini sur cet objet des contraintes de déformation (sur la bouche et les yeux) ainsi que des contraintes de préservation de forme (sur les triangles et segments du contour de la tête). Dans l'état initial, les contraintes de préservation de forme sont toutes parfaitement satisfaites, alors que celles de déformation ne le sont pas. La déformation va

résulter du déplacement des points composant l'objet afin d'homogénéiser la violation des contraintes sur l'objet. Nous présentons maintenant comment obtenir cette déformation, c'est-à-dire comment obtenir l'équilibre entre contraintes submicro de déformation et de préservation de forme. Ce résultat est obtenu en modélisant les points composant l'objet comme des agents.

3.1.4 Les agents-point

Dans la partie précédente, nous avons présenté les contraintes du niveau submicro. Ces contraintes permettent de traduire au niveau des objets submicro le besoin à satisfaire par la déformation. La déformation est alors le résultat d'un déplacement des points de l'objet dans le but d'homogénéiser sur l'objet la violation de ses contraintes submicro. Nous présentons dans cette partie comment la modélisation des points sous forme d'agents permet d'obtenir un tel résultat.

3.1.4.1 Modélisation des points sous forme d'agents

La déformation d'un objet est spécifiée à travers les contraintes portées par les objets submicro qui le composent. Avant la déformation, aucune des contraintes de déformation de l'objet n'est satisfaite alors que toutes ses contraintes de préservation de forme le sont parfaitement. L'état final de l'objet déformé est atteint lorsqu'un équilibre entre ces contraintes est obtenu : une part de la violation des contraintes de déformation est transmise aux contraintes de préservation de forme afin d'obtenir un équilibre. La figure 3.22 représente comment l'insatisfaction des contraintes de déformation est partagée par toutes les contraintes de notre objet exemple. Dans l'état initial, les contraintes de déformation portées par les segments de la bouche et les yeux ne sont pas satisfaites. Dans l'état final, la satisfaction des contraintes de déformation a été améliorée en les équilibrant avec les contraintes de préservation de forme.

Afin d'obtenir un équilibre au niveau de l'objet entre contraintes de déformation et de préservation de forme, nous proposons de distribuer la recherche de cet équilibre au niveau des points composant l'objet : les points sont modélisés comme des agents (cf. figure 3.23). Le but de chaque agent-point est d'atteindre une position d'équilibre entre ses contraintes. Les contraintes d'un agent-point sont les contraintes des objets submicro auxquels il appartient (cf. figure 3.23).

Ainsi, la déformation est vue comme le résultat d'une progression de chacun des agents-point vers sa position d'équilibre. Les agents-point interagissent puisque le déplacement de chacun d'entre eux influence l'équilibre des agents-point qui appartiennent aux mêmes objets submicro que lui. Cette modélisation permet de distribuer la résolution du problème du niveau de l'objet à déformer à un niveau interne de cet objet : la recherche d'un équilibre au niveau de l'objet est remplacée par la recherche d'un équilibre au niveau de chaque point. Ainsi, la recherche d'une solution répondant à ce besoin est effectuée au niveau submicro, tout comme les caractéristiques de la déformation qui, formulées au niveau de l'objet, sont traduites sous forme de contraintes au niveau submicro. Cette modélisation sous forme d'agents de points composant la géométrie d'objets à déformer a également été proposée par (Fritsch, 1997; Baeijs, 1998).

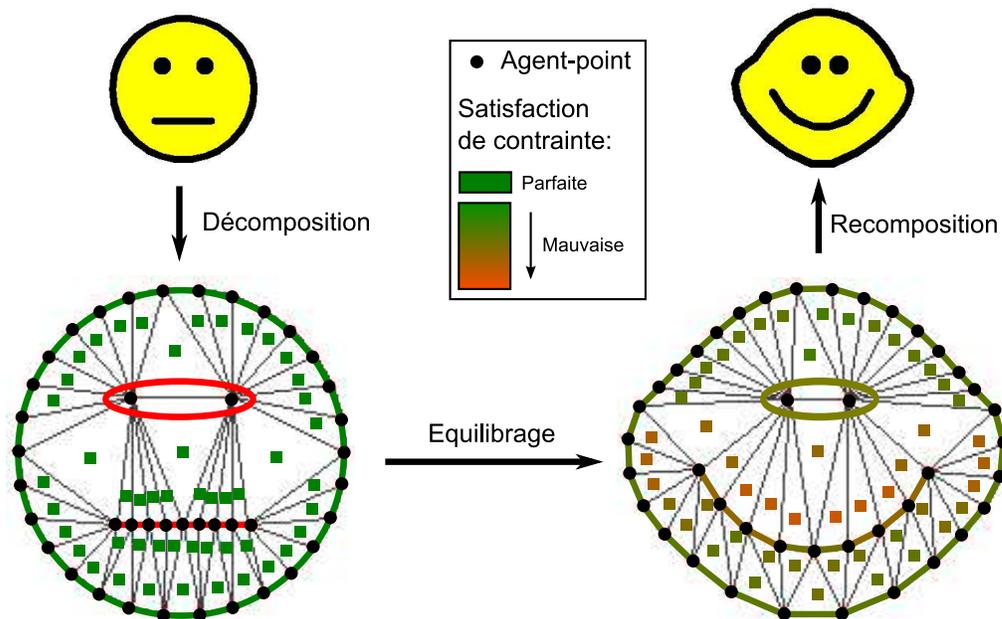


FIGURE 3.22 – Objet à déformer : dans son état initial (a.) aucune des contraintes de déformation n'est satisfaite ; toutes les contraintes de préservation de forme le sont. Dans son état final (b.), l'insatisfaction des contraintes est équilibrée.

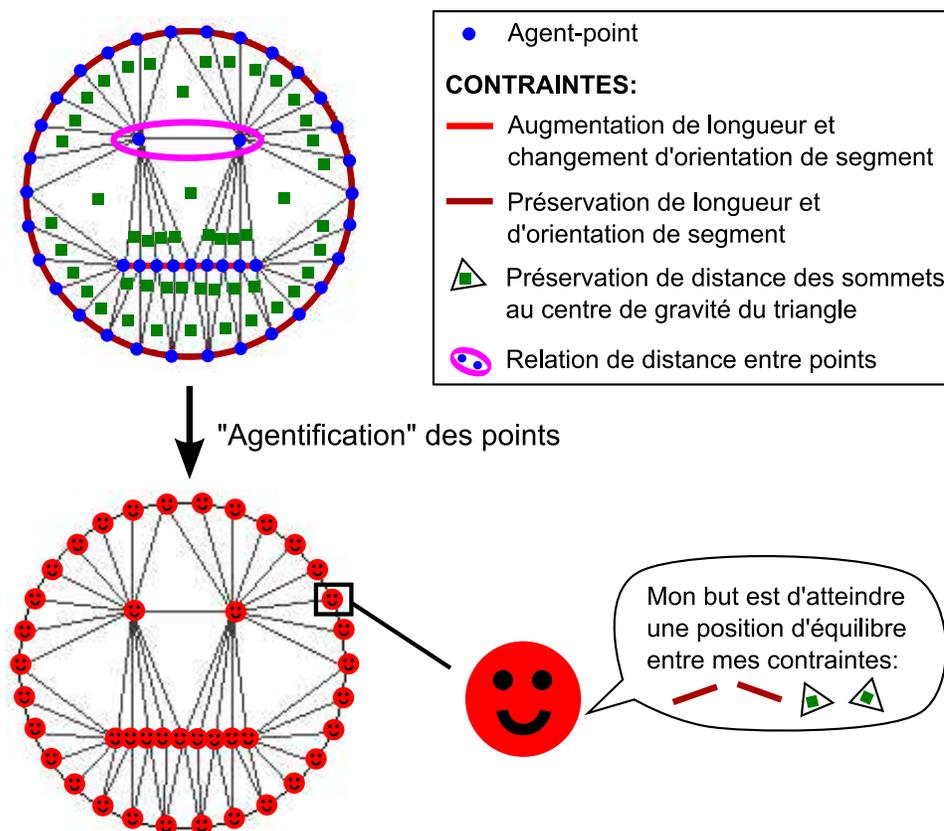


FIGURE 3.23 – L'objet à déformer et ses agents-point

Nous présentons maintenant plus en détail la classe agent-point du modèle GAEL avec, en particulier, les mécanismes permettant à un agent-point d'atteindre sa position d'équilibre.

3.1.4.2 La classe agent-point

La figure 3.24 présente la classe agent-point. Un agent-point possède les attributs suivants :

- **x**, **y** et **z** : ses coordonnées dans son état courant,
- **xInitial**, **yInitial** et **zInitial** : ses coordonnées dans son état initial,
- **estFixe** : cet attribut booléen permet de fixer l'agent-point au niveau de sa position courante. Un agent-point fixe sera contraint à ne pas se déplacer,
- et son **déséquilibre** : le déséquilibre traduit l'éloignement de l'agent-point de sa position d'équilibre. Il est calculé par la méthode `calculerDéséquilibre`. Cette valeur traduit directement la satisfaction de l'agent-point : un déséquilibre nul signifie que le point est dans sa position d'équilibre ; il est donc satisfait. Plus grand est ce déséquilibre, moins satisfait est l'agent-point.

Un agent-point possède également les méthodes suivantes, que nous détaillons ci-après :

- la méthode **recupèreDéplacements** qui permet à l'agent-point de récupérer un vecteur déplacement pour chacune de ses contraintes,
- la méthode **calculerDéséquilibre** qui permet à l'agent-point de calculer la valeur de son déséquilibre,
- la méthode **estEnEquilibre** qui permet à l'agent-point de mesurer s'il est en équilibre ou non, en fonction de la valeur de son déséquilibre,
- la méthode **calculerDéplacement** qui permet à l'agent-point de calculer un déplacement lui permettant a priori de diminuer la valeur de son déséquilibre,
- la méthode **activerAgentsAccointants** qui permet à l'agent-point d'activer ses agents-point accointants,
- et la méthode **activer** qui permet à l'agent-point de réaliser son propre cycle de vie.

Nous présentons maintenant plus en détail chacune de ces méthodes.

La méthode *recupèreDéplacements*

Cette méthode permet à l'agent-point de récupérer les déplacements proposés par ses contraintes. Pour chaque contrainte i , le déplacement \overrightarrow{dep}_i proposé à l'agent-point est celui renvoyé par la méthode *proposeTraitement* de la classe *contrainte submicro* (cf. page 113). La valeur du paramètre α pour la contrainte i est α_i avec :

$$\alpha_i = \frac{importance_i}{\sum_{i=1}^n importance_i}$$

où n est le nombre de contraintes de l'agent-point, $importance_i$ est l'importance de la contrainte i . α_i représente le poids de la contrainte i (pondéré par la valeur de son importance) parmi toutes les contraintes de l'agent-point. Chaque α_i est dans l'intervalle $[0, 1]$; leur somme vaut 1. Nous notons $\overrightarrow{dep}_i(\alpha_i)$ le déplacement proposé par la contrainte i à l'agent-point, avec la valeur α_i du paramètre α .

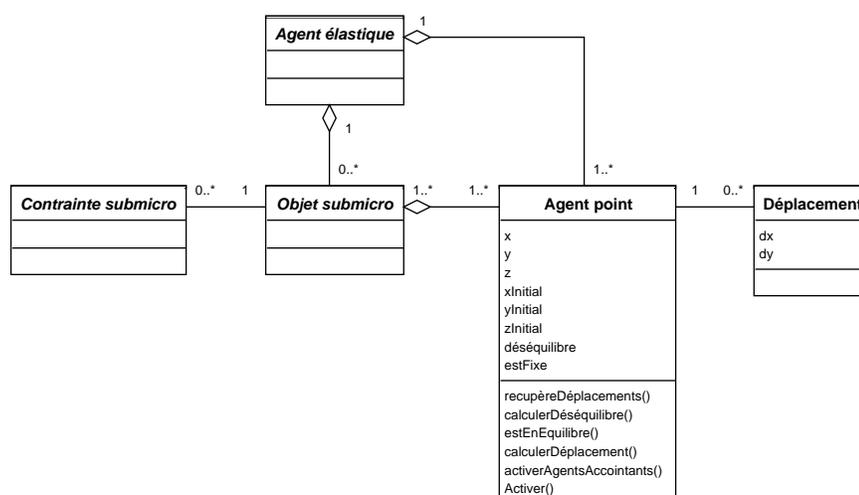


FIGURE 3.24 – La classe agent-point

Ces déplacements sont mémorisés par l’agent-point via la classe *déplacement* (cf. figure 3.24). Ils sont ensuite utilisés par les méthodes *calculerDéséquilibre* et *calculerDéplacement*.

La méthode *calculerDéséquilibre*

Cette méthode permet de calculer la valeur du champ *déséquilibre* de l’agent-point. Cette valeur est donnée par celle de $\|\vec{d}\|$, avec :

$$\vec{d} = \sum_{i=1}^n \overrightarrow{dep}_i(\alpha_i) \quad (3.3)$$

où n désigne le nombre de contraintes de l’agent-point, α_i le poids de la contrainte i parmi toutes les contraintes de l’agent-point et $\overrightarrow{dep}_i(\alpha_i)$ le déplacement proposé par la contrainte i à l’agent-point, avec $\alpha = \alpha_i$. C’est à travers les paramètres α_i que sont prises en compte les valeurs d’importance des contraintes : plus importante sera une contrainte, plus l’effet de sa violation sera pris en compte dans le calcul du déséquilibre de l’agent-point.

Nous montrons maintenant en quoi cette valeur traduit l’éloignement de l’agent-point de sa position d’équilibre sur trois cas présentés en figure 3.25. Pour chacun des trois cas a., b. et c. présentés, le point porte des contraintes différentes. Les vecteurs déplacements proposés par chacun de ses contraintes sont représentés en rouge. La somme de ces vecteurs (c’est-à-dire \vec{d}) est représentée en magenta. Pour chacun des trois cas, nous représentons le point dans une position quelconque et dans sa position d’équilibre.

Cas a : l’agent-point P porte une unique contrainte Dans ce cas, l’agent-point est en équilibre lorsque le déplacement donné par son unique contrainte est nul, c’est-à-dire lorsqu’il occupe sa position cible (cf. figure 3.25 a., en équilibre). Son déséquilibre est donné par la longueur du déplacement proposé par son unique contrainte, pour $\alpha = 1$ (ce déplacement permet au point d’atteindre directement sa position but), soit $\|\vec{d}\|$ avec :

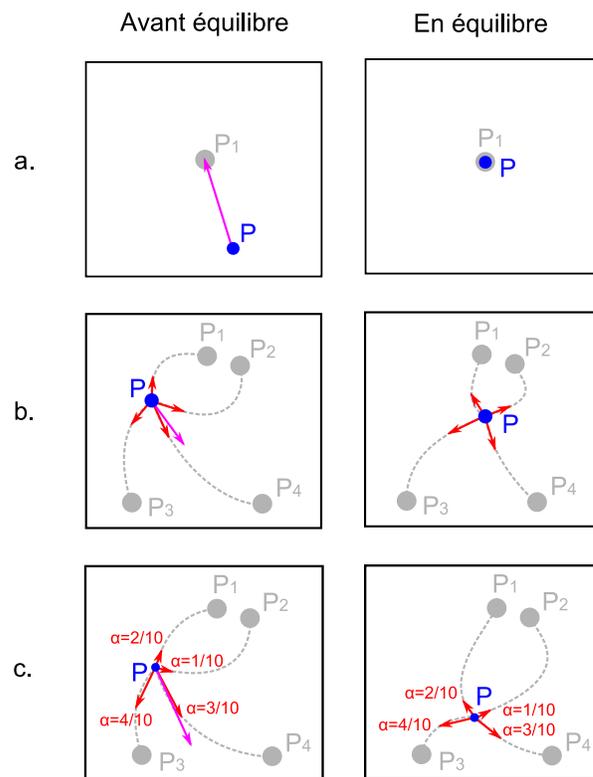


FIGURE 3.25 – Trois exemples de situations pour l'agent-point P : a. lorsque P porte une unique contrainte, b. lorsque P porte plusieurs contraintes de même importance, et c. lorsque P porte plusieurs contraintes d'importances différentes

$$\vec{d} = \overrightarrow{dep_1}(1)$$

Cas b : l'agent-point P porte plusieurs contraintes ayant toutes la même importance Dans ce cas, l'agent-point est en équilibre lorsque la condition suivante est vérifiée :

$$\sum_{i=1}^n \overrightarrow{dep_i}(1/n) = 0$$

La figure 3.25 b de droite, montre l'exemple d'un tel équilibre. L'agent-point P porte quatre contraintes quelconques C_1 , C_2 , C_3 et C_4 . Pour chacune des contraintes C_i , la position but de l'agent-point permettant de satisfaire totalement la contrainte est P_i . Le vecteur $\overrightarrow{dep_i}(1/n)$ est celui qui permet au point de se rapprocher de sa position but (sa direction n'est pas forcément celle de P_i). La position d'équilibre de l'agent-point est définie comme celle qui annule cette somme vectorielle, comme décrit par l'équation précédente. La position d'équilibre est donc celle qui moyenne les violations des contraintes C_i . Le déséquilibre dans ce cas est donné par $\|\vec{d}\|$, avec :

$$\vec{d} = \sum_{i=1}^n \overrightarrow{dep_i}(1/n)$$

Lorsque $n = 1$, nous retrouvons le cas précédent.

Cas c : cas général Ce cas est le cas général pour lequel l'agent-point P porte plusieurs contraintes ayant des importances différentes. Dans ce cas, la contribution d'une contrainte C_i est d'autant plus grande que son coefficient α_i est grand. L'équilibre est obtenu lorsque l'équation suivante est satisfaite :

$$\sum_{i=1}^n \overrightarrow{dep_i}(\alpha_i) = 0$$

La figure 3.25 c. montre la même situation que le cas précédent, mais avec les valeurs 2, 1, 4 et 3 pour importances respectives des contraintes C_1 , C_2 , C_3 et C_4 . Les paramètres α_i de ces contraintes valent donc respectivement 2/10, 1/10, 4/10 et 3/10. La position d'équilibre est déplacée vers les positions des points P_i correspondant aux contraintes ayant les plus grandes valeurs d'importance. Dans ce cas, la valeur du déséquilibre est donnée par l'expression 3.3. Lorsque $n = 1$, ou que les contraintes ont toute la même importance, nous retrouvons les expressions des cas particulier a. et b. précédents.

La méthode *estEnEquilibre*

Cette méthode permet à l'agent-point de déterminer s'il est en équilibre ou non. L'agent-point est en équilibre lorsque la valeur de son champ *déséquilibre* est nulle. Nous montrons en annexe D page 249 qu'il est difficile (et aussi absurde) d'obtenir exactement une telle position pour l'agent-point. Nous estimons que l'agent-point est en équilibre à partir du moment où son déséquilibre est inférieur à la résolution des données généralisées (Nous

justifions ce choix en annexe D). Cette valeur est donnée en paramètre d'entrée au système en fonction du besoin de l'utilisateur.

Ainsi, la méthode `estEnEquilibre` renvoie *VRAI* lorsque la valeur du déséquilibre du point est inférieure à la résolution des données, et *FAUX* sinon.

La méthode `calculerDéplacement`

Cette méthode permet à l'agent-point de calculer un déplacement lui permettant de progresser vers sa position d'équilibre. Ce déplacement est \vec{d} présenté précédemment avec la méthode `calculerDéséquilibre` :

$$\vec{d} = \sum_{i=1}^n \overrightarrow{dep}_i(\alpha_i) \quad (3.4)$$

où n désigne le nombre de contraintes de l'agent-point, $\overrightarrow{dep}_i(\alpha_i)$ le déplacement proposé par la contrainte i à l'agent-point, avec $\alpha = \alpha_i$, et α_i représente la part en importance de la contrainte i parmi toutes les contraintes de l'agent-point, comme défini précédemment.

La méthode `activerAgentsAccointants`

Cette méthode permet à l'agent-point de provoquer l'activation d'autres agents-point. Ces agents-point à activer sont ceux dont l'équilibre est influencé par un déplacement de l'agent-point : ce sont donc tous les agents-point appartenant aux mêmes objets submicro que lui. En effet, dès que l'agent-point se déplace, les caractères de ses objets submicro et donc l'état de satisfaction de leurs contraintes change. L'équilibre de tous les agents-point concernés par ces contraintes est donc potentiellement affecté par ce déplacement. Ces agents-point sont donc bien tous les agents-point appartenant aux mêmes objets submicro que l'agent-point déplacé.

Nous présentons en partie 3.1.5 comment cette méthode permet d'activer de proche en proche les agents-point dont les équilibres sont modifiés, et ainsi de faire de la déformation une opération locale. Nous verrons en partie 3.3 l'avantage de cette caractéristique de notre méthode de déformation pour les grands objets comme par exemple les champs.

La méthode `Activer`

La méthode `Activer` permet à l'agent-point de lancer son propre cycle de vie. Nous présentons maintenant ce cycle de vie. Ce cycle de vie permet à l'agent-point d'atteindre son objectif, c'est-à-dire de se déplacer progressivement jusqu'à sa position d'équilibre en utilisant les méthodes présentées précédemment.

3.1.4.3 Le cycle de vie de l'agent-point

Dans cette partie, nous présentons le cycle de vie de l'agent-point. Ce cycle de vie détaille comment évolue l'agent-point pour atteindre un état satisfaisant. Nous présentons ici deux propositions de cycles de vie de l'agent-point, la deuxième étant une amélioration de la précédente :

- un premier cycle de vie, pour lequel l’agent-point effectue simplement les déplacements donnés par sa méthode *calculerDéplacement* jusqu’à atteindre son équilibre. Nous montrons que ce cycle de vie ne permet pas d’assurer une convergence des agents-point dans tous les cas,
- et un deuxième cycle de vie, qui est une version améliorée du précédent et permet d’améliorer la convergence de chaque agent-point.

Nous ne détaillons pas comment sont activés les agents-point : nous supposons dans un premier lieu que les agents-point évoluent en parallèle. L’activation des agents-point est en réalité gérée par un moteur présenté en partie 3.1.5. Par ailleurs, nous présentons en partie 3.1.5.3 page 140 deux autres versions du cycle de vie de l’agent-point avec en particulier *le cycle de vie unifié*, qui permet d’unifier les cycles de vie des agents-point avec celui des agents géographiques du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007).

Une première proposition de cycle de vie La figure 3.26 présente une première proposition de cycle de vie d’agent-point. Le principe de ce cycle de vie est de permettre à l’agent-point de progresser vers son état d’équilibre tant que celui-ci n’est pas atteint. L’état d’équilibre de l’agent-point est donné par la méthode *estEnEquilibre*. L’agent-point progresse vers sa position d’équilibre en effectuant le déplacement donné par la méthode *calculerDéplacement*. Parce que ce déplacement affecte potentiellement l’état d’équilibre de ses agents accointants, ceux-ci sont activés par l’invocation de la méthode *activerAgentsAccointants*. L’agent-point termine ensuite son cycle de vie dès qu’il est en équilibre.

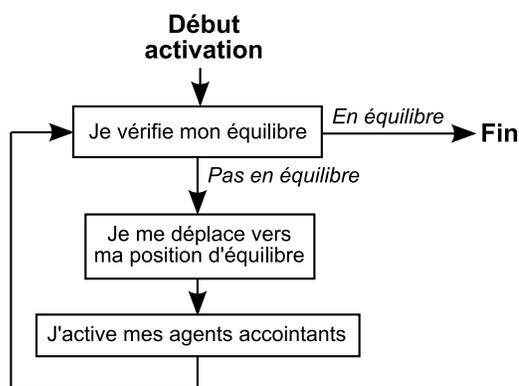


FIGURE 3.26 – Un premier cycle de vie de l’agent-point

En utilisant ce premier cycle de vie, nous constatons des problèmes de convergence des agents-point pour certains cas particuliers pour lesquels de faibles valeurs de caractères submicro contraintes sont atteintes : dans ces cas, de très grandes valeurs de déplacement peuvent apparaître, conséquences de divisions par des nombres très petits. Par exemple, si la longueur d’un segment dont la valeur est contrainte atteint une longueur proche de 0, le déplacement proposé pourra être infiniment grand. Une solution envisageable à ce problème pourrait consister à limiter la longueur du plus grand déplacement faisable par un agent-point à une certaine valeur. Nous proposons plutôt de compléter le cycle de vie de l’agent-point donné précédemment en lui donnant la possibilité de vérifier chaque étape de sa progression avant de la valider. Nous présentons maintenant ce nouveau cycle de vie.

Cycle de vie avec vérification La figure 3.27 présente une version améliorée du cycle de vie de l'agent-point présenté précédemment. Ce cycle de vie permet de prendre en compte les cas pour lesquels le déplacement renvoyé par la méthode *calculerDéplacement* ne permet pas à l'agent-point d'améliorer son équilibre. Pour cela, l'agent-point vérifie après chaque déplacement si ce déplacement lui a effectivement permis d'améliorer la valeur de son déséquilibre. Il effectue le déplacement uniquement dans ce cas. Dans le cas contraire, il ne se déplace pas et termine son cycle de vie. Il peut ensuite éventuellement être activé à nouveau par l'un de ses agents accointants. Ce cycle de vie permet d'assurer une décroissance stricte de la valeur du déséquilibre d'un point lors de son activation.

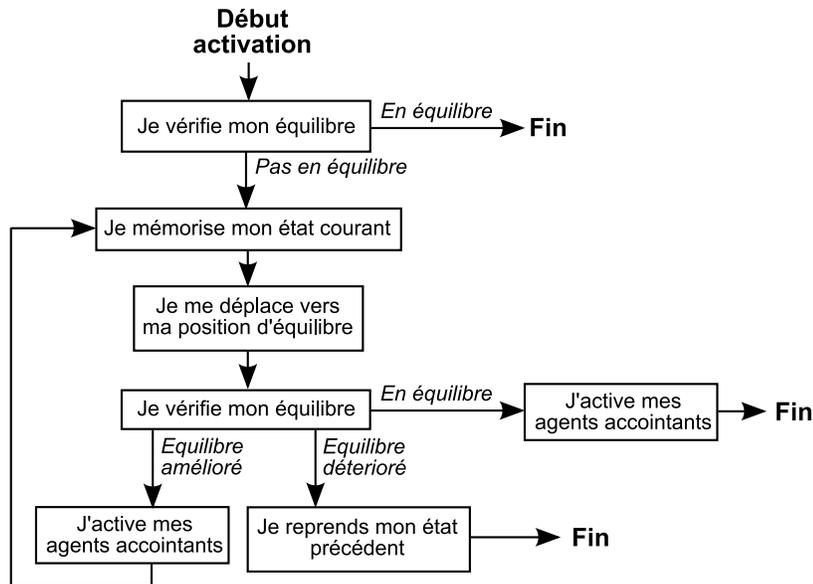


FIGURE 3.27 – Cycle de vie de l'agent-point avec vérification

Nécessité d'un moteur d'activation pour les agents-point Nous avons supposé que les agents-point évoluaient en parallèle : tous suivent leur cycle de vie en même temps et, en s'influençant mutuellement à travers les contraintes submicro qu'ils partagent, se déplacent simultanément vers leur position d'équilibre. Ce déplacement simultané des agents-point permet d'obtenir progressivement une géométrie déformée de l'objet. Les outils informatiques permettant de gérer de tels processus réellement parallèles étant peu répandus, il est nécessaire de procéder par activations successives des agents-point contrôlées par un moteur pour simuler ce déclenchement en parallèle.

Nous présentons dans la prochaine partie comment les agents-point sont activés pour permettre la déformation de l'objet. Cette activation est gérée par un moteur que nous appelons *moteur élastique*.

3.1.5 Le moteur élastique

Le moteur élastique gère l'activation des agents-point. Nous verrons en partie 3.2 comment ce moteur est contrôlé par l'agent élastique lui-même. Nous montrons tout d'abord

en quoi le choix de la méthode d'activation des agents-point est importante. Nous présentons ensuite le fonctionnement du moteur élastique. L'utilisation de ce moteur nécessite quelques changements dans le cycle de vie de l'agent-point proposé en 3.1.4.3 : nous présentons le nouveau cycle de vie de l'agent-point, et proposons enfin une unification de ce cycle de vie avec celui des agents géographiques du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007).

3.1.5.1 Importance de la méthode d'activation

La travail de thèse de (Meurisse, 2004) souligne l'importance de certains choix dans la façon d'orchestrer le déclenchement d'agents, et l'impact potentiel de ces choix sur le comportement global du système multi-agent. Il est en effet nécessaire de prévoir l'impact des choix suivants sur le fonctionnement d'un système multi-agent :

- le choix de l'ordre d'activation des agents,
- et le choix du type et de l'ordre des tâches effectuées par chaque agent lors d'un cycle d'activation.

Différentes stratégies d'activation des agents-point ont été envisagées et testées (cf. annexe E page 253). Différents test effectués ont montré que le choix de la stratégie d'activation n'avait aucun impact sur le résultat du système, mais affecte par contre la rapidité avec laquelle ce résultat est obtenu. En effet, les différentes stratégies d'activation permettent d'obtenir des résultats proches et satisfaisants. Par contre, la stratégie d'activation par agent le plus insatisfait permet de diminuer le nombre d'activations d'agents-point nécessaires pour obtenir le résultat final, et semble ainsi meilleure car a priori plus efficace. Elle est cependant plus coûteuse car elle nécessite de nombreux calculs de satisfaction des agents afin de choisir le plus insatisfait. Notre choix s'est donc porté sur une stratégie d'activation aléatoire des agents-point.

Concernant le choix de l'ordre des actions effectuées par les agents-point, nous proposons de modifier le cycle de vie d'un agent-point afin de lui permettre non pas d'atteindre son état d'équilibre lors de chaque activation, mais seulement de progresser d'un pas vers cet équilibre. Les agents-point vont ainsi pouvoir progresser tous ensemble à tour de rôle vers leur position d'équilibre.

Nous présentons maintenant comment fonctionne ce moteur élastique, ainsi que le nouveau cycle de vie modifié des agents-point.

3.1.5.2 Fonctionnement du moteur élastique

Le moteur s'appuie sur une liste contenant des agents-point en attente d'activation par le moteur. Le processus effectué par le moteur élastique est donné par la figure 3.28.

Le rôle du moteur est d'activer de façon aléatoire les agents-point de sa liste. Sa liste est initialisée en y mettant les agents-point de l'agent élastique n'étant pas en équilibre. Ces agents-point sont usuellement ceux sur lesquels portent les contraintes submicro de déformation portées par l'agent élastique. Les agents-point sont ainsi activés aléatoirement tant que la liste n'est pas vide. Ce sont les agents-point qui choisissent eux-même de quitter la liste, et d'y ajouter éventuellement d'autres agents-point. La taille de la liste varie donc au fur et à mesure de la convergence des agents-point. Nous verrons que dans la plupart

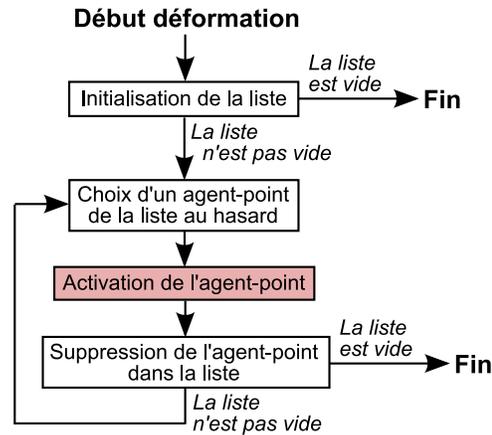


FIGURE 3.28 – Fonctionnement du moteur élastique

des cas, la taille de la liste augmente rapidement en début d'activation du moteur, puis diminue progressivement au fur et à mesure que les agents-point atteignent leur position d'équilibre.

3.1.5.3 Cycle de vie modifié de l'agent-point

Le cycle de vie modifié des agents-point est présenté en figure 3.29. Il est très semblable au précédent de la figure 3.27 page 138 (les modifications et différences sont en rouge). Les changements viennent du fait que :

- un agent-point n'active plus ses agents-accointants, mais il les place dans la liste du moteur élastique pour qu'ils puissent être activés à leur tour. Ce changement concerne la méthode *activerAgentsAccointants* présentée page 136.
- un agent-point qui a progressé vers son équilibre termine son cycle de vie sans atteindre son équilibre (il n'y a plus de boucle). Ce changement permet de laisser au moteur élastique le soin d'activer d'autres agents-point et ainsi permettre une progression collective des agents-point vers leur position d'équilibre. L'agent-point reste cependant dans la liste pour être réactivé par le moteur jusqu'à avoir atteint sa position d'équilibre.

Vers un cycle de vie unifié pour agents-point et agents géographiques Ce cycle de vie est très proche du cycle de vie des agents géographiques meso et micro du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) présenté en figure 1.34 page 67 :

- les deux types d'agents (agents-point et agents géographiques) améliorent leur satisfaction à l'aide du même type de processus à base d'essais et de validation (basé sur le modèle de (Ruas et Plazanet, 1996)),
- les deux types d'agents améliorent leur satisfaction en s'appliquant des traitements donnés par leurs contraintes. Ils sont guidés par ces contraintes.

De la même façon que les agents des niveaux micro et meso ont le même cycle de vie, nous proposons un cycle de vie, dit *unifié*, qui est commun aux agents géographiques et agents-point et permet ainsi de disposer d'un unique cycle de vie pour tous les agents du modèle.

Le cycle de vie unifié pour agent-point et agents géographiques

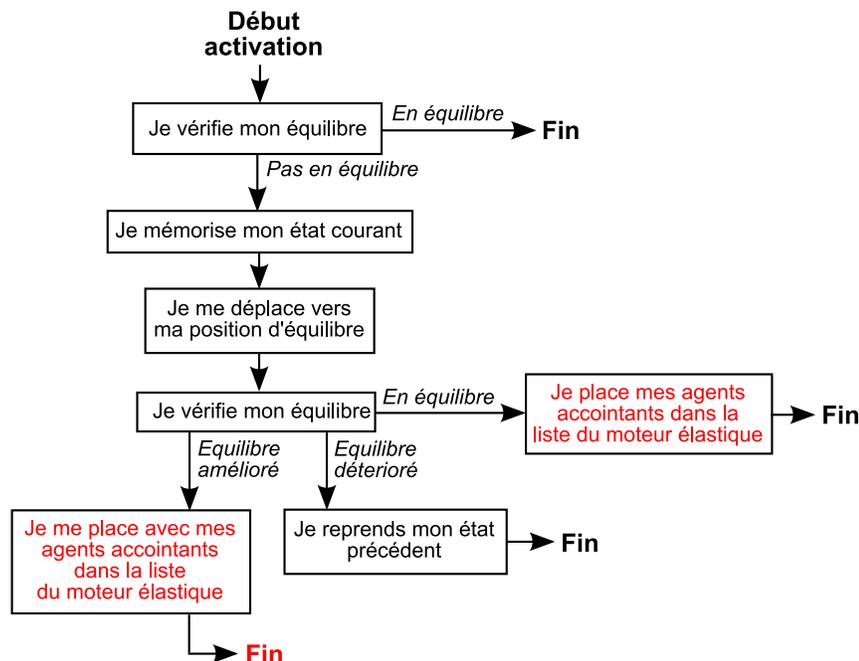


FIGURE 3.29 – Le cycle de vie modifié d’un agent-point, pour sa gestion par le moteur élastique

La figure 3.30 présente un cycle de vie qui unifie les cycles de vie des agents géographiques (cf. figure 1.34 page 67) et des agents-point (cf. figure 3.29 page 141). Ce cycle de vie est utilisé à la fois par les agents géographiques et les agents-point.

Ce cycle de vie est très proche du cycle de vie de l’agent géographique du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) de la figure 1.34 page 67. L’ajout des trois nouvelles étapes représentées en rouge permet de l’adapter aux agents-point. Ces trois étapes sont :

- **une étape d’analyse et de modification de la liste des traitements proposés par les contraintes** : cette étape n’est pas nécessaire aux agents-géographiques puisqu’ils s’appliquent un des traitements proposés par leurs contraintes sans avoir besoin de modifier la liste des traitements. Nous pourrions intégrer l’étape de tri des traitements proposés à un agent géographique par ses contraintes au niveau de cette étape. Pour un agent-point, les traitements proposés par ses contraintes sont des déplacements. L’agent-point ne va pas effectuer l’un de ses déplacements, mais un nouveau déplacement égal à la somme de ses déplacements. C’est au niveau de cette étape que l’agent-point effectue cette somme et l’ajoute à la liste de ses traitements possibles après l’avoir vidée. L’agent-point fusionne ses traitements pour en obtenir un unique qu’il va ensuite essayer,
- **une étape de gestion des conséquences de son état amélioré** : au niveau de cette étape, l’agent-point s’est déplacé mais n’est pas encore en équilibre. L’agent-point se place lui-même ainsi que ses agents accointants dans la liste du moteur élastique. Il quitte ensuite le cycle de vie puisqu’il n’a plus de traitement disponible. Concernant l’agent géographique, il obtient de ses contraintes une nouvelle liste de traitements à essayer au niveau de cette étape.

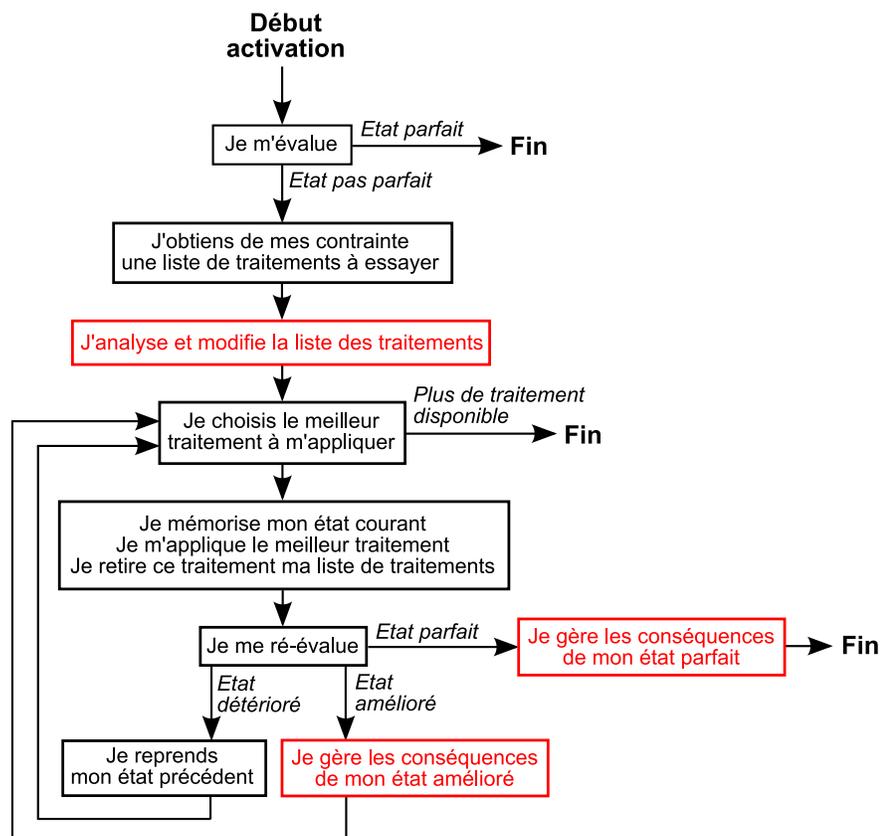


FIGURE 3.30 – Cycle de vie unifié des agents géographiques et des agents-point

- **une étape de gestion des conséquences de son état parfait** : au niveau de cette étape, l'agent-point place ses agents accointants dans la liste du moteur élastique. Il termine ensuite son cycle de vie (il est en équilibre). Pour un agent géographique, aucune action particulière n'est nécessaire.

Nous proposons ainsi de nous appuyer sur une unique classe d'agents ayant ce cycle de vie (cf. figure 3.31 ; pour un agent-point, la satisfaction est donnée par la valeur de son déséquilibre). Les contraintes submicro du modèle GAEL ainsi que les contraintes du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) que nous appelons *contraintes géographiques* héritent d'une classe unique générique de contraintes pouvant être traitées par l'agent. La méthode *activer* permet de déclencher le cycle de vie unifié proposé précédemment. Le moteur de la figure 1.36 page 69 permettant une exploration en arbre pourrait également être modifié pour remplacer celui que nous avons proposé.

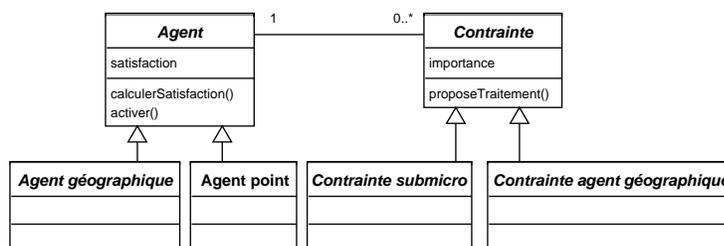


FIGURE 3.31 – Une classe d'agent unifiant les agents géographiques et agents-point

En conclusion, le moteur élastique permet de gérer l'activation des agents-point et ainsi la déformation de l'agent-élastique. Nous présentons et étudions maintenant le résultat de activation sur l'exemple que nous avons proposé en figure 3.1 page 109.

3.1.6 Illustration sur un exemple simple

Dans cette partie nous présentons le processus de la déformation de l'objet exemple effectuée avec le modèle GAEL.

3.1.6.1 Déformation de l'objet exemple

Nous avons déjà présenté le résultat de la déformation de l'objet exemple en figure 3.1 page 109. Cet état pour lequel tous les agents-point composant l'objet sont en équilibre est obtenu après 3516 activations d'agents-point. La figure 3.32 montre la déformation progressive de l'objet en fonction du nombre d'activations d'agents-point. Le besoin formulé au niveau de l'objet et traduit sous la forme de contraintes submicro (cf. en partie 3.21 page 129) est progressivement satisfait. Au fur et à mesure des activations des points, la bouche de l'objet grandit et devient plus souriante, et les yeux se rapprochent. La tête amortit cette transformation (la mâchoire grossit).

Nous constatons que la plus grande partie de la déformation a lieu lors des premières activations d'agents-point. Les agents-point portant les contraintes de déformation effectuent les déplacements les plus grands. Leur déplacement est progressivement propagé à

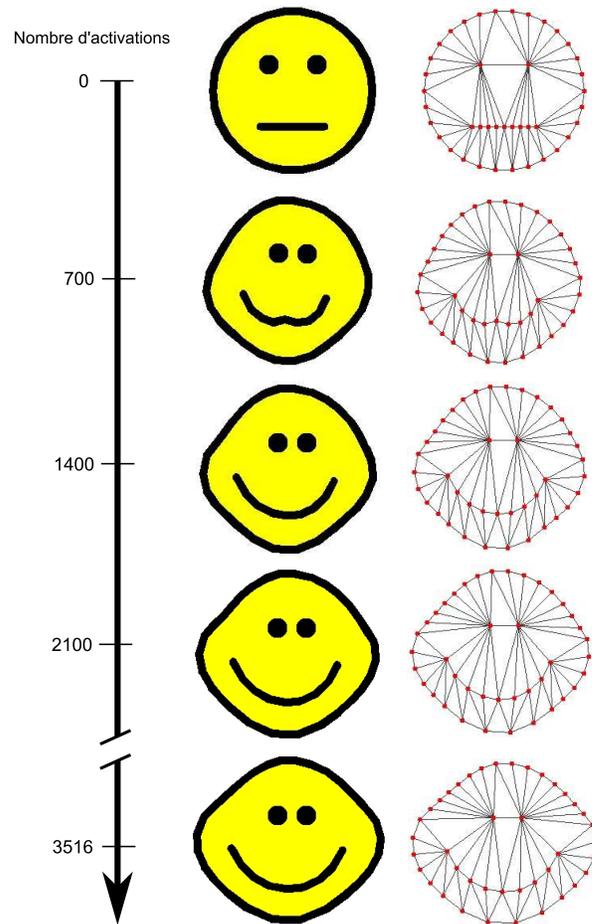


FIGURE 3.32 – Déformation progressive de l'objet exemple

leurs agents-point accointants voisins qui sont à leur tour activés et effectuent des déplacements de plus en plus faibles au fur et à mesure que s'amortissent les contraintes de déformation. La figure 3.33 illustre ce phénomène d'activation des agents-point de proche en proche lors des premières activations. Les agents-point de la liste du moteur en attente d'activation sont affichés en rouge. Nous constatons qu'au fur et à mesure des activations des agents-point, les agents-point proches les uns des autres sont progressivement placés dans la liste du moteur élastique. Nous verrons pour le cas de la déformation de grands objets (comme les champs) que ce mécanisme de propagation de proche en proche permet de n'activer éventuellement qu'une partie des points de l'objet à déformer. Nous verrons l'utilité de ce mécanisme pour la déformation des champs en partie 3.3.

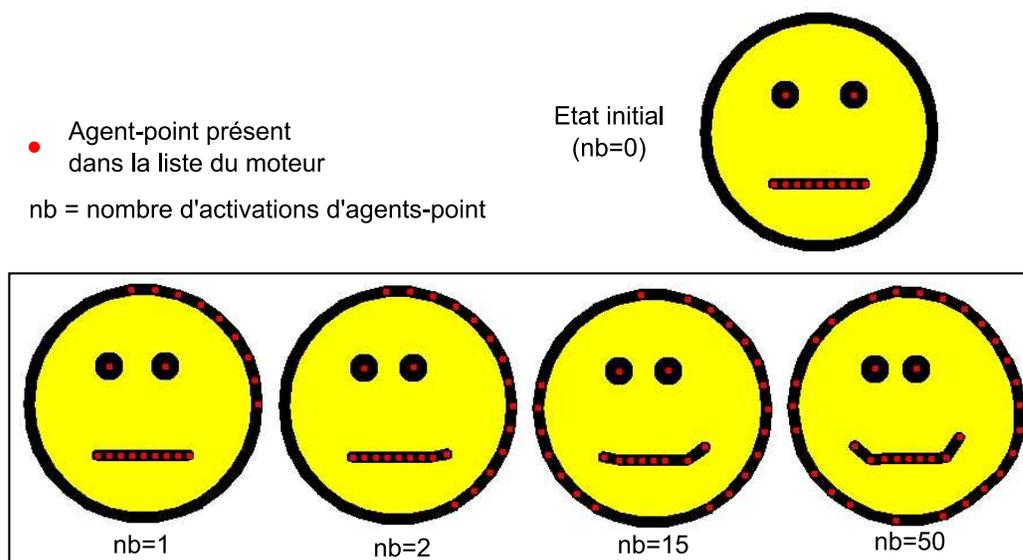


FIGURE 3.33 – Déformation progressive de l'objet exemple

Les graphiques de la figure 3.34 représentent le nombre d'agents-point de la liste du moteur en fonction du nombre d'activations d'agents-point effectuées. Le graphique 3.34 a. montre que tous les agents-point sont progressivement placés dans la liste du moteur très tôt dans le processus. Le graphique 3.34 b. montre la baisse progressive du nombre d'agents-point de la liste du moteur au fur et à mesure de l'activation des agents-point. Concernant le temps de calcul nécessaire à l'obtention de ce résultat, il est de 0.15 secondes sur un ordinateur de bureau standard.

Nous avons présenté ici le résultat de la déformation au niveau de l'objet. Nous présentons maintenant l'évolution de l'un des points de l'objet.

3.1.6.2 Évolution d'un agent-point

Nous étudions dans cette partie le comportement de l'agent-point 31 (cf figure 3.35). Il s'agit de l'agent-point situé à une extrémité de la bouche.

La figure 3.36 donne l'état de cet agent à différents stades du processus de déformation et permet d'étudier son évolution. Sur chacune de ces images sont affichés la valeur

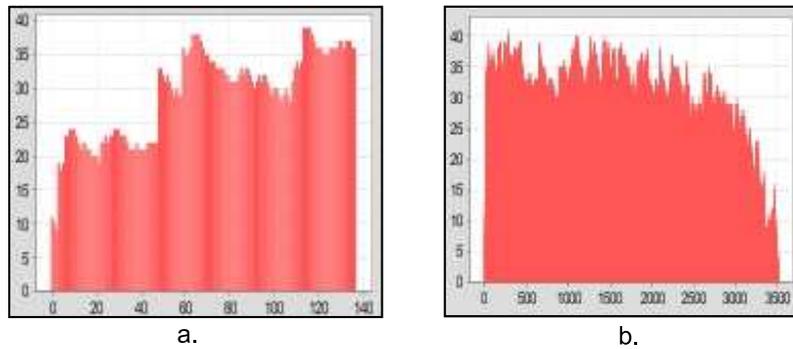


FIGURE 3.34 – Nombre d’agents-point de la liste du moteur en fonction du nombre d’activations d’agents-point : a. lors des 140 premières activations ; b. pour la totalité du processus

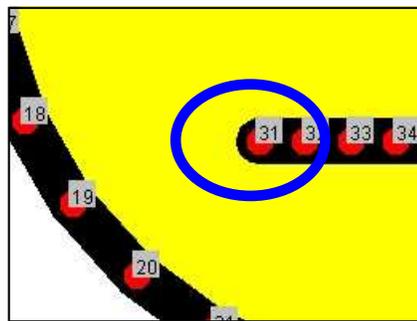


FIGURE 3.35 – L’agent-point 31 étudié

du déséquilibre de l’agent-point (en vert ; cette valeur traduit la distance de l’agent-point à sa position d’équilibre) ainsi que les vecteurs de déplacement donnés par chacune des contraintes du point à cet instant du processus (ce sont les segments oranges ; leur longueur a été exagérée 30 fois sur les figures b, c, d et e pour une meilleure lisibilité). Le segment magenta de chaque image représente la somme de ces déplacements. La figure 3.36 a. donne l’état initial de l’agent-point. Dans cet état, nous constatons qu’il n’est pas en équilibre puisqu’il porte deux contraintes de déformation (de longueur et d’orientation de segment) qui l’incitent à se déplacer. Au fur et à mesure du processus, sur les figures 3.36 a., b., c. et d., la valeur de déséquilibre de l’agent-point (et donc la longueur du déplacement qu’il effectue) évolue pour atteindre une valeur inférieure à la résolution fixée. Nous pouvons constater que cette valeur ne diminue pas toujours : par exemple, entre les figures 3.36 b. et c., la valeur du déséquilibre a légèrement augmenté (de 5.68 à 6.11). Cette augmentation est la conséquence de déplacements d’agents-point voisins, qui ont provoqué une augmentation de la valeur du déséquilibre de l’agent-point (cf. en annexe D page 250). L’état final d’équilibre est atteint en figure 3.36 e pour laquelle la valeur du déséquilibre est 0.99 (la résolution est ici de 1.0m). La figure 3.38 donne la trajectoire de l’agent-point pendant le processus.

La figure 3.38 donne un aperçu des vecteurs de déplacement (figure a.) et des trajectoires (figure b.) de tous les agents-point à la fin du processus. Nous pouvons constater que les points portant les contraintes de déformation ne sont pas forcément ceux dont les trajectoires sont les plus longues.

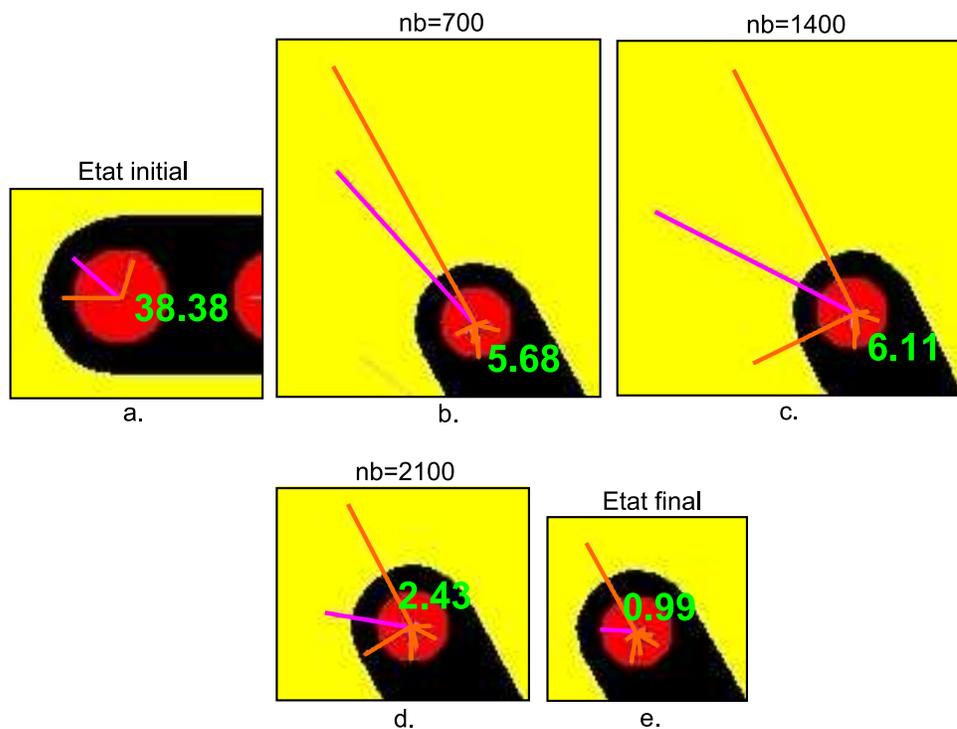


FIGURE 3.36 – Evolution de la valeur de déséquilibre et des vecteurs de déplacement de l'agent-point 31 pendant la déformation

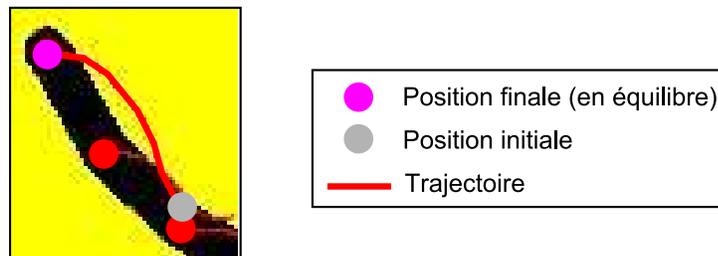


FIGURE 3.37 – Trajectoire de l'agent-point 31 pendant la déformation

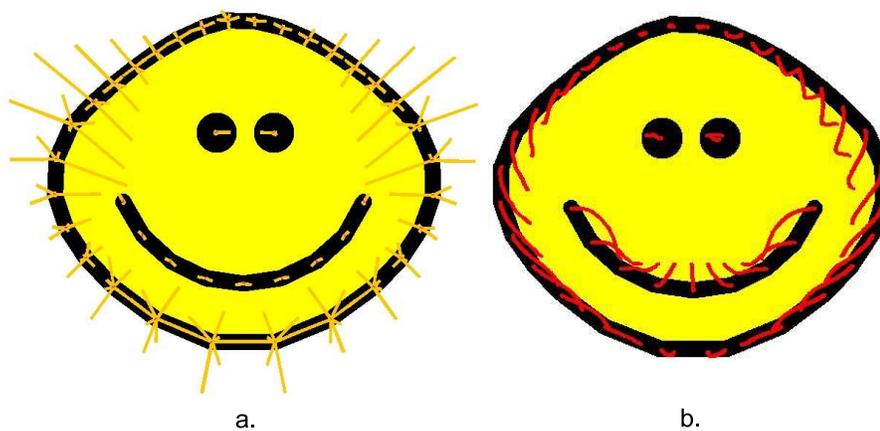


FIGURE 3.38 – Vecteurs de déplacement et trajectoire de tous les agents-point à la fin de la déformation

Bilan de la partie 3.1 Dans cette partie, nous avons présenté comment le modèle GAEL permet d'effectuer des opérations continues. Nous avons vu que l'ajout du niveau submicro et une modélisation des points sous forme d'agents peuvent permettre de rendre les agents géographiques déformables. Nous présentons dans la prochaine partie comment cette méthode de déformation est intégrée au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) pour permettre la gestion hybride d'opérations continues et discrètes.

3.2 Un modèle pour la gestion d'opérations continues intégré au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007)

Nous avons montré dans la partie précédente comment le modèle GAEL permet d'obtenir des déformations avec l'ajout du niveau submicro et une modélisation sous forme d'agents des points composant l'objet à déformer. Nous présentons dans cette partie la manière dont le modèle GAEL est intégré au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) pour permettre le déclenchement conjoint d'opérations discrètes et continues au sein d'un unique modèle de généralisation automatique. Plus précisément, cette partie présente comment le niveau submicro est articulé avec les niveaux micro et meso. Cette articulation repose sur la modélisation des objets à déformer sous la forme d'agent que nous appelons *agents élastiques*. Ces agents gèrent eux-mêmes leur propre déformation dont les caractéristiques sont portées par des *contraintes élastiques*.

Un agent élastique est un agent géographique qui a la capacité de se déformer. Cette déformation est guidée par des contraintes particulières que nous appelons *contraintes élastiques*. Ces contraintes incitent l'agent à se déformer. Les classes *agent élastique* et *contrainte élastique* du modèle GAEL sont présentées sur le diagramme UML de la figure 3.39. Un agent élastique est décomposé en objets submicro pour pouvoir se déformer. Les contraintes élastiques portent sur l'agent élastique et sont traduites en contraintes submicro portées par les objets submicro de l'agent élastique. Les classes *agent élastique* et *contrainte élastique* permettent une articulation du niveau submicro avec celui de l'objet. Nous présentons ces classes plus en détail dans les parties 3.2.1 et 3.2.2.

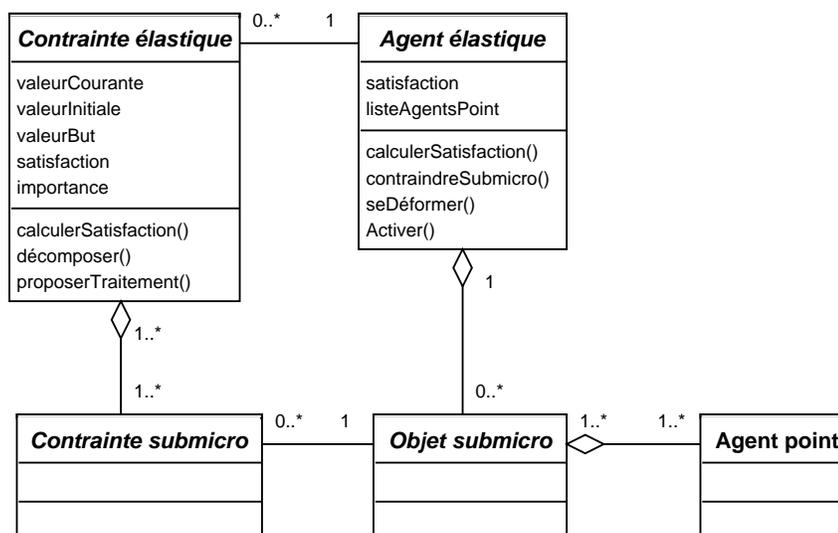


FIGURE 3.39 – Les classes agent et contrainte élastique

3.2.1 Les contraintes élastiques

Une contrainte élastique porte sur un caractère d'un agent élastique. Par exemple, pour l'objet de la figure 3.1 page 109, les contraintes portent sur la distance entre les deux yeux, les formes de la bouche et de la tête, ainsi que les positions relatives entre la bouche, les

yeux et la tête. Ces caractères peuvent être contraints à changer ou bien à être préservés. Par exemple, la distance entre les deux yeux est contrainte à diminuer, alors que la forme arrondie de la tête est contrainte à être préservée. Ces contraintes élastiques qui portent sur des caractères visibles au niveau de l'objet sont traduites au niveau submicro sous la forme de contraintes attachées aux objets submicro (par exemple, la contrainte de préservation de forme de la tête est traduite en contraintes de préservation de longueur et orientation des segments du contour de l'objet). Une contrainte élastique est caractérisée par les attributs suivants :

- ses **valeurs courante, initiale et but** : ce sont les valeurs courante, initiale et but des caractères contraints. Cette valeur est calculée à l'aide d'une mesure et n'est pas forcément qu'un simple nombre.
- sa **satisfaction** : cette valeur entière entre 0 et 10 traduit l'état de satisfaction de la contrainte. C'est une interprétation de l'écart entre les valeurs courante et but de la contrainte.
- son **importance** : cette valeur entière traduit l'importance relative de cette contrainte à être satisfaite par rapport aux autres.

Une contrainte élastique porte les méthodes suivantes :

- La méthode **calculerSatisfaction** : cette méthode permet de calculer la valeur de satisfaction de la contrainte.
- La méthode **décomposer** : cette méthode permet de traduire la contrainte élastique du niveau de l'objet au niveau de ses parties en la décomposant en contraintes submicro. L'effet de cette méthode est d'instancier des contraintes sur les objets submicro de l'agent élastique. Par exemple, une contrainte de longueur portant sur un objet linéaire à déformer peut être traduite en contraintes submicro de longueur sur les segments composant l'objet linéaire. La façon de traduire une contrainte élastique en contraintes du niveau submicro n'est pas toujours directe. Nous donnons en partie 4.2.1.2 page 215 des pistes permettant d'améliorer cette étape.
- La méthode **proposerTraitement** : cette méthode permet à la contrainte de proposer à l'agent un unique traitement lui permettant d'être satisfaite. Les contraintes élastiques de déformation (ce sont les contraintes qui se décomposent en contraintes submicro de déformation) proposent l'opération *seDéformer* que nous présentons dans la partie suivante. Les contraintes de préservation de forme ne proposent aucun traitement.

Nous présentons maintenant comment l'agent élastique se déforme en étant guidé par ses contraintes élastiques.

3.2.2 Les agents élastiques

Un agent élastique porte des contraintes élastiques et est caractérisé par une satisfaction. Cette satisfaction est, comme pour les agents géographiques du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007), une agrégation des satisfactions de ses contraintes élastiques. Son objectif est d'améliorer son état de satisfaction. Pour cela, il a la capacité de se déformer. Il est composé d'objets submicro qu'il peut contraindre en fonction de ses contraintes élastiques. Il gère lui-même sa déformation en activant ses agents-point. Un agent élastique est caractérisé par les attributs suivants :

- sa **satisfaction** : cette valeur traduit l'état de satisfaction de l'agent élastique en fonction des valeurs de satisfaction de ses contraintes.
- sa **listeAgentsPoint** : c'est la liste de ses agents-point dont il gère l'activation. Cette liste est utilisée lors du déclenchement de la méthode *seDéformer*

Un agent élastique porte les méthodes suivantes :

Une méthode *calculerSatisfaction* : cette méthode permet à l'agent de calculer la valeur de sa satisfaction. Nous proposons de prendre la moyenne des satisfactions des contraintes, pondérée par leur importance.

Une méthode *contraindreSubmicro* : cette méthode permet à l'agent d'instancier les contraintes de ses objets submicro. Elle fait appel aux méthodes *décomposer* des contraintes élastiques de l'agent.

Une méthode *seDéformer* : cette méthode permet à l'agent élastique de se déformer en fonction de ses contraintes submicro. Le processus déclenché est présenté en figure 3.40.

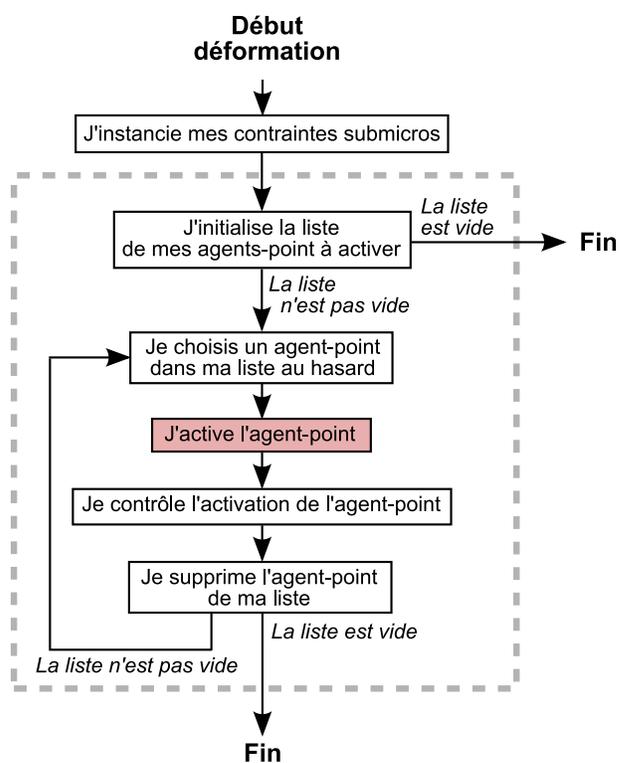


FIGURE 3.40 – Traitement de déformation de l'agent élastique

Pour se déformer, l'agent instancie les contraintes de ses objets submicro en invoquant sa méthode *contraindreSubmicro*. Il entre ensuite dans une phase d'activation de ses agents-point encadrée en gris sur la figure 3.40 qui est identique à celle du moteur élastique (cf. figure 3.28 page 140). Cette phase consiste à initialiser la liste des agents-point de l'agent élastique en ajoutant tous les agents-point qui ne sont pas en équilibre, c'est-à-dire tous

ceux qui portent des contraintes submicro de déformation. Ensuite, les agents-point de la liste sont activés les uns après les autres jusqu'à ce que la liste soit vide. Une phase de contrôle de l'activation des agents-point a été ajoutée. Nous verrons des cas d'utilisation possibles en partie 3.3.

Ainsi, lors de l'exécution de la méthode *seDéformer*, l'agent élastique joue lui-même le rôle du moteur élastique. Cette méthode peut être comparée à la méthode *activation des composants* d'un agent meso présentée en partie 1.3.3.4 (cf. figure 1.39 page 71) : de la même façon que l'agent meso gère l'activation de ses agents composants, l'agent élastique gère l'activation de ses agents-point. Pour un agent meso, cette méthode est utilisée pour satisfaire sa contrainte appelée *contrainte de satisfaction des agents composants*. Pour l'agent élastique, cette méthode est utilisée pour la satisfaction de ses contraintes élastiques.

La méthode *Activer* Cette méthode permet de lancer le cycle de vie de l'agent élastique. L'agent élastique est conçu de façon à pouvoir utiliser le cycle de vie unifié proposé en figure 3.30 page 142. La classe *agent élastique* hérite de la classe générique *agent* (cf. figure 3.41). L'activation d'un agent élastique a pour particularité que :

- toutes ses contraintes lui proposent le même traitement : une déformation,
- il n'a que cet unique traitement à essayer,
- et il mémorise son état courant en mémorisant la position de ses agent-point.

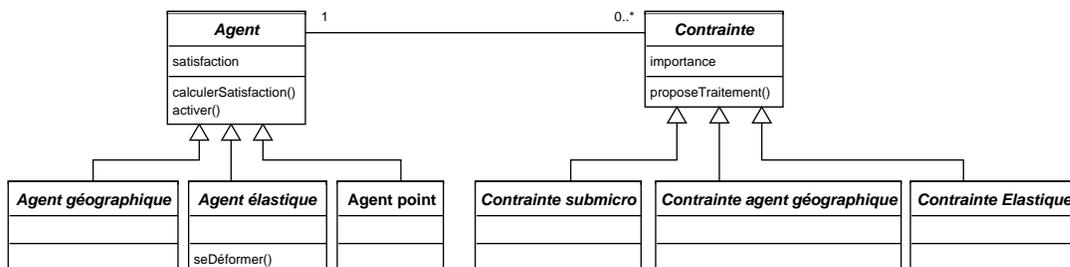


FIGURE 3.41 – Les classes agent élastique et contrainte élastique

Nous montrons maintenant comment l'objet exemple de la figure 3.1 est modélisé sous la forme d'un agent élastique.

3.2.3 Application à l'objet exemple

Rappelons que notre objectif est de transformer l'objet initial de la figure 3.1 pour avoir des yeux plus proches, une bouche plus grande et souriante, tout en préservant au mieux la forme arrondie de la tête et les positions relatives des yeux et de la bouche dans la tête. L'objet est modélisé sous la forme d'un agent élastique et le besoin est traduit par les quatre contraintes élastiques suivantes :

- une contrainte portant sur **la distance entre les yeux** : la valeur but de ce caractère est la moitié de la distance initiale. Cette contrainte se décompose en une unique contrainte submicro de distance portant sur la relation entre les deux objets submicro point singleton correspondant aux yeux.

- une contrainte portant sur **la forme de la bouche** : cette contrainte incite la bouche à acquérir une forme semi-circulaire et à grossir. Ce caractère est mesuré à partir de la valeur moyenne et l'écart-type des valeurs des angles entre deux segments consécutifs composant la bouche, ainsi que de sa longueur. La valeur moyenne de ces angles est contrainte à valoir $\Pi/8$, et la longueur de la bouche à être 2.5 fois plus grande. Cette contrainte est décomposée sous la forme de contraintes submicro de longueur et d'orientation portant sur les segments de la bouche.
- une contrainte portant sur **la forme de la tête** : ce caractère est mesuré à partir de la moyenne et de l'écart type des valeurs des angles entre deux segments consécutifs composant la tête. Ces valeurs sont contraintes à être préservées. Cette contrainte élastique est traduite au niveau submicro sous la forme de contraintes de préservation de longueur et d'orientation des segments composant la tête.
- une contrainte portant sur **la position relative de la bouche, des yeux et de la tête** : ce caractère est mesuré par les distances minimales entre chaque oeil et la tête, chaque oeil et la bouche, et la bouche et la tête. La satisfaction de la contrainte dépend de l'écart de ces valeurs à leur valeurs initiales. Cette contrainte est décomposée sous la forme de contraintes submicro de préservation des centres de gravité des triangles de l'objet.

Lorsqu'il est activé, l'agent élastique commence son cycle de vie représenté en figure 3.30 page 142 en évaluant sa satisfaction. Sa satisfaction est la moyenne des satisfactions de ses contraintes (cf. l'objet initial en figure 3.42). La satisfaction de ses contraintes élastiques de préservation est parfaite alors que celle de ses contraintes élastiques de déformation ne l'est pas. Un agent élastique est dans un état parfait à l'état initial uniquement dans le cas où il ne porte que des contraintes de préservation de forme. Comme ici il n'est pas dans un état parfait (sa satisfaction vaut 4), ses contraintes lui proposent d'améliorer sa satisfaction en s'appliquant une déformation. Cette déformation prend en compte les contraintes submicro composant chacune des contraintes élastiques. A l'issue de la déformation, les satisfactions des contraintes de déformation et de préservation de forme ont été équilibrées par les déplacements des points et la satisfaction de l'agent élastique a été améliorée. Il sourit.

La traduction de chaque contrainte élastique sous forme de contraintes submicro est une phase importante de la conception d'une contrainte élastique car elle détermine le résultat de la déformation. Cette traduction n'est pas automatique : elle est effectuée par le concepteur de la contrainte élastique (lors de l'écriture de la méthode **décomposer**) en fonction de ses connaissances des effets des contraintes submicro qu'il utilise. Si pour certaines contraintes élastiques cette traduction est aisée (par exemple, la contrainte élastique de distance entre les yeux, ou de forme de la bouche), d'autres sont plus complexes et nécessitent de bonnes connaissances des contraintes submicro.

Plusieurs traductions des contraintes élastiques sous forme de contraintes submicro sont possibles. Il n'est pas possible de savoir a priori si celle employée est la meilleure. La figure 3.43 présente les résultats d'autres déformations obtenues en traduisant différemment les contraintes élastiques.

- en figure a., la contrainte de préservation de centre de gravité de triangle est remplacée par une autre de préservation d'aire,
- en figure b., les triangles portent les deux contraintes (préservation d'aire et de position de centre de gravité),

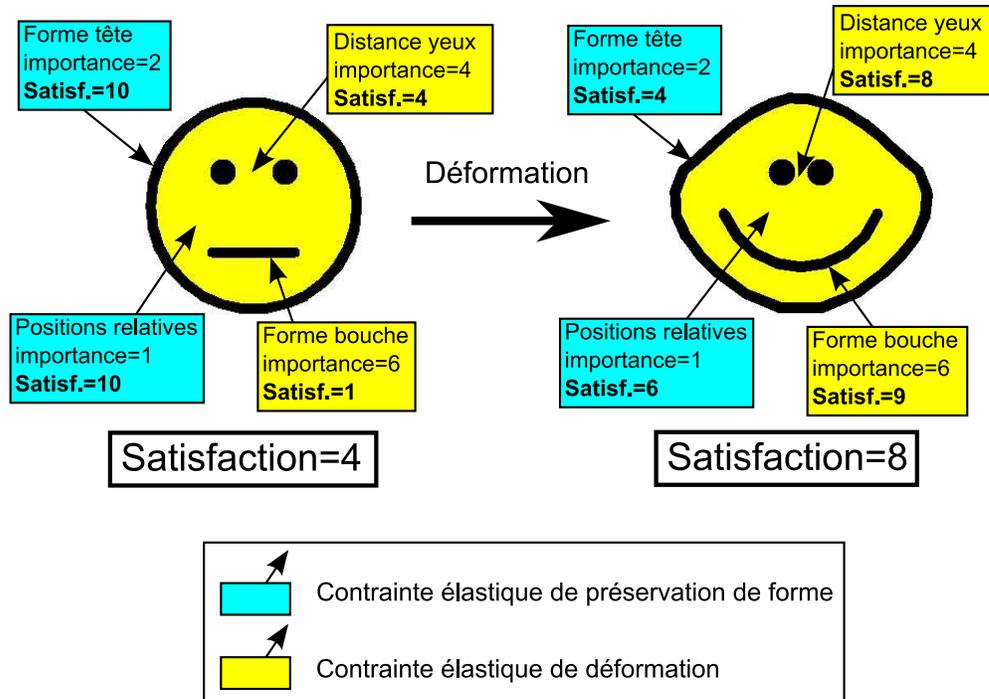


FIGURE 3.42 – Évolution des valeurs de satisfaction lors de la déformation de l'objet exemple

- en figure c., les triangles ne portent aucune des deux contraintes. En conséquence, la forme de la tête est préservée, alors que celle de position relative aucune contrainte submicro
- en figure d., la contrainte de préservation de longueur des segments de la tête est supprimée. En conséquence, la tête a grossi,
- en figure e., les contraintes de préservation de longueur et d'orientation des segments composant la tête sont instanciées avec des importances dix fois supérieures. En conséquence, la tête résiste davantage aux contraintes de déformation de la bouche et des yeux,
- en figure f., les valeurs but des contraintes d'angle des segments de la bouche ont été changées en leur opposé, afin de forcer l'objet non pas à sourire, mais au contraire à être mécontent. L'impact de ce changement sur la forme de la tête est différent,
- en figure g., les segments composant la bouche sont contraints à être deux fois plus courts,
- et enfin, en figure h., la distance but entre les deux yeux a été changée et vaut le triple de la distance initiale.

Les cas présentés montrent qu'une grande variété de déformations peuvent être obtenues en fonction des contraintes submicro choisies (et de leurs importances relatives) pour traduire les contraintes élastiques. Nous évoquons en partie 4.2.1.2 page 215 des pistes d'amélioration de cette étape de traduction.

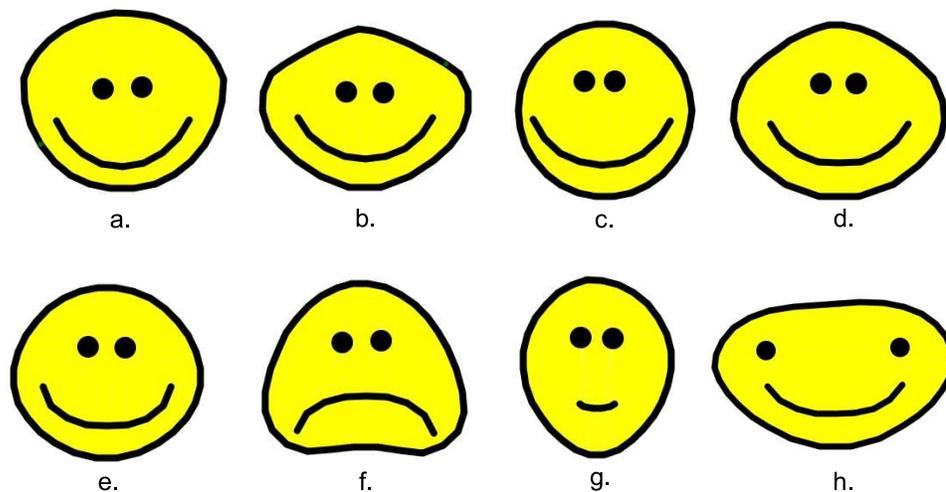


FIGURE 3.43 – Autre résultats de déformation avec des contraintes submicro différentes et différents paramétrages

3.2.4 Bilan

Nous avons montré dans cette partie en quoi le modèle GAEL permettait à un agent élastique de gérer lui-même sa propre déformation grâce à l'introduction de contraintes élastiques décomposées en contraintes au niveau submicro, et en activant les agents-point le composant. Même si un agent élastique a le même cycle de vie qu'un agent géographique du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) à comportement discret (cf. figure 3.41), le modèle GAEL ne permet actuellement pas de disposer d'agents géographiques pouvant avoir à la fois des comportements élastiques (ou continus) et discrets : un agent géographique est soit purement élastique, soit purement rigide. Plusieurs améliorations que nous évoquons en partie 4.2.1.2 page 216 sont en effet nécessaires pour atteindre cet objectif et pouvoir disposer d'une unique classe d'agents géographiques capables de gérer des opérations discrètes et continues.

Notre objectif étant de permettre une préservation des relations entre des objets géographiques qui se généralisent exclusivement avec des comportements discrets, et des champs. Pour cela, nous proposons de modéliser les champs comme des agents élastiques, pour leur permettre de se déformer et ainsi de s'adapter à la généralisation des autres objets.

Dans la prochaine partie, nous présentons comment le modèle GAEL permet de prendre en compte les relations objet-champ lors du processus de généralisation des objets géographiques.

3.3 Un modèle pour la prise en compte de relations objet-champ

Nous avons présenté dans la partie précédente comment le modèle GAEL était intégré au sein du modèle (Ruas et Duchêne, 2007) pour permettre de disposer d'agents géographiques ayant des comportements déformables. Nous présentons dans cette partie comment ce comportement est utilisée pour la prise en compte des relations objet-champ durant le processus de généralisation. Nous montrons comment le modèle GAEL permet aux champs de se déformer pendant le processus de généralisation pour la préservation des relations objet champ.

La figure 3.44 schématise la façon dont sont pris en compte les champs dans le modèle GAEL. Les objets géographiques (bâtiment, route, etc.) et les champs (relief, occupation du sol, etc.) partagent des relations de type « être sur ». Ces relations concernent les positions relatives des objets géographiques et des champs. Lors du processus de généralisation des objets géographiques basée sur (Ruas et Duchêne, 2007), nous proposons de prendre en compte les relations objet-champ à travers les deux mécanismes suivants :

- **les objets géographiques déforment les champs** : cette déformation permet une préservation des relations objet-champ. Cette déformation est un effet de bord des opérations de généralisation des objets géographiques,
- **les champs contraignent les objets géographiques** : les objets géographiques doivent prendre en compte leurs relations avec les champs lors de leur généralisation pour tenter de les préserver au mieux.

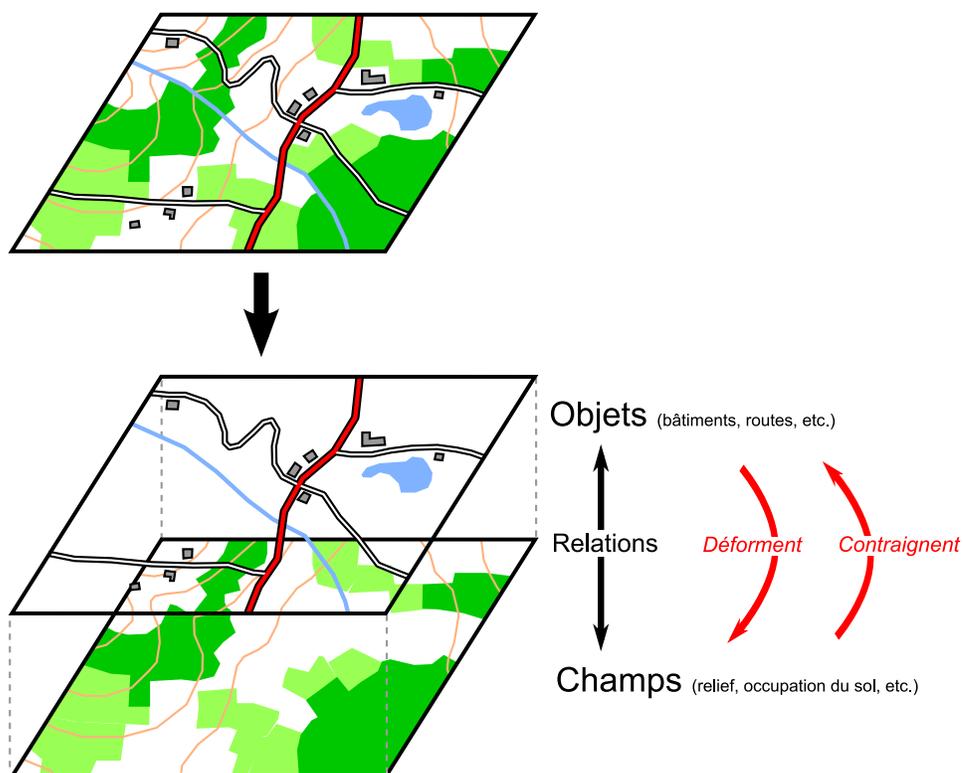


FIGURE 3.44 – Relations objet-champ dans le modèle GAEL

Cette partie est organisée en trois sous-parties :

- dans un premier temps, nous présentons notre modélisation des champs, sous la forme d’agents élastiques particuliers, les *agents-champ*,
- ensuite, nous proposons une modélisation des relations et contraintes nécessaires à la prise en compte des relations objet-champ,
- enfin, nous montrons comment ces relations et leurs contraintes sont prises en compte dans le processus de généralisation du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007).

3.3.1 Les agents-champ

Afin de permettre aux champs de se déformer, nous proposons de les modéliser sous la forme d’agents élastiques. Chaque champ est décomposé à l’aide d’une triangulation, les éléments de cette triangulation étant des objets submicro pouvant être contraints suivant le type du champ considéré et les besoins. Chaque champ porte des contraintes élastiques de préservation de forme qui sont traduites sous la forme de contraintes de préservation au niveau submicro. Ces contraintes dépendent des caractéristiques du champs à préserver. En particulier, il est possible de prendre en compte les objets de champ que nous avons présentés en partie 2.1.2 page 81 pour forcer la préservation de leur forme. Les contraintes élastiques de déformation sont les contraintes portant sur les relations entre les objets et le champ que nous présentons en partie 3.3.2.1.

Pour obtenir une modélisation adéquate de chaque champ, il est nécessaire de traiter les données géographiques de base à partir desquelles les champs sont construits. Par exemple, le champ relief est construit à partir de courbes de niveaux linéaires en effectuant une triangulation. Chaque champ dispose ainsi d’une méthode appelée *structurer* qui permet d’obtenir une modélisation de ce champ en vue de son utilisation par notre modèle.

Nous proposons maintenant des modélisations pour les deux exemples d’agents-champ que nous nous sommes proposés de traiter : l’agent-champ relief et l’agent-champ occupation du sol. Pour chacun d’eux, nous montrons quels objets de champ peuvent être pris en compte et quelles contraintes élastiques de préservation de forme nous proposons de leur faire porter.

3.3.1.1 L’agent-champ relief

Le champ relief est modélisé à l’aide d’une triangulation contrainte par les courbes de niveau. Les objets submicro concernés sont les points singletons, segments et triangles composant cette triangulation. De nombreux objets de champ concernent le relief et peuvent être inclus dans cette triangulation. Nous proposons de tenir compte des objets de champs suivants (cf. figure 3.45) :

- les **points cotés** : ces objets ponctuels sont caractérisés par une valeur d’altitude. Certains comme les bornes géodésiques sont des objets géographiques physiques liés au champ,
- les **courbes de niveau** : chacune est caractérisée par une certaine valeur d’altitude,
- des **lignes de champs diverses** : ce sont des objets linéaires liés au relief (talus, etc.). Une analyse du relief peut permettre d’explicitier et inclure dans ces objets de champ les lignes de crête et de talweg, dont les formes doivent être préservées au mieux.



- Segment de courbe de niveau
- Point coté
- Agent-point

FIGURE 3.45 – L'agent-champ relief et ses objets de champ

Ces objets de champ sont explicités sous la forme d'agrégats d'objets submicro qui sont contraints de façon à prendre en compte certaines contraintes particulières de préservation de forme propres à ces objets de champ (cf. figure 3.46).

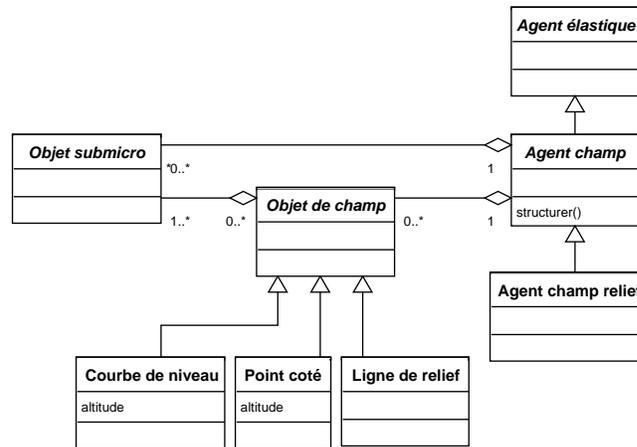


FIGURE 3.46 – Modélisation de l'agent-champ relief et de ses objets de champ

3.3.1.2 L'agent-champ occupation du sol

Le champ d'occupation du sol est modélisé sous la forme d'une triangulation. Les points triangulés sont les points des limites des parcelles d'occupation du sol, la triangulation étant contrainte par ces limites. Les surfaces sans occupation du sol sont explicitées et également triangulées. Ainsi, un triangle appartient à une unique parcelle d'occupation du sol. Les objets de ce champ sont les parcelles d'occupation du sol elles-mêmes et leurs limites (cf. figure 3.47). Elles sont modélisées sous la forme d'agrégats d'objets submicro (cf. figure 3.48).

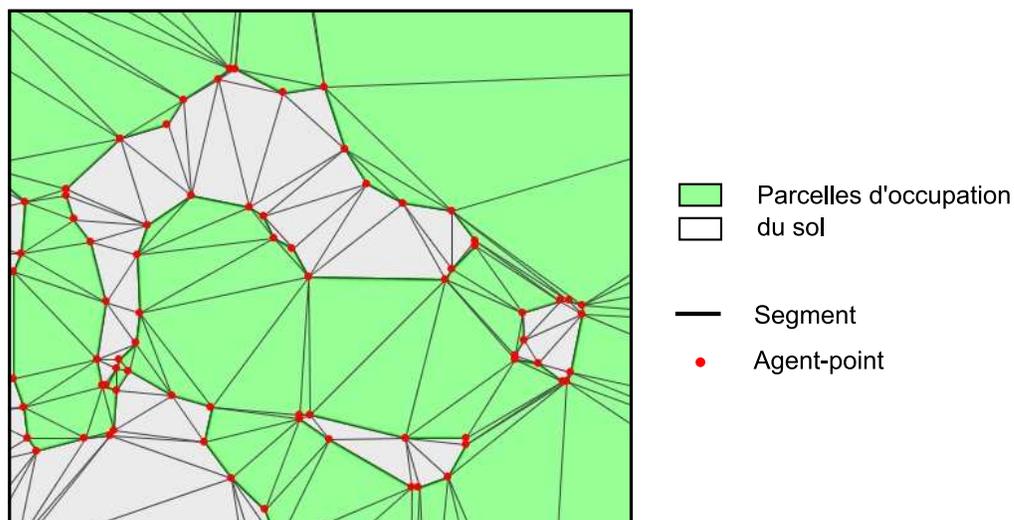


FIGURE 3.47 – L'agent-champ occupation du sol

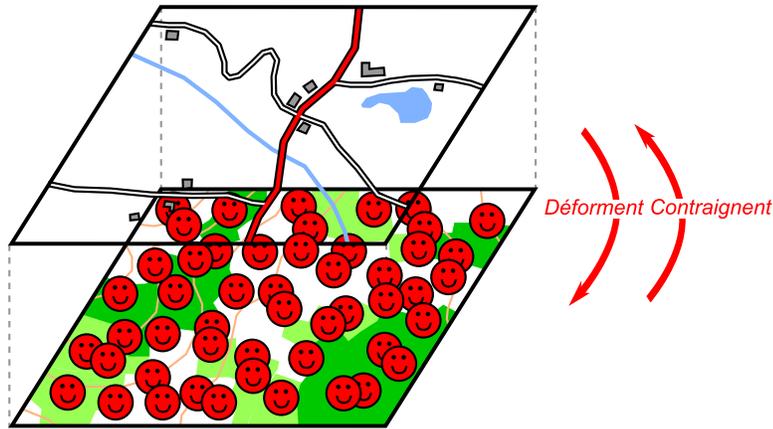


FIGURE 3.49 – Les champs vus comme des nappes élastiques composées d’agents-point se déformant sous l’action des objets, et les contraignant en retour

3.3.2.1 Modélisation des contraintes relationnelles objet-champ

La figure 3.50 présente les différentes classes que nous proposons d’introduire pour la prise en compte des relations entre objets et champs dans le processus de généralisation. Nous introduisons les trois classes suivantes :

- la classe *relation agent géographique-champ* qui permet de caractériser la relation existante entre un agent géographique et un agent-champ,
- la classe *contrainte relationnelle agent géographique-champ* qui traduit la façon dont l’agent géographique voit sa contrainte relationnelle avec le champ,
- et la classe *contrainte élastique relationnelle champ agent géographique* qui est une contrainte élastique traduisant la façon dont l’agent-champ voit sa contrainte relationnelle avec un agent géographique. Un agent-champ porte une contrainte élastique relationnelle pour chaque agent géographique avec lequel il partage une relation. Cette contrainte relationnelle est élastique : elle propose à l’agent-champ de se déformer. Elle est traduite sous la forme de contraintes submicro de déformation.

La figure 3.51 donne un exemple de cas d’instanciation d’objets de ces classes. Sur cette figure, un agent-champ partage trois relations, explicitées chacune sous la forme d’un objet, avec trois agents géographiques. Chaque agent géographique porte une contrainte sur cette relation, et l’agent-champ porte également une contrainte élastique pour chacune de ces relations. Cette modélisation comporte des points communs avec celle des relations et contraintes relationnelles entre agents micro proposée par (Duchêne, 2004) (cf. figure 1.40 page 73). Les informations portant sur la relation qui sont communes aux agents en relation est mise en commun à travers un objet de la classe *relation*. Chacun des objets concernés par la relation porte une contrainte différente qui traduit comment l’objet voit sa contrainte relationnelle (cette façon est différente selon l’objet de la relation). A la différence des contraintes relationnelles micro, nous avons ici une contrainte relationnelle entre un agent-champ et un agent géographique qui est élastique : elle est décomposée au niveau submicro et est satisfaite par déformation du champ.

Nous présentons maintenant plus en détail les attributs et méthodes de chacune de ces trois classes que nous proposons d’introduire.

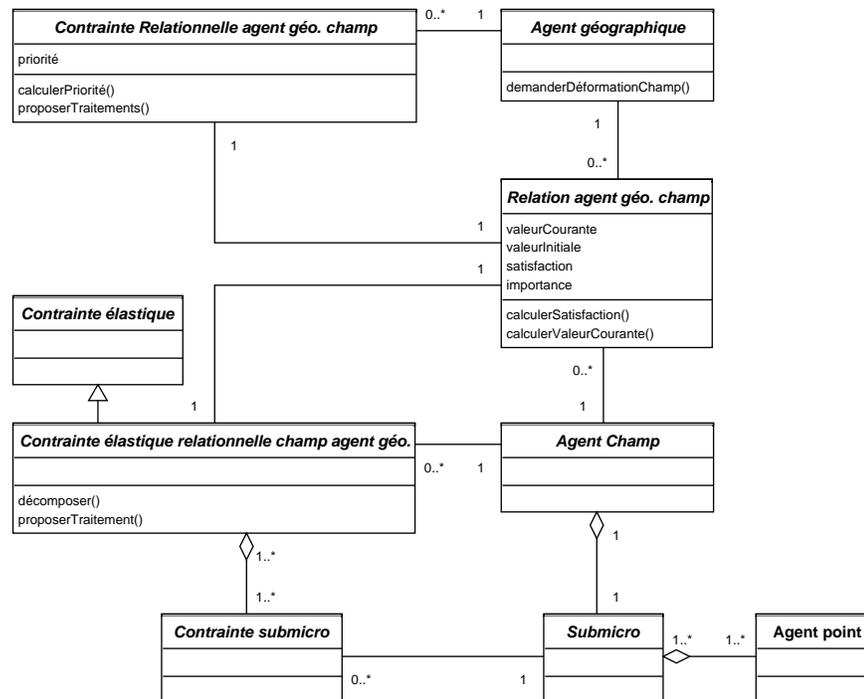


FIGURE 3.50 – Conainte relationnelle objet-champ

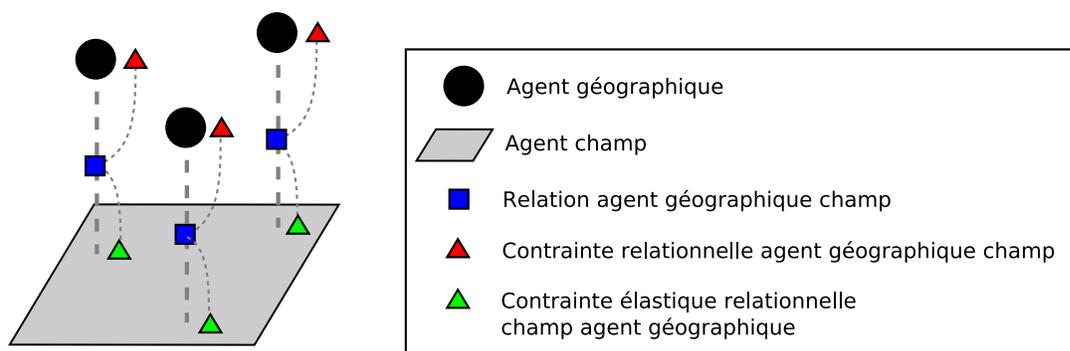


FIGURE 3.51 – Exemples de relations et contraintes entre trois agents géographiques et un agent-champ

3.3.2.2 Les relations agent géographique-champ

Un objet de la classe *relation agent géographique-champ* est lié à l'agent géographique et à l'agent-champ concernés par la relation. Il porte les attributs et méthodes suivants :

- des attributs **valeur courante** et **valeur initiale** : ces attributs permettent de caractériser la relation dans son état courant et dans son état initial,
- un attribut **satisfaction** : cette valeur entière entre 0 et 10 permet de qualifier l'écart entre la valeur courante et la valeur but (qui est ici égale à la valeur initiale, vu que l'on cherche à préserver cette relation) de la relation,
- un attribut **importance** : cet attribut traduit l'importance de la préservation de cette relation,
- une méthode **calculerValeurCourante** qui permet le calcul de la valeur courante de la relation. Cette valeur dépend des propriétés du champ aux alentours de l'objet. C'est au niveau du calcul de cette valeur que l'interpolation du champ est utilisée,
- et enfin une méthode **calculerSatisfaction** qui permet le calcul de la satisfaction de la préservation de la relation.

3.3.2.3 Les contraintes relationnelles agent géographique-champ

Une *contrainte relationnelle agent géographique-champ* porte sur un objet géographique partageant une relation contrainte avec un champ (cf. figure 3.50 page 163). Il permet à l'agent géographique de prendre en compte cette relation lors de sa généralisation propre. Un objet de la classe *contrainte relationnelle agent géographique-champ* porte les attributs et méthodes suivants :

- un attribut **priorité** : cet attribut traduit l'urgence du traitement de cette contrainte par l'agent géographique,
- une méthode **calculerPriorité** : cette méthode permet à l'agent géographique sur lequel porte cette contrainte de calculer sa valeur de priorité en fonction de son état et de son contexte,
- une méthode **proposerTraitements** : cette méthode permet à l'agent géographique de disposer des traitements à priori les mieux adaptés pour améliorer la satisfaction de la relation liée à la contrainte. Nous verrons en partie 3.3.3 page 165 que les contraintes relationnelles incitent l'agent géographique à déformer l'agent-champ de la relation.

3.3.2.4 Les contraintes élastiques relationnelles champ-agent géographique

Une *contrainte élastique relationnelle champ-agent géographique* porte sur un agent-champ partageant une relation contrainte avec un agent géographique. L'agent-champ prend en compte cette contrainte lors de sa déformation afin de chercher à préserver sa relation avec l'agent géographique. Cette contrainte est élastique : elle est traduite au niveau submicro par des contraintes spécifiques, tout comme les contraintes élastiques présentées en partie 3.2.1. Elle porte les méthodes suivantes :

- une méthode *décomposer* : cette méthode permet de traduire la contrainte élastique au niveau submicro. Les contraintes submicro créées sont toutes des contraintes submicro de déformation qui portent le plus souvent sur des triangles composant le champ. Nous présenterons en partie 4.1 page 173 des exemples de telles contraintes submicro.

- et une méthode *proposerTraitement* : cette méthode est utilisée par l’agent-champ pour obtenir les traitements lui permettant de satisfaire cette contrainte. Nous verrons en partie 3.3.3 page 165 que comme pour les contraintes élastiques, un unique traitement est proposé à l’agent-champ : une déformation.

Nous avons présenté comment les relations objet-champ et de leurs contraintes sont modélisées dans le modèle GAEL. Nous donnons des exemples de telles relations et contraintes en partie 3.3.3 page 165. L’ensemble de ces classes a été défini pour être compatible avec le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007). Cette compatibilité permet d’introduire ces relations et leurs contraintes dans le processus de généralisation des objets géographiques.

3.3.3 Introduction des relations objet-champ dans le processus de généralisation

Le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) permet une généralisation des agents géographiques. Nous présentons maintenant comment les relations objet-champ dont nous avons proposé une modélisation dans la partie précédente peuvent être prises en compte dans ce modèle pour être préservées (ce travail a été présenté dans (Gaffuri *et al.*, 2008)).

3.3.3.1 Prise en compte des relations objet-champ par les agents géographiques

La prise en compte des relations objet-champs dans le processus de généralisation d’agents géographiques s’appuie sur les points suivants :

1. La prise en compte des contraintes relationnelles agent-champ dans le calcul de la satisfaction des agents géographiques : lors du calcul de sa satisfaction, un agent géographique prend en compte non seulement ses contraintes habituelles, mais aussi la satisfaction de ses contraintes relationnelles avec les agents-champ. Ses contraintes relationnelles sont donc considérées comme les contraintes portant sur ses caractères propres. Leur état de satisfaction a donc un impact sur l’état de satisfaction global de l’agent géographique.

2. L’ajout d’une méthode *provoquerDéformationChamp* à la classe agent géographique : chaque agent géographique dispose d’une méthode *provoquerDéformationChamp* qui lui permet de déclencher l’activation d’un agent-champ avec lequel il partage une relation. L’agent-champ devient alors temporairement autonome et s’applique une déformation localement autour de l’agent géographique pour tenter d’améliorer sa satisfaction. Cette méthode consiste à :

- placer dans la *liste des agents-point* de l’agent-champ, les agents-point du champ appartenant aux triangles sur lesquels se trouve l’objet,
- activer l’agent-champ.

L’agent-champ tente alors de se déformer localement autour de l’agent géographique pour améliorer la satisfaction de la relation qu’il partage avec l’agent géographique, tout en prenant en compte ses contraintes propres. L’agent-champ annule sa déformation si ses agents-point ne parviennent pas à trouver une position pour laquelle la satisfaction du champ a été améliorée.

3. Une proposition de traitements adéquate par les contraintes relationnelles :

les traitements proposés par une contrainte relationnelle à l'agent géographique doivent permettre d'améliorer sa satisfaction. Pour cela, chaque contrainte propose au moins les deux traitements suivants :

- en premier lieu, une déformation de l'agent-champ concerné par la relation, via la méthode *provoquerDéformationChamp* de l'agent géographique,
- en deuxième lieu, tout autre traitement approprié de l'agent géographique lui-même pouvant lui permettre d'améliorer la satisfaction de la contrainte relationnelle. Le plus souvent, ce traitement est un déplacement de l'agent géographique. Nous verrons que cela peut être aussi une déformation suivant l'agent géographique considéré.

La déformation du champ est essayée en premier par l'agent géographique ; l'agent-champ essaie alors autant qu'il peut d'amortir les transformations de l'agent géographique. En cas d'échec, l'agent géographique tente à son tour de se transformer. Ainsi, les agents géographiques peuvent déformer les champs et sont contraints par eux comme proposé en figure 3.44 page 157. Les priorités des contraintes relationnelles doivent par ailleurs rester faibles, puisqu'il est souvent plus judicieux de favoriser les traitements proposés par les contraintes propres de l'agent géographique. La satisfaction de ses contraintes relationnelles avec les champs est en effet plutôt vue comme un effet de bord de sa généralisation propre.

Nous illustrons maintenant sur un cas comment ces trois points permettent de prendre en compte les relations objet-champ.

3.3.3.2 Un exemple simple de dynamique

Nous supposons ici que nous traitons le cas simplifié d'un unique agent géographique partageant une unique relation avec un agent-champ (cf. figure 3.52).

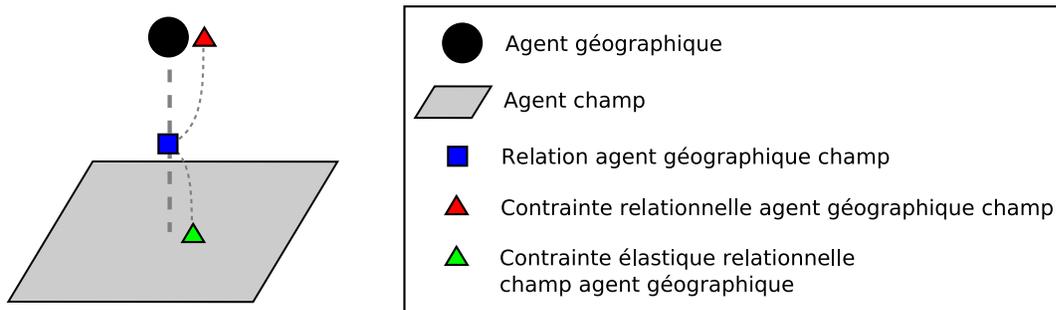


FIGURE 3.52 – Cas simplifié d'un agent géographique partageant une unique relation avec un champ

La figure 3.53 montre différentes étapes de la généralisation de cet agent géographique prenant en compte sa relation avec le champ. Nous présentons maintenant ces différentes étapes.

Étape 1 : (cf. figure 3.53 a.) l'agent géographique est activé et commence à effectuer sa propre généralisation : il commence par évaluer sa satisfaction. La valeur de sa satisfaction dépend de l'état de ses contraintes propres (elles peuvent être parfaitement satisfaites ou non) et de la satisfaction de sa contrainte relationnelle avec le champ (elle n'est pas

forcément satisfaite dans l'état initial car le champ a pu être déformé par un autre agent géographique proche). Nous supposons à cette étape que l'agent n'a pas un état satisfait, mais que sa contrainte relationnelle avec l'agent-champ est parfaitement satisfaite. De son côté, l'agent-champ n'a pas été déformé : sa satisfaction est parfaite.

Etape 2 : (cf. figure 3.53 b.) l'agent s'est appliqué des opérations de généralisation qui lui ont permis de faire progresser sa satisfaction en se transformant. Sa relation avec le champ a été détériorée par sa généralisation propre : la satisfaction de la relation a diminué. L'agent a essayé tous les traitements proposés par ses contraintes propres et aucun d'eux ne lui permet plus d'améliorer sa satisfaction. Il se voit à la fin proposer le traitement le moins prioritaire, à savoir *provoquerDéformationChamp* proposé par sa contrainte relationnelle. Il demande donc une déformation de l'agent-champ. De son côté, la satisfaction de l'agent-champ prenant en compte celle de la relation, la valeur de celle-ci a diminué.

Etape 3 : (cf. figure 3.53 c.) l'agent-champ est activé. Il calcule sa satisfaction qui prend en compte la contrainte relationnelle avec l'agent géographique qui n'est plus satisfaite. Il effectue donc une déformation qui prend en compte le nouvel état de l'agent géographique. Il se déforme. Cette déformation est conservée si le champ estime qu'il a amélioré son état de satisfaction, c'est-à-dire s'il a été capable de se déformer suffisamment pour faire progresser la satisfaction de la contrainte relationnelle, mais pas trop pour avoir préservé sa forme au mieux. A la fin de cette étape, deux cas de figure sont donc possibles : soit l'agent-champ s'est déformé, soit il ne s'est pas déformé.

Etape 4 : l'agent géographique reprend la main. Deux cas de figure sont possibles suivant que l'agent-champ s'est déformé ou non :

- L'agent-champ s'est déformé (cf. figure 3.53 d.) : cela signifie que l'agent-champ est parvenu, grâce à sa déformation, à faire progresser la satisfaction de la relation. Dans ce cas, la satisfaction de l'agent géographique aura elle aussi progressé. L'agent géographique va alors demander à nouveau une liste de traitements à ses contraintes et retourner à l'étape 2. L'agent géographique pourra alors à nouveau déformer le champ ou essayer de s'appliquer une opération autre proposée par sa contrainte relationnelle objet-champ.
- L'agent-champ ne s'est pas déformé cf. (figure 3.53 e.) : dans ce cas, la satisfaction de l'agent géographique n'a pas changé. Il essaie le dernier traitement de sa liste qui l'incite à satisfaire lui-même sa relation avec le champ (il est donc contraint par l'agent-champ qui a refusé de se modifier pour améliorer la satisfaction de la contrainte relationnelle qu'ils partagent). Il s'applique ce traitement qui est dans presque tous les cas un déplacement et vérifie à l'issue de ce traitement si sa satisfaction a augmenté, c'est-à-dire s'il a permis d'améliorer suffisamment la satisfaction de sa relation avec le champ sans trop diminuer la satisfaction de ses contraintes propres. Dans ce cas, (cf. figure 3.53 f.), il retourne à l'étape 2 et pourra éventuellement essayer à nouveau de déformer l'agent-champ. Dans le cas contraire, l'agent géographique termine sa généralisation et ni lui, ni l'agent-champ n'ont pu se transformer pour améliorer la satisfaction de la contrainte relationnelle qu'ils partagent.

Ainsi, à l'issue du processus, les quatre cas suivants sont possibles :

- **l'agent-champ ne s'est pas déformé, l'agent géographique ne s'est pas modifié du fait de la relation** (cf. figure 3.54 a.) : dans ce cas, les contraintes de

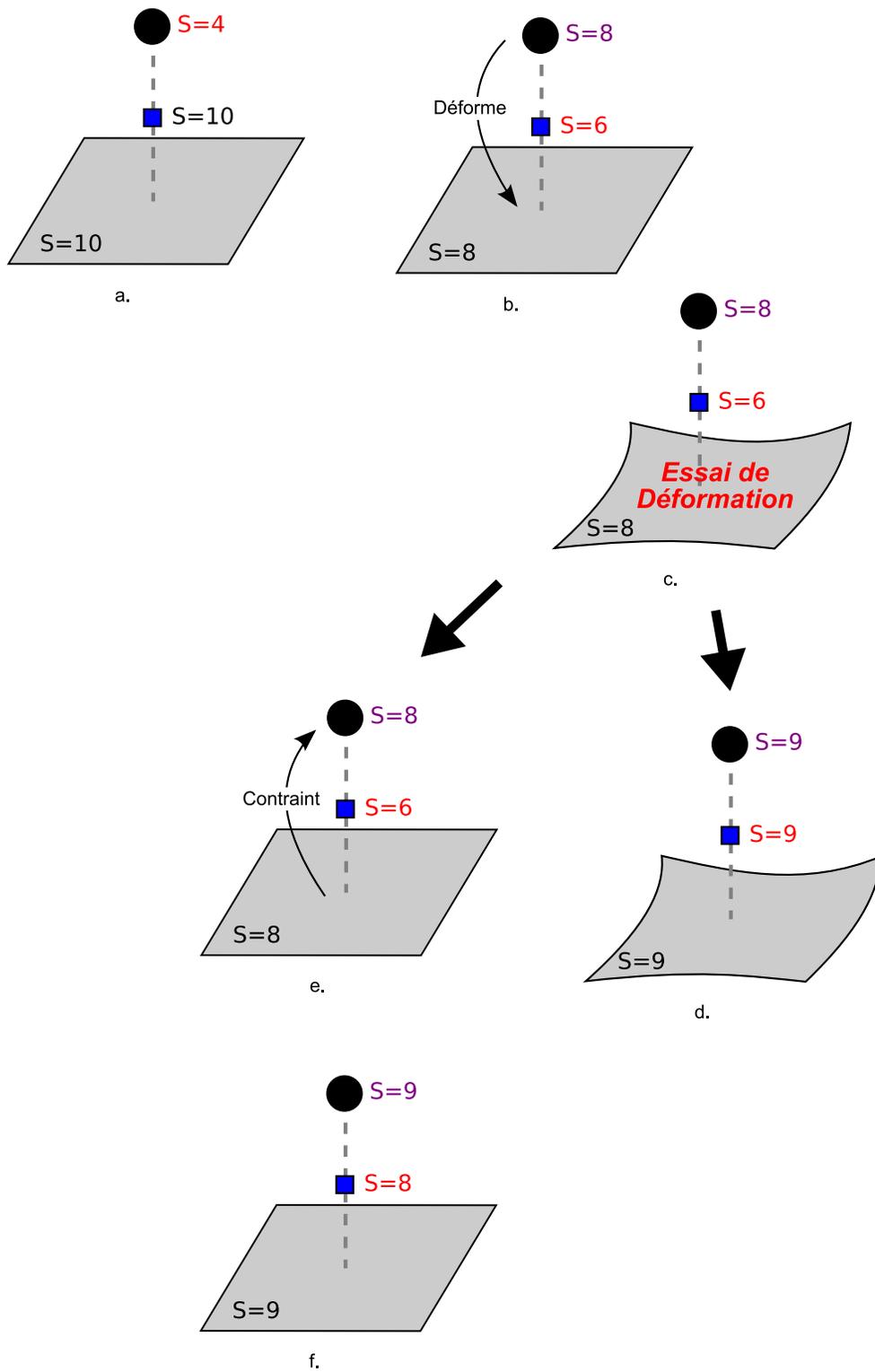


FIGURE 3.53 – Dynamique du cas simplifié

préservation de forme de l'agent-champ et de généralisation propre de l'agent géographique ont été favorisées au détriment de la satisfaction de la relation entre eux : les contraintes relationnelles n'ont pas pu être prises en compte. Un autre cas possible est aussi celui pour lequel la généralisation de l'agent géographique n'a pas altéré la relation. Pour ce cas, ni la déformation du champ ni une modification de l'agent géographique n'a été nécessaire.

- **l'agent-champ s'est déformé, l'agent géographique ne s'est pas modifié du fait de la relation** (cf. figure 3.54 b.) : dans ce cas, la généralisation de l'agent géographique a provoqué une altération de la relation, puis une déformation de l'agent-champ qui l'a acceptée et qui a permis d'améliorer l'état de satisfaction de la relation. L'agent géographique n'a pas eu besoin de se modifier, ou bien il a tenté de se modifier pour encore améliorer la satisfaction de la relation, mais cette modification a échoué.
- **l'agent-champ ne s'est pas déformé, l'agent géographique s'est modifié du fait de la relation** (cf. figure 3.54 c.) : dans ce cas, le champ a refusé de se déformer pour améliorer la satisfaction de la relation. C'est l'agent géographique qui s'est modifié pour permettre d'améliorer la relation. Dans ce cas, l'agent-champ a contraint l'agent géographique à modifier son état pour améliorer l'état de satisfaction de la relation.
- **l'agent-champ s'est déformé, l'agent géographique s'est modifié du fait de la relation** (cf. figure 3.54 d.) : dans ce cas, la déformation du champ a permis d'améliorer la satisfaction de la relation, mais pas suffisamment. L'agent géographique a également essayé de se transformer et a permis une amélioration de la relation. Dans ce cas, l'agent-champ et l'agent géographique ont permis d'atteindre un équilibre pour satisfaire leur relation. Ils ont partagé l'amortissement de la généralisation de l'agent géographique.

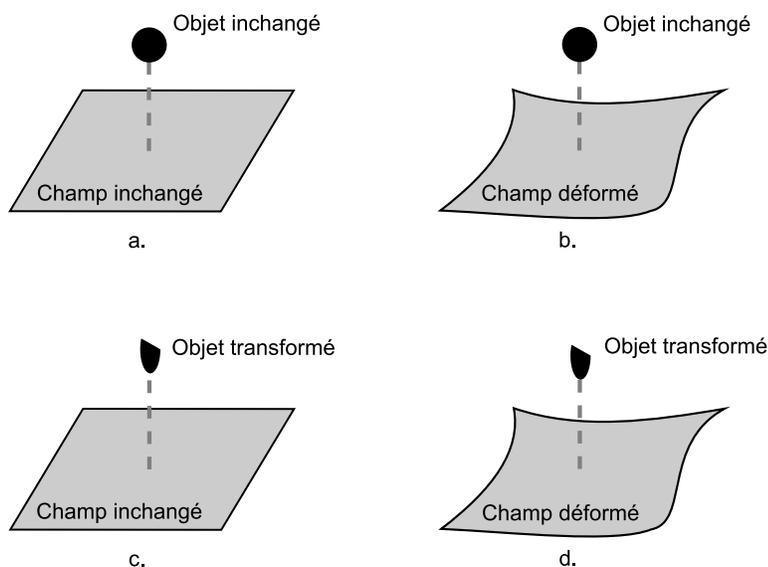


FIGURE 3.54 – Les quatre cas possibles de résultat d'interaction entre agent géographique et agent-champ

La fréquence de chacun de ces cas dépend de l'état des champs et des objets à généraliser, mais également de la façon dont les contraintes sont paramétrées d'une part, et les satisfactions calculées d'autre part. Nous verrons en partie 4 des exemples pour lesquels chacun des quatre cas suivants sont obtenus.

Cas général Dans le cas général, un agent géographique peut porter plusieurs contraintes relationnelles avec plusieurs agents-champ ; agent-champ porte également plusieurs contraintes avec plusieurs agents géographiques. Nous verrons au chapitre 4 qu'un agent géographique est capable de gérer ses relations avec plusieurs champs (il tente de les déformer à tour de rôle). Un agent-champ peut être déformé par plusieurs agents géographiques, il peut en contraindre certains et accepter la déformation d'autres. Les contraintes peuvent par ailleurs porter à la fois sur des agents géographiques micro et meso (nous verrons un exemple). De plus, la méthode de prise en compte des relations objet-champ proposée peut être mise en œuvre à la fois pour le modèle de (Duchêne, 2004) et de (Ruas, 1999a).

3.4 Bilan

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle GAEL. La figure 3.55 donne le diagramme de UML de ce modèle composé de l'ensemble des classes que nous avons introduites dans ce chapitre. Nous avons présenté en partie 3.1 comment ce modèle permettait de gérer des opérations continues de généralisation, puis comment ces opérations pouvaient être utilisées conjointement avec les opérations discrètes (cf. partie 3.2) et enfin comment il permettait de prendre en compte les relations objet-champ (cf. partie 3.3).

Dans le prochain chapitre, nous présentons les résultats de la mise en œuvre de ce modèle.

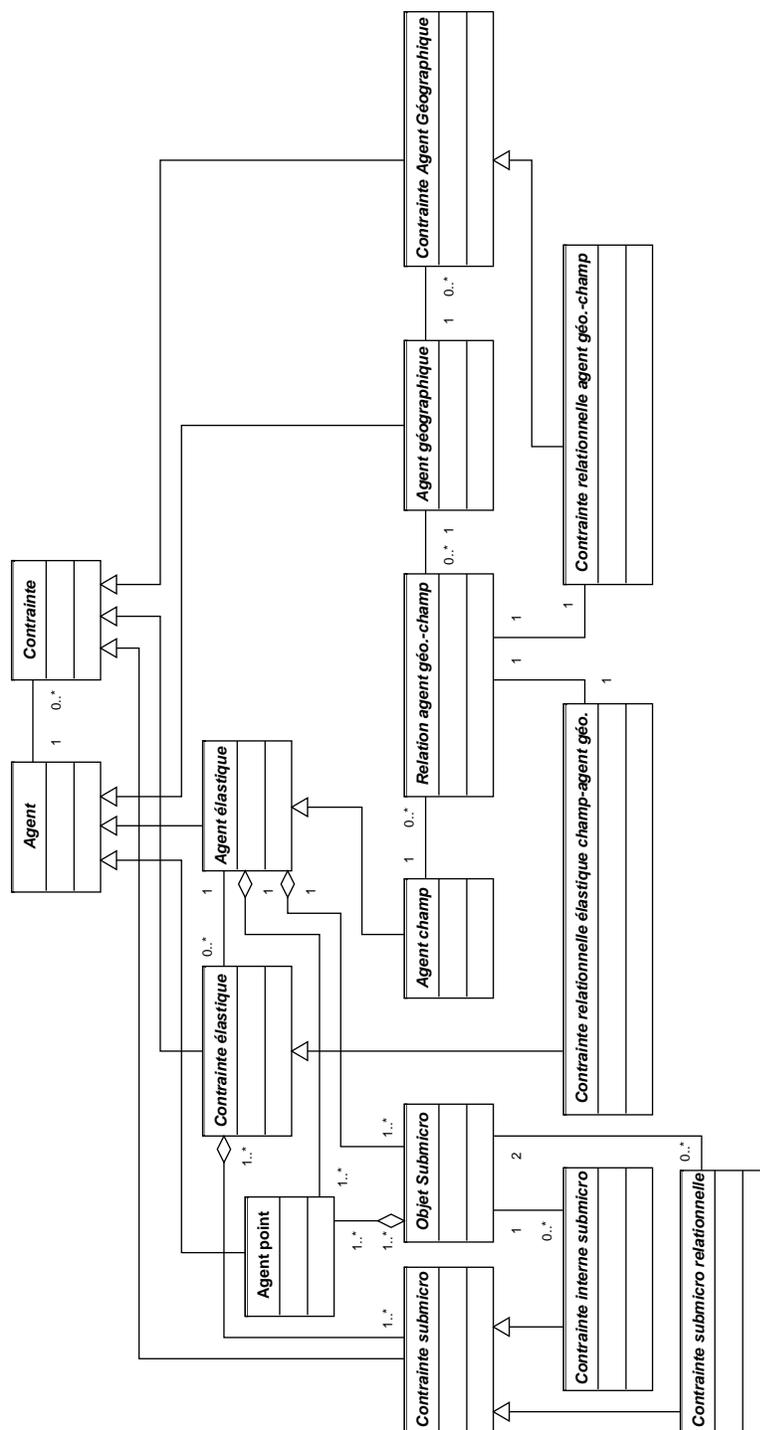


FIGURE 3.55 – Le modèle GAEL

Chapitre 4

Mise en œuvre et résultats

Nous avons présenté au chapitre précédent le modèle GAEL que nous proposons pour la prise en compte des relations objet-champ dans le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007). Ce chapitre présente une mise en œuvre de ce modèle pour certaines des relations objet-champ présentées en annexe A page 231 et des résultats de cette mise en œuvre (partie 4.1). Enfin, une critique du modèle que nous proposons permet de donner des perspectives et des pistes d'amélioration futures (partie 4.2).

4.1 Cas de mise en œuvre et résultats

Le modèle GAEL présenté au chapitre précédent a été mis en œuvre et testé sur des données géographiques réelles pour certains cas de généralisation. La présentation de cette mise en œuvre s'articule autour des parties suivantes :

- tout d'abord, nous décrivons les points communs des différents cas d'application : les données géographiques utilisées et les spécifications du processus de généralisation,
- nous présentons ensuite des cas d'application concernant d'une part le champ relief, et d'autre part le champ occupation du sol,
- enfin, nous présentons trois applications pour lesquelles certaines parties du modèle GAEL ont été utilisées.

4.1.1 Description des cas d'application

Le modèle GAEL a été implémenté et testé sur des données géographiques issues du Référentiel à Grande Echelle (RGE®) de l'IGN. Cette base de données géographique comporte, entre autres, une composante topographique, la BDTopo®, d'une échelle de référence d'environ 1 :15000 (cf. figure 1.7 a. page 25 et (IGN, 2002)), et une composante altimétrique, la BDAlti®. La mise en œuvre que nous avons effectuée a été testée sur les données suivantes :

- la classe *Bâtiment* issue de la BDTopo®,
 - les classes *Tronçon de route* et *Tronçon de chemin* issues de la BDTopo®,
 - les classes *Tronçon de cours d'eau* et *Surface d'eau* issues de la BDTopo®,
 - une classe de courbes de niveau issues de la BDAlti®,
 - la classe *ligne orographique* issue de la BDTopo®,
 - une classe *points cotés* issue d'une ancienne version de la BDTopo® (cette classe n'est plus présente dans la version actuelle de la BDTopo®),
 - et la classe *zone arborée* issue de la BDTopo®.
-

Nous avons choisi différentes zones de test dans le département de l'Isère, pour la diversité de ses paysages et en particulier la présence de nombreuses zones montagneuses dont les caractéristiques nous ont semblé intéressantes. Les tests ont été effectués pour la préservation de relations objet-champ au cours d'un processus de généralisation pour des représentations cartographiques aux échelles 1 :25000 et 1 :50000. Cette prise en compte a été effectuée en modélisant les champs relief et occupation du sol comme des agents élastiques se déformant sous l'action des objets à travers des contraintes objet-champ.

Nous présentons maintenant plusieurs cas d'application du modèle GAEL concernant d'une part le champ relief et d'autre part le champ occupation du sol. Pour chacun de ces cas d'application, nous présentons en premier lieu les contraintes élastiques que nous proposons de faire porter aux agents-champ concernés pour les rendre déformables. Puis, nous présentons les relations agent-champ que nous avons mises en œuvre dans le cadre de cette thèse. Pour chacune d'elles, nous présentons les classes spécifiques de *relation*, *contrainte relationnelle*, et *contrainte submicro* associées. Nous donnons des résultats effectués sur des zones test.

4.1.2 Cas d'application avec le champ relief

Le modèle GAEL a été mis en œuvre pour la préservation de deux relations objet-champ relief particulières. Nous présentons tout d'abord en partie 4.1.2.1 les contraintes élastiques spécifiques que nous proposons de faire porter à l'agent-champ relief. Puis, dans les parties 4.1.2.2 et 4.1.2.3, nous présentons deux relations mises en œuvre pour l'agent-champ relief : l'une qui porte sur la préservation de l'altitude des bâtiments, et l'autre qui porte sur l'écoulement de tronçons hydrographiques.

4.1.2.1 Contraintes de préservation de l'agent-champ relief

Les agents-champ doivent préserver au mieux certains caractères particuliers lorsqu'ils se déforment. Dans le modèle GAEL, ces caractères sont contraints à être préservés à travers l'utilisation de contraintes élastiques de préservation de forme portées par les agents-champ et traduites sous la forme de contraintes submicro (cf. partie 3.2.1 page 149). Nous décrivons les contraintes élastiques de préservation que nous proposons de faire porter à l'agent-champ relief, ainsi que la décomposition submicro que nous proposons. Ce choix est le résultat de tests que nous avons effectués et qui nous ont permis de donner au champ un comportement élastique adapté à sa nature. Comme nous l'avons vu dans le cas de la déformation de l'objet exemple (cf. page 153), la façon de contraindre l'agent-champ n'est pas unique : différents contraintes élastiques peuvent être utilisées. Également, la façon de traduire les contraintes élastiques en contraintes submicro n'est ni directe, ni unique. Elle dépend de la façon dont les champs doivent se comporter pendant le processus de généralisation. Nous proposons d'ailleurs des pistes d'amélioration de cette phase en partie 4.2.1.2 page 215.

Nous proposons de faire porter à l'agent-champ relief les contraintes élastiques suivantes :

- une contrainte élastique de **préservation de position planimétrique du champ** : cette contrainte force une préservation de la valeur du champ au niveau de chaque point de l'espace en « fixant » le champ à l'espace géographique. Au niveau submicro, elle est traduite sous la forme d'une contrainte de préservation de position au niveau

de chacun des points composant le champ (cf. page 114). Les points correspondant à des objets de champ du type *point coté* sont contraints à être fixes : nous estimons en effet que leur position planimétrique doit être préservée, en particulier lorsque ces points cotés sont des bornes géodésiques. La valeur courante de la contrainte est donnée par l'écart maximum à leur position initiale des agents-point composant le champ. La satisfaction de la contrainte décroît en fonction de la valeur de cet écart.

- une contrainte élastique de **préservation de forme générale** : cette contrainte incite l'agent-champ relief à garder sa forme générale. Elle est décomposée en contraintes submicro suivantes :
 - deux contraintes de longueur et d'orientation de chacun des segments composant les courbes de niveau de l'agent-champ (cf. pages 115 et 116). Ces contraintes incitent à préserver la forme générale des courbes de niveau,
 - deux contraintes de préservation d'aire et de position de centre de gravité de chacun des triangles (cf. pages 117 et 118). Ces contraintes permettent une préservation des distances entre courbes de niveau.

Concernant le calcul de la satisfaction de cette contrainte, nous proposons une première méthode qui nécessiterait des améliorations. La satisfaction de cette contrainte doit permettre de mesurer qualitativement l'écart entre la forme courante du champ et sa forme initiale, afin de savoir s'il est trop ou pas assez déformé. Nous discutons plus en détail ce problème en partie 4.2.1.2 page 215. Nous proposons provisoirement de lier la valeur de satisfaction de cette contrainte à la présence de triangles retournés. En effet, il arrive lors d'une déformation trop importante qu'un ou plusieurs triangles du champ se trouvent retournés. Cette situation correspond souvent à l'intersection entre deux courbes de niveau. Pour éviter ces cas, la satisfaction de la contrainte est nulle lorsqu'au moins un triangle retourné est présent, et parfaite sinon.

Ces contraintes élastiques permettent de conférer à l'agent-champ relief la capacité de se déformer sous l'effet d'une contrainte déformation. Nous présentons maintenant les contraintes de déformation objet-champ que nous avons mises au point qui permettent à l'agent-champ relief de se déformer sous l'action des objets placés sur lui.

4.1.2.2 Relation d'altitude de bâtiment

Chaque bâtiment est caractérisé par une valeur d'altitude. L'altitude d'un bâtiment n'est pas un caractère intrinsèque du bâtiment contrairement à, par exemple, sa taille : cette valeur dépend de la position relative du bâtiment par rapport au champ. Elle caractérise la relation entre le bâtiment et le champ relief. L'altitude d'un bâtiment pouvant changer lorsque le bâtiment s'applique des opérations de généralisation (en particulier, lorsqu'il se déplace), nous proposons de mettre en œuvre notre modèle pour préserver cette relation d'altitude. Contraindre cette relation incite à la préservation de la valeur d'altitude d'un bâtiment. Les classes spécialisées à partir de celles de la figure 3.50 page 163 pour la prise en compte de cette relation sont présentées sur le diagramme UML de la figure 4.1. Nous introduisons les classes suivantes :

- une classe *relation altitude bâtiment* qui hérite de la classe *relation agent géographique champ*,
- une classe *contrainte relationnelle altitude bâtiment* qui hérite de la classe *contrainte relationnelle agent géographique champ*,

- une classe *contrainte relationnelle relief altitude bâtiments* qui hérite de la classe *contrainte élastique relationnelle champ agent géographique*,
- et une classe *contrainte submicro altitude bâtiments* qui hérite de la classe *contrainte submicro*,

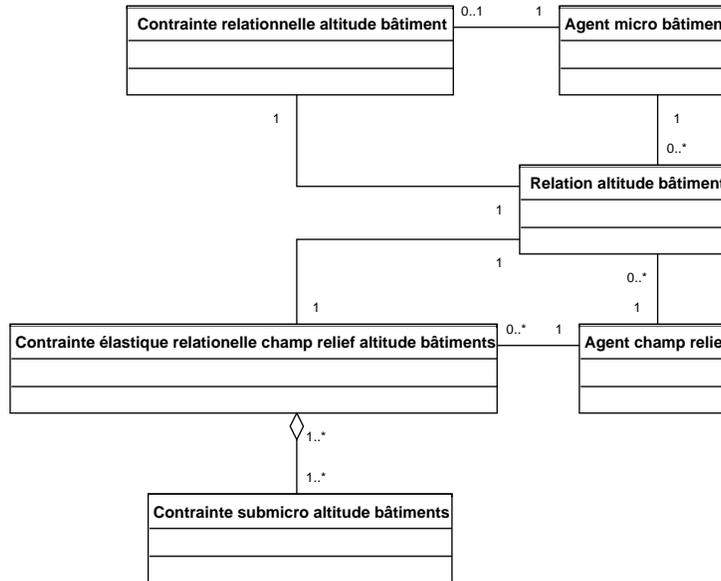


FIGURE 4.1 – Diagramme UML de classe de la relation objet-champ d’altitude d’un bâtiment

La classe *relation altitude bâtiment* Cette classe a pour rôle de modéliser la relation entre un agent géographique bâtiment et l’agent-champ relief concernant son altitude. La valeur courante de la relation est celle de l’altitude du bâtiment dans son état courant (celle au niveau de son centre). La valeur initiale est l’altitude initiale du bâtiment. La satisfaction de la contrainte décroît avec l’écart entre les valeurs initiale et courante de la relation. La figure 4.2 donne la valeur de la satisfaction de la relation en fonction de l’écart d’altitude du bâtiment. Cette satisfaction est caractérisée par les valeurs D_{alt} et d_{alt} . D_{alt} représente une valeur seuil : en deçà d’une variation de D_{alt} d’altitude d’un bâtiment, la relation est considérée comme totalement satisfaite. d_{alt} représente le coût en écart d’altitude d’un point de satisfaction de la relation. Les paramètres D_{alt} et d_{alt} permettent de paramétrer la sévérité de la contrainte. Ils dépendent de l’échelle finale des données. Pour les exemples donnés ici, nous avons pris les valeurs $D_{alt} = 0.5m$ et $d_{alt} = 0.25m$ pour le 1 :25000, et $D_{alt} = 1.0m$ et $d_{alt} = 0.5m$ pour le 1 :50000.

L’objet *relation altitude bâtiment* fournit une évaluation de l’état de satisfaction de la relation qui peut être utilisée indépendamment du processus de généralisation. La valeur de satisfaction permet en effet de détecter les bâtiments pour lesquels la relation n’est pas bien satisfaite. Les figures suivantes illustrent cette propriété. La figure 4.3 présente des données géographiques testées dans leur état initial. Les figures 4.3 b. et c. donnent pour chaque bâtiment (en rouge) respectivement les valeurs de l’écart d’altitude (l’altitude courante moins l’altitude initiale) et la valeur de satisfaction de la contrainte. Dans cet

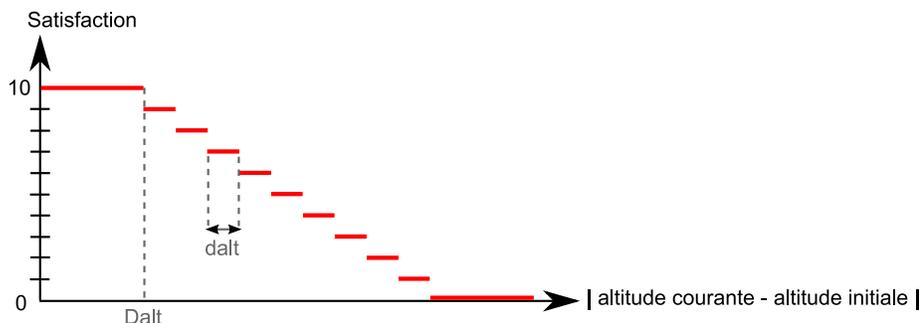


FIGURE 4.2 – Satisfaction de la relation d'altitude de bâtiment

état, puisque les données n'ont pas été modifiées, les valeurs des écarts d'altitude de tous les bâtiments sont nulles et les satisfactions de toutes les relations parfaites (10). Les figures 4.4 et figures 4.5 montrent comment évoluent ces valeurs lors de généralisations au 1 :25000 et au 1 :50000 qui ne prennent pas en compte le champ relief. La généralisation des bâtiments provoque des changements de forme et de position des bâtiments, qui ont pour conséquences de changer les valeurs de leur altitude (cf. figures 4.4 b. et 4.5 b.) et donc d'altérer la satisfaction de leur relation (cf. figures 4.4 c. et 4.5 c.).

La classe *contrainte relationnelle altitude bâtiment* Cette contrainte traduit la façon dont l'agent-bâtiment voit sa relation avec l'agent-champ. Par définition, sa satisfaction est la même que celle de la relation précédente. Nous proposons de lui affecter une priorité nulle et de lui permettre de proposer au bâtiment les deux traitements suivants :

- une activation de l'agent-champ relief avec un poids de 2,
- un déplacement de l'agent-bâtiment lui-même avec un poids de 1.

Ainsi, lors de sa généralisation, afin de satisfaire sa contrainte de préservation d'altitude, l'agent-bâtiment tente en premier lieu de déformer l'agent-champ relief, puis de se déplacer si la solution précédente n'a pas suffi pour satisfaire totalement la relation. Le déplacement \vec{D} du bâtiment proposé est donné par :

$$\vec{D} = \frac{-Dz}{\text{Tan}A} \vec{u}$$

avec Dz la différence entre l'altitude courante et l'altitude initiale du bâtiment, A l'angle par rapport au plan horizontal du vecteur pente sous le bâtiment entre 0 (horizontal) et $\pi/2$ (vertical), et \vec{u} la direction de la pente dans le plan. Ce déplacement est dirigé selon la pente sous le bâtiment et a une longueur permettant de rétablir la valeur d'altitude du bâtiment (elle dépend de l'angle de la pente et de la dénivelée du bâtiment). La figure 4.6 représente le bâtiment dans le plan vertical de son vecteur de pente (en orange) et le vecteur déplacement proposé : le bâtiment « glisse » sur le relief en direction de la ligne de plus grande pente pour diminuer son altitude. Dans le cas contraire où l'altitude courante du bâtiment est inférieure à son altitude but, ce déplacement incite le bâtiment à remonter.

Dans certains cas, le déplacement proposé permet d'améliorer la satisfaction de la contrainte mais provoque la violation d'autres contraintes (par exemple de proximité avec d'autres objets). L'essai d'un déplacement plus court que celui donné précédemment peut dans



FIGURE 4.3 – Données initiales : (a.) avant généralisation, (b.) écarts d'altitude des bâtiments, et (c.) satisfaction de la relation

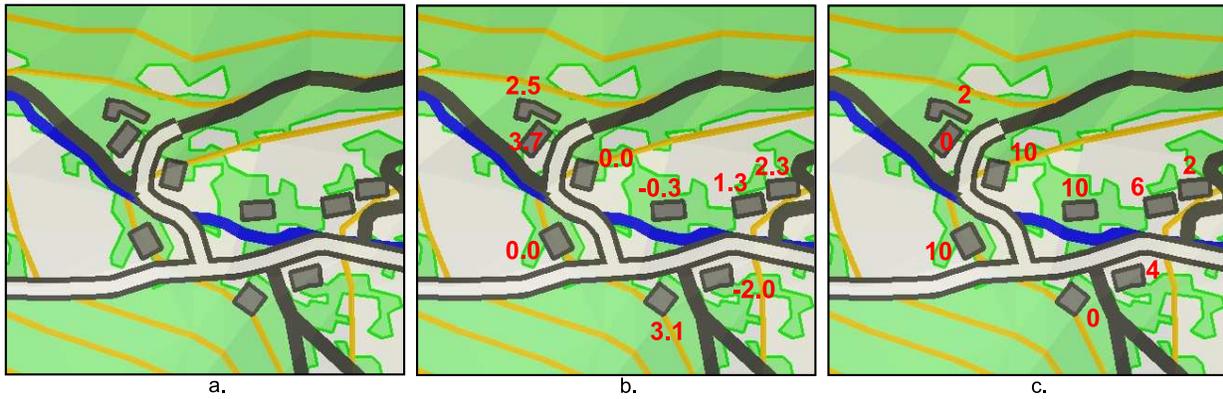


FIGURE 4.4 – Données après généralisation au 1 :25000 : (a.) sans prise en compte du relief, (b.) écarts d'altitude des bâtiments, et (c.) satisfaction de la relation

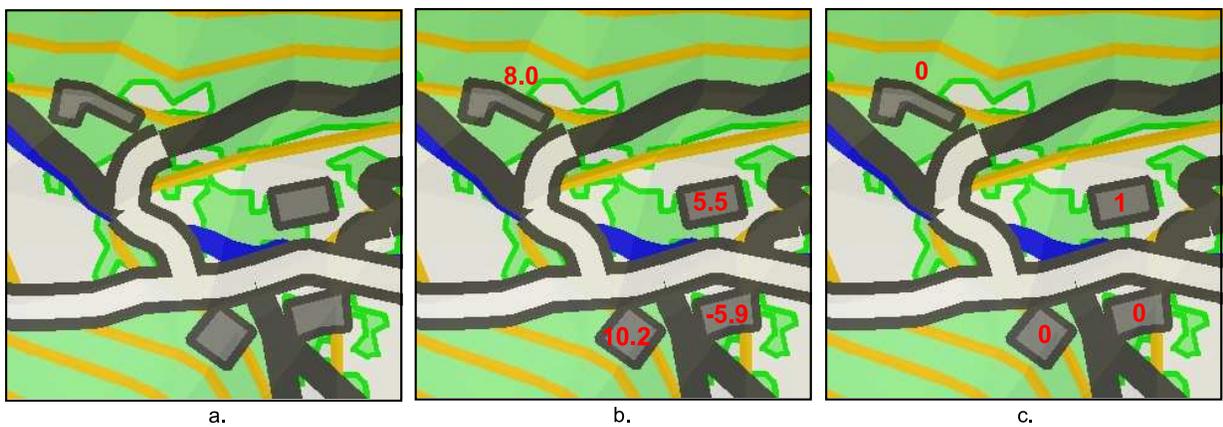


FIGURE 4.5 – Données après généralisation au 1 :50000 : (a.) sans prise en compte du relief, (b.) écarts d'altitude des bâtiments, et (c.) satisfaction de la relation

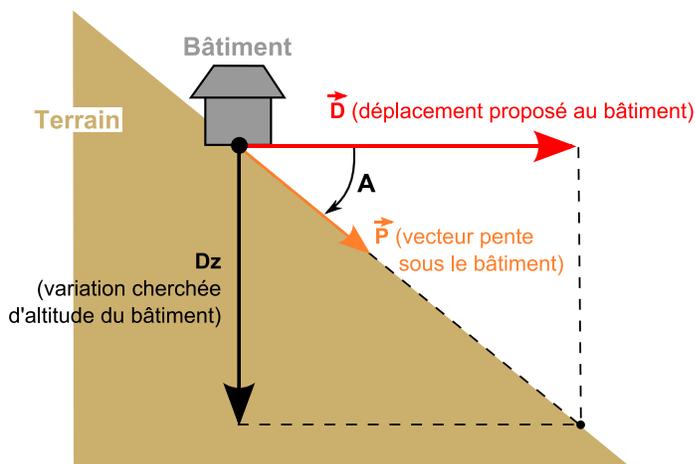


FIGURE 4.6 – Calcul du déplacement proposé à l’agent-bâtiment pour améliorer la satisfaction de sa contrainte d’altitude (la figure est représentée dans le plan vertical contenant le vecteur de pente du bâtiment (en orange))

certains cas se révéler plus judicieux. C’est pourquoi la contrainte précédente propose non seulement le déplacement \vec{D} présenté mais également un autre deux fois plus court $\vec{D}/2$. Il peut aussi être envisagé de proposer un déplacement dont la direction n’est pas exactement celle de la pente, mais qui permet de faire varier l’altitude du bâtiment dans le bon sens.

La classe *contrainte relationnelle relief altitude bâtiments* Cette contrainte élastique est portée par l’agent-champ relief. Elle a pour rôle de l’inciter à se déformer pour améliorer la relation objet-champ. Par définition, sa satisfaction est égale à celle de la relation. Comme toute contrainte élastique, elle ne propose qu’un unique traitement qui est la déformation du champ. Cette déformation est obtenue à travers la décomposition au niveau submicro de cette contrainte sous la forme de *contraintes submicro altitude bâtiments* que nous présentons maintenant.

La classe *contrainte submicro altitude bâtiments* Cette contrainte submicro est portée par chacun des triangles composant l’agent-champ relief. Son rôle est d’inciter chaque triangle composant l’agent-champ relief à se déplacer pour améliorer l’état de satisfaction des relations d’altitude des bâtiments qui se trouvent sur lui. La figure 4.7 présente comment ce déplacement est calculé. En premier lieu, le triangle évalue \bar{Dz} , la valeur moyenne de la dénivelée des bâtiments qui sont sur lui (cf. figure 4.7 a.). Un déplacement de chacun des points du triangle est ensuite calculé pour inciter le triangle à être déplacé pour annuler la valeur moyenne de la dénivelée des bâtiments (cf. figure 4.7 b.). Le déplacement \vec{D} proposé à chacun des agents-point P_1 , P_2 et P_3 du triangle est :

$$\vec{D} = \alpha \frac{\bar{Dz}f}{\tan A} \vec{u}$$

avec \bar{Dz} la valeur moyenne des dénivelées des bâtiments situés sur le triangle, A l’angle du vecteur pente sous le bâtiment par rapport au plan horizontal entre 0 (horizontal) et $\pi/2$ (vertical), \vec{u} le vecteur unitaire du plan dirigé selon la pente, et α le paramètre introduit en partie 3.1.3.1 page 113.

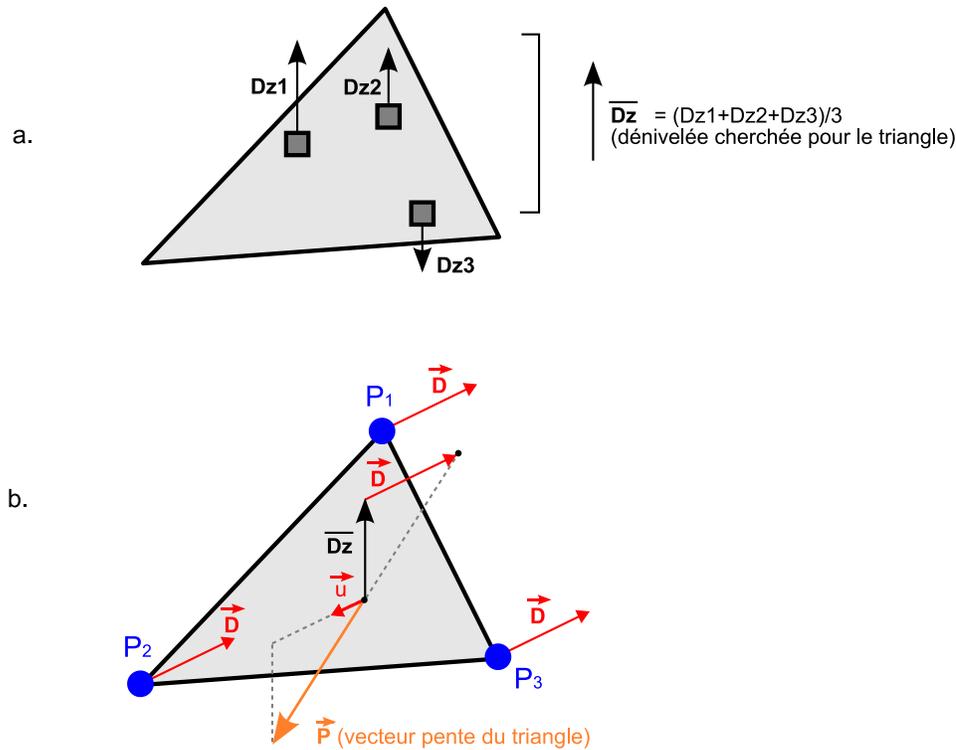


FIGURE 4.7 – Calcul du déplacement des agents-point pour la contrainte submicro d'altitude de bâtiments d'un triangle

Chacun des triangles composant l'agent-champ relief portent cette contrainte. Lors de son activation, certains points de l'agent-champ se déplacent pour tenter de diminuer les écarts de dénivelée des bâtiments situés sur le champ. Nous présentons maintenant des résultats obtenus sur des zones test.

Résultats La figure 4.8 illustre deux résultats obtenus sur une même zone test pour des représentations au 1 :25000 et au 1 :50000. L'image du haut montre les données initiales. Pour chacune des deux échelles, nous pouvons comparer les effets de la prise en compte de la relation présentée précédemment sur le résultat final : le champ relief a été déformé pour amortir les transformations des bâtiments. Les deux images de droite mettent en valeur les déformations subies par le relief.

Les figures 4.9 et 4.10 montrent comment la prise en compte des relations d'altitude de bâtiment a permis de réduire les écarts d'altitude des bâtiments (figures b.), et donc d'améliorer la satisfaction de leurs relations (figures c.). Ces résultats peuvent être comparés avec les figures 4.4 et 4.5 de la page 178.

La figure 4.11 montre comment le relief s'est déformé pendant le processus de généralisation. Seuls quelques points voisins de l'agent géographique ayant activé l'agent-champ se déplacent : la déformation est locale. Seuls quelques points proches de l'agent en cours d'activation sont activés. Il n'est pas nécessaire de prendre en compte l'ensemble des agents-point composant l'agent-champ relief. L'agent-champ amortit la transformation de l'agent-bâtiment.

Données initiales

**Généralisation au 1:25 000****Sans** prise en compte de la relation**Avec** prise en compte de la relation

Déformation de champ effectuée

— Courbe de niveau déformée
— Courbe de niveau initiale**Généralisation au 1:50 000****Sans** prise en compte de la relation**Avec** prise en compte de la relation

Déformation de champ effectuée

FIGURE 4.8 – Résultats de prise en compte de relations de préservation d'altitude de bâtiment pour le 1 :25000 et le 1 :50000

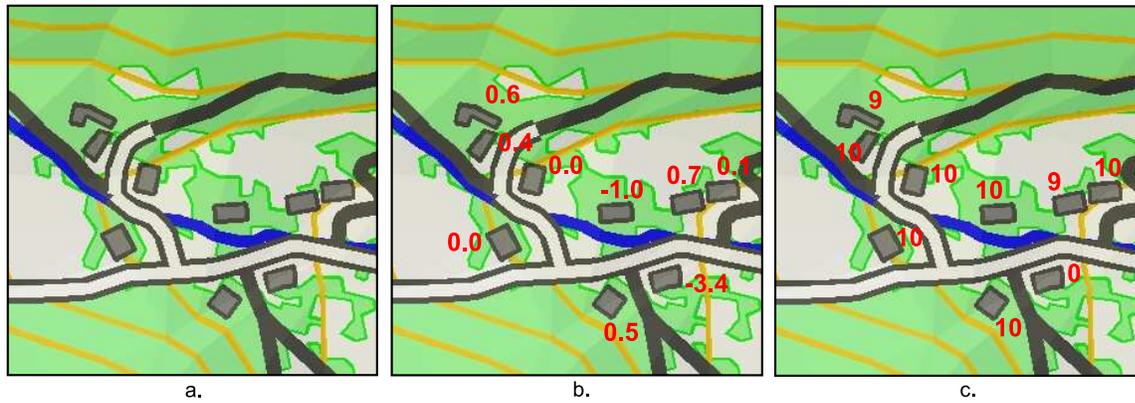


FIGURE 4.9 – Données après généralisation au 1 :25000, avec (a.) prise en compte du relief. (b.) Écarts d'altitude des bâtiments et (c.) satisfaction de la relation (à comparer avec les figures 4.4 de la page 178)

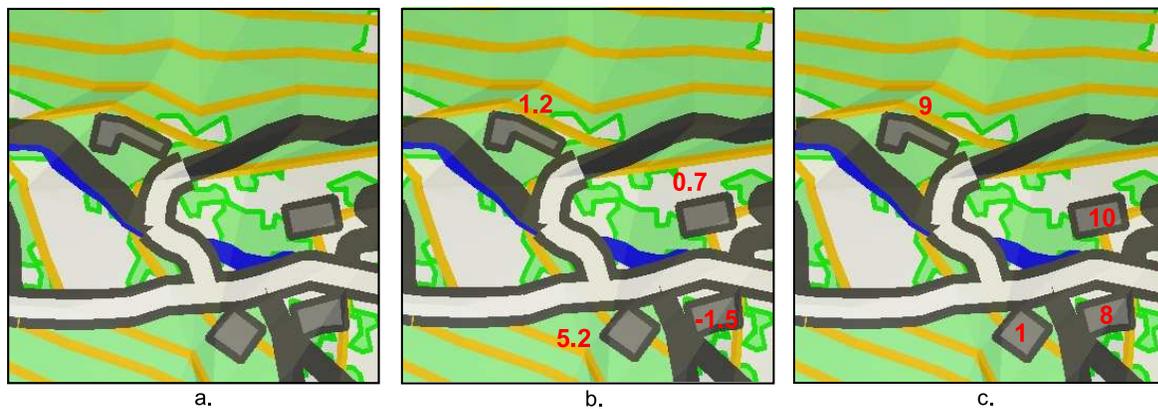


FIGURE 4.10 – Données après généralisation au 1 :50000, avec (a.) prise en compte du relief. (b.) Écarts d'altitude des bâtiments et (c.) satisfaction de la relation (à comparer avec les figures 4.5 de la page 178)



FIGURE 4.11 – Déformation locale de l’agent-champ relief en cours de généralisation

La figure 4.12 permet une comparaison des états de l’agent-champ relief en début et en fin de processus. Le déplacement des bâtiments a provoqué un décalage de certaines courbes de niveau vers l’extérieur de la vallée. L’action combinée des agents-bâtiment sur le relief a permis d’obtenir une opération d’élargissement de vallée telle que présentée sur les figures 2.8 et 2.9 page 89. Cette opération d’élargissement de la vallée émerge du comportement des agents.

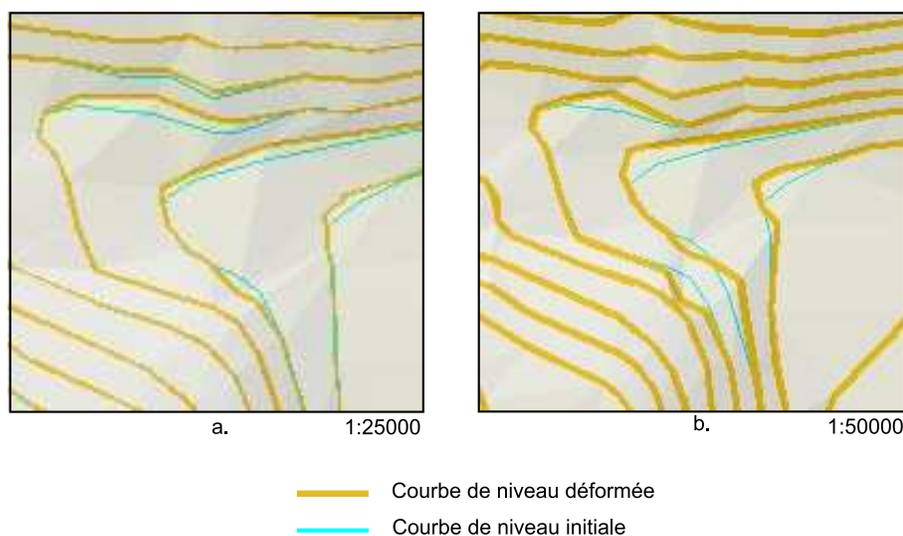


FIGURE 4.12 – Résultat de déformation pour le 1 :25000 (a.) et le 1 :50000 (b.)

Les figure 4.13, 4.14 et 4.15 donnent d’autres résultats pour une zone plus grande pour une généralisation au 1 :50000. La figure 4.13 a. présente les données dans leur état initial, avant généralisation. Il s’agit d’une zone avec un relief accidenté et quelques bâtiments épars. Les figures 4.13 b. et c. donnent les résultats de la généralisation pour le 1 :50000

respectivement sans et avec prise en compte de la relation d'altitude de bâtiment. La déformation du relief a permis une préservation des positions relatives entre bâtiments et relief.

La figure 4.14 donne les variations de valeur de satisfaction des relations d'altitude de chaque bâtiment (en rouge). Ces valeurs de satisfaction ont été détériorées par la généralisation des bâtiments (figure 4.14 a.), et leur prise en compte a permis de les améliorer (figure 4.14 b.).

Les figures 4.15 a et b présentent respectivement les transformations subies par le bâti et le relief (les bâtiments et courbes de niveau initiaux sont en cyan). Ces figures montrent comment l'agent-champ relief et les bâtiments ont interagi pour satisfaire au mieux les relations qu'ils partagent. Tout comme pour le cas précédent, un léger élargissement de la vallée a été provoqué par les interactions entre les agents-bâtiment et le relief.

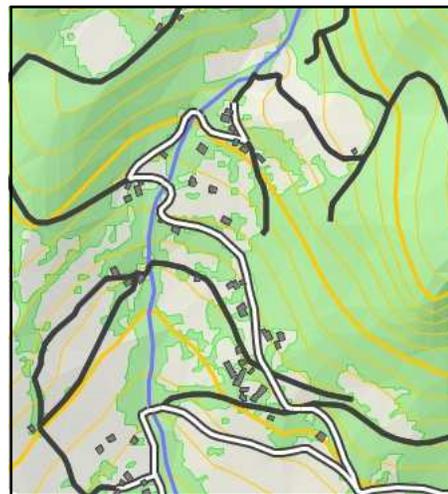
La déformation de l'agent-champ relief obtenue en figure 4.15 b résulte d'un équilibre entre les contraintes submicro de préservation et de déformation portées par l'agent-champ relief. Comme nous l'avons présenté pour le cas de l'objet exemple (cf. figure 3.43 page 155), le choix de ces contraintes et de leur paramètre d'importance n'est pas unique. Les figures 4.16 a et b permettent de comparer deux résultats obtenus avec des contraintes submicro différentes. En figure a. se trouve le résultat présenté précédemment. La figure b. donne le résultat d'une autre déformation obtenue en faisant porter à l'agent-champ relief les mêmes contraintes submicros, mais avec une valeur d'importance de la contrainte submicro de préservation d'altitude des bâtiments cent fois supérieure à la valeur utilisée précédemment. Cette déformation favorise davantage les contraintes de déformation du champ au détriment de ses contraintes de préservation de forme. Cette déformation permet une meilleure satisfaction des relations entre bâtiments et relief, mais le relief est davantage déformé. Cette comparaison met en valeur l'importance du choix des contraintes submicro sur le résultat final.

Enfin, la figure 4.17 donne un dernier résultat concernant un groupe de bâtiments situés au pied d'une zone pentue. Sans prise en compte de la relation, nous constatons que les bâtiments se déplacent vers l'est, et se retrouvent sur la zone pentue. La satisfaction de la relation est fortement dégradée. Avec une prise en compte de la relation, les bâtiments déforment ensemble le relief afin de décaler les courbes de niveau vers l'est pour avoir plus de place.

Le cas d'application présenté dans cette partie concernait la relation entre les bâtiments et le relief. Il a permis de contraindre l'objet à préserver la valeur du champ relief au niveau de sa position. Nous pensons que ce cas peut être généralisé pour être appliqué au cas général des relations concernant :

- des objets de faible étendue pouvant être assimilés à leur centre de gravité, appelés *petits objets* en partie 2.1.4.1 page 85,
- et des champs à grandeur intervalle (comme défini en partie 2.1.1 page 78).

Cette relation permet ainsi de contraindre la préservation de la valeur d'un champ donné au niveau de la position d'objets.



a. données initiales

b. données généralisées
sans prise en compte de la relationc. données généralisées
avec prise en compte de la relation

FIGURE 4.13 – Résultat de la prise en compte de la relation de préservation d'altitude de bâtiment. (a.) données initiales, (b.) données après généralisation **sans** prise en compte des relations, et (c.) données après généralisation **avec** prise en compte des relations

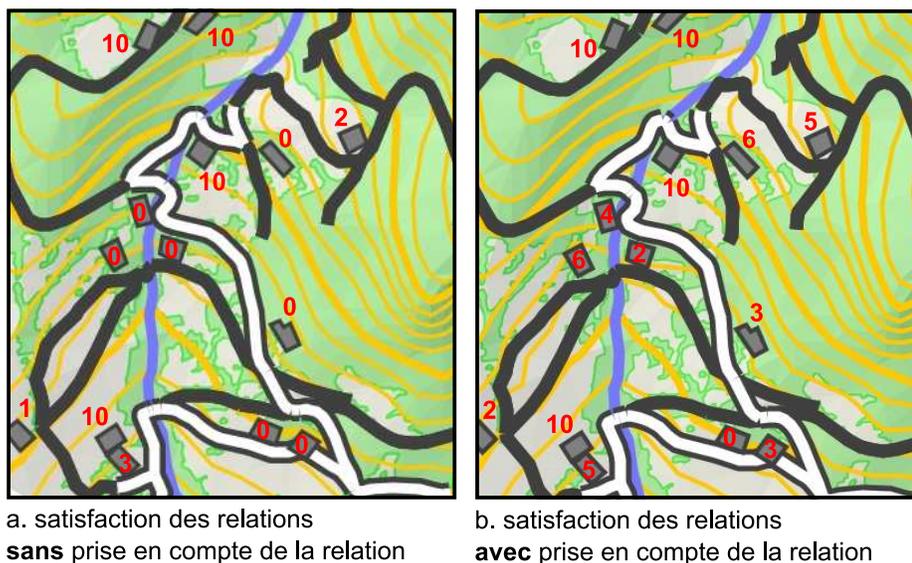


FIGURE 4.14 – Variations de satisfaction des relations (a.) sans et (b.) avec leur prise en compte pour le 1 :50000

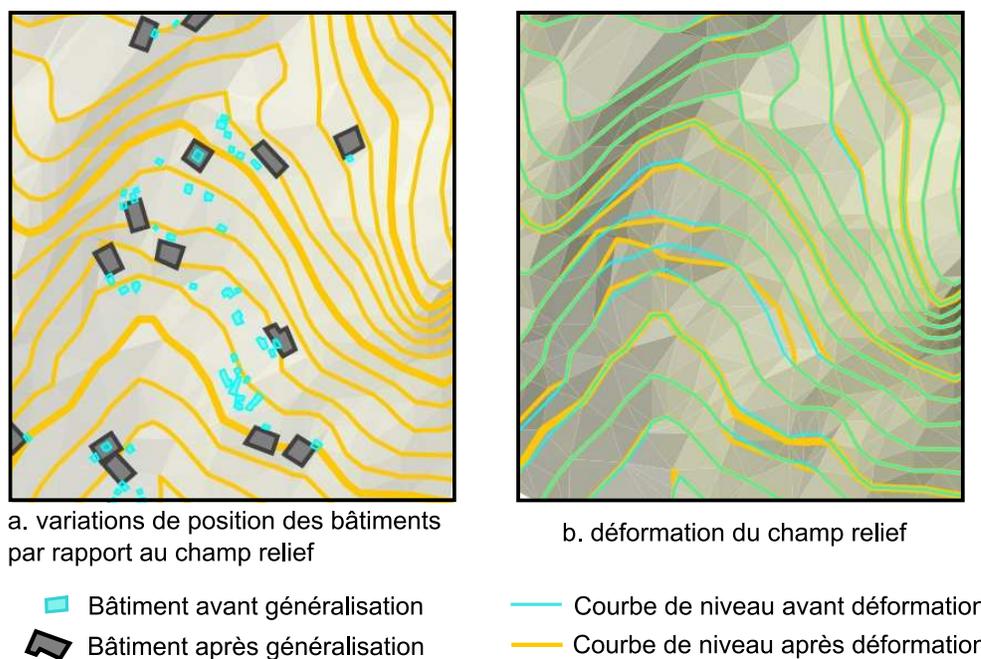


FIGURE 4.15 – Transformations des bâtiments (a.) et déformation du relief (b.) pour le 1 :50000

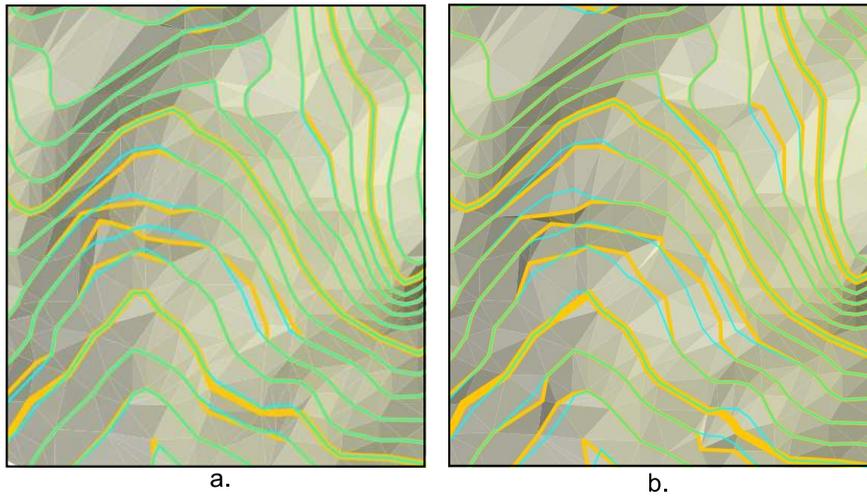


FIGURE 4.16 – Deux déformations possible du relief

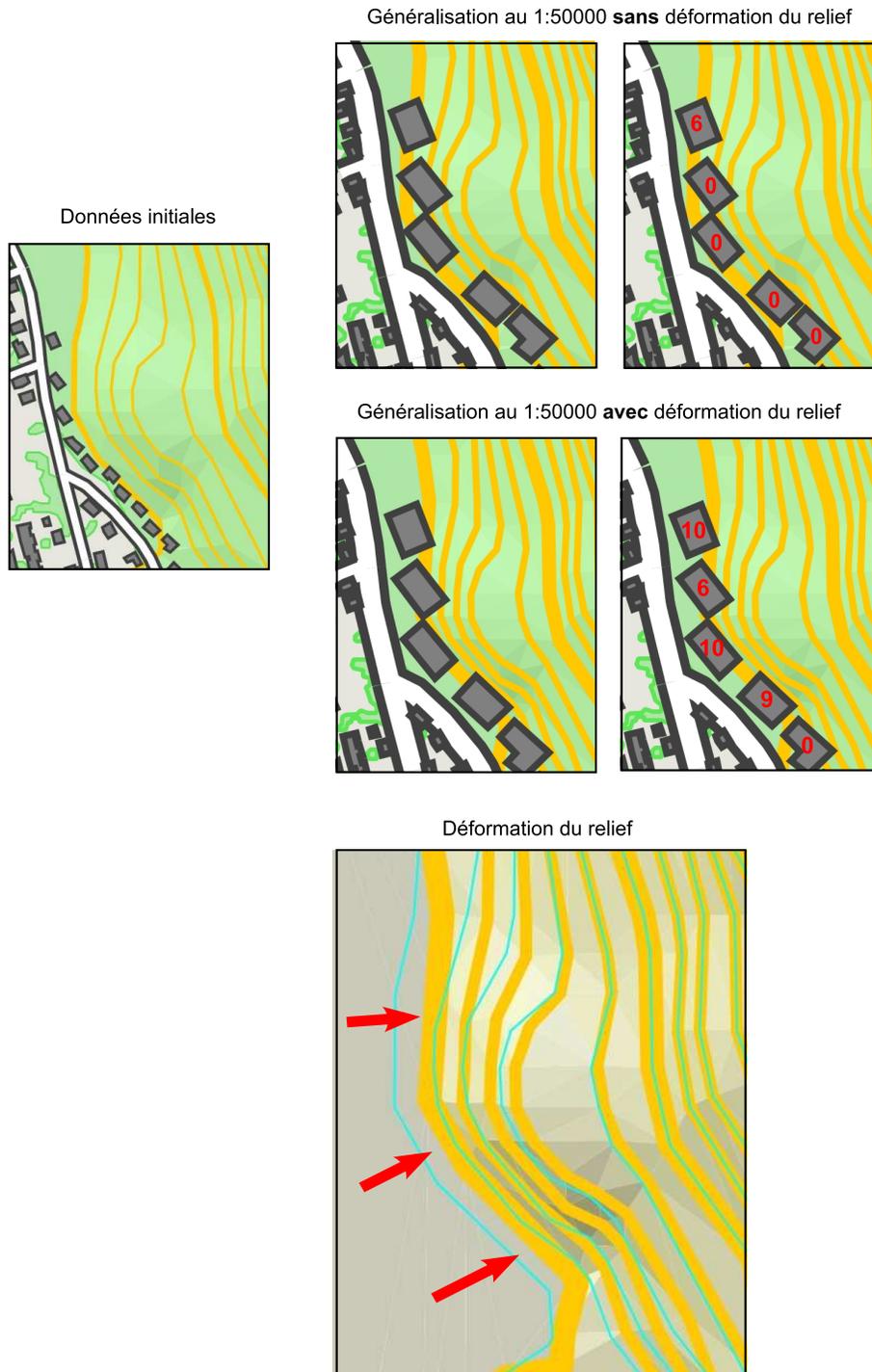


FIGURE 4.17 – Effet de la prise en compte de la relation d'altitude de bâtiment sur un groupe de bâtiments en pied d'une zone pentue

4.1.2.3 Relation d'écoulement de tronçon hydrographique

Nous présentons dans cette partie une mise en œuvre du modèle GAEL dans le but de préserver les positions relatives entre le champ relief et les tronçons du réseau hydrographique¹. La relation objet-champ que nous mettons en œuvre permet de préserver l'écoulement de chaque tronçon hydrographique sur le relief. Cette préservation est particulièrement importante puisqu'elle correspond à un phénomène physique d'écoulement des eaux sur la surface terrestre dans la réalité. (Skinberg, 1982, p.84) parle de thème « orohydrographique » pour souligner la force de la liaison existante entre ces deux thèmes et la nécessité de les traiter ensemble. Nous présentons ici en quoi le modèle GAEL permet une préservation de cette relation. Les classes spécialisées à partir de celles de la figure 3.50 page 163 pour la prise en compte de cette relation sont présentées sur le diagramme UML de la figure 4.18. Nous introduisons les classes suivantes :

- une classe *relation écoulement tronçon hydrographique* qui hérite de la classe *relation agent géographique champ*,
- une classe *contrainte relationnelle écoulement tronçon hydrographique* qui hérite de la classe *contrainte relationnelle agent géographique champ*,
- une classe *contrainte relationnelle relief écoulement tronçon hydrographique* qui hérite de la classe *contrainte élastique relationnelle champ agent géographique*,
- et une classe *contrainte submicro faire couler hydrographie* qui hérite de la classe *contrainte submicro*,

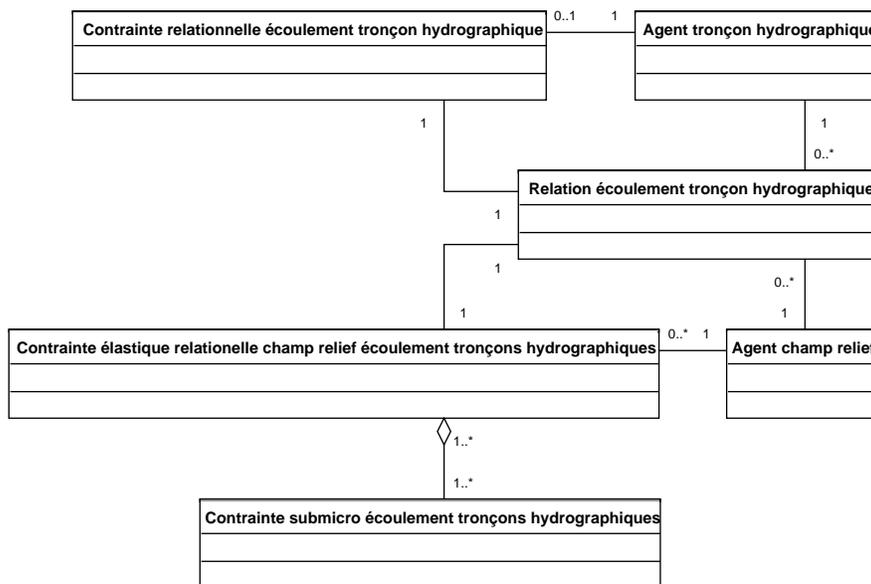


FIGURE 4.18 – Diagramme UML de classe de la relation objet-champ d'écoulement de tronçon hydrographique

La classe *relation écoulement tronçon hydrographique* Cette classe a pour rôle de modéliser la relation d'écoulement entre un agent géographique tronçon hydrographique et l'agent-champ relief. La valeur courante de cette relation est celle d'un indicateur compris

1. Ce cas d'application a été présenté dans (Gaffuri, 2007).

entre 0 et 1 permettant de mesurer la qualité d'écoulement du tronçon hydrographique sur le relief. Nous présentons maintenant comment cet indicateur est calculé.

Le calcul de cet indicateur repose sur le fait qu'une ligne orientée s'appuyant sur une surface² s'écoule parfaitement lorsqu'en tout point de la ligne, la direction de la ligne est parallèle à celle de la pente. En figure 4.19 a., cette propriété est traduite par le fait qu'en tout point $P(s)$ de la ligne défini par son abscisse curviligne s , le vecteur de pente de la surface en $P(s)$ (représenté en orange) et le vecteur tangent à la ligne en $P(s)$ (représenté en bleu ; il s'agit du vecteur tangent orienté dans la direction de la ligne) doivent avoir la même direction. Plus proche est l'écart entre ces deux vecteurs, meilleur est l'écoulement. L'indicateur d'écoulement que nous définissons s'appuie sur l'écart entre ces deux vecteurs.

Nous définissons ainsi un indicateur de qualité d'écoulement en tout point $P(s)$ de la ligne en nous basant sur les angles α et φ de la figure 4.19 b. α est l'écart angulaire entre les directions des deux vecteurs dans le plan horizontal. α est dans l'intervalle $[-\pi, \pi]$. Lorsque α est nul, l'écoulement est parfait. Lorsque $|\alpha|$ est supérieur à $\pi/2$, le cours d'eau remonte la pente. φ est l'angle entre le vecteur de pente et le plan horizontal. Ses valeurs sont dans l'intervalle $[0, \pi/2]$. Lorsque φ est nul, la surface est plate et l'écoulement peut donc être considéré comme parfait. Ainsi, plus grandes sont les valeurs de $|\alpha|$ et φ , pire est l'écoulement. Nous proposons ainsi de définir un indicateur de qualité d'écoulement au niveau du point $P(s)$ par :

$$Q = 1 - \frac{|\alpha|}{\pi} \cdot \frac{2\varphi}{\pi}$$

Q est dans l'intervalle $[0, 1]$. Il est d'autant plus proche de 1 que l'écoulement est bon. Le calcul de la valeur de Q repose sur les valeurs des deux termes suivants :

- le terme $\frac{|\alpha|}{\pi}$, qui traduit l'écart entre les directions de la ligne et de la pente, dans le plan horizontal. Ce terme est nul lorsque ces directions sont identiques, et vaut 1 lorsqu'elles sont opposées,
- et le terme $\frac{2\varphi}{\pi}$ qui traduit la force de la pente. Si le relief est plat, ce terme est nul ; il est d'autant plus proche de 1 que la pente est verticale. Ce terme sert à aggraver un écart de direction entre la pente et la ligne : un même écart est plus grave en terrain pentu qu'en terrain plat.

Nous proposons d'utiliser le produit de ces deux termes, soustrait à 1, comme indicateur.

La valeur de Q est définie en tout point de la ligne et varie le long de cette ligne (cf. figure 4.20). L'écoulement est mauvais au niveau des points ayant de faibles valeurs de Q .

Nous avons présenté comment l'indicateur de qualité d'écoulement Q était défini en tout point d'une ligne représentant un cours d'eau. Afin de disposer d'un indicateur d'écoulement global sur un tronçon hydrographique, nous proposons :

2. Nous supposons que la géométrie de la ligne n'a pas d'information altimétrique : l'altitude de chaque point de la ligne est donnée par celle de la surface au niveau de ce point. La ligne est comme posée sur la surface. Nous ne traitons pas le cas où la ligne est représentée par une géométrie en 3D ; dans ce cas, il est nécessaire de s'intéresser aux incohérences pouvant apparaître entre les altitudes des points de la ligne et de la surface. Nous évoquons ce cas en partie 4.2.2.1 page 220.

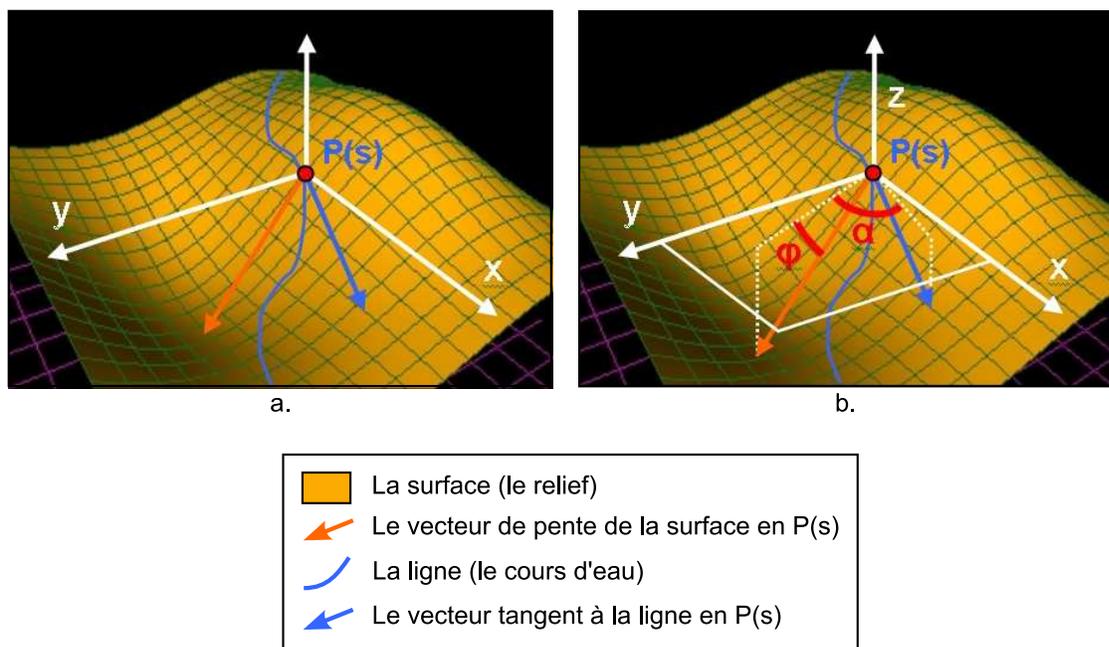


FIGURE 4.19 – Définition des angles α et φ utilisés pour la définition de l'indicateur d'écoulement

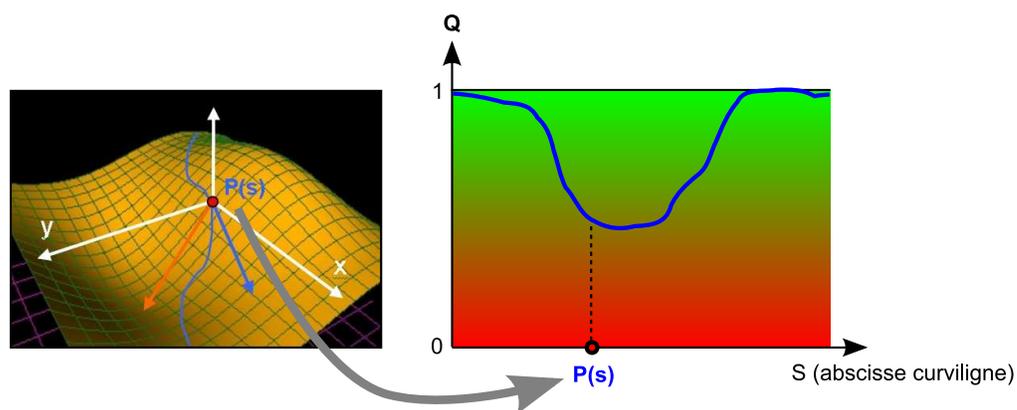


FIGURE 4.20 – Exemple de variation de l'indicateur d'écoulement Q d'une ligne en fonction de l'abscisse curviligne S

- d’une part, de calculer l’indicateur Q présenté précédemment non pas en chaque point du tronçon, mais au niveau de chacun des segments composant ce tronçon. La valeur de Q sur chaque segment est une valeur moyenne calculée à partir de la direction du segment (qui est constante sur le segment) et des valeurs de pente sous le segment (un segment peut couper plusieurs triangles),
- d’autre part, de définir l’indicateur de qualité d’écoulement global du tronçon comme la valeur minimale des indicateurs de qualité de chacun de ses segments.

La satisfaction de la relation est définie à partir de la valeur de l’indicateur d’écoulement du tronçon de façon comparable à celle de la relation d’altitude de bâtiment (cf. figure 4.2 page 177). L’objet *relation écoulement tronçon hydrographique* permet d’obtenir une évaluation de l’état de satisfaction de la relation. Les figures suivantes illustrent cette propriété.

La figure 4.21 a. présente une zone de test. Il s’agit d’une vallée étroite dans laquelle coule un cours d’eau. Une route passe dans cette vallée et longe le cours d’eau. Pour une visualisation au 1 :50 000, un conflit cartographique de superposition entre la route et le cours d’eau apparaît (cf. figure 4.21 b.). La figure 4.21 c donne les valeurs de satisfaction de la relation d’écoulement de chacun des 3 tronçons représentés (en rouge). Nous pouvons constater que, même dans l’état initial, les relations d’écoulement ne sont pas parfaitement satisfaites (elles le seraient si elles étaient égales à 10). La couleur de chacun des segments composant le réseau hydrographique dépend de la valeur de son indicateur d’écoulement. Plus un segment est vert, meilleur est son écoulement, et inversement, plus un segment est rouge, pire est son écoulement. Cette représentation permet de visualiser les parties du réseau hydrographique s’écoulant mal. Cette évaluation peut être utilisée indépendamment du processus de généralisation afin de détecter des incohérences éventuelles pouvant exister entre le réseau hydrographique et le relief. L’indicateur de qualité permet en effet de détecter les tronçons hydrographiques et leurs segments pour lesquels la relation d’écoulement n’est pas bien satisfaite. Nous présentons en partie 4.1.4.2 page 205 un autre cas d’application du modèle GAEL permettant de corriger ces incohérences.

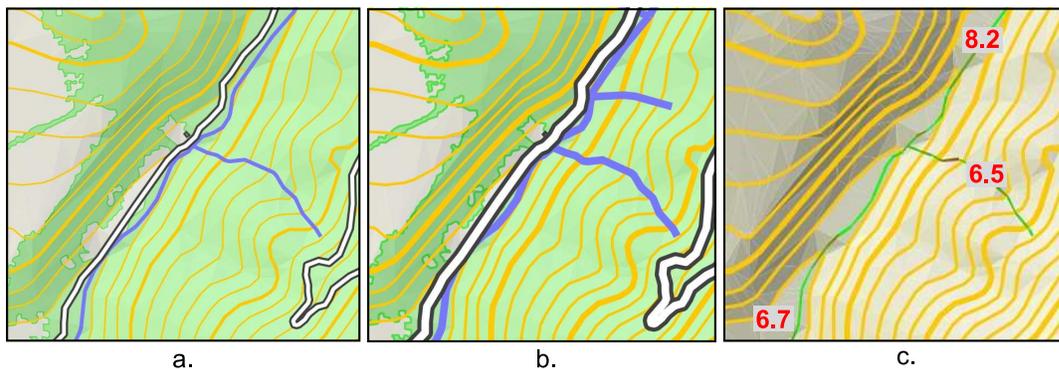


FIGURE 4.21 – Données testées : une vallée encaissée

Afin de résoudre le conflit de superposition entre les réseaux hydrographiques et routiers, il est nécessaire d’écarter la route et le cours d’eau. En figure 4.22 a., le cours d’eau s’est

écarté de la route ; leur conflit de superposition a été résolu³. La figure 4.22 b. montre le décalage entre le cours d'eau dans son état initial (en cyan) et dans son état après avoir été déplacé (en bleu). Du fait de ce déplacement, le cours d'eau est sorti de son talweg. En conséquence, l'état de satisfaction de sa relation d'écoulement a été détérioré : les valeurs de satisfaction en rouge de la figure 4.22 c. sont inférieures à celles de la figure 4.21 c.

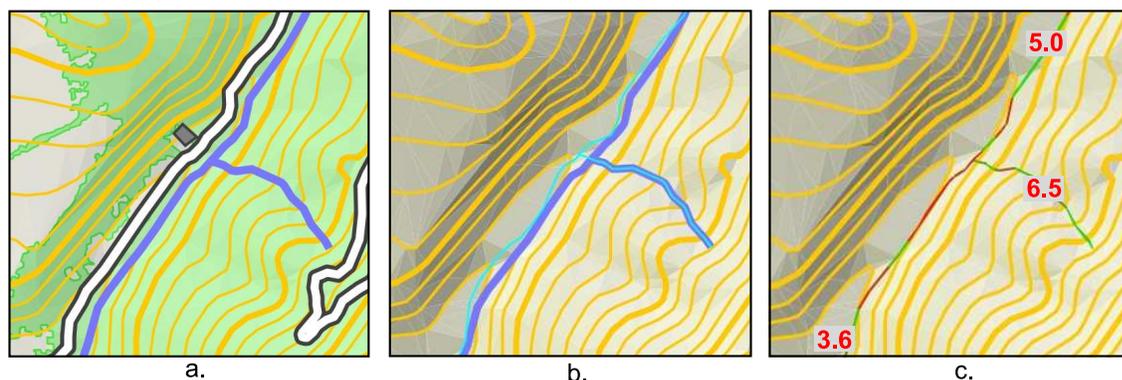


FIGURE 4.22 – Généralisation sans prise en compte de la relation d'écoulement

Ainsi, l'objet relation permet de détecter des conflits pouvant apparaître entre le réseau hydrographique et le relief. D'autres travaux fournissent de telles méthodes de détection de conflit. (Liu *et al.*, 2005) proposent une méthode basée sur l'analyse des points d'intersection entre tronçons hydrographiques et courbes de niveau. Nous présentons maintenant comment le modèle GAEL permet, en plus, une résolution de ces conflits. Cette résolution est effectuée grâce à la prise en compte des contraintes que nous présentons maintenant.

La classe *contrainte relationnelle écoulement tronçon hydrographique* Cette contrainte traduit comment l'agent tronçon hydrographique voit sa relation avec l'agent-champ relief. Sa satisfaction est la même que celle de la relation d'écoulement présentée précédemment. Nous proposons de lui affecter une priorité nulle et de lui permettre de proposer au tronçon hydrographique les deux traitements suivants :

- une activation de l'agent-champ relief avec un poids de 2,
- une déformation de l'agent tronçon hydrographique lui-même avec un poids de 1.

Ainsi, l'agent tronçon hydrographique va tenter en premier lieu d'activer l'agent-champ relief pour qu'il se déforme, puis de se déformer lui-même si la déformation de l'agent-champ relief n'a pas suffi à satisfaire totalement la relation. Nous présentons comment cette déformation du tronçon hydrographique est effectuée.

Opération de déformation du tronçon hydrographique pour écoulement

3. Ce conflit de superposition aurait aussi pu être résolu en déplaçant non pas le cours d'eau, mais la route, ou encore les deux en même temps. Dans certains processus de généralisation comme celui proposé dans (Lecordix *et al.*, 2007b), la position planimétrique du réseau routier est supposée plus importante que celle du réseau hydrographique. C'est pourquoi, le réseau hydrographique est déplacé.

Cette opération de déformation est proposée au tronçon hydrographique pour améliorer son écoulement. Le tronçon hydrographique est modélisé comme un agent élastique qui se déforme sous l'influence du relief. Le tronçon hydrographique est contraint à garder sa forme à travers l'utilisation de contraintes submicro de préservation de forme (préservation de position de points, de longueur et d'orientation de segments). Il est également contraint à s'écouler à travers l'utilisation d'une *contrainte submicro d'écoulement de segment* portée par chacun de ses segments. Cette contrainte porte sur l'orientation et la position d'un segment. Elle incite le segment à :

- d'une part, **s'orienter** dans la direction de la pente du relief. Le comportement de chaque segment peut être comparé à celui d'une aiguille de boussole qui cherche à s'orienter vers le nord : chaque segment cherche à pivoter vers la pente.
- d'autre part, **se déplacer** orthogonalement à sa direction, dans la direction de la pente. Le segment est ainsi incité à « glisser » le long de la pente.

Cette contrainte incite le segment à pivoter et à se déplacer (cf. figure 4.23) b.. Le déplacement proposé à chacun des agents-point est la somme des deux déplacements suivants :

- un déplacement induit par **la rotation** du segment (cf. figure 4.23 b. en vert). Ce déplacement calculé de la même façon que celui de la contrainte d'orientation de segment présentée en partie 3.1.3.2 page 116, l'orientation but étant celle de la pente sous le segment. Contrairement à la contrainte submicro d'orientation de segment, l'orientation but change au fur et à mesure que le segment se déplace.
- un déplacement induit par **la translation** du segment (cf. figure 4.23 b. en magenta). Ce déplacement est le projeté suivant la direction orthogonale au segment d'un vecteur représenté en gris en figure 4.23 b.. Ce vecteur est le vecteur colinéaire au vecteur de pente qui a la même longueur que le vecteur déplacement induit par la rotation calculé précédemment.

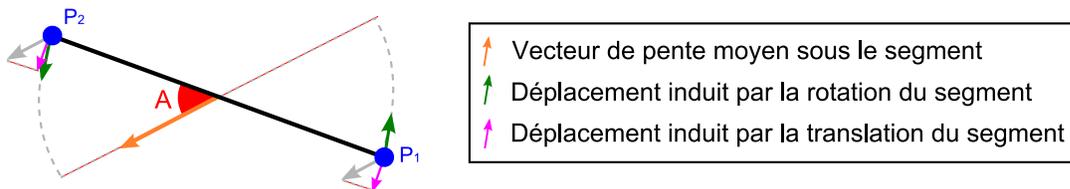


FIGURE 4.23 – Contrainte submicro d'écoulement de segment

Cette contrainte submicro permet d'utiliser une opération de déformation du tronçon hydrographique permettant, a priori, d'améliorer la satisfaction de la relation d'écoulement. Cette opération peut être utilisée pour rétablir la relation d'écoulement entre le réseau hydrographique et le relief (cf. figure 4.24).

La satisfaction de la relation d'écoulement peut également être améliorée en déformant le relief à travers l'utilisation de la contrainte suivante.

La classe *contrainte relationnelle relief écoulement tronçon hydrographique* Cette contrainte élastique est portée par l'agent-champ relief. Elle a pour rôle de l'inciter à se déformer pour améliorer la relation objet-champ. Sa satisfaction est celle de la relation.

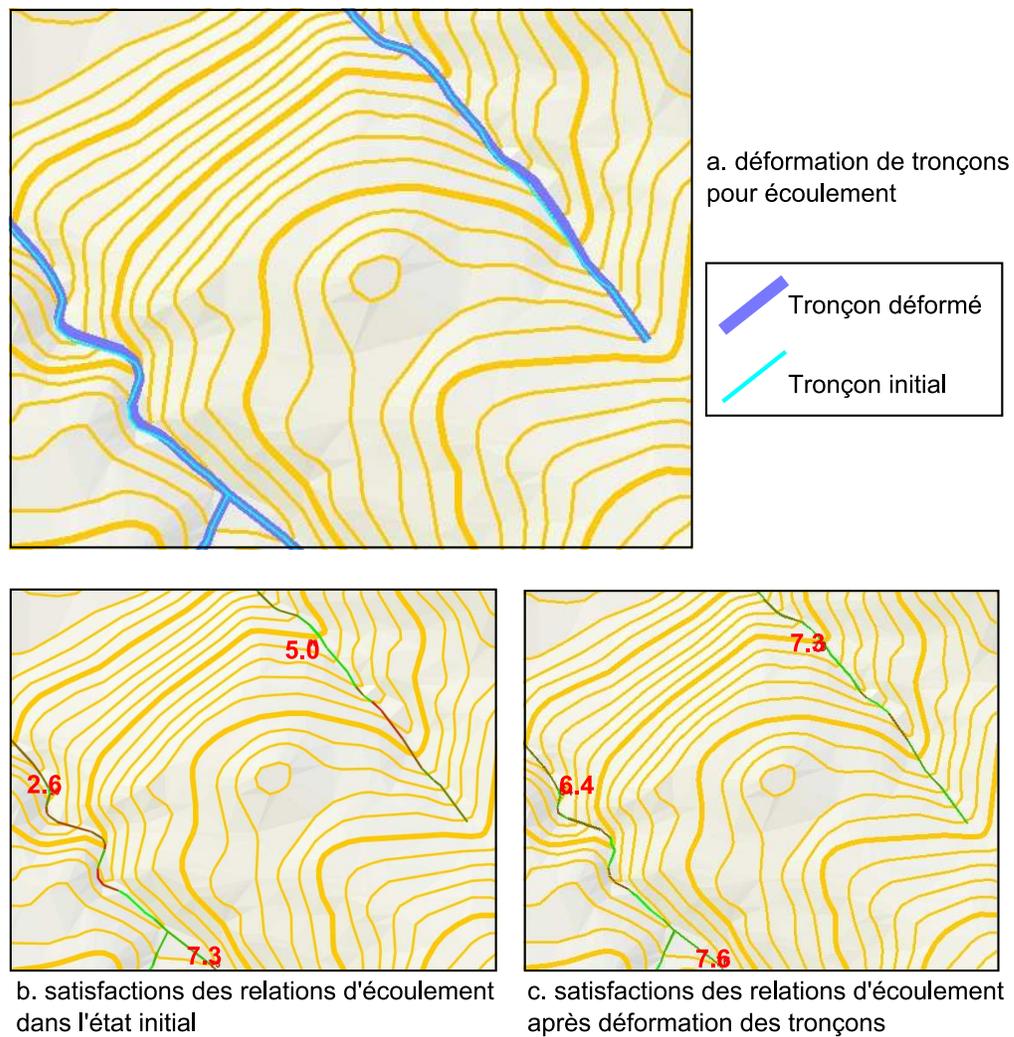


FIGURE 4.24 – Déformation de tronçons hydrographiques pour améliorer l'écoulement

Comme toute contrainte élastique, elle ne propose qu'un unique traitement qui est la déformation du champ. Cette déformation est obtenue à travers la décomposition au niveau submicro de cette contrainte sous la forme de *contraintes submicro écoulement hydrographie* que nous présentons maintenant.

La classe *contrainte submicro écoulement hydrographie* Cette contrainte submicro est portée par chacun des triangles composant l'agent-champ relief. Son rôle est d'inciter l'agent-champ relief à se déformer pour améliorer l'état de satisfaction de toutes les relations d'écoulement de tronçons hydrographiques qu'il porte. Elle incite chaque triangle composant l'agent-champ relief à se déplacer et à pivoter pour améliorer l'état de satisfaction des tronçons hydrographiques qui se trouvent sur lui. La figure 4.25 présente comment ce déplacement est calculé. Chaque triangle est caractérisé par une valeur Da . Da est une moyenne de valeurs d'écart d'orientation⁴ calculée pour chaque segment hydrographique situé sur le triangle (cf. figure 4.25 a.). Cet écart est, comme pour la contrainte submicro d'écoulement de segment, l'écart entre l'orientation du segment et le vecteur de pente du triangle dans le plan horizontal. La moyenne des écarts Da est pondérée par la longueur de chaque segment sur le triangle.

Afin de contraindre la valeur Da à être nulle, la contrainte submicro propose un déplacement à chacun des agents-point du triangle permettant de diminuer cette valeur (cf. figure 4.25 b.). Ces déplacements incitent le triangle :

- d'une part, à pivoter autour de son centre dans le sens opposé à Da . (cf. figure 4.25 b. en vert). Ce déplacement calculé de la même façon que celui de la contrainte d'orientation azimutale de pente de triangle présentée en partie 3.1.3.2 page 119, l'orientation but étant l'orientation moyenne du réseau hydrographique sur le triangle. Contrairement à la contrainte submicro d'orientation azimutale de pente de triangle, l'orientation but change lorsque les agents-point composant le triangle se déplacent,
- d'autre part, à se déplacer dans une direction orthogonale à celle des segments hydrographiques (cf. figure 4.25 b. en magenta). Ce déplacement est le projeté suivant la direction orthogonale à la direction moyenne du réseau hydrographique sur le triangle (en bleu) d'un vecteur représenté en gris en figure 4.25 b.. Ce vecteur est le vecteur colinéaire et opposé au vecteur de pente qui a la même longueur que le vecteur déplacement induit par la rotation calculée précédemment.

Résultats La figure 4.26 montre le résultat obtenu lors de la généralisation de l'extrait de la figure 4.21 avec prise en compte de la relation d'écoulement. Nous constatons que la prise en compte de la relation a permis d'obtenir une déformation du relief (cf. figure 4.26 en bas). Cette déformation a permis d'améliorer la relation d'écoulement du réseau hydrographique sur le relief : nous constatons un décalage des courbes de niveau qui a permis d'améliorer visuellement la relation d'écoulement. Cette amélioration de satisfaction est également constatée sur les valeurs de satisfaction des relations d'écoulement des tronçons (affichées en rouge).

4. Nous avons pris en compte le fait qu'une moyenne de valeurs périodiques comme les valeurs d'angle peuvent dans de nombreux cas ne pas avoir de sens. (Duchêne *et al.*, 2003) montre dans le cas particulier d'une mesure d'orientation de bâtiment qu'il est important de prendre en compte ce problème. Pour notre cas, nous estimons que cette moyenne a un sens, car il s'agit d'une moyenne d'écarts d'angles (et non de valeur) qui sont répartis autour de 0, entre $-\pi$ et π . Ils ont le plus souvent de faibles valeurs.

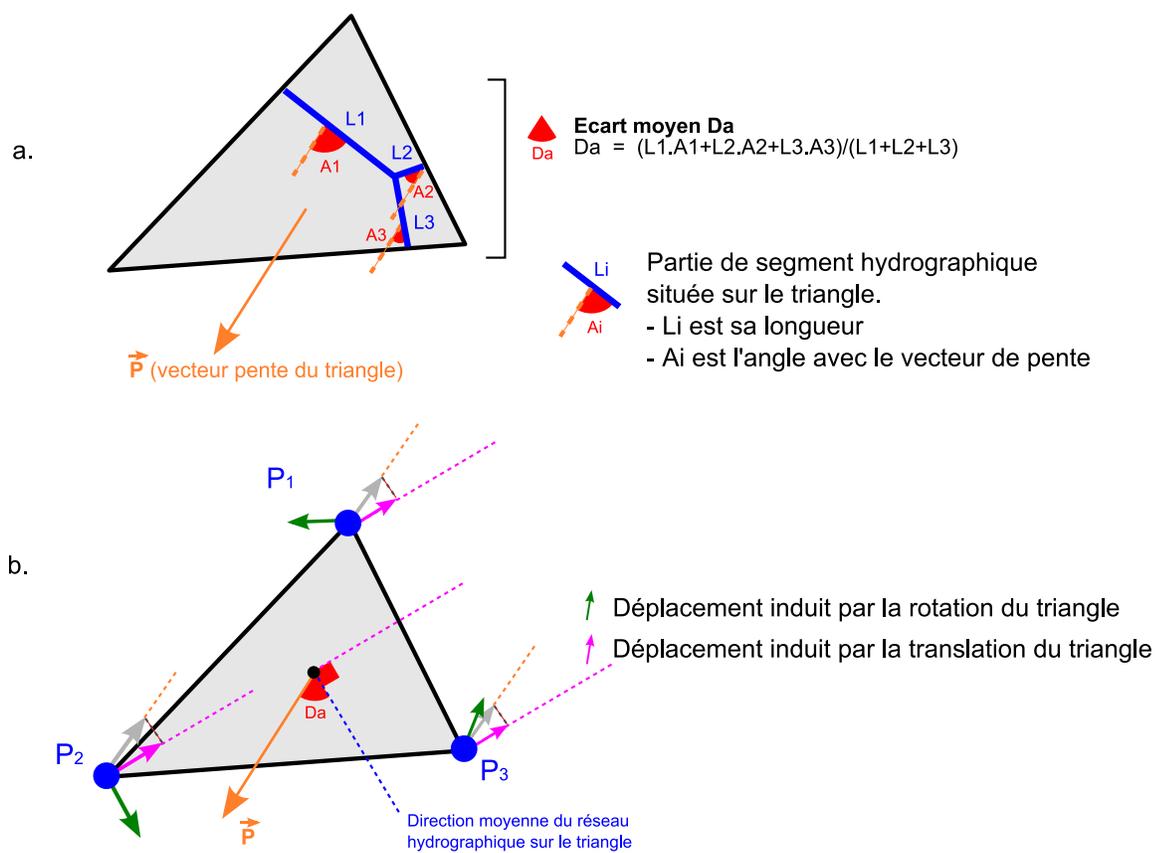


FIGURE 4.25 – Contrainte submicro de triangle pour l'écoulement

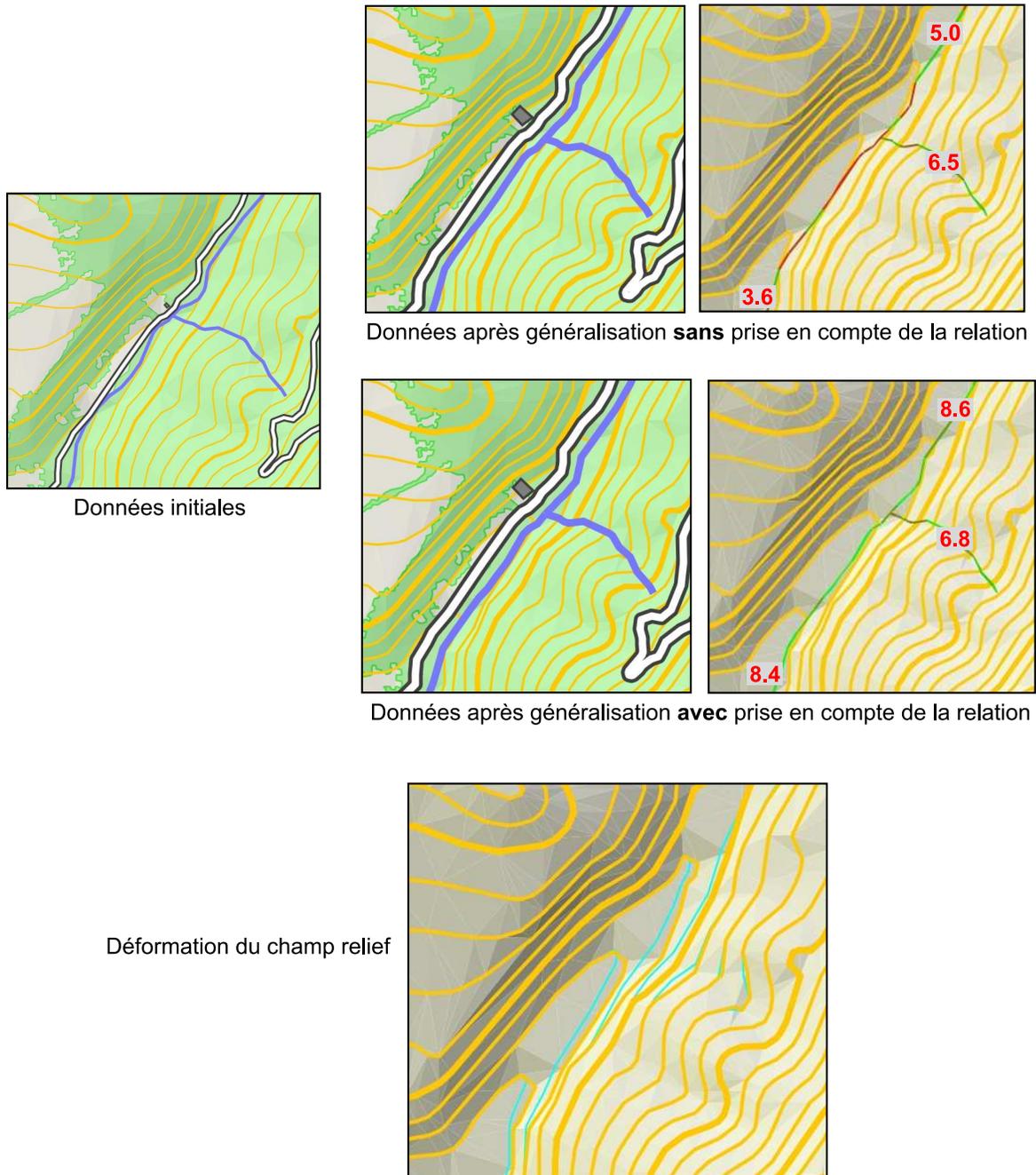


FIGURE 4.26 – Résultat de la prise en compte de la relation d'écoulement

Cette mise en œuvre montre que le modèle GAEL peut aussi être adapté à la prise en compte de relations objet-champ concernant les réseaux. Cette application donne un exemple de mise en œuvre que nous pensons adaptable à d'autres relations entre champs et réseaux. Nous verrons des pistes en partie 4.2.2.1 page 219. Nous présentons également en partie 4.1.4.2 une mise en œuvre du modèle GAEL utilisant celle proposée dans cette partie dans le but de mettre en cohérence les données hydrographiques et altimétriques.

4.1.3 Cas d'application avec le champ occupation du sol

Nous présentons maintenant une autre mise en œuvre du modèle GAEL que nous avons effectuée et qui concerne le champ d'occupation du sol. Par rapport au champ relief traité précédemment, ce champ a la particularité d'être à grandeur nominale (comme défini en partie 2.1.1 page 78). Nous présentons tout d'abord en partie 4.1.3.1 les contraintes élastiques de préservation de forme que nous proposons de faire porter à l'agent-champ occupation du sol pour le rendre déformable. Nous présentons ensuite en partie 4.1.3.2 page 200 un début de mise en œuvre que nous avons entreprise pour la préservation de relation d'appartenance d'un bâtiment à sa zone d'occupation du sol.

4.1.3.1 Contraintes de préservation de l'agent-champ occupation du sol

Comme l'agent-champ relief, l'agent-champ occupation du sol doit porter des contraintes élastiques de préservation de forme afin de lui permettre d'avoir un comportement déformable particulier. Des tests nous ont permis de choisir des contraintes permettant de conférer à l'agent-champ occupation du sol un comportement déformable particulier, qui préserve en particulier au mieux la forme de ses parcelles. Nous proposons de faire porter à l'agent-champ occupation du sol les contraintes suivantes :

- une contrainte élastique de **préservation de position planimétrique du champ** : comme pour l'agent-champ relief, cette contrainte force une préservation de la valeur du champ au niveau de chaque point de l'espace. Elle a les mêmes caractéristiques que la contrainte analogue proposée précédemment pour l'agent-champ relief,
- une contrainte élastique de **préservation de forme générale** : cette contrainte incite l'agent-champ occupation du sol à garder sa forme générale. Elle est décomposée en contraintes submicro suivantes :
 - deux contraintes de longueur et d'orientation de chacun des segments composant les limites d'occupation du sol (cf. pages 115 et 116),
 - deux contraintes de préservation d'aire et de position de centre de gravité de chacun des triangles (cf. pages 117 et 118).

Ces contraintes incitent à préserver la forme générale des parcelles d'occupation du sol du champ. Tout comme pour la contrainte élastique de préservation de forme générale de l'agent-champ relief, nous proposons provisoirement de lier la satisfaction de cette contrainte à la présence de triangles retournés. L'amélioration de cette évaluation pourra faire l'objet de travaux futurs.

Ces contraintes élastiques permettent de conférer à l'agent-champ occupation du sol la capacité de se déformer sous l'effet d'une contrainte déformation. Nous présentons maintenant une contrainte de déformation objet-champ que nous avons mise au point qui permettent à l'agent-champ relief de se déformer sous l'influence d'objets placés sur lui.

4.1.3.2 Relation d'appartenance de bâtiment à une zone d'occupation du sol

Chaque bâtiment est caractérisé par une appartenance à une zone d'occupation du sol qui peut changer lorsque le bâtiment s'applique des opérations de généralisation (en particulier, lorsqu'il se déplace). Nous proposons de mettre en œuvre notre modèle pour préserver cette relation. Contraindre cette relation incite à la préservation de la zone d'occupation du sol d'un bâtiment. Les classes spécialisées à partir de celles de la figure 3.50 page 163 pour la prise en compte de cette relation sont présentées sur le diagramme UML de la figure 4.27. Nous introduisons les classes suivantes :

- une classe *relation zone OS bâtiment* qui hérite de la classe *relation agent géographique champ*,
- une classe *contrainte relationnelle zone OS bâtiment* qui hérite de la classe *contrainte relationnelle agent géographique champ*,
- une classe *contrainte relationnelle champ OS bâtiments* qui hérite de la classe *contrainte élastique relationnelle champ agent géographique*,
- et une classe *contrainte submicro zone OS bâtiments* qui hérite de la classe *contrainte submicro*,

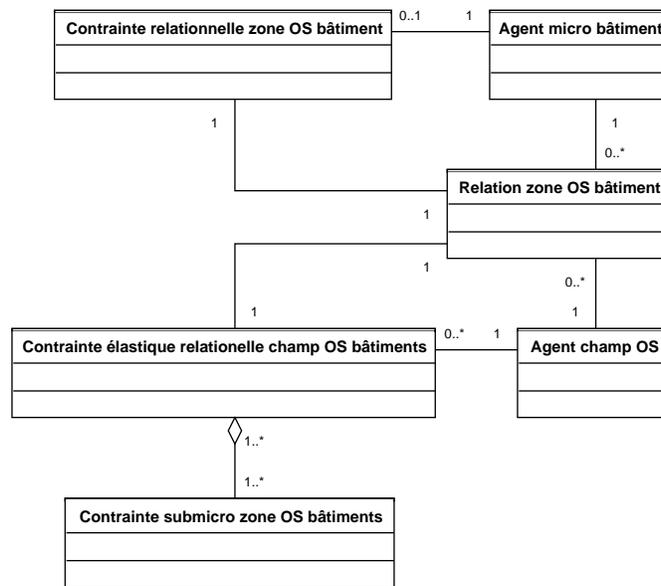


FIGURE 4.27 – Diagramme UML de classe de la relation objet-champ d'appartenance de bâtiment à une zone d'occupation du sol

La classe *relation zone OS bâtiment* Cette classe a pour rôle de modéliser la relation entre un agent géographique bâtiment et l'agent-champ occupation du sol concernant la zone à laquelle le bâtiment appartient. La valeur courante de la relation est l'identifiant de la zone d'occupation du sol dans laquelle le bâtiment est situé (celle au niveau de son centre). La valeur initiale est l'identifiant de la zone dans laquelle le bâtiment est initialement situé. La satisfaction de la contrainte décroît avec l'écart entre les valeurs initiale et courante de la relation. La satisfaction de la relation ne peut valoir que deux valeurs : 10 si le bâtiment se trouve bien dans sa zone d'occupation du sol initiale, et 0 sinon. Cette relation peut donc uniquement être totalement satisfaite ou totalement violée.

L'objet *relation zone OS bâtiment* fournit une évaluation de l'état de satisfaction de la relation qui peut être utilisée indépendamment du processus de généralisation. La valeur de satisfaction permet en effet de détecter lorsqu'un bâtiment est sorti de sa zone d'occupation du sol lors de son processus de généralisation. La figure 4.28 montre l'exemple de la dégradation de la satisfaction de la relation provoquée par la généralisation de bâtiments aux échelles 1:25000 et 1:50000. Nous constatons que pour le 1:25000, les transformations subies par les bâtiments sont suffisamment faibles pour préserver la relation.

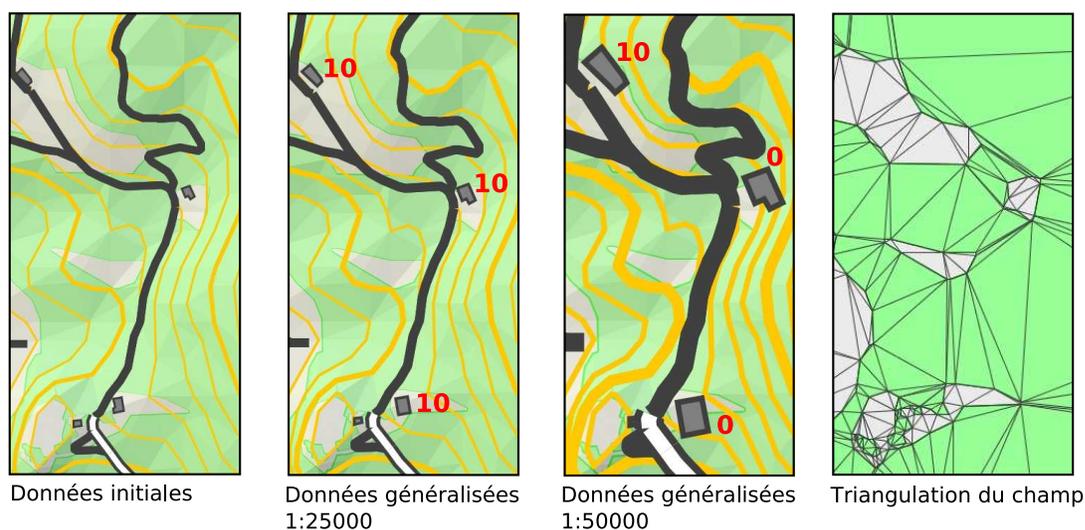


FIGURE 4.28 – Dégradation de la satisfaction d'appartenance à une zone d'occupation du sol lors du processus de généralisation

La classe *contrainte relationnelle zone OS bâtiment* Cette contrainte traduit la façon dont l'agent-bâtiment voit sa relation avec l'agent-champ. Par définition, sa satisfaction est la même que celle de la relation précédente. Nous proposons de lui affecter une priorité nulle et de lui permettre de proposer au bâtiment les deux traitements suivants :

- une activation de l'agent-champ relief avec un poids de 2,
- un déplacement de l'agent-bâtiment lui-même avec un poids de 1.

Lors de sa généralisation, afin de satisfaire sa contrainte de préservation d'appartenance à une zone d'occupation du sol, l'agent-bâtiment tente en premier lieu de déformer l'agent-champ occupation du sol, puis, si la déformation de l'agent-champ n'a pas permis de satisfaire totalement la relation, de se déplacer. Le déplacement proposé au bâtiment est le plus court déplacement qui lui permette de « retourner » dans sa zone d'occupation du sol initiale. Il est calculé à partir de la plus courte distance entre le centre du bâtiment et sa zone d'occupation du sol initiale.

La classe *contrainte relationnelle champ OS bâtiments* Cette contrainte élastique est portée par l'agent-champ relief. Elle a pour rôle de l'inciter à se déformer pour améliorer la relation objet-champ. Par définition, sa satisfaction est égale à celle de la relation. Comme toute contrainte élastique, elle ne propose qu'un unique traitement qui est la déformation du champ. Cette déformation est obtenue à travers la décomposition au niveau

submicro de cette contrainte sous la forme de *contraintes submicro zone OS bâtiments* que nous présentons maintenant.

La classe *contrainte submicro zone OS bâtiments* Cette contrainte submicro est portée par chacun des triangles composant l'agent-champ occupation du sol. Son rôle est d'inciter chaque triangle composant l'agent-champ à se déplacer pour améliorer l'état de satisfaction des relations d'appartenance des bâtiments qui se trouvent sur lui. Le déplacement proposé à chacun des agents-point du triangle est l'opposé des déplacements proposés à chacun des bâtiments situés sur lui. Chaque triangle tente ainsi de se déplacer pour améliorer les contraintes d'appartenance des bâtiments qui sont sur lui.

Résultats La figure 4.29 présente le résultat obtenu sur la zone test proposée au 1 :50000. Nous constatons que les changements provoqués sont invisibles : non seulement la déformation du champ occupation du sol est de très faible ampleur, mais ces changements sont masqués par les objets qui ont provoqué ces changements. Parmi les deux bâtiments dont la relation avait été détériorée par la généralisation, seul un des deux (celui du milieu) est parvenu à améliorer son état. Le bâtiment le plus au sud n'est pas parvenu à déformer le champ convenablement pour améliorer l'état de sa relation. La figure donne le détail de la faible déformation que le champ est parvenu à s'appliquer pendant la généralisation du bâtiment du milieu. Seuls quelques points au niveau de la zone entourée en rouge se sont déplacés et ont provoqué un changement de zone du centre du bâtiment.

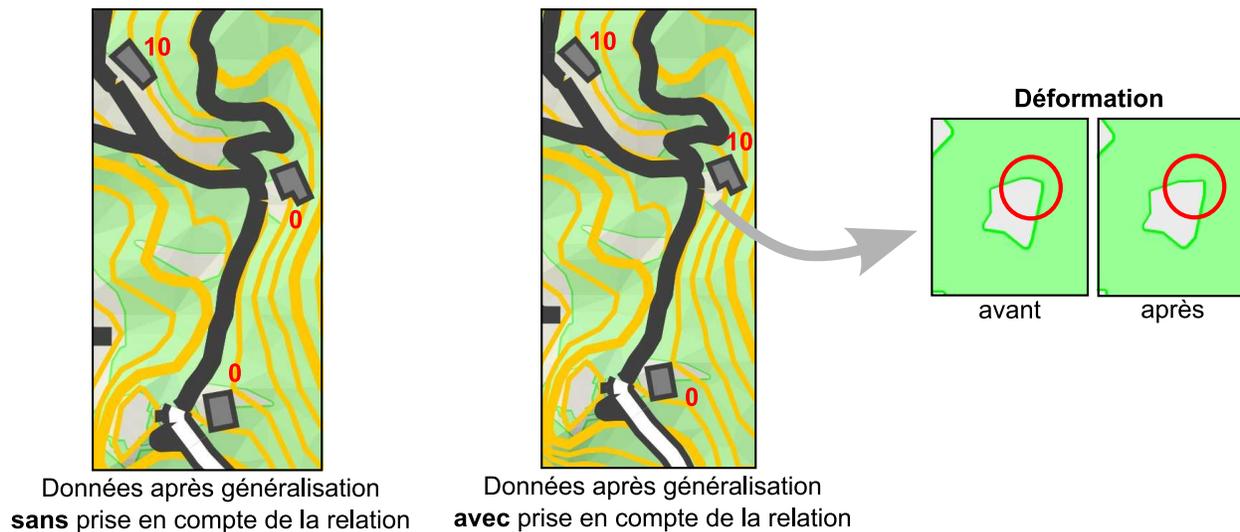


FIGURE 4.29 – Résultat de la prise en compte de la contrainte de préservation d'appartenance de bâtiment à sa zone d'occupation du sol

Les résultats de cette mise en œuvre ne sont pas satisfaisants. Des améliorations de la méthode de calcul de la satisfaction ainsi que de la méthode de déformation pourraient permettre d'obtenir des déformations plus satisfaisantes. Nous estimons que cette limite n'est pas propre au modèle, mais à la mise en œuvre que nous avons proposée. Comme amélioration, nous suggérons :

- de caractériser l'appartenance d'un bâtiment à sa zone d'occupation du sol pas uniquement en fonction de la position de son centre, mais en fonction de la part du

- bâtiment qui est contenue dans la surface. Cette amélioration permettrait de ne pas considérer comme satisfait un bâtiment qui intersecte sa limite d'occupation du sol,
- de proposer au bâtiment en état insatisfait un déplacement qui lui permette non pas de replacer son centre dans sa zone, mais la totalité de sa géométrie. Pour cela, nous suggérons d'utiliser la méthode proposée par (Duchêne, 2004, p. 139) qui permet de calculer un tel déplacement,
 - et de la même façon, d'améliorer le déplacement proposé par la contrainte submicro.

4.1.4 Autres cas d'application du modèle GAEL

Le modèle GAEL a été mis au point dans le but de prendre en compte les relations objet-champ dans le processus de généralisation. Nous présentons maintenant trois applications qui utilisent, parfois partiellement, le modèle GAEL pour des objectifs différents. En premier lieu, nous montrons une mise en œuvre pour effectuer des opérations de déplacement pendant le processus de généralisation. Nous présentons ensuite une utilisation du modèle pour la mise en cohérence des thèmes hydrographiques et altimétriques. Enfin, nous montrons comment ce modèle peut être appliqué à la généralisation de courbes de niveau.

4.1.4.1 Application au déplacement en généralisation

Le modèle GAEL a été mis en œuvre pour effectuer certaines opérations de déplacement pendant le processus de généralisation. Cette mise en œuvre a pour objectif de rendre possibles des opérations de propagation d'opérations de généralisation du routier sur le bâti⁵. Le but de cette application est d'éviter l'apparition d'incohérences trop importantes entre les thèmes routier et bâti lors d'une généralisation du thème routier indépendante du bâti.

En effet, lors de la généralisation du réseau routier, celui-ci se transforme sans prendre en compte les bâtiments qui peuvent être proches de lui. En conséquence, il est fréquent que des bâtiments proches de tronçons routiers subissent des transformations de forte ampleur intersectent la géométrie du tronçon, voire passent de l'autre côté du tronçon. La figure 4.30 donne un exemple de création d'une telle incohérence. Sur le figure 4.30 a., les données initiales sont représentées. Afin d'améliorer la lisibilité du réseau routier, un traitement de déformation (issu de (Bader, 2001)) est appliqué au réseau routier. La figure 4.30 b. montre le résultat obtenu : la déformation du réseau routier a permis de résoudre des conflits cartographiques de superposition entre les géométries des tronçons routiers. En conséquence de ce traitement effectué sans prendre en compte le bâti, nous constatons que des bâtiments se trouvent maintenant sous le réseau routier.

Pour permettre une propagation de l'opération de généralisation du réseau routier sur le bâti, le modèle GAEL a été adapté par (Craipeau, 2007). Le principe de cette adaptation

5. L'adaptation du modèle GAEL que nous présentons dans cette partie n'a pas été effectuée dans le cadre de cette thèse, mais dans le cadre d'un examen professionnel interne à l'IGN par Sandrine Craipeau (cf. (Craipeau, 2007)). Le résultat de ce travail est utilisé dans le processus de généralisation automatique présenté dans (Lecordix *et al.*, 2007b). Ce processus, en cours d'industrialisation, vise à produire la future carte topographique de base française aux échelles du 1 :25000 et 1 :50000 à partir de la BDTopo® de l'IGN à l'aide de techniques à base d'agents. Nous présentons brièvement ce travail ici, car il donne un exemple d'application possible du modèle GAEL qui nous semble intéressant.

est de modéliser les groupes de bâtiments proches du réseau routier comme des agents élastiques. Chacun de ces agents élastiques se décompose en une triangulation dont les sommets sont les centres des bâtiments de l'îlot et les points du réseau routier qui lui sont adjacents. La déformation du réseau routier provoque une déformation de ces agents élastiques qui permet alors de déterminer des vecteurs de propagation pour chacun des bâtiments composant les agents élastiques. La figure 4.30 c. donne un exemple de résultat : les bâtiments initialement sous le réseau routier (représentés en orange sur la figure) ont été déplacés suite à une déformation de leur îlot. Des conflits de superposition entre routes et bâti persistent mais l'état des données a été amélioré.

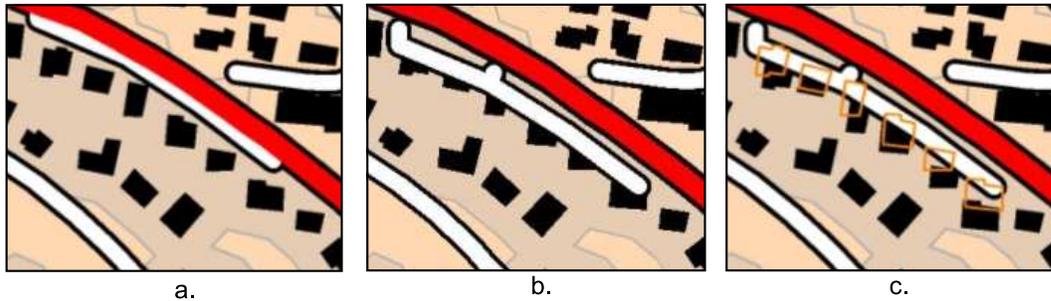


FIGURE 4.30 – Propagation d'opérations de généralisation du routier sur le bâti, d'après (Craipeau, 2007). (a.) données initiales symbolisées, (b.) résultat après résolution des conflits d'empâtement du réseau routier basé sur l'algorithme de (Bader, 2001) et (c.) résultat après déplacement des bâtiments

Le modèle GAEL a également été appliqué à la déformation de tronçons hydrographiques pour la résolution de conflits de proximité. Il est fréquent, en particulier dans les vallées encaissées, de trouver des routes qui longent des cours d'eau (la plupart des vallées sont le plus souvent desservies par des routes tracées au fond des vallées). La figure 4.31 a. donne l'exemple d'une telle configuration. En conséquence, les conflits de proximité entre tronçons hydrographiques et routier sont fréquents. Par exemple, la figure 4.31 b. représente une route et un cours d'eau avec des symboles au 1 :50000. Les deux symboles sont trop proches l'un de l'autre, voire même se superposent. Le modèle GAEL peut être appliqué pour obtenir une déformation du tronçon hydrographique qui permette de résoudre ce conflit de superposition.

Le principe de ce traitement est de modéliser le tronçon hydrographique comme un agent élastique, le tronçon routier étant fixe. Le tronçon hydrographique porte des contraintes submicro de préservation de forme (préservation de longueur et d'orientation de ses segments) qui l'incitent à garder sa forme. Les segments du tronçon sont incités à s'écarter du tronçon hydrographique à travers l'utilisation d'une contrainte relationnelle submicro de distance minimale entre segments (cf. partie 3.1.3.4 page 125) composant le tronçon hydrographique et le tronçon routier : les segments trop proches les uns des autres sont incités à s'éloigner. Ainsi, lors d'une activation de l'agent tronçon hydrographique, celui-ci se déforme pour s'écarter du tronçon routier. Un résultat est donné en figure 4.31 c. : le tronçon hydrographique s'est écarté du tronçon routier ; le conflit de proximité entre eux a été résolu.

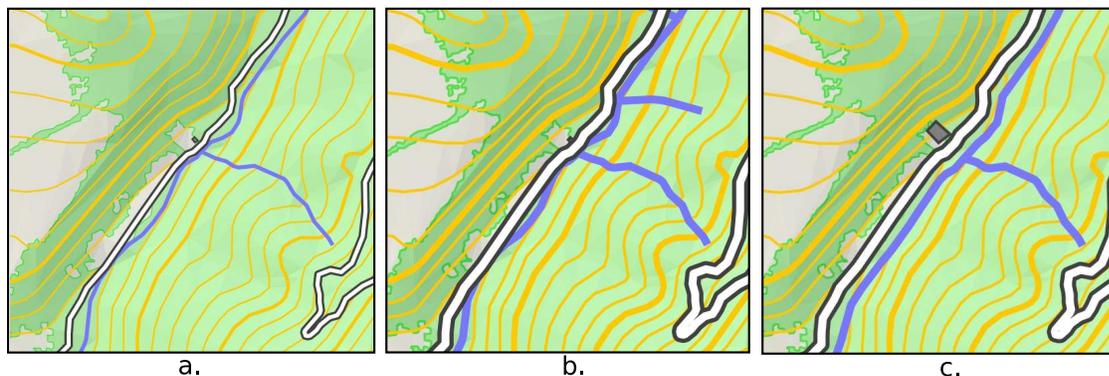


FIGURE 4.31 – Déformation du réseau hydrographique pour la résolution de conflit de proximité avec le réseau routier

Les deux applications présentées ici montrent que le modèle GAEL peut être utilisé lors du processus de généralisation pour effectuer des opérations de déformation. Nous présentons maintenant une autre mise en œuvre effectuée et ne portant pas sur la généralisation.

4.1.4.2 Application à la mise en cohérence hydrographie-relief

Nous présentons dans cette partie une mise en œuvre du modèle GAEL dont le but est de corriger des incohérences entre les thèmes hydrographique et altimétrique⁶. Les données altimétriques et hydrographiques sont usuellement collectées à travers des procédés souvent indépendants. En conséquence, les relations existantes entre ces thèmes, comme par exemple celle d'écoulement que nous avons évoquée précédemment, ne sont pas toujours satisfaites dans les bases de données géographiques. Une telle incohérence est détectée en figure 4.21 : les satisfactions d'écoulement ne sont pas parfaites dans les données initiales. En figure 4.32, des cours d'eau semblent s'écouler hors de leur talweg (cf. figures a., b. et d.) et des lacs ne semblent pas plan, puisque leurs contours intersectent des courbes de niveau (cf. figures c., e. et f.). Ces incohérences peuvent dans certains cas avoir des conséquences fâcheuses lors de l'utilisation de ces données. La nécessité de disposer de méthodes permettant de corriger ces incohérences est formulée dans beaucoup de travaux (Gotlib *et al.*, 2007; Toth, 2007).

A travers la relation d'écoulement de tronçon présentée précédemment en partie 4.1.2.3 page 189, le modèle GAEL permet de traiter, du moins en partie, les incohérences concernant l'écoulement du réseau hydrographique. Il permet en effet :

- d'une part, de détecter les zones du réseau hydrographique pour lesquelles l'écoulement est mauvais, grâce à l'utilisation de l'indicateur de qualité d'écoulement,
- et d'autre part, de corriger cette incohérence en déformant, soit le relief, soit le réseau hydrographique, soit les deux.

Les figures 4.24 (présentée page 195) et 4.33 présentent des résultats de l'application de l'opération de déformation de tronçons hydrographiques présentée en partie 4.1.2.3 basée

6. Cette mise en œuvre du modèle GAEL a été présentée dans (Gaffuri, 2007). Elle a été reprise dans le cadre d'un examen professionnel interne à l'IGN effectué par Xavier Halbecq (cf. (Halbecq, 2007)) pour être utilisée dans le processus de production de la future carte de base de l'IGN présenté dans (Lecordix *et al.*, 2007b).

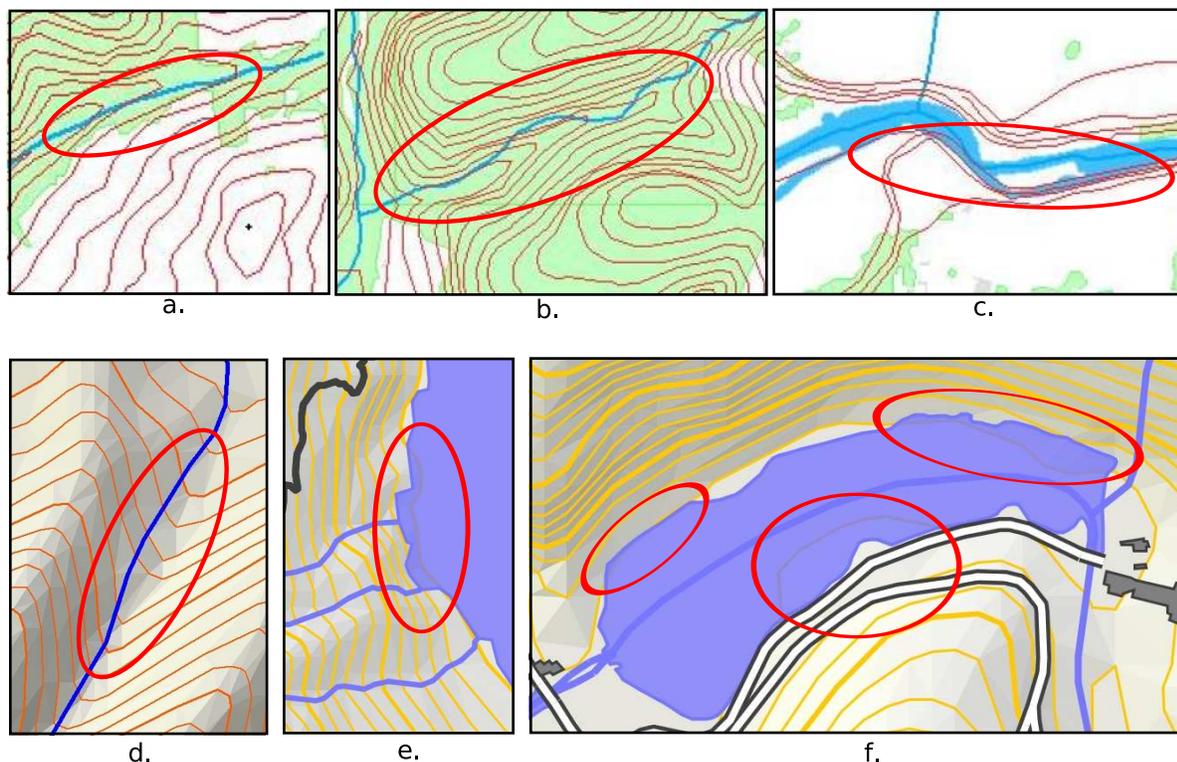


FIGURE 4.32 – Exemples d’incohérences hydrographie-relief, entourées en rouge (les figures a., b. et c. sont extraites de (Halbecq, 2007)).

sur l’utilisation de la contrainte submicro d’écoulement de segment. Son effet est de « faire tomber » les cours d’eau le long de la pente dans leur talweg pour les mettre en cohérence avec le relief.

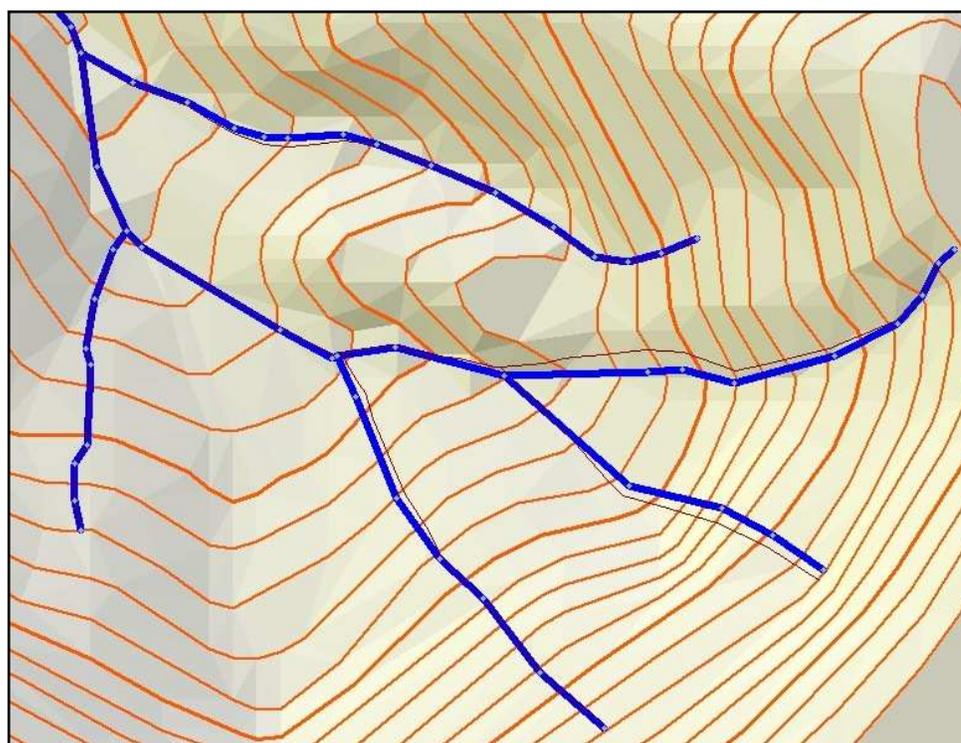
La figure 4.34 présente deux résultats de déformation du relief qui permettent de corriger les incohérences d’écoulement. Les figures a. et c. montrent que seuls quelques agents-point du relief autour du réseau hydrographique ont été déplacés.

4.1.4.3 Application à la généralisation de courbes de niveau

Dans toutes les applications présentées jusqu’à présent, les contraintes portées par l’agent-champ relief avaient pour objectif de l’inciter à préserver sa forme. Nous donnons ici une application utilisant des contraintes submicro qui permettent d’appliquer des opérations de généralisation sur le champ relief. Ces opérations permettent de résoudre des conflits de superposition entre courbes de niveau pour améliorer la lisibilité du relief.

Lors de la représentation du relief à une échelle donnée, il est parfois nécessaire de déformer des courbes de niveau afin d’éviter qu’elles ne se superposent. Ces conflits de superposition sont particulièrement fréquents en terrain pentu où les courbes de niveau consécutives sont proches les unes des autres, et peuvent parfois se superposer. Les opérations usuellement utilisées pour résoudre ces conflits sont (d’après (Imhof, 1982a)) :

- un changement de valeur d’équidistance des courbes de niveau. Cette opération permet de supprimer certaines courbes de niveau et ainsi de faire disparaître certains



— Réseau hydrographique déformé
— Réseau hydrographique initial

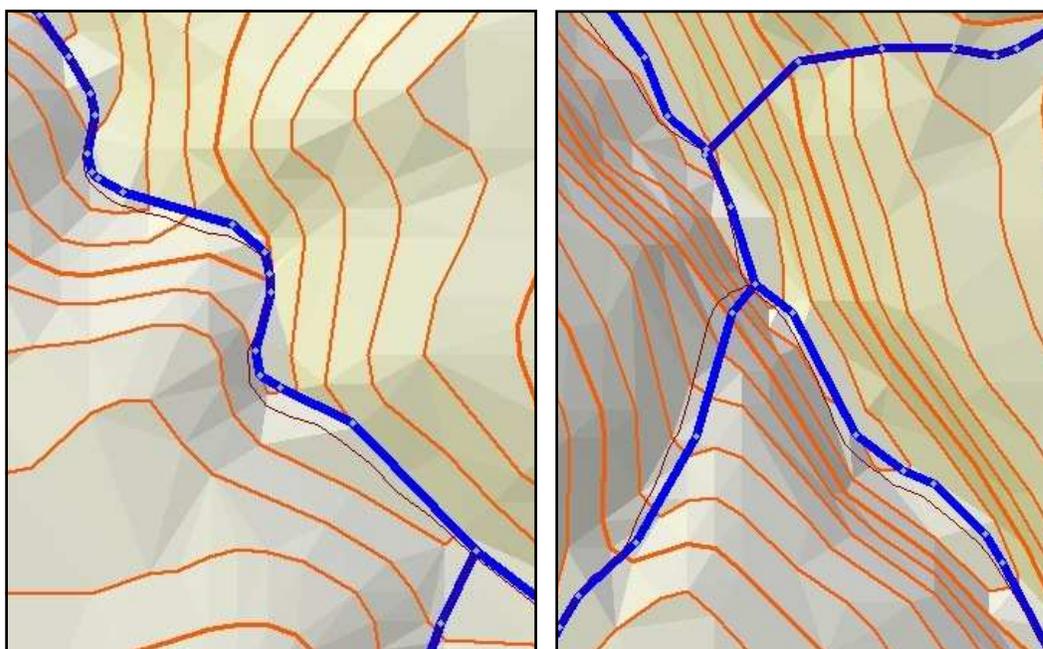


FIGURE 4.33 – Résultats de remise en cohérence hydrographie-relief par déformation de tronçons hydrographiques

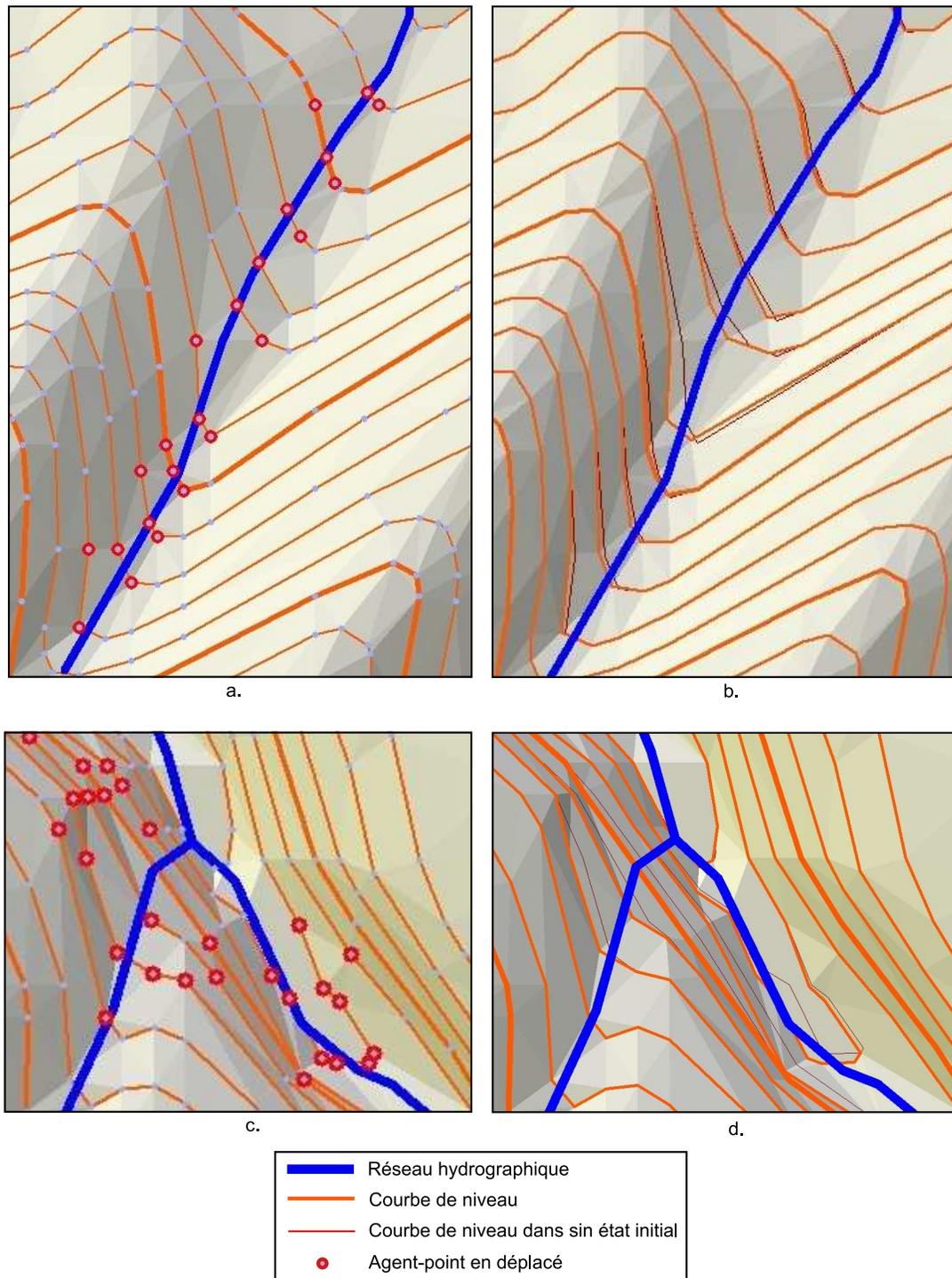


FIGURE 4.34 – Résultats de remise en cohérence hydrographie-relief par déformation du relief

conflits de superposition. Un exemple d'application de cette opération est donné figure 2.6 page 87,

- une suppression de certaines parties de courbes de niveau se superposant à ses courbes successives. Ces parties de courbes de niveau sont localisées aux endroits de forte pente. (Mackaness et Steven, 2006) présente une méthode d'automatisation de cette opération.
- ou bien une faible déformation des courbes de niveau qui permet d'espacer les courbes de niveau en conflit.

Nous montrons en quoi le modèle GAEL permet d'effectuer cette dernière opération. Le principe de cette adaptation est de faire porter aux objets submicro composant l'agent-champ relief des contraintes submicro adéquates permettant de le déformer pour résoudre ces conflits de superposition entre les courbes de niveau successives trop proches. Cette contrainte submicro est la contrainte de distance minimale entre point et segment présentée en partie 3.1.3.4 page 122. Nous proposons de faire porter cette contrainte à tout couple composé d'un point et d'un segment de courbe de niveau appartenant à un même triangle. La distance minimale but de la contrainte est la somme de la largeur d'une courbe de niveau et de la distance minimale de séparation entre deux courbes de niveau successives. Ainsi, les courbes de niveau sont incitées à s'écarter les unes des autres.

La figure 4.35 montre un résultat de cette application du modèle GAEL obtenu pour la représentation d'une zone pentue au 1 :50000. Figure 4.35 a. sont représentées les données initiales. Ces courbes de niveau sont symbolisées en figure 4.35 b. pour une représentation cartographique au 1 :50000. Certaines courbes de niveau sont trop proches les unes des autres, voire se superposent. Une activation de l'agent-champ permet un déplacement des points qui le composent (cf. figure 4.35 c.). En figure 4.35 d., après déformation de l'agent-champ relief, certaines courbes de niveau se sont déformées au niveau des zones de conflit initiales et sont au final plus espacées les unes des autres, ce qui contribue à en améliorer la lisibilité. En figure 4.35 e. sont représentées les courbes de niveau initiales en cyan et finales en bistre. L'agent-champ relief s'est déformé pour permettre d'améliorer la lisibilité de ses courbes de niveau. La figure 4.36 donne un autre résultat (les zones intéressantes sont entourées en rouge).

Un résultat comparable aurait pu être obtenu avec une autre contrainte submicro. En effet, contraindre les courbes de niveau à s'écarter les unes des autres équivaut à contraindre la pente de chaque triangle à être inférieure à un certain seuil. Cette contrainte peut se traduire également au niveau submicro.

Cette application montre un autre exemple d'adaptation du modèle GAEL pour effectuer des opérations de généralisation continues sur les champs. Le problème à résoudre au niveau du champ (résoudre les conflits de superposition des courbes de niveau) est traduit au niveau submicro pour être résolu.

4.2 Critique et discussion

La mise en œuvre du modèle GAEL présentée dans la partie précédente donne un aperçu de ses possibilités. Nous critiquons le modèle GAEL : nous donnons les points fort de

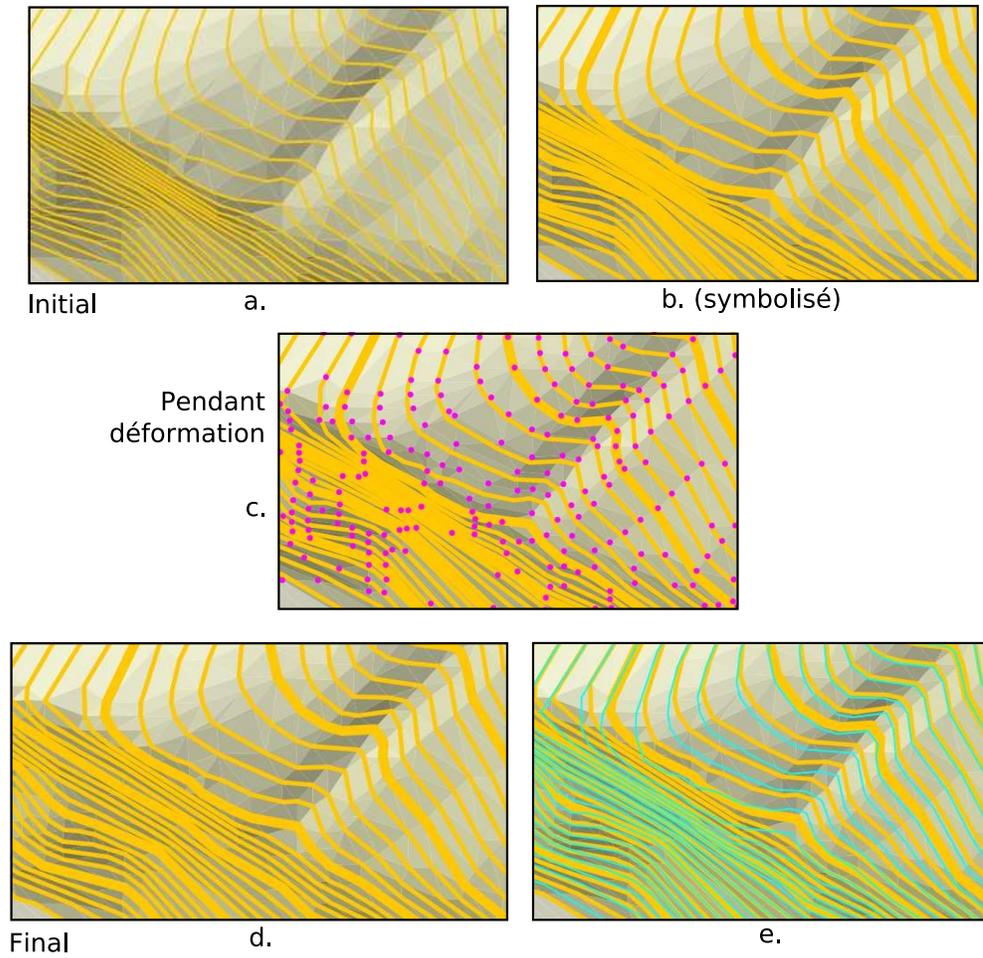
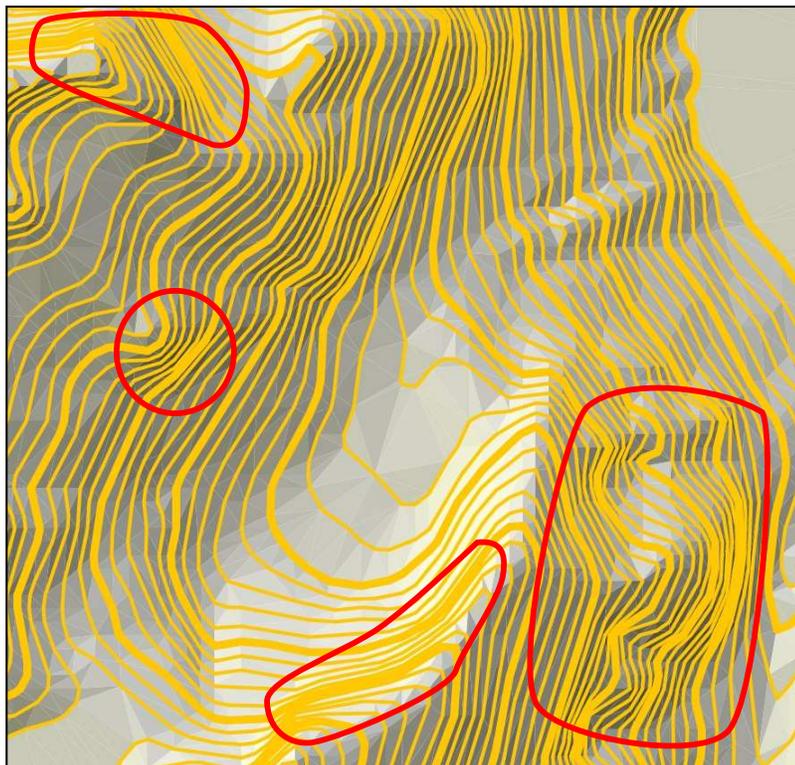
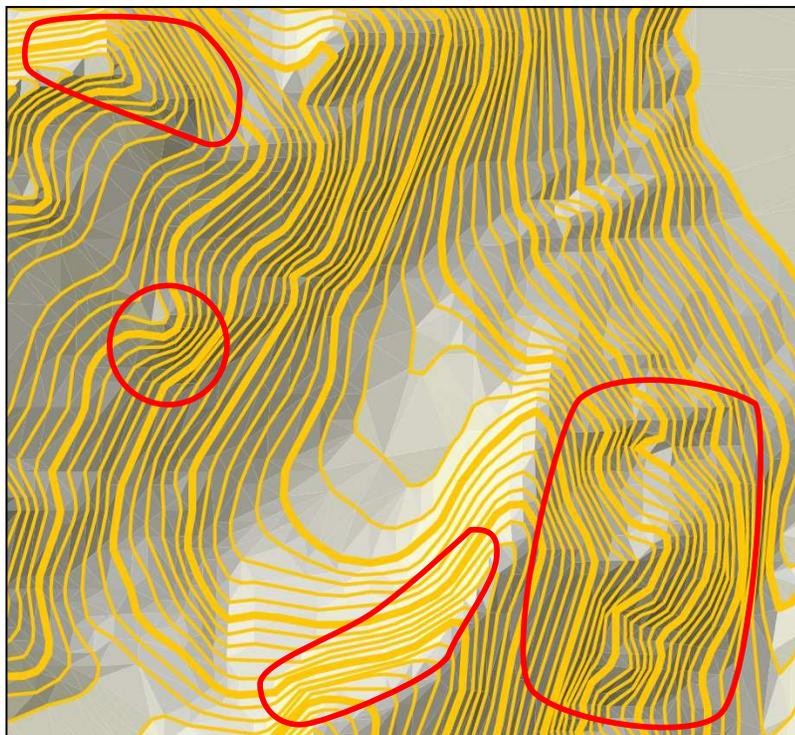


FIGURE 4.35 – Généralisation de courbes de niveau



Initial



Final

FIGURE 4.36 – Généralisation de courbes de niveau

ce modèle, ainsi que certaines de ses limites importantes. Nous donnons quelques pistes d'amélioration futures. Cette partie est divisée en deux sous-parties :

- nous critiquons tout d'abord le modèle GAEL en tant que modèle de généralisation,
- ensuite, nous critiquons notre proposition de prise en compte des thèmes champ.

4.2.1 GAEL comme modèle de généralisation

Le modèle GAEL est un modèle de généralisation qui permet d'effectuer des opérations continues de généralisation au sein du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007). Nous critiquons la méthode de déformation du modèle GAEL, puis de son interfaçage avec le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007). Enfin, nous comparons le modèle GAEL à des modèles existants adoptant une approche similaire.

4.2.1.1 GAEL comme méthode de déformation

Le modèle GAEL permet d'effectuer des déformations à base d'agents. Le principe de la méthode est de décomposer les objets à déformer sous la forme d'objets submicro qui portent des contraintes. Les objets submicro sont composés d'agents-point, dont le but est d'équilibrer les contraintes des objets submicro auxquels ils appartiennent.

Critique de la méthode de convergence Les agents-point convergent vers leur position d'équilibre par itérations successives en se basant sur une méthode d'exploration par escalade. Nous avons montré en annexe D page 249 que la méthode employée permet d'assurer une convergence de chaque agent-point. Les agents-point pouvant interagir, nous avons vu que cette preuve ne suffisait pas à assurer la convergence d'un système d'agents-point dans son ensemble. Nous ne sommes pas parvenus à apporter une preuve de convergence du système. La convergence du système a cependant toujours été observée avec les contraintes submicro que nous avons testées.

Critique de la généricité De nombreuses méthodes de déformation sont employées en généralisation, le modèle GAEL possède un niveau de généricité que nous estimons supérieur. Il permet en effet de déformer à la fois des objets linéaires (courbes de niveau, réseaux, etc.) et surfaciques (champs, etc.). Les types de déformation qu'il permet d'effectuer sont également plus nombreux : en fonction des objets et contraintes submicro utilisées pour un objet à déformer, différents types de comportements déformables des objets peuvent être obtenus. Tout comme pour le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007), le modèle peut être enrichi par de nouveaux objets submicro, de nouvelles relations submicro, ainsi que de nouvelles contraintes submicro associées. Nous pensons qu'une grande majorité des opérations de déformation nécessaires en généralisation peuvent être obtenues avec le modèle GAEL. Des travaux futurs de mise en œuvre du modèle pourraient être entrepris pour permettre de l'appliquer à d'autres opérations continues de généralisation.

Une difficulté de mise en œuvre concerne le choix des types d'objets submicro et de leurs contraintes pour un but donné. Si le modèle offre un large choix de combinaisons de contraintes submicro, ce choix ne doit pas être fait au hasard : il est nécessaire de connaître l'impact de l'ajout d'une contrainte submicro sur le comportement d'un objet déformable. Pour cela, des tests sont nécessaires afin de paramétrer correctement une déformation.

Nous estimons également que la méthode de déformation du modèle GAEL est suffisamment générique pour être utilisée pour d'autres applications en géomatique. La généralisation n'est pas le seul domaine pour lequel des transformations continues sont nécessaires. Nous pourrions envisager d'utiliser le modèle GAEL par exemple pour apparier des données (des techniques de déformation dites de *rubber sheeting* sont souvent utilisées) ou encore en visualisation pour contruire des cartes en anamorphoses. Pour chacun de ces domaines d'application potentiels, la conception d'objets submicro et de contraintes associées appropriées sont certainement nécessaires.

Critique de la complexité d'utilisation Les modèles de généralisation sont conçus afin d'être appliqués à plusieurs cas. Leur faculté à être réutilisés est liée à la facilité de leur compréhension : un utilisateur doit pouvoir l'utiliser sans être nécessairement expert. Afin de faciliter son utilisation, le modèle GAEL a été conçu comme un composant pouvant être utilisé grâce à un interfaçage adapté à plusieurs niveaux d'utilisateurs potentiels. Nous définissons trois types d'utilisateurs potentiels. Ces utilisateurs sont des concepteurs de processus automatiques de généralisation qui souhaitent l'utiliser pour un type de généralisation qu'ils connaissent ; ils utilisent le modèle GAEL à des niveaux différents :

- un niveau *expert* : l'utilisateur expert du système peut agir sur le noyau du modèle : le comportement des agents-point, la façon de traiter les contraintes submicro, etc.
- un niveau *maître* : cet utilisateur souhaite utiliser le modèle GAEL pour effectuer de nouveaux types de déformation qui ne sont pas couvertes par la mise en œuvre du modèle dont il dispose. Pour cela, il ajoute de nouveaux types d'objets submicro, de contraintes submicro et de relations submicro, puis les utilise comme l'utilisateur intermédiaire.
- un niveau *intermédiaire* : cet utilisateur souhaite utiliser le modèle GAEL pour effectuer des opérations de déformation lors du processus automatique de généralisation qu'il met au point. Il peut réutiliser des composants déjà existants du modèle. Pour cela, il applique à l'objet qu'il souhaite déformer les opérations suivantes :
 - décomposition en objets submicro,
 - instanciation de contraintes submicro sur l'objet,
 - utilisation de l'opération de déformation.

Ce niveau dernier niveau d'utilisation a été testé lors de la mise en œuvre du modèle GAEL de (Craipeau, 2007) présenté en partie 4.1.4.1 page 203. A l'heure actuelle, la réutilisation du modèle GAEL à ce niveau d'utilisation est effectuée à travers un interfaçage programmatique (où API) : l'utilisateur a accès aux méthodes dont il a besoin ; les autres lui sont cachées. Cette réutilisation peut certainement encore être améliorée grâce à l'utilisation d'interfaces graphiques permettant à un utilisateur de mettre au point ses propres déformations en sélectionnant des contraintes parmi celles disponibles.

Influence de la densité de points Comme beaucoup de méthodes de déformation basées sur des déplacements de points, notre méthode a pour inconvénient de dépendre de la densité de points utilisée pour représenter la géométrie de l'objet déformé. En effet, deux géométries identiques mais composées de points différents ne seront a priori pas déformées de la même façon. Par exemple, le résultat de la déformation obtenue sur l'objet exemple du chapitre 3 (cf. figure 3.1 page 109) dépend de la densité de points utilisés pour représenter le contour de la tête. Pour obtenir une déformation satisfaisante, la densité en points de la géométrie à déformer ne doit être :

- ni trop forte : une trop grande densité de points peut provoquer une trop grande déformation de l’objet. De plus, plus il y a de points, plus les temps de calcul sont grands,
- ni trop faible : une géométrie comportant une densité de points trop faible ne pourra pas beaucoup se déformer. Par exemple, pour le cas de l’objet exemple de la page 109, une bouche souriante n’aurait pas pu être obtenue si le nombre de point utilisés pour représenter la bouche avait été trop faible.

Il peut ainsi être judicieux de changer la densité de points utilisés pour représenter une géométrie avant de la déformer. Cette densité peut être simplement augmentée en utilisant un opérateur de densification qui ajoute des points le long d’un contour de géométrie, en fonction d’un certain pas. Elle peut aussi être diminuée en utilisant des opérations de filtrage.

Pour l’ensemble des déformations testées dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé un opérateur de filtrage très léger sur l’ensemble des géométries testées, afin d’éliminer des points intermédiaires de géométries inutiles. Nous avons implicitement supposé que les déformations étaient d’ampleur suffisamment faible pour que l’ajout de points ne soit pas nécessaire. Pour des opérations de déformation plus amples, il serait certainement utile de traiter ce problème, par exemple, en permettant à un agent devant se déformer de contrôler la densification ou le filtrage de sa géométrie.

Cas d’application limite Comme tous les modèles de généralisation automatique basés sur des opérations continues, le modèle GAEL n’est pas adapté aux grands changements. Lorsqu’une déformation est utilisée pour un changement trop important, le résultat est souvent peu satisfaisant. Par exemple, la figure 4.37 montre des résultats de déformation obtenus et peu satisfaisants. La figure 4.37 a. montre un résultat du traitement de généralisation de courbe de niveau présenté en partie 4.1.4.3 page 206. Au niveau d’une zone particulièrement contrainte (une zone très pentue), aucune déformation n’a pu être obtenue pour améliorer la lisibilité. Des agents-point se sont trop déplacés et ont provoqué des retournements de triangles. Un traitement plus judicieux aurait été un traitement discret de suppression de parties de courbe de niveau comme proposé dans (Mackaness et Steven, 2006). La figure 4.37 b. présente un autre exemple de transformation excessive ne pouvant pas être résolue par le modèle GAEL : une déformation de l’objet exemple avec une contrainte de distance minimale entre les yeux particulièrement forte permet d’obtenir ce résultat : les yeux sortent du visage. Lorsqu’une transformation est trop ample, elle ne peut être effectuée par simple déformation.

L’existence de ces cas limites était prévue : nous savons que les opérations continues ne sont adaptées que pour des changements relativement faibles. Au delà, le recours à des opérations discrètes plus amples est nécessaire. C’est pourquoi le modèle GAEL a été conçu de façon à être utilisé avec le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007), qui, lui, est adapté à ce type de transformations.

4.2.1.2 Couplage au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007)

Le modèle GAEL a été conçu dans le but de pouvoir disposer d’un modèle hybride de généralisation, c’est-à-dire un modèle capable d’effectuer des opérations continues et discrètes. Pour obtenir cette fonctionnalité, nous avons proposé en partie 3.2 page 149

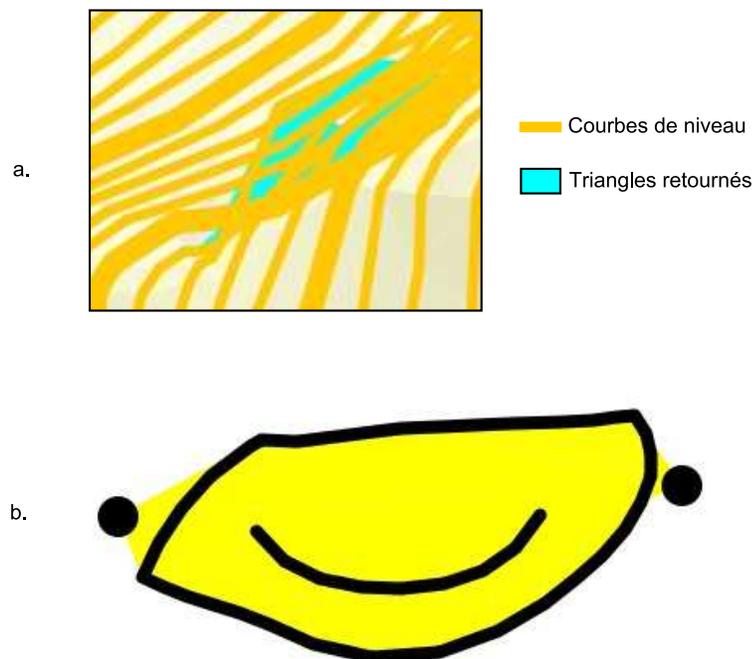


FIGURE 4.37 – Cas limites d'utilisation

de nous appuyer sur les classes *agent élastique* et *contrainte élastique* qui permettent un passage entre le niveau de l'objet à déformer et le niveau de ses parties (le niveau submicro). Cette proposition comporte deux difficultés essentielles :

Difficulté de traduction des contraintes élastiques en contraintes submicro

Dans la méthode que nous proposons, les contraintes portées par l'agent élastique sont décomposées au niveau de ses parties, sous la forme de contraintes submicro. Cette décomposition dépend du type de contrainte élastique et est effectuée par le concepteur de la contrainte élastique en fonction de ses connaissances des contraintes submicro dont il dispose. Cette décomposition est plus ou moins évidente selon les cas, comme nous l'avons présenté pour l'exemple en page 153. Pour faciliter cette étape, nous proposons de fournir au concepteur un outil lui permettant de tester les effets de l'ajout de différentes contraintes submicro sur le comportement déformable d'un objet. Cet outil devrait lui permettre de paramétrer la déformation qu'il souhaite faire subir à son objet.

Un travail futur pourrait viser à automatiser cette décomposition en laissant à l'agent élastique qui souhaite se déformer le choix de ses contraintes submicro. Ce choix pourrait être effectué de façon autonome par l'agent élastique en fonction de ses contraintes élastiques. Il pourrait avoir la capacité d'essayer plusieurs ensembles de contraintes submicro, et tester le résultat de la déformation qui en découle. Pour mettre en œuvre cette fonctionnalité, l'agent élastique devrait avoir la capacité de mesurer le résultat d'une déformation de façon robuste. Cette mesure s'appuierait sur le calcul de satisfaction des contraintes élastiques qui peut lui aussi être complexe à effectuer.

Difficulté de mesure de satisfaction des contraintes élastiques Pour permettre à un agent élastique de mesurer si une déformation lui a permis de progresser vers un état plus

satisfaisant, nous avons proposé de nous appuyer sur le calcul de satisfaction des contraintes élastiques qu'il porte. La satisfaction de l'agent élastique permet de déterminer si l'équilibre entre contraintes de déformation et de préservation est satisfaisant : l'agent élastique doit être suffisamment déformé pour satisfaire au mieux ses contraintes de déformation, mais pas trop pour permettre une certaine préservation de sa forme. Pour cela, il est nécessaire de pouvoir mesurer quand un objet a été trop déformé. La mise au point d'une telle mesure peut être difficile. Nous n'avons pas apporté de moyen générique pour la mise au point de telles mesures. En conséquence, des déformations trop fortes d'objet ne sont pas détectées dans la mise en œuvre que nous avons testée. Par exemple, la figure 4.38 donne le résultat d'une déformation de l'agent-champ relief provoquée par la généralisation d'un agent-bâtiment dont l'altitude est contrainte à être préservée. Une comparaison entre les états initiaux et finaux du relief montre que la déformation n'a pas permis de préserver suffisamment la forme d'une des courbes de niveau. Une partie anguleuse de la courbe de niveau est apparue. La mise au point d'une mesure de forme de courbe de niveau pourrait permettre dans ce cas de détecter ce conflit. L'agent élastique pourrait alors réagir en modifiant certaines de ses contraintes submicro de préservation de forme, ou bien en refusant de se déformer.

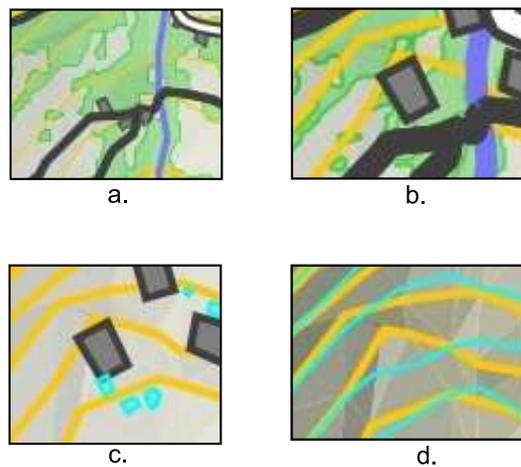


FIGURE 4.38 – Exemple de déformation excessive de courbe de niveau

Vers des agents à la fois élastiques et rigides Le modèle GAEL ne permet pas dans son état actuel de disposer d'agents à la fois rigides et élastiques, c'est-à-dire pouvant s'appliquer tantôt des opérations discrètes, tantôt des opérations continues pour se généraliser. Pour la prise en compte des champs, nous avons proposé d'utiliser uniquement des agents soit purement élastiques, soit purement rigides, pouvant s'appliquer uniquement l'un des types d'opération (cf. partie 3.2.4 page 155). Dans les processus de généralisation que nous avons testés, les agents-champ et les tronçons sont modélisés comme des agents purement élastiques, et les bâtiments comme des agents purement discrets. Nous pensons que la qualité des résultats d'un processus automatique de généralisation pouvant utiliser les deux types d'opérations devrait être meilleure.

Pour parvenir à cet objectif, nous proposons de fusionner les classes *agent géographique* du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) et *agent élastique* (de même pour les classes

contrainte du modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) et *contrainte élastique*). Un agent géographique peut alors choisir de s'appliquer des opérations discrètes ou continues selon son état. Chaque contrainte peut proposer à l'agent qui la porte à la fois des traitements discrets et continus. Des travaux futurs pourraient permettre à un agent de se décomposer au niveau submicro pour se déformer, puis se recomposer pour s'appliquer des traitements discrets.

4.2.1.3 Comparaison avec des modèles de généralisation basés sur la même approche

Le modèle GAEL permet d'effectuer des opérations continues de généralisation. Nous avons présenté en partie 2.3.1.1 page 103 plusieurs méthodes de déformation, pour certaines appliquées à la généralisation. Nous comparons dans cette partie notre méthode avec celles existantes.

Les avantages principaux du modèle GAEL sont selon nous :

- son couplage à un modèle à base d'opérations discrètes : aucun des modèles de généralisation à base de déformation ne permet en effet l'utilisation combinée des deux types d'opération. Le modèle GAEL a été conçu pour être utilisé avec le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007). En conséquence, le résultat d'une déformation peut être contrôlé par l'agent déformé.
- sa faculté à effectuer des déformations locales : la grande majorité des méthodes de déformation présentées en partie 2.3.1.1 sont basées sur une approche globale. A travers le mécanisme d'activation de proche en proche des agents-point, le modèle GAEL permet d'effectuer des déformations locales d'objet. Cet avantage est particulièrement important pour les objets à déformer de grande ampleur, comme les champs,
- sa généralité : il peut être utilisé pour un grand nombre d'opérations continues possibles, en particulier pour la déformation des champs.

Nous comparons plus en détail le modèle GAEL avec certains travaux basés sur une approche par déformation.

Comparaison avec les modèles à base de transformations continues globales

Nous avons vu en partie 2.3.1.1 page 103 que de nombreuses méthodes de déformation utilisées en généralisation sont basées sur des méthodes globales (moindres carrés et les éléments finis). Mis à part les avantages énoncés précédemment, nous pensons que le modèle GAEL permet une plus grande liberté et facilité dans la conception des contraintes submicro. Par exemple, nous pensons que les contraintes submicro de triangles que nous avons proposées pour la préservation de l'écoulement du réseau hydrographique ou de l'altitude de bâtiments ne peut pas être exprimée dans ces modèles. Un avantage de ces méthodes par rapport au modèle GAEL est l'assurance de leur convergence. Notons par ailleurs que le modèle GAEL n'exclut pas l'utilisation de méthodes globales : le but d'un agent élastique est de trouver une position d'équilibre pour ses points. Nous pourrions envisager de permettre à chaque agent élastique de se déformer dans certains cas qui le permettent à l'aide de ces méthodes globales comme, par exemple, les moindres carrés.

Comparaison avec le modèle de (Baeijs, 1998) Le modèle GAEL possède des points communs avec le modèle de (Baeijs, 1998) que nous avons présenté en partie 1.3.2.2 page 61. Les deux modèles s'appuient en effet chacun sur une modélisation des points composant les géométries des objets géographiques à déformer sous la forme d'agents qui cherchent à atteindre une position d'équilibre. Les différences essentielles sont les suivantes :

- les agents-point du modèle de (Baeijs, 1998) interagissent chacun avec les autres agents contenus dans leurs *champs*. Dans le modèle GAEL, les agents-point sont mis en relation à travers les objets submicro, qui permettent de leur conférer des interactions qui nous estimons plus intéressantes et plus adaptées à la généralisation.
- le modèle de (Baeijs, 1998) a été mis en œuvre pour la généralisation du thème bâti. Nous pensons que des opérations discrètes sont plus adaptées à la généralisation de ce thème. C'est pourquoi le couplage du modèle GAEL au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) est un avantage.
- les agents-point du modèle de (Baeijs, 1998) sont supposés être tous activés : la méthode de résolution est globale. Le modèle GAEL fournit un mécanisme d'activation des agents-point en fonction de leur état d'équilibre qui permet de rendre l'opération de déformation locale.

Comparaison avec le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) Le modèle GAEL a été conçu pour être utilisé en complément au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007). Les deux modèles possèdent des points communs qui permettent leur couplage : ils utilisent des agents portant des contraintes qu'ils tentent de satisfaire en s'appliquant des traitements. Du fait que ces deux modèles utilisent des approches différentes, l'un une approche à base de transformations discrètes et l'autre continues, nous pouvons mentionner les différences suivantes :

- les contraintes submicro n'ont pas de priorité, contrairement aux contraintes des objets géographiques de (Ruas et Duchêne, 2007). Cette différence provient du fait que les agents-point ne traitent par leurs contraintes les unes après les autres, mais toutes en même temps.
- la satisfaction des agents-point varie continuellement, alors que celle des agents géographiques varie de façon discontinue. Cette différence provient du fait que la satisfaction des agents géographiques progresse de façon discontinue (par paliers, après le déclenchement d'une opération discrète) alors que celle des agents-point change petit à petit continuellement.
- chaque agent-point agrège les traitements proposés par ses contraintes (qui sont tous des déplacements) alors que l'agent géographique choisit un de ces traitements (en fonction de son poids et de la priorité de la contrainte qui le propose). Notons que dans le modèle CartACom, ce mécanisme d'agrégation de tâche est également utilisé (Duchêne, 2004, partie C.4.4.2 p.96). Cette différence entre le fait de choisir une action parmi plusieurs actions à effectuer, ou bien de choisir une action moyenne des actions à effectuer (quand cette moyenne peut être définie) est général aux systèmes multi-agent comme affirmé par (Ferber, 1997, chap.5.7.3).

4.2.2 GAEL pour la prise en compte des relations objet-champ

Dans cette partie, nous critiquons la méthode que nous avons proposée en partie 3.3 page 157 pour la prise en compte des relations objet-champ dans le processus de généralisation.

4.2.2.1 Généricité

La modélisation des relations objet-champ que nous avons proposée a été mise en œuvre pour quelques cas de relations objet-champ. L'annexe A montre la grande diversité des relations objet-champ qu'il peut être utile de préserver pendant le processus de généralisation. Nous estimons que le modèle GAEL est suffisamment générique pour prendre en compte une grande partie de ces relations. Les relations objet-champ mises au point dans le cadre de cette thèse sont des exemples de mise en œuvre qui peuvent être adaptés pour d'autres types de relations objet-champ portant sur des objets géographiques et des champs différents.

Les éléments importants nécessaires à la conception d'un nouveau type de relation sont :

- la mise au point d'une fonction de satisfaction de relation. Cette fonction de satisfaction doit permettre de mesurer l'état de la relation,
- la mise au point d'une contrainte submicro portée par l'agent-champ lui permettant, lorsqu'il se déforme, d'améliorer la satisfaction de la relation. Cette contrainte peut être portée par un ou plusieurs types d'objets submicro.
- la mise au point de traitements des objets concernés par la relation objet-champ permettant aussi une amélioration de l'état de la relation. Ce traitement peut éventuellement être une déformation, comme pour le cas de la relation d'écoulement (dans ce cas, une contrainte submicro spécifique doit être mise au point).

Nous proposons des pistes permettant la mise en œuvre d'autres types de relations objet-champ. Ces mises en œuvre pourront faire l'objet de futurs travaux.

Relation d'orientation de bâtiment selon la pente Dans des zones de relief accidenté, les bâtiments sont souvent orientés selon la pente du relief. Cette relation pourrait être contrainte en utilisant le modèle GAEL. La satisfaction de la relation serait une fonction de l'écart d'orientation du bâtiment par rapport à celle de la pente. Les traitements proposés par la contrainte relationnelle du bâtiment seraient une rotation du bâtiment, ou bien une déformation de l'agent-champ relief utilisant une contrainte submicro d'orientation de triangle. Cette contrainte submicro inciterait chaque triangle à pivoter afin de rétablir l'écart d'orientation par rapport à la pente de chacun des bâtiments qui sont sur lui.

Relation de planéité de lac Nous avons vu en figure 4.32 page 206 qu'il pouvait être utile de contraindre le contour d'une surface hydrographique plane à ne pas couper de courbes de niveau. La relation d'écoulement de tronçon hydrographique présentée en partie 4.1.2.3 page 189 peut être adaptée à cette nouvelle relation. Un résultat satisfaisant peut certainement être obtenu en contraignant chaque segment composant le contour du lac à être, non pas dirigé vers la pente comme dans le cas de la contrainte d'écoulement, mais à lui être orthogonale. (Koch et Heipke, 2006) propose une modélisation comparable en utilisant une méthode de déformation par moindres carrés. Il est également possible de contraindre les points composant le contour du lac à avoir une altitude identique.

Relation de planéité de canal Un tronçon de canal entre deux écluses doit avoir une altitude (quasiment) constante. Une relation analogue à celle précédente pourrait être mise

en œuvre pour inciter le canal à rester horizontal, c'est-à-dire orthogonal à la pente en tout point.

Relation de constance de pente d'une route Les routes de montagne ont souvent une pente faible et relativement constante. Cette relation avec le relief peut être mesurée à l'aide de la valeur de la pente au niveau de chaque segment d'un tronçon routier. En cas de violation de cette contrainte, le relief peut être déformé en utilisant une contrainte d'orientation de pente azimutale de triangle. La valeur but de cette contrainte dépend de l'orientation des segments routiers au dessus du triangle. L'état de satisfaction de la relation peut également être satisfaite en déformant le tronçon routier à travers l'utilisation d'une contrainte d'orientation de pente de ses segments. Notons que la relation entre un tronçon routier et le relief peut être caractérisée par la présence de talus au bord de la route.

Relation de non-superposition de courbe de niveau et de tronçon routier La figure 2.11 page 91 présente une opération de généralisation effectuée dans le but de réduire au maximum la superposition entre la représentation du relief sous forme de courbes de niveau et le réseau routier. En effet, la pente du réseau routier étant contrainte à être la plus faible possible, il est fréquent de trouver des configurations pour lesquelles les tronçons routiers sont quasiment parallèles aux courbes de niveau qui leur sont proches. Nous pensons que le modèle GAEL pourrait permettre de traiter cette opération en utilisant une relation de non-superposition de courbe de niveau et de tronçon routier. L'opération de déformation de courbe de niveau pourrait être obtenue en contraignant les segments de courbes de niveau situés sous le réseau routier à être orthogonal à celui-ci. (Kremeike, 2004) propose une autre méthode permettant d'effectuer cette opération. Cette méthode consiste à inclure le symbole du tronçon routier dans le modèle numérique de terrain afin de l'aplanir au niveau de son emprise.

Relation topologique de réseau La figure 2.12 page 91 illustre comment les relations d'adjacence entre tronçons routiers et limites d'occupation du sol sont préservées. Nous pensons que des contraintes relationnelles submicro de distance minimales entre segments routiers et segments de limite d'occupation du sol peuvent être utilisés pour contraindre les tronçons routiers à rester collés à leurs limites d'occupation du sol.

D'autres relations concernant d'autres types d'objets et d'autres champs peuvent être proposées comme des applications futures du modèle GAEL. Certains de ces cas d'applications ne sont peut-être pas faciles à traiter avec le modèle GAEL tel qu'il a été conçu. Nous espérons que les mises en œuvre futures pourrons permettre un enrichissement du modèle.

Également, nous estimons que la modélisation des relations objet-champ que nous proposons dans le modèle GAEL est suffisamment générique pour être utilisée dans d'autres applications que la généralisation. Nous avons présenté en partie 4.1.4.2 page 205 une application de certains aspects du modèle GAEL dans le but de corriger des incohérences entre les thèmes hydrographiques et altimétriques. Nous pensons que d'autres applications, pas seulement pour des problèmes de généralisation, sont envisageables et permettront d'enrichir le modèle.

4.2.2.2 Stratégie de satisfaction des relations objet-champ

Le modèle GAEL permet de modéliser les relations objet-champ, ainsi que des contraintes portant sur ces relations. Afin de permettre une satisfaction de ces contraintes, nous avons proposé en partie 3.3.3 page 165 de les introduire dans le processus de généralisation de (Ruas et Duchêne, 2007) de la façon suivante :

- les valeurs de satisfaction des contraintes objet-champ d'un agent géographique sont prise en compte dans le calcul de sa satisfaction totale,
- les valeurs de priorité des contraintes objet-champ sont faibles,
- pour satisfaire chaque contrainte objet-champ, les traitements proposés à l'agent géographique sont d'abord une activation de l'agent-champ concerné pour qu'il se déforme, puis un ou plusieurs traitements sur l'agent géographique (usuellement, un déplacement ou une déformation adéquates).

Cette proposition permet d'améliorer les valeurs de satisfaction des relations objet-champ contraintes. La prise en compte de la satisfaction de ses contraintes objet-champ dans le calcul de la satisfaction globale d'un agent géographique permet d'obtenir un effet contraignant des agents-champs sur le relief : une opération de généralisation ayant pour effet de trop dégrader l'état de satisfaction des relations agent-champ peut être annulée. Même sans proposer de traitement, cette contrainte permet, dans une certaine mesure, une influence des champs sur la généralisation des objets avec lesquels ils partagent des relations.

Pour améliorer leur satisfaction, les contraintes objet-champ proposent des traitements. Le fait de proposer en premier lieu une déformation du champ, puis des traitements sur les objets, a les avantages suivant :

- les champs sont plus malléables que les objets. Il leur est plus facile de se déformer pour amortir les transformations des objets.
- les transformations des objets provoquant des violations de relations objet-champ sont effectuées pour de « bonnes raisons ». Les transformations de l'objet proposées par ses contraintes objet-champ ont souvent des effets qui s'opposent aux autres transformations que l'objet s'est appliqué. Par exemple, le déplacement proposée à un bâtiment par sa contrainte de préservation d'altitude est souvent opposé à un autre déplacement effectué par le bâtiment pour, par exemple, satisfaire une contrainte de proximité avec d'autres objets : le déplacement proposé par la contrainte de préservation d'altitude de bâtiment n'a donc a priori peu de chance de permettre d'améliorer effectivement l'état de satisfaction des données. Les situations pour lesquels les champs refusent de se déformer et parviennent à contraindre les objets (cf. figure 3.54 c. page 169) sont peu nombreux.

Lorsqu'un agent-champ se déforme, il ne prend pas en compte uniquement l'agent géographique qui l'a activé, mais aussi les autres qui lui sont proches et qui peuvent être à leur tour influencés par la déformation effectuée. En conséquence, l'agent-champ se déforme pour équilibrer les contraintes relationnelles avec les agents-géographiques. Des agents géographiques peuvent déformer l'agent-champ ensemble, dans des directions éventuellement différentes. Nous avons donné des résultats en partie 4.1.2 pour lesquels plusieurs objets provoquent ensemble une déformation de l'agent-champ relief dans la même direction. Nous avons vu un cas pour lequel cette action collective des agents géographiques situés en fond de vallée permet d'obtenir l'opération d'élargissement de vallée (cf. figure 4.12). Également,

la figure 4.17 page 188 donne un résultat pour lequel plusieurs bâtiments ont déplacé ensemble une montagne. Dans d'autres cas, les agents géographiques peuvent s'opposer et tenter d'étirer un champ dans des directions presque opposées. Dans ce cas, l'agent-champ se déforme pour trouver une situation intermédiaire entre les étirements provoqués par les agents-géographiques. Par exemple, la figure 4.39 présente un résultat pour lequel deux bâtiments se sont déplacés dans des directions opposées (cf. figure a.) : le relief s'est déformé de façon à amortir ces deux transformations (cf. figure b.). La figure 4.40 présente un autre résultat d'une déformation de l'agent-champ relief provoquée par deux agents géographiques cherchant à l'étirer dans des directions opposées. La figure a. donne l'état des deux agents-bâtiment considérés dans un état généralisé, sans déformation de l'agent-champ relief, avec les valeurs de satisfaction de leur relation d'altitude respectives : 0 et 4. La figure b. présente comment l'agent-champ relief s'est déformé pour améliorer la satisfaction de ses relations avec les objets. Cette déformation a permis de faire évoluer les valeurs de satisfaction de (0,3) à (10,0) (cf. figure c.) : la satisfaction globale a été améliorée, bien que celle d'un des bâtiment ait diminué. La déformation de l'agent-champ a pris en compte les états des deux agents-géographiques et a provoqué un transfert d'insatisfaction d'un des deux bâtiments à l'autre.

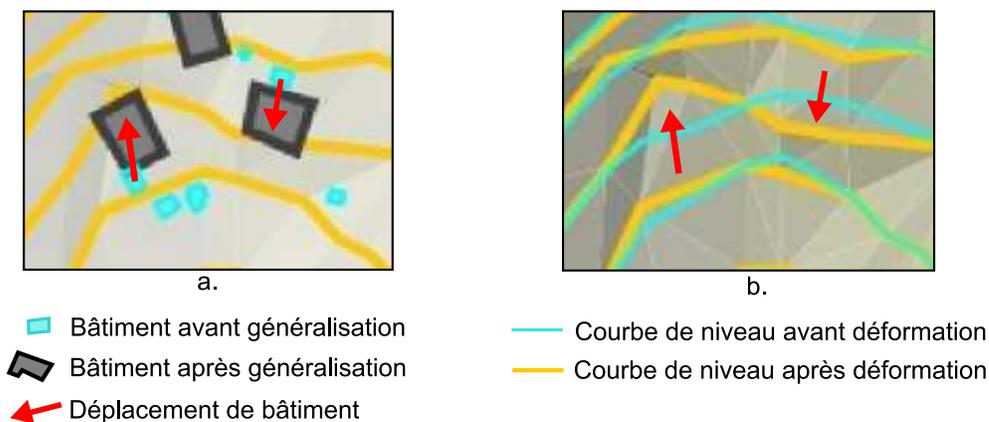


FIGURE 4.39 – Exemple de bâtiments déformant le relief dans des directions opposées

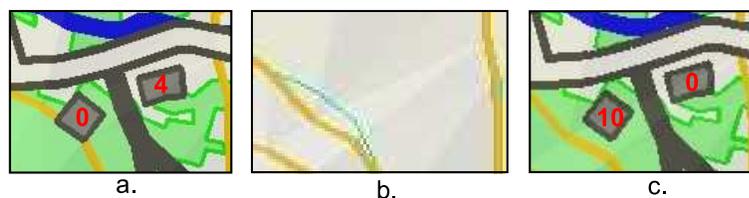


FIGURE 4.40 – Exemple de transfert d'insatisfaction d'un bâtiment à un autre lorsqu'ils déforment un champ dans des directions opposées

La stratégie de satisfaction des relations objet-champ que nous avons proposée repose sur une recherche de satisfaction de ces relations au fur et à mesure du processus de généralisation : dès que la généralisation d'un agent géographique provoque la violation de relations, les agents-champ concernés tentent de se déformer. L'avantage de cette méthode est de satisfaire les conflits au fur et à mesure qu'ils apparaissent. Cette solution a pour

inconvenient que les agent-champ sont activés de nombreuses fois, en particulier aux niveau des zones où les objets avec lesquels ils partagent des relations sont denses. Pour pallier cet inconvenient, il peut sembler judicieux de séparer le processus de généralisation entre 1. une étape de généralisation de tous les objets, puis 2. une étape unique de déformation de l'agent-champ. Le problème de cette alternative est qu'elle ne permet pas de prendre en compte les champs pendant la généralisation des agents géographiques. Nous pensons qu'il existe une solution intermédiaire permettant de n'activer les agents-champs qu'à des moments adéquats du processus de généralisation des agents géographiques. Des travaux permettant de déterminer ces moments adéquats du processus pourraient permettre de rendre plus efficace le processus en diminuant le nombre d'activations des agents-champ. Une solution possible serait de faire porter les contraintes objet-champ non pas à des agents micros, mais à des agents meso. Cette solution consisterait à expliciter les groupes d'agents qui doivent déformer les champs ensemble.

Enfin, nous pensons que le processus de satisfaction des contraintes objet-champ pourrait être amélioré en déclenchant une activation de l'agent-champ dès qu'un agent géographique avec lequel il partage une relation est supprimé. En effet, la suppression d'un agent géographique doit être suivie d'une relaxation des contraintes objet-champ qu'il portait.

4.2.2.3 Nécessité d'une instanciation judicieuse des contraintes objet-champ

Les relations objet-champ doivent être prises en compte dans le processus de généralisation lorsque leur préservation est pertinente. Par exemple, la prise en compte de l'altitude des bâtiments en zone de plaine est quasiment inutile, alors qu'elle est plus déterminante en zone de montagne. Ainsi, nous pensons que des méthodes d'analyse spatiale seraient utiles pour permettre de détecter des relations entre objets et relief particulières et effectuer ainsi une instanciation judicieuse des relations objet-champ et de leurs contraintes associées. (Touya, 2008) vise à déterminer les zones de l'espace géographiques au niveau desquelles l'utilisation du modèle GAEL pour la prise en compte des relations objet champ est pertinente.

Également, ces méthodes d'analyse spatiale pourraient permettre d'adapter le processus de satisfaction des contraintes objet-champ à certaines situations. Par exemple, des tests effectués par Xavier Halbecq dans le cadre de l'application du modèle GAEL à la correction des incohérences hydrographie-relief (cf. partie 4.1.4.2) ont révélé que les incohérences entre hydrographie et relief étaient plus importantes au niveau des zones boisées que des zones en terrain ouvert. Cette raison provient du fait que les informations hydrographiques et altimétriques sont plus difficiles à acquérir au niveau en zone boisée lorsqu'elles sont extraites de photo aériennes : la couverture végétale cache en partie le terrain. Par conséquent, les informations hydrographiques et altimétriques sont moins exactes au niveau des zones boisées. Ce constat pourrait permettre d'adapter les paramètres de déformation du relief et des tronçons hydrographiques au niveau des zones boisées : les objets accepteraient des déformations plus amples au niveau de ces zones.

4.2.2.4 Modélisation des agents-champ

Nous avons proposé de modéliser les agents-champ sous la forme de triangulation. Cette modélisation est une interpolation particulière qui n'est a priori pas la seule envisageable.

Le modèle GAEL n'exclut pas l'utilisation d'autres méthodes d'interpolation plus sophistiquées. Par exemple, nous pourrions envisager de représenter le relief par une surface spline dont les points de contrôle seraient des agents. D'autres objets submicro et contraintes associées adaptées à cette représentation pourraient être mises au point. Nous pensons cependant que l'interpolation par triangulation est suffisante pour une grande majorité d'applications. Ses inconvénients peuvent être surmontés. Parmi ces inconvénients, la présence de triangle plats, en particulier en zone de talweg, peut avoir une influence non désirable sur les résultats obtenus. Par exemple, dans le cas de la mise en œuvre de la relation d'écoulement de tronçon hydrographique, la présence de triangles plats en fond de vallée a pour conséquence de ne pas inciter le tronçon hydrographique à se déformer jusqu'à se placer au milieu du talweg : celui-ci reste au bord du talweg. Un tel cas est donné en figure 4.33 page 207. Des méthodes permettant d'éliminer les triangles plats pourraient améliorer certains résultats. Nous suggérons également d'utiliser des méthodes d'interpolation améliorant les triangulations comme celle proposée par (Hugentobler, 2004).

Non prise en compte des relations entre champs Le modèle GAEL permet de prendre en compte les relations existantes entre un objet et éventuellement plusieurs champs. Nous avons proposé de déformer ces champs indépendamment les uns des autres. En conséquence, des relations pouvant exister entre champs peuvent être détruites. Par exemple, un versant de vallée boisé est la conséquence d'une relation entre les champs relief et occupation du sol. Des déformations indépendantes de ces deux champs peuvent provoquer une destruction de cette relation. Un autre exemple de telle relation plus importante entre champs concerne les cartes d'avalanche CLPA (carte de localisation probable des avalanches). Sur ces cartes sont représentées des zones de coulées d'avalanche longues qui ont une relation particulièrement forte avec le relief. Il peut être important de préserver ces relations. Des travaux futurs pourraient viser à prendre en compte ces relations au sein du processus de généralisation.

Vers une généralisation propre des champs Le modèle GAEL n'a pas été conçu pour la généralisation des champs. Nous pensons cependant que sa capacité à gérer les opérations continues permet d'envisager de l'utiliser pour ce type de généralisation. Nous avons présenté en partie 4.1.4.3 page 206 une application du modèle GAEL à la généralisation de courbe de niveau. Nous pensons que d'autres applications du modèle GAEL pourront permettre de progresser vers une généralisation des thèmes champ. Le couplage du modèle GAEL avec le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) permet de plus d'envisager des processus de généralisation des champs composés d'opérations continues et discrètes (comme par exemples les opérations de suppression de talweg de (Ai, 2004) et de suppression de parties de courbes de niveau de (Mackaness et Steven, 2006)). Des travaux sur la généralisation concomitante des objets et des champs sont également envisageables.

Conclusion

Rappel de l'objectif

Dans cette thèse, nous avons proposé un modèle de généralisation automatique permettant de prendre en compte des thèmes champ pendant le processus de généralisation de (Ruas et Duchêne, 2007). Notre objectif était de permettre une préservation des relations pouvant exister entre les objets (bâtiments, routes, etc.) et les champs (le relief, l'occupation du sol, etc.). Nous avons présenté en quoi ces relations pouvaient être importantes à préserver. Pour atteindre cet objectif, nous avons montré qu'il était nécessaire :

- de disposer d'un modèle de généralisation hybride, c'est-à-dire capable de déclencher au sein d'un processus de généralisation à la fois des opérations *discrètes* et *continues* (cf. partie 2.2.2 page 95),
- de disposer d'une modélisation des relations objet-champ permettant leur prise en compte au sein du processus de généralisation des objets (cf. partie 2.2.1 page 93).

Bilan

Pour répondre à l'objectif de cette thèse, nous avons proposé le modèle GAEL (cf. chapitre 3).

Apports du modèle GAEL

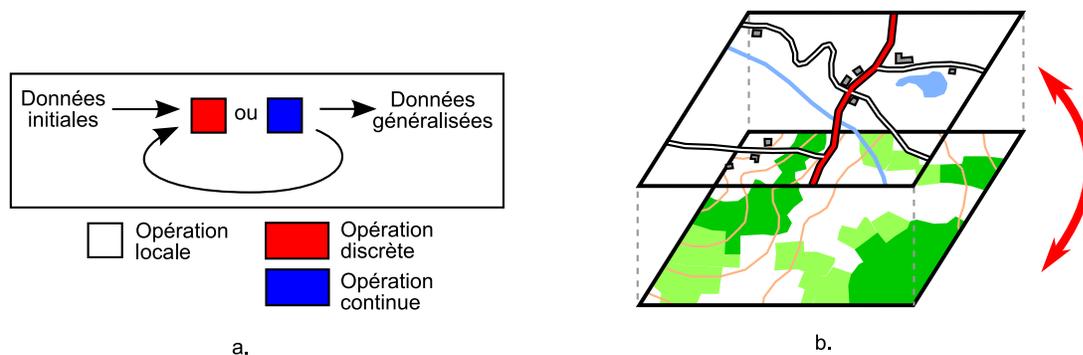


FIGURE 4.41 – Apports du modèle GAEL : (a.) un modèle hybride de généralisation (b.) un modèle pour la prise en compte des relations objet-champ

Un modèle de déformation pour la généralisation

Nous avons présenté en partie 3.1 page 109 en quoi le modèle GAEL permettait des opérations continues de généralisation. Nous avons proposé une méthode à base d'agents permettant de généraliser par déformation. Cette méthode de déformation s'appuie sur l'utilisation d'un niveau interne aux objets à déformer, le niveau *submicro*. Une déformation est obtenue en décomposant l'objet à déformer en partie contraintes, et en permettant aux points composant la géométrie de l'objet de se déplacer de façon autonome afin d'équilibrer les différentes contraintes portées par les parties de l'objet. Si de nombreuses méthodes de déformation ont été utilisées en généralisation automatique, nous estimons que celle que nous proposons possède les avantages suivants :

- généralité : elle peut être appliquée à de nombreux types d'objets différents (linéaires, surfaciques, réseaux, etc.) et à de nombreux cas de déformation,
- localité : les déformations sont appliquées localement. Cet avantage est particulièrement important pour la déformation des grands objets tels que les champs,
- couplage avec le modèle à base d'opérations discrètes de (Ruas et Duchêne, 2007), comme nous présentons maintenant.

Un modèle couplé au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007)

La prise en compte des thèmes champ nécessite de disposer d'un modèle de généralisation automatique capable de déclencher des opérations discrètes et continues successives et locales, comme présenté en figure 2.20 page 106. Nous avons vu que le modèle GAEL permettait de répondre à cet objectif pour le cas particulier de la déformation des champs pendant les processus de généralisation. Il permet en effet, grâce à son couplage au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) d'obtenir des processus de généralisation composés d'opérations discrètes (transformation d'objets) et continues (déformation de champs). Nous pensons que le modèle GAEL est suffisamment générique pour être appliqué à d'autres cas d'utilisation concomitante d'opérations discrètes et continues de généralisation.

Les modèles de généralisation actuels ne permettaient pas une généralisation hybride. En effet, nous avons vu en partie 2.3.1.2 que l'utilisation concomitante d'opérations discrètes et continues n'était pas satisfaisante et manquait de généralité. Si de nombreuses méthodes de généralisation à base d'opérations continues existent, le modèle GAEL apporte la possibilité de pouvoir être utilisé conjointement à un modèle de généralisation à base d'opérations discrètes.

Un modèle pour la prise en compte des relations objet-champ

Le modèle GAEL apporte également la possibilité de prendre en compte les relations objet-champ dans le processus de généralisation. Il permet, par exemple, d'assurer que les tronçons hydrographiques s'écoulent sur le relief. Cette prise en compte n'était prévue dans aucun modèle de généralisation automatique existant. Cet apport comprend :

- une modélisation des champs, des relations objet-champ et de leurs contraintes associées,
 - et une stratégie de prise en compte de ces relations et de leurs contraintes associées dans le processus de généralisation des objets. La stratégie que nous avons proposée permet une satisfaction des contraintes portant sur la relation pendant le processus de généralisation.
-

(Mackaness, 2006, p. 247) rapporte la citation suivante, extraite d'une discussion ayant eu lieu en 1965 à propos de la généralisation cartographique :

« Imagine a gorge with a river and a road and a railway. First we plot the river, then we display the road. The railway is displaced further and finally the contours are moved. This presents a very difficult problem for the machine to solve ».

Nous estimons que le modèle GAEL rend possible l'automatisation de l'opération décrite dans cette citation.

Le modèle GAEL permet une progression vers la prise en compte d'un nouveau type de thèmes. La plupart des méthodes de généralisation existantes sont appliquées à des thèmes particuliers, le plus souvent isolés des autres thèmes. Des méthodes permettant de généraliser les thèmes ensemble, prenant en compte les relations entre les objets de ces thèmes, sont nécessaires. Nous estimons que le modèle GAEL permet un progrès vers cet objectif. Il rend possible des interactions entre deux types de thèmes, les thèmes champ et les thèmes objet.

Un modèle mis en œuvre et implémenté

Enfin, nous avons présenté une mise en œuvre du modèle GAEL pour des cas particuliers. Cette mise en œuvre comprend :

- un jeu de contraintes submicros pouvant être réutilisées (cf. partie 3.1.3 page 113),
- trois relations concernant des objets et champs particuliers (cf. partie 4.1 page 173). Ces trois relations concernent l'altitude du bâti, l'écoulement de l'hydrographie et l'appartenance du bâti à son type d'occupation du sol. Nous avons par ailleurs présenté en partie 4.2.2.1 page 219 en quoi les relations mises en œuvre dans le cadre de cette thèse peuvent être adaptées plus ou moins directement à d'autres types de relations,
- et trois exemples de traitements de généralisation par déformation particuliers (cf. partie 4.1.4 page 203). Ces trois traitements concernent le déplacement d'objets par déformation pour respecter des contraintes de proximité, la correction d'incohérences entre le réseau hydrographique et le relief, et la généralisation de courbes de niveau.

Même si la mise en œuvre du modèle GAEL n'a été entreprise que dans certains cas particuliers, nous estimons que d'autres spécialisations du modèle peuvent permettre d'améliorer l'automatisation de la généralisation :

- quantitativement, en rendant possible l'automatisation de nouveaux processus de généralisation, en particulier ceux concernant les objets à comportement élastique,
- et qualitativement, en améliorant des processus de généralisation déjà existants. Nous pensons que l'utilisation de méthodes de déformation peut améliorer les processus de généralisation à base d'opérations discrètes déjà existants.

Cette thèse a par ailleurs permis de produire un prototype du modèle GAEL. Ce prototype est en cours d'adaptation pour être utilisé pour certains processus automatiques visant à produire les futures cartes au 1 :25000 et 1 :50000 de l'IGN (Lecordix *et al.*, 2007b).

Enseignements

En partie 2.3.2 page 107, nous avons proposé d'utiliser une méthode à base d'agents pour effectuer des opérations continues de généralisation. Nous avons supposé que l'approche agent pouvait permettre la mise au point d'un modèle hybride de généralisation pouvant prendre en compte les relations objet-champ. Notre travail montre que l'approche agent permet de répondre à cet objectif.

Cette thèse illustre la pertinence de l'approche agent pour l'automatisation de la généralisation cartographique. Nous avons présenté en partie 1.3 page 57 divers travaux en automatisation de la généralisation adoptant cette approche. Notre travail confirme le fait que cette approche permette de disposer de traitements automatiques toujours plus performants. Les modèles à base d'agents ont pour particularité d'être relativement faciles à enrichir : il est toujours possible d'ajouter de nouveaux types d'agents, ou aussi de nouvelles capacités à des agents existants pour élargir les possibilités d'un système multi-agent.

Ce travail met également en valeur le fait que l'approche agent est adaptée à la résolution de problèmes de nature continue. Nous avons évoqué en partie 2.3.2 page 107 différents travaux visant à résoudre de tels problèmes à l'aide de l'approche agent. Ce travail fournit non seulement un nouvel exemple d'application de l'approche agent à la résolution de problèmes continus, mais il permet aussi de montrer que cette approche peut être envisagée pour unifier des méthodes de résolution continues et discrètes. Nous pensons que la capacité de l'approche agent à unifier ces approches provient du fait qu'elle autorise une communication efficace entre des niveaux d'abstraction différents (le continu concerne un niveau plus fin que le discret).

Perspectives

Améliorations du modèle

Le modèle GAEL permet de répondre à l'objectif de cette thèse. La critique de ce modèle que nous avons donnée en partie 4.2 page 209 permet d'en donner des pistes d'amélioration futures.

Vers un meilleur couplage des modèles Le modèle GAEL permet d'effectuer un processus de généralisation composé d'opérations de généralisation discrètes, appliquées sur les objets (bâtiments, routes, etc.) et continues, appliquées sur les champs. Dans le modèle GAEL actuel, un agent est soit purement élastique (il ne peut que se déformer), soit purement discret (il ne peut s'appliquer que des transformations discrètes). Nous avons vu en partie 2.2.2.1 page 95 que le processus de généralisation nécessitait dans certains cas d'appliquer les deux types d'opérations à certains objet. Nous pensons que le modèle que nous proposons pourrait être amélioré en permettant à chaque agent d'avoir à la fois des comportements élastiques et discrets, et de choisir lui-même son comportement en fonction de son état. Cette perspective nécessiterait d'améliorer le couplage entre les différents modèles de généralisation ((Duchêne et Gaffuri, 2008) présente différents scénarios de couplage de ces modèles). Elle nécessite également de mettre au point une stratégie permettant de déterminer quand un agent doit être élastique ou discret. Un travail de thèse traitant, en particulier, de ce problème a débuté au laboratoire COGIT (Touya, 2008).

Vers des stratégies de déformations plus efficaces Dans le modèle GAEL tel que nous le proposons, un agent élastique ne se voit proposer qu'une unique déformation par ses contraintes pour tenter d'améliorer son état. Nous pensons que, dans certains cas, plusieurs déformations, ayant des paramètres différents, devraient pouvoir être essayées par l'agent élastique. Les paramètres influençant la nature de la déformation essayée sont le type des objets submicros, des contraintes portées par ces objets submicros, et leurs importances relatives. Ces déformations pourraient être mises au point :

- dans un premier temps, « à la main », par le concepteur du processus de généralisation. Le concepteur spécifie un ensemble statique de déformations qu'il pense adaptée aux contraintes qu'il conçoit. Il nous semble nécessaire de fournir des outils d'aide au paramétrage de ces déformations. Ces outils permettraient au concepteur du processus de généralisation de constater visuellement l'impact des changements de paramètres sur la déformation subie par l'agent élastique.
- dans un deuxième temps, par l'agent lui-même. Nous pourrions envisager de permettre à l'agent élastique de décider lui-même quelles contraintes submicros faire porter à ses objets submicros, et avec quelle importance.

Vers des déformations mieux contrôlées Nous avons vu que les déformations du modèle GAEL étaient contrôlées par l'agent élastique à travers le calcul de la satisfaction de ses contraintes élastiques. Nous avons vu que le calcul de ces valeurs n'était pas direct pour certains des cas que nous avons rencontrés. Un meilleur calcul de ces valeurs permettrait un meilleur contrôle du résultat des déformations.

Vers une meilleure prise en compte des relations objet-champ Enfin, nous avons proposé une stratégie de prise en compte des relations objet-champ dans le processus de généralisation des objets. Cette stratégie consiste à tenter de satisfaire les contraintes objet-champ dès qu'elles sont violées. Nous pensons que dans de nombreux cas, un traitement des contraintes objet-champ au niveau meso serait plus judicieux.

Nouveaux cas d'application

Vers d'autres domaines d'application Le modèle GAEL couplé au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) est un exemple de système unifiant des approches continues et discontinues de résolution d'un même problème. De nombreux autres domaines d'application pour lesquels une telle unification serait utile pourraient être considérés. Par exemple, en physique, une formulation orientée agent de la méthode des éléments finis pourrait permettre une modélisation de phénomènes physiques connaissant des évolutions à la fois discrètes et continues. En géographie, de nombreuses dynamiques connaissant la même dualité pourraient également être modélisées ainsi.

Vers de nouvelles mises en œuvre Comme tout modèle, le modèle GAEL se veut générique. Dans le cadre de cette thèse, il a été mis en œuvre pour des cas particuliers ne suffisant pas à prouver sa généralité. De futurs travaux pourraient permettre de mettre en évidence le niveau de généralité de ce modèle et d'isoler des cas d'application éventuels pour lesquels il n'est pas adapté et nécessite d'être amélioré ou complété. Ces mises en œuvre pourraient concerner de nouvelles relations objet-champ (nous en avons suggéré certaines en partie 4.2.2.1 page 219) ou bien des cas de généralisation pour lesquels des opérations discrètes et continues sont nécessaires.

Vers une utilisation plus répandue des méthodes de généralisation automatique

Le modèle GAEL améliore l'automatisation de la généralisation : nous avons présenté comment il permettait une utilisation concomitante d'opérations discrètes et continues, et une prise en compte de nouveaux thèmes. Nous disposons désormais d'un modèle de généralisation complet, pouvant être mis en oeuvre pour répondre à une majorité des besoins en généralisation. Nous pensons que des efforts sont nécessaires pour rendre ces modèles plus accessibles à des utilisateurs de données géographiques non cartographes toujours plus nombreux.

Annexe A

Exemples de relations objet-champ

Cette annexe présente quelques exemples de relations entre objets (bâti, réseaux routier et hydrographique) et champs (relief et occupation du sol). Chaque exemple est illustré d'extraits de cartes topographiques, parfois à différentes échelles, afin d'illustrer la préservation de ces relations pendant le processus de généralisation. Nous avons déjà présenté certaines de ces relations en partie 2.1.4.3 page 87. La liste présentée ici n'est évidemment pas exhaustive.

Nous présentons tout d'abord des relations concernant le relief, puis d'autres concernant l'occupation du sol.

A.1 Relations avec le relief

A.1.1 Relations entre relief et bâti

Les constructions humaines sont contraintes par le relief, en particulier les bâtiments. Que ce soit pour des raisons climatiques (l'adret est usuellement plus bâti que l'ubac car mieux exposé), d'accessibilité (les fonds de vallées sont usuellement plus accessibles, et donc plus bâtis) ou stratégiques (des villages anciens ont été construits sur des sommets pour être défendus plus facilement), l'implantation du bâti dans la réalité est influencée par l'orographie.

Par exemple, les figures A.1 et A.2 représentent respectivement un village et un quartier localisés aux sommets de collines.

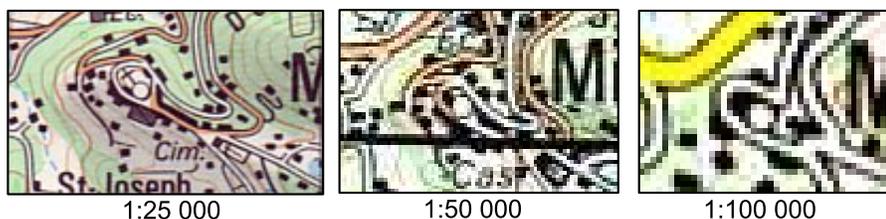


FIGURE A.1 – Relation bâti-relief : un village au sommet d'une colline (cartes : IGN)

La figure A.3 illustre également la relation pouvant exister entre bâtiments et pente : les bâtiments sont souvent orientés suivant la pente.

A.1.2 Relations entre relief et réseau routier

Le réseau routier est fortement contraint par le relief. La raison essentielle est que les véhicules empruntant ces routes ne peuvent pas gravir des pentes trop fortes. Certaines routes ont une valeur de pente constante sur certaines parties. Les routes sont donc contraintes par le relief.

Par exemple, la figure A.4 montre une route descendant un versant pentu. Nous pouvons constater que la valeur de pente de cette route est quasiment constante. La route épouse le versant et ses irrégularités. Par exemple, lorsqu'un léger talweg est présent, la route comporte de faibles virage afin de préserver une valeur de pente constante. Sa forme est liée à celle des courbes de niveaux qu'elle coupe.

Sur les figures A.5 et A.6, deux chemins contournent chacun un sommet. Ce sommet peut être vu comme un obstacle. Son franchissement impliquerait une valeur de pente trop grande. Les chemins épousent ainsi le contour des sommets afin de les contourner à altitude constante.

En figure A.7, une route passe par un col. Le passage par un col permet d'éviter des obstacles du relief afin de minimiser les valeurs et variations de pente de la route.

En figure A.8, un sentier longe une falaise. Cette trajectoire a pour objectif de permettre au randonneur d'apprécier le point de vue depuis la falaise tout au long de son parcours du sentier. Nous pouvons constater que cette falaise est également une limite de zone d'occupation du sol (entre prairie et zone boisée). Le chemin est donc également lié à cette limite.

En figure A.9, le réseau routier franchit un obstacle du relief via un tunnel. Un tunnel représente une relation très forte entre le relief et le réseau routier. Il peut être caractérisé par sa longueur ainsi que les altitudes d'entrée et de sortie (qui peuvent être différentes).

Nous avons présenté des exemples qui permettent de constater que le réseau routier est contraint par le relief. Dans d'autres cas, nous pouvons constater que l'inverse peut se produire : des travaux de terrassement importants effectués pour la construction du réseau routier peuvent avoir pour conséquence de transformer le relief. Nous pouvons constater ainsi la présence fréquente le long de routes de talus, remblais, murs de soutènement, levées de terre, etc.

Il existe de nombreux autres type de réseaux de transport ayant des relations spécifiques avec le relief (chemins de fer à crémaillère, funiculaires, téléphériques, réseau de transport d'énergie, etc.).

Nous présentons maintenant certaines relations concernant l'hydrographie et le relief.

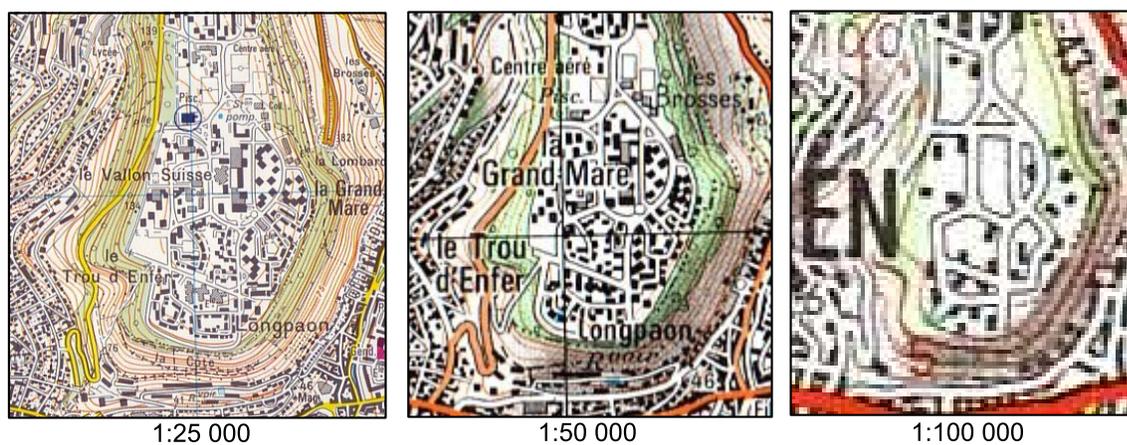


FIGURE A.2 – Relation bâti-relief : un quartier au sommet d'une colline (cartes : IGN)

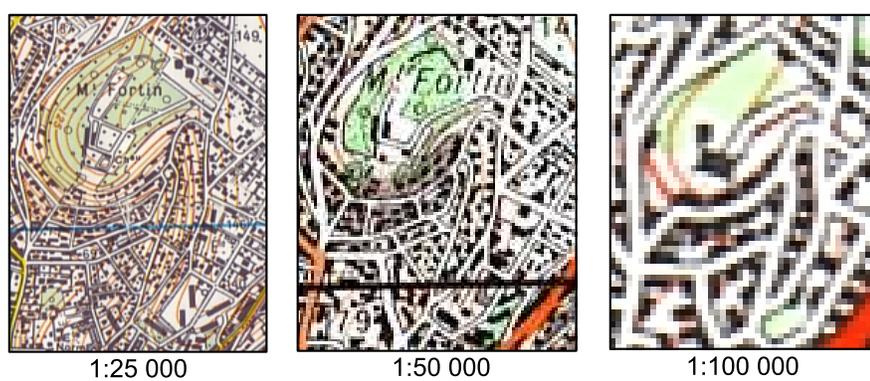


FIGURE A.3 – Relation bâti-relief : des bâtiment orientés selon la pente (cartes : IGN)

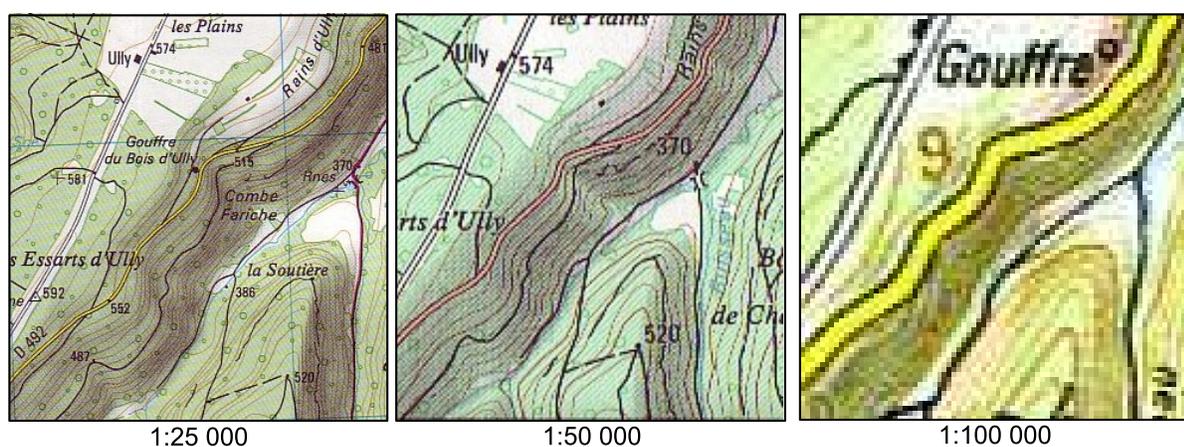


FIGURE A.4 – Relation routier-relief : une route qui descend un versant (cartes : IGN)

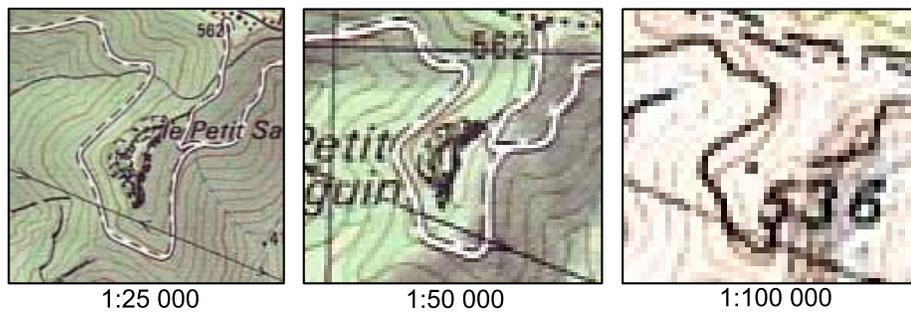


FIGURE A.5 – Relation routier-relief : un chemin qui contourne un sommet (cartes : IGN)

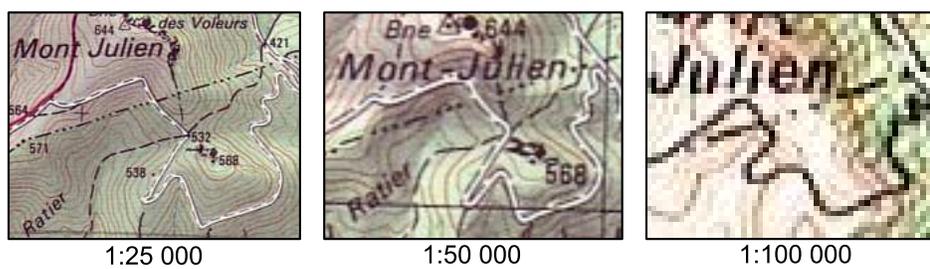


FIGURE A.6 – Relation routier-relief : un chemin qui contourne un sommet (cartes : IGN)

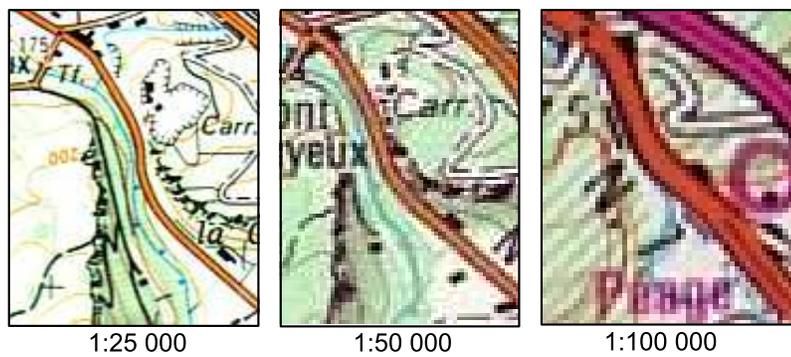


FIGURE A.7 – Relation routier-relief : une route qui passe un col (cartes : IGN)

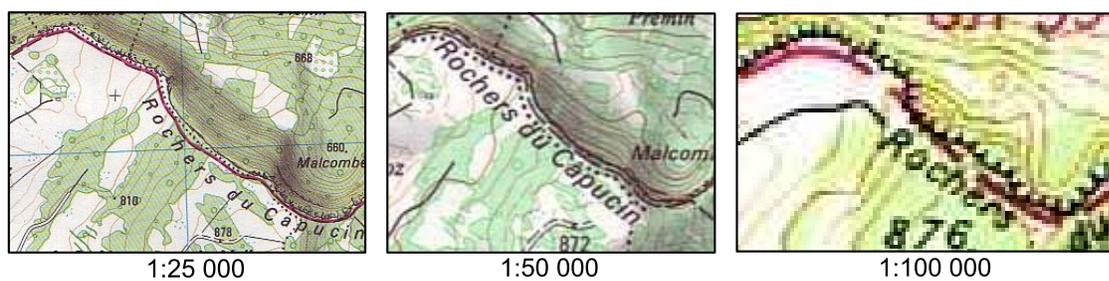


FIGURE A.8 – Relation routier-relief : un sentier longeant une falaise (cartes : IGN)

A.1.3 Relations entre relief et hydrographie

Le lien entre relief et hydrographie est particulièrement important, car ces deux thèmes sont liés par des lois physiques, contrairement aux relations précédentes qui peuvent être moins systématiques. En effet, l'hydrographie s'écoule sur le relief, et le relief est creusé par l'hydrographie. (Skinberg, 1982, p.85) emploie même le terme *oro-hydrographie* pour souligner la quasi-fusion de ces deux thèmes.

La manifestation certainement la plus importante de la relation entre le relief et l'hydrographie est représentée en figure A.10 : les cours d'eau s'écoulent parfaitement dans les talwegs qu'ils ont creusés. Le réseau hydrographique pourrait même suffire à lui seul pour suggérer le relief. Ainsi, un cours d'eau ne « remonte » jamais le relief, et est orienté vers la pente en tout point.

La figure A.11 présente également la relation entre une surface hydrographique et le relief. La surface de l'eau d'un lac a une altitude constante, en particulier son contour qui ne doit pas couper de courbe de niveau.

D'autres cours d'eau particuliers comme le canal présenté en figure A.12 présente également comme caractéristique d'avoir une altitude presque constante. Ils semblent suivre les courbes de niveau.

A.1.4 Relations complexes avec le relief

Nous pouvons également mentionner des relations plus complexes mettant en jeu plusieurs objets. Par exemple, la figure A.13 présente le cas d'une route parcourant le versant d'une montagne. Souvent, ces routes ne sont pas à pente nulle : une route suivant parfaitement une courbe de niveau est parfois trop longue. Le tracé de la route est le résultat d'un compromis entre longueur et faiblesse de la valeur de la pente. Ainsi, nous pouvons observer comme présenté schématiquement en figure A.13 des cas de routes qui montent vers des lignes de crêtes ; une fois cette ligne de crête atteinte (au niveau des points violets), la route redescend jusqu'à un talweg dans lequel coule souvent un cours d'eau ; puis, à partir du pont permettant à la route de franchir le talweg, la route remonte jusqu'à la prochaine ligne de crête, et ainsi de suite. Cette variation de la relation entre route et relief est bien connue des cyclistes qui ont conscience de ces variations de valeur de pente au niveau de certains points caractéristiques du relief (lignes de crête et de talweg). Également, une personne souhaitant se rendre d'un versant d'un talweg à un autre choisira un compromis entre la ligne droite (qui est le chemin le plus court mais avec une forte dénivelée) et la ligne géodésique (qui est un chemin qui minimise la dénivelée mais qui est plus long).

La figure A.14 présente un autre exemple d'une telle relation enchevêtrée entre plusieurs objets et le relief. Au sommet de la montagne représentée se trouvent un point du vue et un point géodésique. Ce sommet est desservi par une route, qui sert également à desservir le point de vue.

Ainsi, il est possible de constater des relations entre objets et champs mettant en jeu plusieurs types d'objets. Nous présentons maintenant des exemples de relations concernant le champ occupation du sol.

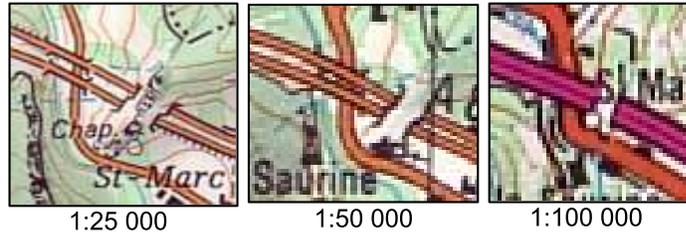


FIGURE A.9 – Relation routier-relief : un tunnel (cartes : IGN)

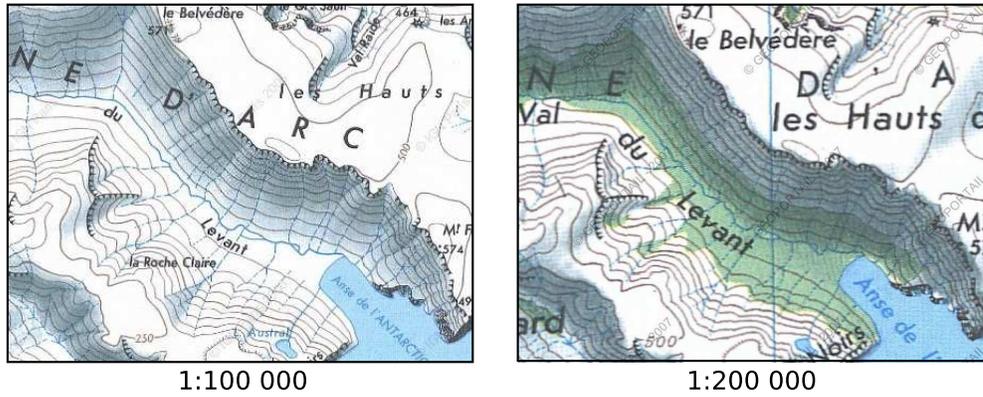


FIGURE A.10 – Relation hydrographie-relief : des cours d'eau qui coulent dans des talwegs (cartes : IGN)

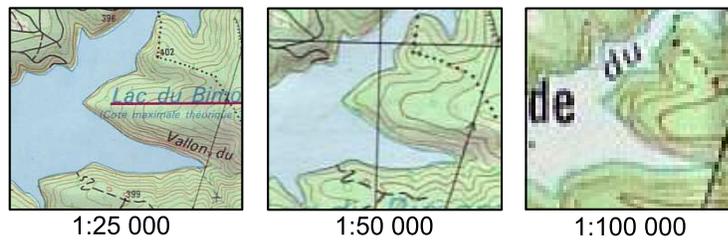


FIGURE A.11 – Relation hydrographie-relief : un lac à cote constante (cartes : IGN)

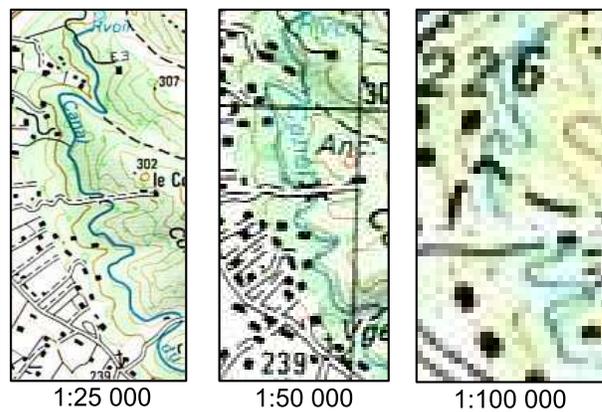


FIGURE A.12 – Relation hydrographie-relief : un canal d'altitude constante (cartes : IGN)

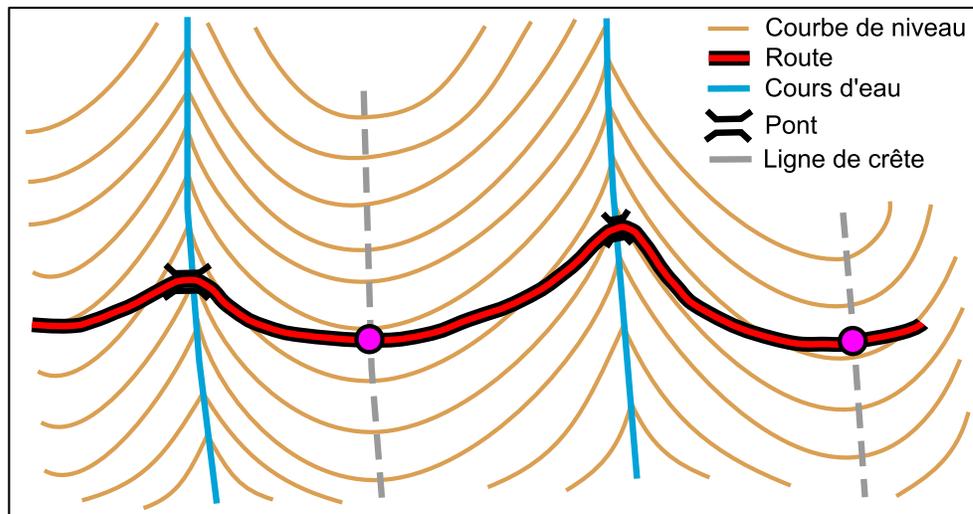


FIGURE A.13 – Relation entre relief, réseaux routier et hydrographique

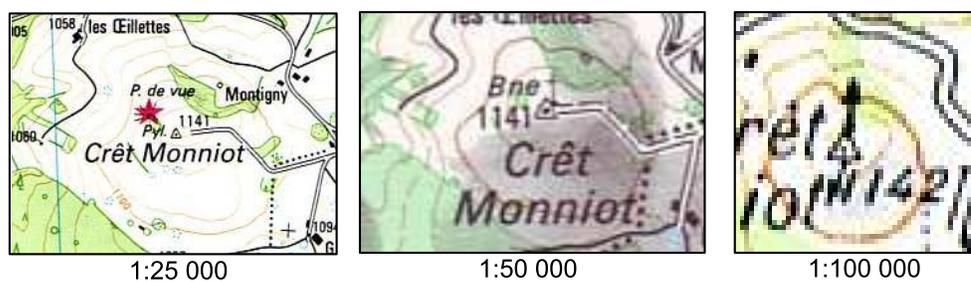


FIGURE A.14 – Relation complexe : un sommet coiffé d'une borne et d'un point de vue et desservi par une route (cartes : IGN)

A.2 Relations avec l'occupation du sol

A.2.1 Relations entre occupation du sol et bâti

Il existe de nombreuses relations concernant des objets de type bâtiment et le champ d'occupation du sol. Par exemple, la figure A.15 présente diverses relations d'appartenance d'un bâtiment à une zone d'occupation du sol. S'il est important de préserver le fait qu'un bâtiment appartienne à une certaine zone d'occupation du sol, il est également utile de préserver la position du bâtiment dans cette zone. Par exemple, nous pouvons voir en figure A.15 a. deux bâtiments qui se trouvent approximativement au milieu d'une parcelle de terrain à nu. Sur les figure A.15 b et c, les bâtiments sont plutôt en bord de parcelle.

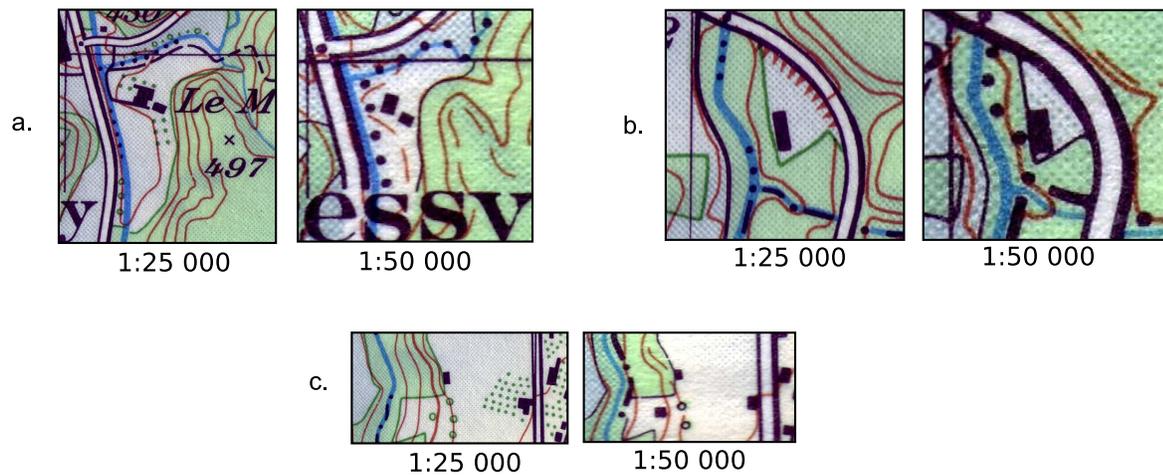


FIGURE A.15 – Relation bâti-occupation du sol : un bâtiment occupant une certaine position dans une parcelle d'occupation du sol (cartes : swiss topo)

Nous pouvons également constater que certains groupes de bâtiments sont caractérisés par leur appartenance à une certaine zone. Par exemple, la figure A.16 présente un village en grande partie localisé en forêt.

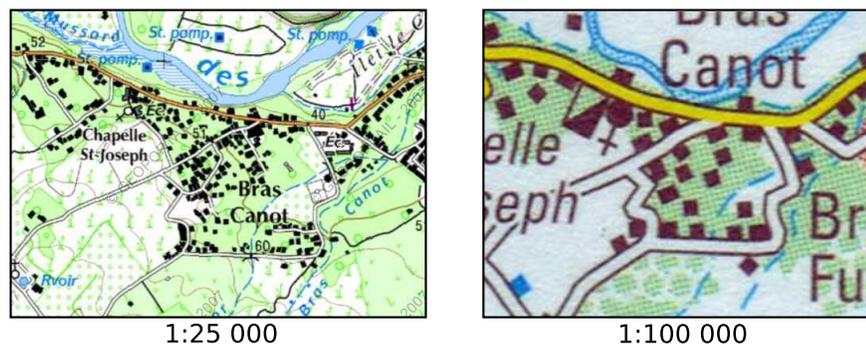


FIGURE A.16 – Relation bâti-occupation du sol : un village en zone boisée (cartes : IGN)

A.2.2 Relations entre occupation du sol et réseaux

Il existe également de nombreuses relations entre réseaux et occupation du sol. Dans une très grande majorité des cas, les parcelles cadastrales (et donc l'occupation du sol) s'appuient sur des réseaux. En conséquence, les zones d'occupation du sol partagent de nombreuses relations topologiques avec les réseaux (routier, hydrographique, ferroviaire, etc.). Les figures A.17 a. et b. présentent des exemples de telles configurations.

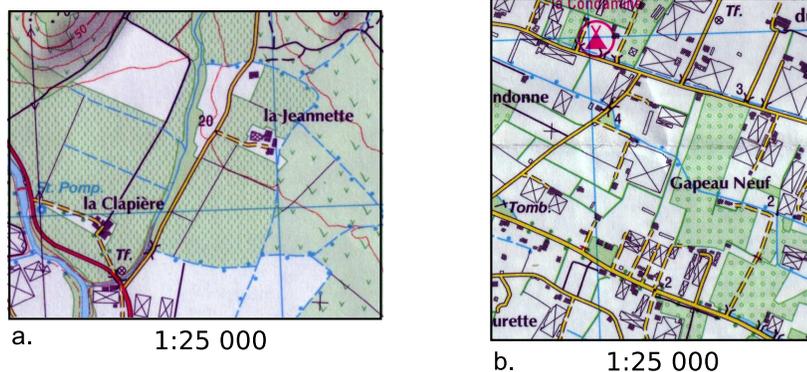


FIGURE A.17 – Relations réseaux-occupation du sol : des réseaux (routier et hydrographique) structurant l'occupation du sol (cartes : IGN)

Annexe B

Analogies

La généralisation est un processus composé de transformations continues et discrètes. Nous pouvons constater l'existence d'une dualité entre transformations discrètes et continues dans de nombreux autres processus de transformation. Nous en présentons plusieurs dans cette annexe.

La déformation d'un solide : un objet réel solide, plus ou moins souple, subissant des contraintes (étirements, compressions, etc.) peut se déformer continuellement jusqu'à un certain point (en fonction des propriétés de sa matière) où il va finir par casser. Cette cassure peut être vue comme un changement discret, par opposition à la déformation, continue. Par exemple, une plaque de caoutchouc soumise à des pressions en certains points peut s'adapter à ces pressions en se déformant jusqu'à un point de rupture qui provoquera une déchirure. De même, les mouvements continus de la croûte terrestre provoqués par l'activité interne de la terre peuvent également se manifester sous forme de séismes, changements brusques et discrets.

Au cinéma : les changements de plan peuvent être continus (mouvement continu d'une unique caméra d'un point à un autre, travelling) ou discrets (changement de plan avec coupure ou changement de caméra). Cette différence est visible sur la pellicule : un film peut être vu comme un ensemble de transformations d'images continues et discrètes.

En biologie : toutes les espèces vivantes sont issues d'êtres vivants primitifs ayant évolué en s'adaptant à leur environnement. Certains biologistes défendent une conception dite *gradualiste* de l'évolution (l'évolution est vue comme un processus continu), alors que d'autres défendent une conception dite *par équilibre ponctué* (l'évolution est vue comme un processus discontinu) (cf. figure B.1 a., d'après (Raven *et al.*, 2007, figure 23.17, p. 486)).

Sur la surface de la mer : les changements observés à la surface de la mer peuvent être vus comme des ondulations continues. Par moment, des changements discrets comparables à une déchirure de la surface de l'eau apparaissent, et prennent la forme de déferlements et d'écume (cf. figure B.1 b.).

En placement automatique des écritures : enfin, nous pouvons également constater une analogie avec le problème du placement automatique d'écritures sur une carte. Cer-

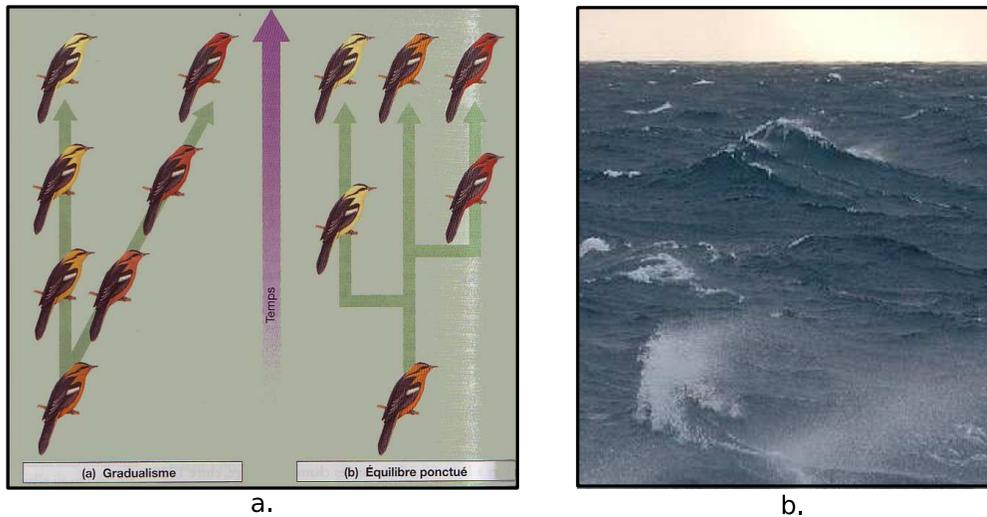


FIGURE B.1 – Analogie avec des processus de transformation hybrides : a. évolution du vivant, b. évolution de la surface de la mer

tains modèles de placement automatique s'appuient sur l'utilisation d'opérations discrètes (grands déplacements, suppressions, etc.) (Lecordix *et al.*, 1994), d'autres s'appuient sur des déplacements continus (Stadler *et al.*, 2006), et d'autres sur une utilisation successive d'opérations discrètes, puis continues (Zhang et Harrie, 2006). La nécessité d'une utilisation hybride est mentionnée par (Stadler *et al.*, 2006, p. 208) :

« However, to obtain good results, such a force-directed approach must be combined with a discrete method ».

Ces exemples montrent que le problème du traitement conjoint de processus discrets et continus n'est pas propre qu'à la généralisation. Pour de nombreux phénomènes de transformation, il est nécessaire de considérer ces deux aspects. Nous pouvons également constater que la plus grande partie des changements ont lieu via des transformations discrètes. Le continu peut être considéré comme le *second ordre* du discret. L'exemple d'un développement limité présenté figure B.2 illustre cela : la partie continue du développement est négligeable par rapport à sa partie discrète. Ainsi, au niveau quantitatif, le discret représente plus que le continu.

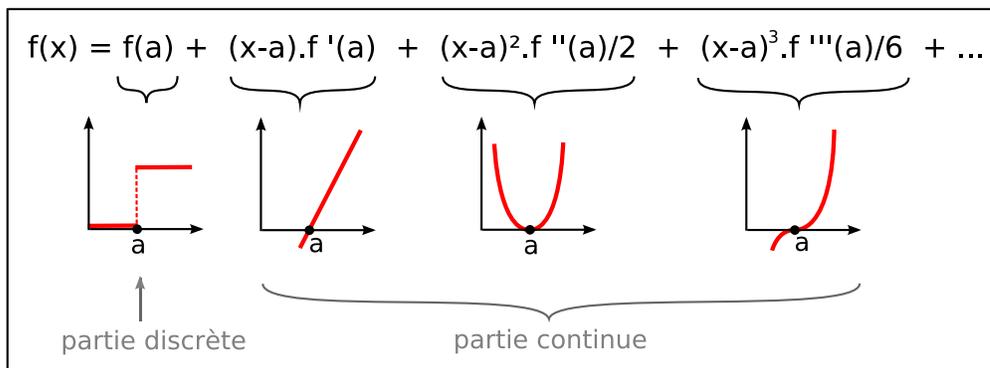


FIGURE B.2 – Le continu comme second ordre du discret : analogie avec un développement limité

Annexe C

Détail du déplacement de la contrainte d'aire de triangle

Nous justifions dans cette annexe la formule du déplacement donnée en partie 3.1.3.2 page 117 concernant la contrainte d'aire d'un triangle. Cette contrainte incite chacun des points composant un triangle à se déplacer pour pouvoir atteindre une certaine valeur but d'aire du triangle.

Le triangle considéré est composé des points P_1 , P_2 et P_3 , ordonnés dans le sens direct (cf. figure C.1). On note A et A_{but} les aires respectivement courante et but du triangle. Nous détaillons ici le calcul du déplacement pour le point P_1 . Des calculs analogues sont faits pour les points P_2 et P_3 . Nous justifions tout d'abord la direction du vecteur déplacement (suivant la hauteur du triangle issue de P_1), puis la longueur de ce déplacement.

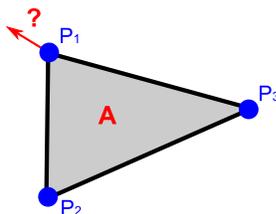


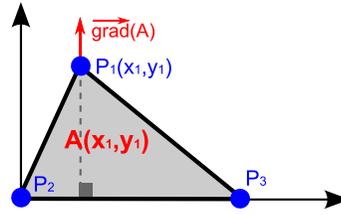
FIGURE C.1 – Un triangle dont l'aire est contrainte

C.1 Direction du vecteur déplacement

Le déplacement proposé au point P_1 doit être dans la direction qui permet de faire varier le plus la valeur de l'aire du triangle. Cette direction est donnée par celle du vecteur gradient de l'aire, en fonction de la position du point P_1 . Nous montrons que cette direction est celle de la hauteur du triangle issue de P_1 (cf. figure C.2).

En effet, dans le repère orthonormé de la figure C.2, l'aire A du triangle vaut :

$$A = \frac{Y_1 P_2 P_3}{2}$$

FIGURE C.2 – Variation de l'aire du triangle en fonction de la position de P_1

Le gradient de A en fonction de la position de P_1 est :

$$\overrightarrow{\text{grad}A} = \left(\frac{\partial A}{\partial X_1}, \frac{\partial A}{\partial Y_1} \right) = \left(0, \frac{P_2 P_3}{2} \right)$$

La direction de ce vecteur est donc selon l'axe des ordonnées, c'est à dire suivant la hauteur du triangle issue de P_1 comme illustré sur la figure C.2). C'est lorsque le point P_1 se déplace parallèlement à l'axe des ordonnées que l'aire du triangle varie le plus ; lorsque le point P_1 se déplace parallèlement à l'axe des abscisses, l'aire du triangle reste constante.

C.2 Longueur du vecteur déplacement

Le déplacement du point P_1 doit permettre d'augmenter l'aire du triangle de la valeur $\frac{\alpha(A_{but}-A)}{3}$. La valeur A' après déplacement du point P_1 de l'aire du triangle est donc $A + \frac{\alpha(A_{but}-A)}{3}$. En notant (X'_1, Y'_1) la position du point P_1 après son déplacement, on a :

$$A' = \frac{P_2 P_3 Y'_1}{2}$$

soit :

$$Y'_1 = \frac{2A'}{P_2 P_3}$$

De plus, sachant que :

$$Y_1 = \frac{2A}{P_2 P_3}$$

on a :

$$\Delta Y_1 = Y'_1 - Y_1 = \frac{2(A' - A)}{P_2 P_3} = \frac{2\alpha(A_{but} - A)}{3P_2 P_3}$$

et :

$$\Delta X_1 = X'_1 - X_1 = 0$$

puisque le déplacement de P_1 se fait uniquement suivant l'axe des ordonnées.

La longueur du déplacement à effectuer par le point P_1 est donc donnée par ΔY_1 . Dans le cas général d'un référentiel géographique qui n'est pas orienté suivant le côté $P_2 P_3$ du triangle comme sur la figure C.2, le déplacement $\overrightarrow{\Delta P_1}$ du point P_1 est donné par :

$$\overrightarrow{\Delta P_1} = \frac{2\alpha \Delta A}{3P_2 P_3} \vec{u}$$

avec $\Delta A = A_{but} - A$ et \vec{u} le vecteur unitaire directeur de la hauteur du triangle issue de P_1 . Enfin, sachant que :

$$\vec{u} = \frac{\overrightarrow{P_2P_3}^\perp}{P_2P_3}$$

on a :

$$\vec{u} = \left(-\frac{Y_3 - Y_2}{P_2P_3}, \frac{X_3 - X_2}{P_2P_3} \right)$$

On obtient les équations 3.1 et 3.2 de la page 118 :

$$\Delta X_1 = -\frac{2\alpha\Delta A(Y_3 - Y_2)}{3P_2P_3^2}$$

$$\Delta Y_1 = \frac{2\alpha\Delta A(X_3 - X_2)}{3P_2P_3^2}$$

Annexe D

A propos de la convergence

Nous donnons dans cette annexe des précisions à propos de la convergence du système.

- nous montrons d’abord qu’un agent-point pris individuellement converge forcément vers sa position d’équilibre, en supposant que ses voisins sont immobiles.
- nous montrons ensuite en quoi le déplacement simultanée de l’ensemble des agents-point ne permet pas d’assurer la convergence du système multi-agent.

D.1 Convergence de chaque agent-point

La méthode utilisée par chaque agent-point pour trouver sa position d’équilibre lors de son activation consiste à progresser par petits déplacements successifs vers cette position d’équilibre. Cette position est atteinte en explorant des positions voisines de la position courante de l’agent-point pour lesquelles la valeur du déséquilibre décroît. La méthode de résolution utilisée ici fait donc partie des méthodes dites d’*exploration par escalade* (aussi appelées *exploration par descente de gradient*) que nous avons évoquée en partie 1.2.5.2 page 50.

Nous montrons ici en quoi la convergence d’un agent-point seul (c’est à dire en considérant tous les autres agents-point comme fixes) est assurée. La preuve de la convergence d’un agent-point repose sur le fait que la valeur de son déséquilibre décroît strictement durant son cycle de vie. En effet, tant que l’agent-point n’est pas en équilibre, le déplacement qu’il effectue est non nul (car il a pour norme justement la valeur du déséquilibre) et lui permet de diminuer la valeur de son déséquilibre. Or, puisque la valeur déséquilibre est minorée par zéro (c’est une distance), il converge donc vers une valeur limite positive. Deux cas sont possibles suivant la valeur de cette limite :

- **la valeur vers laquelle le déséquilibre converge est non nulle** : dans ce cas, supposons que l’agent-point occupe la position pour laquelle la valeur limite de son déséquilibre est atteinte. Lorsqu’il occupe cette position, le déplacement donné par la méthode *calculerDéplacement* de l’agent-point est non nul (car sa norme est, comme la valeur du déséquilibre au niveau de cette position, non nulle), ce qui contredit le fait que cette position soit une position limite. Un tel cas est donc exclu : la valeur vers laquelle le déséquilibre converge est donc forcément nulle.
 - **la valeur vers laquelle le déséquilibre converge est nulle** : un problème est posé par le fait que l’agent-point n’atteindra pas forcément une position annulant la valeur de son déséquilibre en un nombre fini d’étapes. En effet, le paradoxe dit de *la flèche de*
-

Zénon d'Elée évoqué dans (Platon, 1926) illustre ce phénomène pour lequel un objet effectuant des déplacements successifs infiniment petits ne parvient pas à atteindre une position cible de laquelle il ne cesse pourtant jamais de se rapprocher. Nous constatons que ce même phénomène est observé lors de la convergence de l'agent-point : celui-ci ne s'arrête jamais et finit par effectuer des déplacements toujours plus petits (il existe cependant certains cas pour lesquels un agent-point parvient à annuler exactement la valeur de son déséquilibre, comme par exemple le cas où l'agent-point ne porte qu'une unique contrainte). Pour palier cette limite, et en considérant qu'il est absurde de chercher à positionner un agent-point en-deçà d'une certaine précision, nous avons proposé lors de la définition de la méthode *estEnEquilibre* de l'agent-point (cf. page 135) de considérer l'agent-point comme étant en équilibre à partir du moment où la valeur de son déséquilibre est plus petite que la résolution des données. Le choix de cette valeur est motivé par le fait que deux points distants de cette valeur peuvent être considérés comme confondus : cela n'a plus de sens de déplacer un point d'une distance aussi petite. Cette valeur est donnée en paramètre d'entrée au système en fonction du besoin de l'utilisateur final des données généralisées.

Ainsi, un agent-point converge forcément jusqu'à atteindre un état d'équilibre.

Une autre question suggérée par l'étude de la convergence est celle de l'unicité de la position d'équilibre. Nous avons en effet parlé jusqu'à présent de **la** position d'équilibre de l'agent-point, alors que celle-ci n'est a priori pas unique. S'il est possible de mettre au point des cas de figure pour lesquels plusieurs positions d'équilibre d'un agent-point sont possibles, nous pouvons supposer que dans une grande majorité des cas, les déformations seront d'ampleur suffisamment faible pour qu'il existe une unique position d'équilibre dans un voisinage de l'agent-point.

Nous présentons maintenant en quoi la convergence de chaque agent-point pris de façon isolée ne permet pas d'assurer la convergence du système.

D.2 Convergence d'un ensemble d'agents-point

Dans la section précédente, nous avons montré que chaque agent-point converge vers une position d'équilibre, en supposant que ses voisins sont figés. La convergence de chaque agent-point ne suffit pas à montrer que le système dans son ensemble converge. En effet, les agents-point se déplacent les uns après les autres et s'influencent lors de ces déplacements : ainsi, lorsqu'un agent-point se déplace pour diminuer la valeur de son déséquilibre, ce déplacement peut provoquer une augmentation de la valeur de déséquilibre de ses agents-point adjacents. La valeur du déséquilibre de chaque agent-point ne décroît donc pas toujours strictement entre deux de ses activations successives. Un tel cas est observé en figure 3.36 page 147 : entre les images b. et c., la valeur du déséquilibre de l'agent-point 31 a augmenté (elle est passée de 5.68 à 6.11). Ainsi, des situations d'interblocage (ou *deadlock*) peuvent être envisagées : par exemples, deux agents-point adjacents peuvent tenter à tour de rôle de se déplacer pour diminuer leur déséquilibre propre, et ne jamais y parvenir si le déplacement de chacun d'eux détériore l'état d'équilibre de l'autre.

Nous ne sommes pas parvenu à trouver une preuve satisfaisante de la convergence du système dans son ensemble. De telles situations d'interblocage n'ont cependant pas été observées empiriquement avec les contraintes submicros que nous avons testées. L'absence de ces situations d'interblocage entre deux agents-point peut s'expliquer par le fait que deux agents-point adjacents partagent une ou plusieurs contraintes submicro dont les valeurs but sont les mêmes pour chacun des deux agents-point. Les contraintes submicro communes aux agents-point les incite à se stabiliser.

La convergence du système dans son ensemble pourrait être prouvée si le déplacement de chaque agent-point permettait d'obtenir une décroissance, non pas de son déséquilibre propre, mais de la somme des déséquilibres des agents-points du système. Sachant que le déplacement d'un agent-point influence seulement le déséquilibre de ses agents-point adjacents, il suffirait donc à l'agent-point d'effectuer un déplacement permettant de diminuer la somme de son propre déséquilibre et des déséquilibres de ses agents adjacents (les valeurs de déséquilibre de tous les autres agents-point du système ne sont pas affectées).

Annexe E

Choix de la stratégie d'activation des agents-point

Dans le modèle GAEL, les agents-point sont activés successivement par un séquenceur. Dans cette annexe, nous présentons :

- l'importance du choix de la stratégie d'activation des agents-point sur le fonctionnement du système,
- les différentes stratégies d'activation envisageables pour notre cas,
- notre choix parmi les différentes stratégies d'activation, et les raisons de ce choix.

E.1 Importance du choix de la stratégie d'activation des agents

Dans un système multi-agents logiciel conçu sur une plate-forme mono-processeur tel que celui que nous proposons, les agents n'évoluent pas en parallèle. Ils sont activés à tour de rôle par un séquenceur. La stratégie d'activation des agents n'est pas unique. Cette stratégie comprend :

- *l'ordre d'activation des agents* : les agents ne pouvant être activés simultanément, il est nécessaire de choisir l'ordre dans lequel les agents sont activés. Après l'activation d'un agent la stratégie d'activation doit permettre de déterminer le prochain agent à activer,
- *et le type et l'ordre des tâches effectuées par chaque agent lors de son activation* : lors de chaque activation, un agent effectue un ensemble de tâches dans un ordre particulier. La stratégie d'activation permet de déterminer les tâches que chaque agent effectue lors d'une activation, ainsi que leur ordre. Les tâches et leur ordre ne sont pas nécessairement les mêmes lors de toutes les activations d'un même agent.

Ces choix ne sont pas anodins : ils ont souvent un impact important sur le comportement du système. (Meurisse, 2004) illustre dans le cas de la simulation multi-agent *sugarscape* l'influence de la stratégie d'activation des agents sur le comportement du système. Le choix de la stratégie d'activation des agents peut avoir un impact sur :

- le résultat de l'activation des agents : des stratégies d'activation différentes peuvent permettre l'obtention de résultats différents,
 - la rapidité d'obtention d'un résultat : une stratégie d'activation peut se révéler plus efficace qu'une autre et permettre l'obtention d'un même résultat plus rapidement,
-

- et même le fait d'obtenir un certain résultat : pour des systèmes multi-agents devant converger vers un certain état, la convergence peut ne jamais être obtenue en suivant une stratégie d'activation particulière.

Pour ces raisons, nous nous intéressons aux différentes stratégies d'activation possibles pour le système multi-agent que nous proposons.

E.2 Stratégies d'activation possibles des agents-point

Le système multi-agent que nous proposons est composé d'agents-point devant être activés les uns après les autres. Le choix du prochain agent-point à activer peut être fait suivant l'une des méthodes suivantes :

- *activation du plus insatisfait* : cette méthode d'activation consiste à choisir l'agent-point le plus insatisfait comme prochain agent à activer. L'agent-point le plus insatisfait est celui ayant la valeur de déséquilibre la plus grande,
- *activation du premier arrivé* : les agents-points à activer sont stockés dans une structure de file d'attente. Ils sont activés les uns après les autres, le prochain agent-point à activer étant le premier élément de la file,
- ou enfin *activation aléatoire* : cette méthode d'activation consiste à choisir au hasard l'agent-point à activer.

Lors de l'activation d'un agent-point, il peut effectuer les tâches suivantes :

- déterminer un déplacement à faire pour progresser vers son équilibre : cette tâche consiste à s'appliquer ses méthodes **recupèreDéplacements** et **calculerDéplacement**, qui permettent à l'agent-point d'une part de récupérer un vecteur déplacement pour chacune de ses contraintes, puis de calculer un déplacement lui permettant a priori de diminuer la valeur de son déséquilibre (c'est la somme des déplacements proposés par ses contraintes). Cette tâche permet à l'agent-point de percevoir son environnement, à travers ses contraintes submicros,
- progresser vers son état d'équilibre : cette tâche consiste à effectuer le déplacement calculé par la tâche précédente.

Mettre au point une stratégie d'activation consiste à choisir une méthode d'activation des agents-point parmi celles données précédemment, ainsi qu'un ordre de tâches à effectuer lors du cycle d'activation de chaque agent-point. Nous donnons maintenant certaines stratégies susceptibles d'être utilisées pour notre cas.

Stratégie façon automates cellulaires Cette stratégie consiste à activer tous les agents-point les uns après les autres lors de deux phases :

- une phase de perception : les agents-point sont activés et déterminent le déplacement à faire pour progresser vers leur état d'équilibre en consultant leurs contraintes,
- et une phase de changement : les agents-point sont activés et s'appliquent le déplacement calculé lors de la phase précédente.

Ces deux phases sont répétées jusqu'à ce que tous les agents-point soient dans un état d'équilibre. Pour chacune de ces deux phases, l'ordre d'activation des agents-point n'importe pas : lors de la phase de perception, tous les agents perçoivent le même environne-

ment, et lors de la phase de changement, ils ne prennent pas en compte les changements ayant été effectués par les agents-point s'étant déplacés avant eux.

Stratégies avec changement à chaque activation d'agent-point Différentes stratégies consistent à activer chacun des agents-point les uns après les autres, et à leur faire exécuter à chaque activation l'une des tâches suivantes :

- soit un déplacement lui permettant de progresser vers son état d'équilibre : lorsqu'il est activé, l'agent-point consulte ses contraintes et se déplace,
- soit un ensemble de déplacements lui permettant d'atteindre son état d'équilibre : l'agent-point répète la tâche précédente jusqu'à ce qu'il soit en équilibre.

Dans le premier cas, l'agent-point activé progresse vers son état d'équilibre, alors qu'il se déplace jusqu'à cet état d'équilibre dans le second cas. Concernant le choix de l'agent-point à activer, chacune des trois méthodes proposées précédemment (activation du plus insatisfait, activation en file d'attente, ou activation aléatoire) peut être envisagée. Six stratégies d'activation sont donc envisageables.

E.3 Choix

Nous présentons la stratégie d'activation que nous avons choisie et les raisons de ce choix.

Nous n'avons pas retenu la stratégie d'activation en automate cellulaire, car elle ne permettait pas de contrôler le déplacement de chacun des agents-point. Nous souhaitons en effet vérifier à l'issue de l'activation de chaque agent-point si son état s'est amélioré et, en cas de non amélioration, d'annuler le déplacement effectué. Ce comportement n'est pas possible avec cette stratégie d'activation. Nous avons donc plutôt choisi une stratégie avec changement à chaque activation d'agent-point.

Concernant les tâches effectuées par chaque agent-point lors de son activation, nous avons choisi de permettre à chaque agent-point uniquement de progresser vers son état d'équilibre sans l'atteindre complètement. Des tests ont révélé que cette méthode était plus efficace. Cette différence d'efficacité s'explique par le fait que cette stratégie permet de respecter une certaine équité dans le partage du processeur : chaque agent-point ne s'approprie pas totalement le processeur et laisse la main aux autres agents-point pour permettre une progression collective de tous les agents-point. Un agent-point ayant atteint sa position d'équilibre à un moment du processus a très peu de chance d'y rester si ses agents accointants ne sont pas eux-même proches de leur position d'équilibre. Nous avons donc choisi de permettre aux agents-point de progresser ensemble.

Concernant la méthode de choix du prochain agent-point à activer, la méthode d'activation de l'agent le plus insatisfait semble a priori la meilleure. Elle permet en effet d'assurer que tous les agents-point progressent de façon équitable puisqu'elle permet d'homogénéiser l'état de satisfaction des agents-point. Nous constatons cependant que l'étape de recherche de l'agent le plus insatisfait a un coût relativement important, proche de celui du calcul du déplacement de l'agent-point. En effet, pour notre cas, la satisfaction d'un agent-point est liée à la valeur de son déséquilibre : le calcul de cette valeur nécessite de calculer le déplacement que doit effectuer l'agent-point pour progresser vers son équilibre. Il semble normal, à

partir du moment où ce déplacement a été calculé, de l'effectuer pour permettre à l'agent-point de progresser vers son équilibre, même s'il n'est pas le plus insatisfait. Nous avons donc exclu cette méthode. Parmi les deux méthodes de choix de prochain agent-point à activer restantes, nous n'avons pas constaté de différence pertinente. Nous proposons donc d'utiliser la méthode d'activation aléatoire des agents-point.

Table des figures

1.1	Trois représentations de Marseille.	20
1.2	Représentation en modes grille et vecteur	21
1.3	Organisation des bases de données géographiques en classes d'objets	21
1.4	Exemples de données attributaires d'objets géographiques	21
1.5	Symbolisation automatique de données géographiques	22
1.6	Un pull, perçu à différentes échelles	24
1.7	Deux bases de données géographiques ayant des niveaux de détail différents. (a.) la BDTopo® de l'IGN et (b.) la BDCarto® de l'IGN	25
1.8	Généralisation d'une base de données géographiques	27
1.9	Généralisation cartographique du 1 :25 000 au 1 :50 000 (cartes : IGN)	27
1.10	Seuils de visibilité (d'après (Weger, 1998))	28
1.11	Exemples de généralisation cartographique	29
1.12	Conflits cartographiques en cartographie numérique	30
1.13	Conflits cartographiques en cartographie numérique	30
1.14	Exemples d'opérations de généralisation (d'après (Mustière, 2001, chap.A2))	32
1.15	Distinction entre géométrie d'un objet et celle d'un objet cartographique	33
1.16	La généralisation cartographique numérique : dérivation d'une base de données cartographique à partir d'une base de données géographiques	34
1.17	Décomposition du processus de généralisation cartographique en généralisation de modèle et généralisation graphique	35
1.18	Exemples de cartes comportant des défauts de conception cartographique	38
1.19	Dérivation des bases de données géographiques et cartographiques à partir d'une base de données de référence	41
1.20	Exemples de résultats d'algorithmes sur objets	42
1.21	Exemples de résultats d'algorithmes sur des groupes d'objets	43
1.22	Exemples de résultats d'algorithmes sur des parties d'objets	44
1.23	Mise au point d'une suite de traitements prédéfinis (outils ModelBuilder du logiciel ArcGIS 9.1, d'après (Lee, 2003))	47
1.24	Exemple de généralisation par moindres carrés. D'après a. (Harrie, 2001) et b. (Sester, 2000)	49
1.25	Exemple de généralisation par la méthode des éléments finis. D'après (Højholt, 1998)	50
1.26	Exemple de généralisation par déformation par poutres élastiques (Bader, 2001)	50
1.27	Exemple de généralisation par recuit simulé ; d'après (Ware <i>et al.</i> , 2003) (a.) et (Monnot <i>et al.</i> , 2007) (b. et c.)	51
1.28	Le modèle de (Ruas et Plazanet, 1996)	53

1.29	Généralisation d'un tronçon routier avec le modèle GALBE, d'après (Mustière, 2001, chap.B)	54
1.30	Exemple de simulation multi-agent : une colonie de fourmi (d'après (Wilensky, 1998))	60
1.31	La classe contrainte	65
1.32	Exemples de contraintes sur un agent micro bâtiment	66
1.33	Exemples de contraintes sur un agent meso îlot	66
1.34	Cycle de vie d'un agent géographique d'après (Ruas, 1999a)	67
1.35	La classe agent	68
1.36	Cycle de vie d'un agent géographique, avec exploration en arbre	69
1.37	Hierarchie de l'espace urbain pour la généralisation	70
1.38	Les agents meso	71
1.39	Opération d'activation des composants d'un agent meso	71
1.40	Les classes du modèle CartACom	73
1.41	Le cycle de vie d'un agent micro CartACom	74
1.42	Quelques résultats du modèle (Ruas et Duchêne, 2007)	75
2.1	Exemples de représentations de thèmes champ	78
2.2	Exemples d'objets de champ : anticyclones, dépressions et fronts d'une carte météorologique	81
2.3	Méthodes usuelles de représentation de champs	83
2.4	Méthodes usuelles de représentation cartographique de champs	85
2.5	Classification d'objets en fonction de leur comportement en généralisation	86
2.6	Généralisation de courbes de niveau (Imhof, 1982b, p. 129)	87
2.7	Exemples de relations objet-champ	88
2.8	Opération d'élargissement de talweg (Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, 1977, p. 27)	89
2.9	Opération d'élargissement de talweg (IGN)	90
2.10	Généralisation conjointe de l'hydrographie et du relief (la représentation initiale est en trait fin ; la représentation généralisée est en trait épais) (Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, 1977, p. 42)	90
2.11	Généralisation conjointe du routier et du relief. a. (Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, 2002, p. 97), b. et c. (Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, 1977, p. 27)	91
2.12	Généralisation conjointe du routier et de l'occupation du sol (Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, 2002, p. 111)	91
2.13	Trois types de relations traduisant le contexte des objets en généralisation, d'après (Mustière et Moulin, 2002)	94
2.14	Modélisation de l'espace en SMA : a. espace discontinu (d'après MadKit, http://www.madkit.org/) et b. continu (d'après RIVAGE (Servat, 2000))	95
2.15	Exemples d'utilisation d'opérations discrètes (en rouge) et continues (en bleu) en généralisation cartographique	96
2.16	Exemple d'opérations continues, discrètes et sur les classes pour la représentation de mines. (Bertin, 1967, p. 301)	98
2.17	Relation entre amplitude du changement d'échelle, types d'opérations et types de généralisation	99
2.18	Exemple de carte en anamorphose. D'après (Kocmoud, 1997)	104

2.19	Différentes cartes en anamorphose résultant de différentes méthodes. D'après (Kocmoud et House, 1998)	104
2.20	Situations actuelle et souhaitée de généralisation hybride	106
3.1	Exemple d'objet à déformer : a. l'objet initial ; b. l'objet après déformation	109
3.2	Hierarchie entre les différents niveaux macro, meso, micro et submicro	111
3.3	Modèle de données pour la décomposition d'un agent élastique en objets submicro composés d'agents-point et portant des contraintes submicro	112
3.4	Décomposition de l'objet à déformer sous forme d'objets submicro	112
3.5	Les contraintes submicro	113
3.6	Exemple de trajectoire d'un agent-point P lorsque α varie de 0 à 1	114
3.7	Contrainte de position de point singleton	115
3.8	Contrainte de longueur de segment	115
3.9	Contrainte d'orientation de segment	116
3.10	Contrainte de valeur d'angle	117
3.11	Contrainte d'aire de triangle	118
3.12	Contrainte de préservation de distance au centre de gravité de triangle	118
3.13	Contrainte d'orientation azimutale de triangle	119
3.14	Contraintes relationnelles submicro	121
3.15	Contrainte de distance minimale entre points	121
3.16	Contrainte de distance minimale entre point et segment	123
3.17	Contrainte de distance entre point et segment	125
3.18	Contrainte de distance minimale entre deux segments	126
3.19	Contrainte d'angle entre deux segments	127
3.20	Deux types de contraintes submicro : les contraintes internes et les contraintes relationnelles	128
3.21	Traduction du but sous la forme de contraintes du niveau submicro	129
3.22	Objet à déformer : dans son état initial (a.) aucune des contraintes de déformation n'est satisfaite ; toutes les contraintes de préservation de forme le sont. Dans son état final (b.), l'insatisfaction des contraintes est équilibrée.	131
3.23	L'objet à déformer et ses agents-point	131
3.24	La classe agent-point	133
3.25	Trois exemples de situations pour l'agent-point P : a. lorsque P porte une unique contrainte, b. lorsque P porte plusieurs contraintes de même importance, et c. lorsque P porte plusieurs contraintes d'importances différentes	134
3.26	Un premier cycle de vie de l'agent-point	137
3.27	Cycle de vie de l'agent-point avec vérification	138
3.28	Fonctionnement du moteur élastique	140
3.29	Le cycle de vie modifié d'un agent-point, pour sa gestion par le moteur élastique	141
3.30	Cycle de vie unifié des agents géographiques et des agents-point	142
3.31	Une classe d'agent unifiant les agents géographiques et agents-point	143
3.32	Déformation progressive de l'objet exemple	144
3.33	Déformation progressive de l'objet exemple	145
3.34	Nombre d'agents-point de la liste du moteur en fonction du nombre d'activations d'agents-point : a. lors des 140 premières activations ; b. pour la totalité du processus	146
3.35	L'agent-point 31 étudié	146

3.36	Evolution de la valeur de déséquilibre et des vecteurs de déplacement de l'agent-point 31 pendant la déformation	147
3.37	Trajectoire de l'agent-point 31 pendant la déformation	147
3.38	Vecteurs de déplacement et trajectoire de tous les agents-point à la fin de la déformation	147
3.39	Les classes agent et contrainte élastique	149
3.40	Traitement de déformation de l'agent élastique	151
3.41	Les classes agent élastique et contrainte élastique	152
3.42	Évolution des valeurs de satisfaction lors de la déformation de l'objet exemple	154
3.43	Autre résultats de déformation avec des contraintes submicro différentes et différents paramétrages	155
3.44	Relations objet-champ dans le modèle GAEL	157
3.45	L'agent-champ relief et ses objets de champ	159
3.46	Modélisation de l'agent-champ relief et de ses objets de champ	160
3.47	L'agent-champ occupation du sol	160
3.48	L'agent-champ occupation du sol et de ses objets de champ	161
3.49	Les champs vus comme des nappes élastiques composées d'agents-point se déformant sous l'action des objets, et les contraignant en retour	162
3.50	Contrainte relationnelle objet-champ	163
3.51	Exemples de relations et contraintes entre trois agents géographiques et un agent-champ	163
3.52	Cas simplifié d'un agent géographique partageant une unique relation avec un champ	166
3.53	Dynamique du cas simplifié	168
3.54	Les quatre cas possibles de résultat d'interaction entre agent géographique et agent-champ	169
3.55	Le modèle GAEL	171
4.1	Diagramme UML de classe de la relation objet-champ d'altitude d'un bâtiment	176
4.2	Satisfaction de la relation d'altitude de bâtiment	177
4.3	Données initiales : (a.) avant généralisation, (b.) écarts d'altitude des bâtiments, et (c.) satisfaction de la relation	178
4.4	Données après généralisation au 1 :25000 : (a.) sans prise en compte du relief, (b.) écarts d'altitude des bâtiments, et (c.) satisfaction de la relation .	178
4.5	Données après généralisation au 1 :50000 : (a.) sans prise en compte du relief, (b.) écarts d'altitude des bâtiments, et (c.) satisfaction de la relation .	178
4.6	Calcul du déplacement proposé à l'agent-bâtiment pour améliorer la satisfaction de sa contrainte d'altitude (la figure est représentée dans le plan vertical contenant le vecteur de pente du bâtiment (en orange)	179
4.7	Calcul du déplacement des agents-point pour la contrainte submicro d'altitude de bâtiments d'un triangle	180
4.8	Résultats de prise en compte de relations de préservation d'altitude de bâtiment pour le 1 :25000 et le 1 :50000	181
4.9	Données après généralisation au 1 :25000, avec (a.) prise en compte du relief. (b.) Écarts d'altitude des bâtiments et (c.) satisfaction de la relation (à comparer avec les figures 4.4 de la page 178)	182

4.10	Données après généralisation au 1 :50000, avec (a.) prise en compte du relief. (b.) Écarts d'altitude des bâtiments et (c.) satisfaction de la relation (à comparer avec les figures 4.5 de la page 178)	182
4.11	Déformation locale de l'agent-champ relief en cours de généralisation	183
4.12	Résultat de déformation pour le 1 :25000 (a.) et le 1 :50000 (b.)	183
4.13	Résultat de la prise en compte de la relation de préservation d'altitude de bâtiment. (a.) données initiales, (b.) données après généralisation sans prise en compte des relations, et (c.) données après généralisation avec prise en compte des relations	185
4.14	Variations de satisfaction des relations (a.) sans et (b.) avec leur prise en compte pour le 1 :50000	186
4.15	Transformations des bâtiments (a.) et déformation du relief (b.) pour le 1 :50000	186
4.16	Deux déformations possible du relief	187
4.17	Effet de la prise en compte de la relation d'altitude de bâtiment sur un groupe de bâtiments en pied d'une zone pentue	188
4.18	Diagramme UML de classe de la relation objet-champ d'écoulement de tronçon hydrographique	189
4.19	Définition des angles α et φ utilisés pour la définition de l'indicateur d'écoulement	191
4.20	Exemple de variation de l'indicateur d'écoulement Q d'une ligne en fonction de l'abscisse curviligne S	191
4.21	Données testées : une vallée encaissée	192
4.22	Généralisation sans prise en compte de la relation d'écoulement	193
4.23	Contrainte submicro d'écoulement de segment	194
4.24	Déformation de tronçons hydrographiques pour améliorer l'écoulement	195
4.25	Contrainte submicro de triangle pour l'écoulement	197
4.26	Résultat de la prise en compte de la relation d'écoulement	198
4.27	Diagramme UML de classe de la relation objet-champ d'appartenance de bâtiment à une zone d'occupation du sol	200
4.28	Dégradation de la satisfaction d'appartenance à une zone d'occupation du sol lors du processus de généralisation	201
4.29	Résultat de la prise en compte de la contrainte de préservation d'appartenance de bâtiment à sa zone d'occupation du sol	202
4.30	Propagation d'opérations de généralisation du routier sur le bâti, d'après (Craipeau, 2007). (a.) données initiales symbolisées, (b.) résultat après résolution des conflits d'empâtement du réseau routier basé sur l'algorithme de (Bader, 2001) et (c.) résultat après déplacement des bâtiments	204
4.31	Déformation du réseau hydrographique pour la résolution de conflit de proximité avec le réseau routier	205
4.32	Exemples d'incohérences hydrographie-relief, entourées en rouge (les figures a., b. et c. sont extraites de (Halbecq, 2007)).	206
4.33	Résultats de remise en cohérence hydrographie-relief par déformation de tronçons hydrographiques	207
4.34	Résultats de remise en cohérence hydrographie-relief par déformation du relief	208
4.35	Généralisation de courbes de niveau	210
4.36	Généralisation de courbes de niveau	211
4.37	Cas limites d'utilisation	215

4.38	Exemple de déformation excessive de courbe de niveau	216
4.39	Exemple de bâtiments déformant le relief dans des directions opposées	222
4.40	Exemple de transfert d'insatisfaction d'un bâtiment à un autre lorsqu'ils déforment un champ dans des directions opposées	222
4.41	Apports du modèle GAEL : (a.) un modèle hybride de généralisation (b.) un modèle pour le prise en compte des relations objet-champ	225
A.1	Relation bâti-relief : un village au sommet d'une colline (cartes : IGN)	231
A.2	Relation bâti-relief : un quartier au sommet d'une colline (cartes : IGN)	233
A.3	Relation bâti-relief : des bâtiment orientés selon la pente (cartes : IGN)	233
A.4	Relation routier-relief : une route qui descend un versant (cartes : IGN)	233
A.5	Relation routier-relief : un chemin qui contourne un sommet (cartes : IGN)	234
A.6	Relation routier-relief : un chemin qui contourne un sommet (cartes : IGN)	234
A.7	Relation routier-relief : une route qui passe un col (cartes : IGN)	234
A.8	Relation routier-relief : un sentier longeant une falaise (cartes : IGN)	234
A.9	Relation routier-relief : un tunnel (cartes : IGN)	236
A.10	Relation hydrographie-relief : des cours d'eau qui coulent dans des talwegs (cartes : IGN)	236
A.11	Relation hydrographie-relief : un lac à cote constante (cartes : IGN)	236
A.12	Relation hydrographie-relief : un canal d'altitude constante (cartes : IGN)	236
A.13	Relation entre relief, réseaux routier et hydrographique	237
A.14	Relation complexe : un sommet coiffé d'une borne et d'un point de vue et desservi par une route (cartes : IGN)	237
A.15	Relation bâti-occupation du sol : un bâtiment occupant une certaine position dans une parcelle d'occupation du sol (cartes : swiss topo)	238
A.16	Relation bâti-occupation du sol : un village en zone boisée (cartes : IGN)	238
A.17	Relations réseaux-occupation du sol : des réseaux (routier et hydrographique) structurant l'occupation du sol (cartes : IGN)	239
B.1	Analogie avec des processus de transformation hybrides : a. évolution du vivant, b. évolution de la surface de la mer	242
B.2	Le continu comme second ordre du discret : analogie avec un développement limité	243
C.1	Un triangle dont l'aire est contrainte	245
C.2	Variation de l'aire du triangle en fonction de la position de P_1	246

Liste des tableaux

1.1	Classification des opérations de généralisation (d'après (Mustière, 2001, chap.A2))	31
2.1	Exemples de champs et de différentes variables associées	79

Bibliographie

- P. Agarwal et R. Abraham, 2003** : Agent-based simulation of cognitive neighbourhoods in large-scale geographical environments. *In 7th International Conference on GeoComputation*, University of Southampton, United Kingdom, 2003.
- T. Ai, 2004** : A generalisation of contour line based on the extraction and analysis of drainage system. *In ISPRS*, Istanbul, Turquie, 2004.
- T. Ai et P. Van Oosterom, 2002** : displacement methods based on field analysis. *In ISPRS, technical commission 2 symposium*, 2002.
- S. Airault, 1996** : De la base de données à la carte : une approche globale pour l'équarissage de bâtiment. *Revue internationale de géomatique*, 6(2-3):203-217, 1996.
- S. Anand, S. Avelar, J. M. Ware et M. Jackson, 2007** : Automated schematic map production using simulated annealing and gradient descent approaches. *In GISRUK'07*, 2007.
- K.-H. Anders et M. Sester, 2000** : Parameter-free cluster detection in spatial databases and its application to typification. *In Comm. IV, ISPRS Congress*, volume 23, Part B4/1, pages 75-82, Amsterdam, 2000. URL <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2000/Anders1573.pdf>.
- M. Arnaud et X. Emery, 2000** : *Estimation et interpolation spatiale*. Hermès, 2000.
- Association Cartographique Internationale, 1973** : *Dictionnaire multilingue de termes techniques de cartographie*. Franz Steiner Verlag, Wiesbaden, 1973.
- T. Badard, 2000** : *Propagation des mises à jour dans les bases de données géographiques multi-représentations par analyse des changements géographiques*. thèse de doctorat en sciences de l'information géographique, université de Marne la Vallée, laboratoire COGIT, 2000. URL <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/>.
- M. Bader, 2001** : *Energy minimization methods for feature displacement in map generalisation*. thèse de doctorat, université de Zurich, 2001.
- M. Bader et M. Barrault, 2000** : Improving snakes for linear feature displacement in cartographic generalization. *In 5th international conference on geocomputation*, Greenwich, United Kingdom, 2000. URL <http://www.geocomputation.org/2000/GC034/Gc034.htm>.
- M. Bader, M. Barrault et R. Weibel, 2005** : Building displacement over a ductile truss. *international journal of geographical information science*, 19(8-9), 2005. Fisher P., Gahegan M., Lees B. (ed.).
-

- M. Bader et R. Weibel, 1997** : Detecting and resolving size and proximity conflicts in the generalisation of polygonal maps. *In 18th International Cartographic Conference*, pages 1525–1532, Stockholm, Sweden, 1997. International Cartographic Association.
- C. Baeijs, 1998** : *Fonctionnalité émergente dans une société d'agents autonomes ; étude des aspects organisationnels dans les systèmes multi-agents réactifs*. Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 1998.
- C. Baeijs, Y. Demazeau et L. Alvares, 1995** : Application des systèmes multi-agents à la généralisation cartographique. *In 3èmes Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents, AFCET & AFIA*, Chambéry, France, 1995.
- B. Baella et M. Pla, 2003** : An example of database generalization workflow : The topographic database of catalonia at 1 :25 000. *In Fifth Workshop on Progress in Automated Map Generalization*, Paris, France, 2003. ICA commission on map generalisation.
- B. Baella, M. Pla, J. Palomar-Vasquez et J. Pardo-Pascual, 2007** : Spot heights generalization : deriving the relief of the topographic database of catalonia at 1 :25 000 from the master database. *In workshop on generalisation and multiple representation*, Moscow, Russia, 2007. ICA. URL http://aci.ign.fr/BDpubli/moscow2007/Blanca_ICAWorkshop.pdf.
- S. Bandini, S. Manzoni et C. Simone, 2002** : Dealing with space in multi-agent systems : a model for situated mas. *In proceedings of AAMAS'02*, pages 1183–1190, Bologne, Italie, 2002.
- X. Barillot, 2002** : mesures et structures d'analyse. *In généralisation et représentation multiple*, chapitre 10, pages 187–200. Hermès Lavoisier, 2002.
- X. Barillot et C. Plazanet, 2002** : *Généralisation et représentation multiple*, chapitre 11 Analyse des formes des routes, pages 203–223. Hermès Lavoisier, 2002.
- M. Barrault, N. Regnauld, C. Duchêne, K. Haire, C. Baeijs, Y. Demazeau, P. Hardy, W. Mackaness, A. Ruas et R. Weibel, 2001** : Integrating multi-agent, object-oriented, and algorithmic techniques for improved automated map generalization. *In 20th international conference of cartography*, volume 3, pages 2110–2116, Beijing, Chine, 2001.
- K. Beard, 1991** : Constraints on rule formation. *In Barbara Bottenfield et Robert McMaster, éditeurs : Map generalisation : making rules for knowledge representation*, chapitre Constraints on rule formation, pages 121–135. Longman Scientific and Technical, Harlow, Essex, 1991.
- I. Benenson et P. Torrens, 2003** : Geographic automata systems : a new paradigm for integrating gis and geographic simulation. *In 7th International Conference on GeoComputation*, University of Southampton, United Kingdom, 2003.
- I. Benenson et P. Torrens, 2005** : Geographic automata systems. *International journal of geographical information science*, 19(4):385–412, 2005.
- J. Bertin, 1967** : *Sémiologie graphique*. Mouton, Gauthier-Villars, 1967.
-

-
- M. Béguin et D. Pumain, 2001** : *La représentation des données géographiques, statistique et cartographie*. Géographie. Armand Colin, 2001. ISBN 2-200-25144-0.
- I. O. Bildirici, 2004** : Building and road generalization with the change generalization software using turkish topographic base map data. *Cartography and Geographic information science*, 31(1):43–54, 2004.
- J. Bobrich, 1996** : *Ein neuer Ansatz zur kartographischen Verdrängung auf der Grundlage eines mechanischen Federmodells*. Thèse de doctorat, München universität, 1996.
- M. Bobzien, I. Petzold et Burghardt D., 2007** : Automated derivation of a 1 :300 000 topographic map from swiss dlm vector 200. In *ICC*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
- A. Boffet, 2000** : Creating urban information for cartographic generalization. In *international Symposium on Spatial Data Handling (SDH)*, pages 3b4–3b16, 2000.
- A. Boffet, 2001** : *Méthode de création d'informations multi-niveaux pour la généralisation cartographique de l'urbain*. thèse de doctorat en informatique, spécialité sciences de l'information géographique, université de Marne La Vallée, laboratoire COGIT, 2001. URL <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/>.
- G. Booch, J. Rumbaugh et I. Jacobson, 1999** : *The unified language user guide*. Addison-Wesley, 1999. URL <http://www.rational.com/uml/>.
- K. Brassel et R. Weibel, 1988** : A review and conceptual framework of automated map generalisation. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2(3):229–244, 1988.
- L. Breton, J.-D. Zucker et E. Clément, 1999** : Une approche multi-agent pour la résolution d'équations en physique des milieux granulaires. In Marie-Pierre Gleizes et Pierre Marcenac, éditeurs : *JFIADSMA '99*. Hermès, Paris, France, 1999.
- H. Brüggeman, 1985** : die topographisch-kartographische datenbank in der standardisierung. In *Nachrichten aus dem Karten-une Vermessungswesen*, numéro 95 in I, page 43, 1985.
- D. Brosset et T. Devogele, 2004** : Algorithmes génétiques et généralisation de mnt marins. In *7ième conférence du GDR SIGMA*, Grenoble, France, 2004.
- A. Buckley et P. Hardy, 2007** : Cartographic software capabilities and data requirements : current status and look toward the future. *Cartography and geographic information science*, 34(2):155–157, 2007.
- G. Ll. Bundy, C. B. Jones et E. Furse, 1995** : Holistic generalization of large-scale cartographic data. In Jean-Claude Müller, Jean-Philippe Lagrange et Robert Weibel, éditeurs : *GIS and generalization*, chapitre 8, pages 106–119. Taylor and Francis, 1995.
- D. Burghardt, 2002** : smoothing of line objects with optimization techniques. In *ISPRS workshop on multi-scale representations of spatial data*, Ottawa, Canada, 2002.
- D. Burghardt, 2005** : controlled line smoothing by snakes. *Geoinformatica*, 9(3):237–252, 2005.
-

- D. Burghardt et A. Cecconi, 2003** : Mesh simplification for building typification. *In fifth workshop on progress in automated map generalisation*, Paris, France, 2003. ICA commission on map generalisation.
- D. Burghardt et S. Meier, 1997** : Cartographic displacement using the snakes concept. *In W. Foerstner et L. Pluemer, éditeurs : Semantic modelling for the acquisition of topographic information from images and maps*. Birkhaeuser verlag, Basel, 1997.
- D. Burghardt, M. Neun et R. Weibel, 2005** : Generalization services on the web - classification and an initial prototype implementation. *Cartography and geographic information science*, 32(4):257–268, 2005.
- B. Buttenfield, 1991** : A rule for describing line feature geometry. *In Barbara Buttenfield et Robert McMaster, éditeurs : Map generalization : making rules for knowledge representation*, pages 150–171. Longman Scientific and technical, Harlow, Essex, 1991.
- U. Camara, M. Antonio, A. Lopez et F. Javier, 2005** : Generalization of urban city-block (built-up areas) maps in raster-vector model. *In International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- J. Carvalho, 1995** : *Extraction automatique d'informations géomorphométriques (réseaux et surfaces enveloppes) à partir de modèles numériques de terrain*. thèse de doctorat, université Paris 7, 1995.
- C. Cauvin, 1998** : Des transformations cartographiques. *Mappemonde*, 1(49):12–15, 1998.
- C. Cauvin, C. Schneider et G. Cherrier, 1989** : Cartographic transformations and the piezopleth maps method. *The Cartographic Journal*, 26:96–104, 1989.
- M. Chabrol et D. Sarramia, 2001** : Modélisation orientée objet et multi-agent du système d'information des systèmes de trafic urbain. *In M.-F. Bruandet, éditeur : formalisme et modèles pour les systèmes d'information*, volume 6 de *Ingénierie des systèmes d'information, ISI-NIS*. Hermès, 2001.
- B. Chaib-Draa, I. Jarras et B. Moulin, 2001** : Systèmes multi-agents : principes généraux et application. *In Jean-Pierre Briot et Yves Demazeau, éditeurs : Principes et architecture des systèmes multi-agents*, chapitre 1. Hermès-Lavoisier, 2001. ISBN 2-7462-0336-7.
- N. Champion, 2007** : A robust algorithm for estimating digital terrain model from digital surface models in dense urban areas. *In ISPRS Conference, Photogrammetric Image Analysis (PIA)*, Munich, Germany, 2007.
- L. Charleux, 2005** : Gwr, maup et lissage par potentiel. *revue internationale de la géomatique, Cassini'04*, 15(Martin, Hervé):195–209, 2005. Hermès Lavoisier.
- O. Chaudhry et W. Mackaness, 2007** : Utilising membership information in the creation of hierarchical geographies. *In workshop on generalisation and multiple representation*, Moscow, Russia, 2007. ICA. URL <http://aci.ign.fr/BDpubli/moscow2007/Chaudhry-ICAWorkshop.pdf>.
-

-
- J. Chen, P. Gong, C. He, W. Luo, M. Tamura et P. Shi, 2002** : Assesment of the urban development plan of beijing using ca-based urban growth model. *Photogrammetric engeneering & remote sensing*, 68(10):1063–1071, 2002.
- V. Chevrier et A. Saint-Dizier, 2005** : L’intelligence en essaim ou comment faire complex avec du simple ? Interstices, 2005. URL http://interstices.info/display.jsp?id=c_7083.
- A.H.J. Christensen, 2003** : Two experiments on stream network generalisation. In *21st International Cartographic Conference*, Durban, South Africa, 2003. International Cartographic Association.
- S. Christophe, 2001** : Analyse des structures urbaines : implémentation d’un outil de détection et de caractérisation des alignements sous le sig lamps2. Mémoire de D.E.A., DEA traitement de l’information spatiale, laboratoire COGIT, Institut Géographique National, 2001.
- S. Christophe et A. Ruas, 2002** : Detecting building alignments for generalisation purposes. In D. Richardson et P. van Oosterom, éditeurs : *10th international symposium on spatial data handling*, pages 121–136, Berlin, Allemagne, 2002. Springer, Heidelberg. ISBN 3-540-43802-5.
- D. Coulot, 2002** : Initiation théorique et pratique à la méthode d’estimation par moindres carrés. Notes de cours, ’Ecole Nationale des Sciences Géographiques, 2002.
- T. J. Cova et M. F. Goodchild, 2002** : Extending geographical repre-sentation to include fields of spatial objects. *International Journal of geographical Information Sciences*, 16(6):509–532, 2002.
- S. Craipeau, 2007** : Connexion des processus de généralisation des réseaux et du bâti : manuel utilisateur. rapport d’évafi, Institut Géographique National, Direction Technique, 2007.
- R. Cuenin, 1972** : *Cartographie générale*. Collections scientifiques de l’institut géographique national, 1972.
- E. Danovaro, L. De Floriani, L. Papaleo et M. Vitali, 2006** : A multi-resolution representation for terrain morphology. In M. Raubal et et al., éditeurs : *GIScience’06*, pages 33–46. springer verlag, 2006.
- J.-M. Dembele et C. Cambier, 2006** : Modélisation à base d’agents de systèmes physiques : exemple de l’érosion côtière. In *JFSMA’06*. Hermès, Paris, France, 2006.
- H. Deng, W. Fang, O. Yang et Y. Li, 2003** : A model of road network generalisation based on genetic algorithms. In *21st International Cartographic Conference*, Durban, South Africa, 2003. International Cartographic Association.
- J. Denègre, éditeur, **2005**. *Sémiologie et conception cartographique*. collection ENSG - IGN. Hermès Lavoisier, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, 2005.
- J. Denègre et F. Salgé, 1996** : *Les systèmes d’information géographique*. Que sais-je ? Presses universitaires de France, 1996.
-

- Departement of geography, university of Zurich, 1999** : Selection of basis measures. Rapport technique DC1, AGENT consortium, 1999.
- J. Dequidt, D. Marchal et Grisoni L., 2005** : Time-critical animation of deformable solids. *Journal of Computer Animation and Virtual Worlds*, 16:177–187, 2005.
- Directive INSPIRE, 2007** : Directive 2007/2/ce du parlement européen et du conseil du 14 mars 2007 établissant une infrastructure d’information géographique dans la communauté européenne. journal officiel de l’union européenne, 2007. URL <http://inspire.jrc.it/>.
- J.-P. Donnay, 2005** : Formalisation des informations géographiques en mode maillé. *Revue internationale de géomatique*, 15(4):415–438, 2005.
- D.H. Douglas et T.K. Peucker, 1973** : Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *In The canadian cartographer*, 1973.
- C. Duchêne, 2004** : *Généralisation cartographique par agents communicants : le modèle CartACom*. thèse de doctorat en informatique, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, laboratoire COGIT, 2004. URL <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/>.
- C. Duchêne, S. Bard, X. Barillot, A. Ruas, J. Trevisan et F. Holzapfel, 2003** : Quantitative and qualitative description of building orientation. *In fifth workshop on progress in automated map generalization*, Paris, France, 2003.
- C. Duchêne et J. Gaffuri, 2008** : Combining three multi-agent based generalisation models : Agent, cartacom and gael. *In SDH’2008*, Montpellier, France, 2008.
- R. Edsall, 2007** : Cultural factors in digital cartographic design : implications for communication to diverse users. *Cartography and geographic information science*, 34(2):121–128, 2007.
- A. Edwardes, 2005** : A conservation law for map space in portrayal and generalisation. *In International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- Y. Egels, éditeur, 2002**. *Photogrammétrie numérique*. Ecole nationale des sciences géographiques, 2002.
- S. El Adouaj, A. Drogoul et S. Espié, 2000** : How to combine reactivity and anticipation : the case of conflicts resolution in a simulated road traffic. *In MABSS’2000 workshop*, LNAI series, Boston, Etats-Unis, 2000. Springer Verlag.
- P. Ellerkamp, 2001** : Simulation de dynamiques spatiales ; exemple de la densification de la population autour d’Šavignon. *In 5ièmes rencontres Théo Quant*, 2001.
- J. Ferber, 1997** : *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*. collection Information Intelligence Artificielle. InterEditions, 1997. ISBN 2-7296-0665-3.
- J. Ferber et A. Drogoul, 1992** : Using reactive multi-agents systems in simulation and problem solving. *In L. Gasser et N. Avouirs, éditeurs : Distributed artificial intelligence : theory and praxis*, pages 53–80. Kluwer academic publishers, Amsterdam, 1992.
-

-
- N. Ferrand, 1998** : Systèmes multi-agents réactifs et résolution de problèmes spatialisés. *Revue d'intelligence artificielle*, 12(1):37–72, 1998.
- S. Filin, N. Abo Kadel, K. Kremeike, M. Sester et Y. Doytsher, 2007** : Interpretation and generalization of 3d landscapes from lidar data. *Cartography and Geographic Information Science*, 34:231–243, 2007.
- H. Firkowski, C.A.P. Carvalho et Sluter C.R., 2003** : Regular grid dem generalisation based on information theory. In *21st international cartographic conference*, Durban, South Africa, 2003. international cartographic association. ISBN : 0-958-46093-0.
- J. Fisher, J. Lowther et C.-K. Shene, 2004a** : If you know b-splines, well you also know nurbs! In *SIGCSE'04*, Norfolk, Virginia, USA, 2004a.
- P. Fisher, J. Wood et T. Cheng, 2004b** : Where is helvellyn? fuzziness of multi-scale landscape morphology. *transactions of the Institute of British Geographers*, 29(1):106–128, 2004b. URL http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/tibg/TRAN_0242.pdf.
- T. Foerster et J. Stöter, 2006** : Establishing an ogc web processing service for generalization processes. In *workshop on generalisation and multiple representation*, Vancouver, United-States, 2006. ICA. URL http://aci.ign.fr/Portland/paper/ICA2006-foerster_stoter.pdf.
- T. Foerster et J. Stöter, 2007** : Towards a formal classification of generalization operators. In *International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
- A.U. Frank et D.M. Mark, 1991** : Language issues for gis. In D. Maguire, M. Goodchild et D. Rhind, éditeurs : *Geographical Information Systems*, volume 1, pages 147–163. Longman, 1991.
- J.-C. François et A. Ribardièrre, 2004** : Qu'apporte l'échelon infracommunal à la carte des inégalités de richesse île-de-france? *Mappemonde*, 75, 2004. URL <http://mappemonde.mgm.fr/num3/art04305.html>.
- E. Fritsch, 1997** : *Représentations de la géométrie et des contraintes cartographiques pour la généralisation du linéaire routier*. thèse de doctorat, université de Marne la Vallée, laboratoire COGIT, 1997.
- T. Gabor, 1999** : *A thorough investigation of digital terrain model generalization using adaptative filtering*. Thèse de doctorat, Ohio state university, 1999.
- J. Gaffuri, 2006** : How to merge optimization and agent based techniques in a single generalisation model? In *workshop on generalisation and multiple representation*, Vancouver, United-States, 2006. International Cartographic Association, commission on map generalisation and multiple representation. URL <http://aci.ign.fr/Portland/paper/ICA2006-Gaffuri.pdf>.
- J. Gaffuri, 2007** : Outflow preservation of the hydrographic network on the relief in map generalisation. In *International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
-

- J. Gaffuri, C. Duchêne et A. Ruas, 2008** : Object-field relationships modelling in an agent-based generalisation model. *In workshop on generalisation and multiple representation*, Montpellier, France, 2008. URL <http://aci.ign.fr/montpellier2008/workshop.php>.
- J. Gaffuri et J. Trevisan, 2004** : Role of urban patterns for building generalisation : An application of agent. *In ICA Workshop on Generalisation and Multiple representation*, 2004.
- M. Galanda, 2001** : Optimization techniques for polygon generalization. *In Fourth ICA workshop on progress in automated map generalization*, Beijing, 2001. ICA commission on automated map generalization.
- M. Galanda, 2003** : *Automated Polygon Generalization in a Multi Agent System*. Thèse de doctorat, Department of Geography, University of Zurich, 2003.
- M. Galanda et R. Weibel, 2002** : An agent-based framework for polygonal subdivision generalization. *In D. Richardson et P. van Oosterom, éditeurs : Advances in spatial data handling, 10th international symposium on spatial data handling*, pages 121–136, Berlin, Germany, 2002. Springer, Heidelberg. ISBN 3-540-43802-5.
- M. Galanda et R. Weibel, 2003** : Using an energy minimization technique for polygon generalisation. *cartography and geographic information science*, 30(3):263–279, 2003.
- J. L. Garcia Balboa, F. J. Ariza Lopez et R. L. Luque, 2005** : Road line classification for cartographic generalization : a neural net approach. *In International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- J. Garrigues, 1999** : Statique des poutres élastiques. cours de l'École Centrale de Marseille, 1999. URL <http://jgarrigues.perso.egim-mrs.fr/>.
- J. Garrigues, 2002a** : Mécanique des milieux continus en déformations finies. cours de l'École Centrale de Marseille, 2002a. URL <http://jgarrigues.perso.egim-mrs.fr/>.
- J. Garrigues, 2002b** : La méthode des éléments finis. cours de l'École Centrale de Marseille, 2002b. URL <http://jgarrigues.perso.egim-mrs.fr/>.
- M. T. Gastner et M. E. J. Newman, 2004** : Diffusion-based method for producing density-equalizing maps. National Academy of Sciences, 2004. URL <http://www.pubmedcentral.gov/articlerender.fcgi?artid=419634>.
- T. Gökgöz et M. Selçuk, 2004** : A new approach for the simplification of contours. *Cartographica*, 39(4), 2004.
- C. Gold et D. Thibault, 2001** : Map generalisation by skeleton retraction. *In 20th International Cartographic Conference*, pages 2072–2081. International Cartographic Association, 2001.
- M. F. Goodchild, 1997** : Representing fields. Core Curriculum in GIScience, National center for Geographic Information and Analysis (NCGIA), Santa Barbara, 1997. URL <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u054/>.
-

-
- D. Gotlib, R. Olszewski et J. Krupski, 2007** : Digital terrain model as a component of the mrdb type reference database in poland. *In International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
- E. Grosso et N. Regnaud, 2005** : warping techniques : a new tool for cartographic generalisation. *In GIS Research UK, 13th annual conference*, university of Glasgow, Scotland, 2005.
- E. Guilbert, 2002** : Détection des conflits entre isobathes en généralisation cartographique. *revue internationale de la géomatique*, 12(4):421–438, 2002. Hermès Lavoisier.
- E. Guilbert, E. Saux et M. Daniel, 2006** : conflict removal between b-spline curves for isobathymetric line generalization using a snake model. *Cartography and geographic information science*, 33(1):37–52, 2006.
- Z. Guo et K. C. Wong, 2005** : Skinning with deformable chunks. *Computer Graphics Forum*, 24(3):373–382, 2005. ISBN / ISSN : ISSN 1067-7055.
- M. Haberkorn, 2004** : *Manuel pratique des sports d'orientation : de l'initiation à la compétition*. Amphora, 2004.
- S. Hahman, B. Sauvage et G.-P. Bonneau, 2005** : Area preserving deformation of multiresolution curves. *In Computer aided geometric design*, 2005.
- X. Halbecq, 2007** : Production des données orographiques pour la nouvelle carte de base. rapport d'évafi, Institut Géographique National, Direction Technique, 2007.
- Y. Hammam, A. Moore, P. Whigham et C. Freeman, 2005** : A generic spatial model based on vector-agents. *In 8th international conference on geocomputation*, Ann Arbor, Michigan, USA, 2005.
- J.-F. Hangouët, 1998** : *Approche et méthodes pour l'automatisation de la généralisation cartographique ; application en bord de ville*. thèse de doctorat, université de Marne La Vallée, laboratoire COGIT, 1998. URL <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/>.
- J.-F. Hangouët, 2000** : Storing voronoï diagrams in geographical databases. *In Geo-Computation'00*, 2000.
- P. J. Hardy, J.-L. Monnot et D. Lee, 2007** : An optimization approach to constraint-based generalization in a commodity gis framework. *In International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
- L. Harrie, 1999** : The constraint method for solving spatial conflicts in cartographic generalization. *Cartography and Geographic Information Science*, 26(1):55–69, 1999.
- L. Harrie, 2001** : *An optimisation approach to cartographic generalisation*. thèse de doctorat, Lund university, Lund institute of technology, department of technology and society, 2001.
- L. Harrie et T. Sarjakoski, 2002** : Simultaneous graphic generalisation of vector data sets. *GeoInformatica*, 6(3):233–261, 2002.
-

- L. Harrie, T. Sarjakoski et L. Lehto, 2002** : A variable-scale map for small-display cartography. *In Joint International Symposium on GeoSpatial Theory, Processing and Applications (ISPRS/Commission IV, SDH2002)*, Ottawa, Canada, 2002.
- J. Hasthorpe et N. Mount, 2007** : The generation of river channel skeletons from binary images using raster thinning algorithms. *In GISRUK'07*, 2007.
- J.-H. Haunert, 2005** : Link based conflation of geographic datasets. *In workshop in generalisation and multiple representation*, la Corona, Spain, 2005.
- J.-H. Haunert, 2007** : Optimization methods for area aggregation in land cover maps. *In International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
- J.-H. Haunert et M. Sester, 2004** : Using a straight skeleton for generalisation in a multiple representation environment. *In ICA/EuroSDR workshop on generalisation and multiple representation*, Leicester, England, 2004.
- J.-H. Haunert et M. Sester, 2005** : Propagating updates between linked datasets of different scales. *In International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- F. Heinzle, K.-H. Anders et M. Sester, 2005** : Graph based approaches for recognition of patterns and implicit information in road networks. *In International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- P. Højholt, 1998** : Solving local and global space conflicts in map generalisation using a finite element method adapted from structural mechanics. *In proceedings of SDH'98*, pages 679–689, 1998.
- P. Højholt, 2000** : Solving space conflicts in map generalisation : using a finite element method. *Cartography and Geographic Information Sciences*, 27(1):65–74, 2000.
- E. Holmes, K. Holme, K. Mäkilä, M. Mattson-Kauppi et G. Mörtvik, 2002** : *The sverige spatial microsimulation model, content, validation, and example applications*. gerum kulturgeografi, Umea university, 2002.
- F. Holzappel et A. Ruas, 2004** : Utilisation de connaissances d'experts pour l'automatisation de la caractérisation des alignements de bâtiments. *In Le Monde des Cartes*, volume 179, 2004.
- S. Horvat, Z. Zeleznjak et M. Jandris-Sacer, 2003** : Generalisation of geographic elements on aeronautical chart. *In 21st International Cartographic Conference*, Durban, South Africa, 2003. International Cartographic Association.
- D. H. House et C. J. Kocmoud, 1998** : Continuous cartogram construction. *In IEEE Visualisation*, Research Triangle Park, 1998. URL <http://www-viz.tamu.edu/faculty/house/cartograms/>.
- F. Hubert, 2003** : *Modèle de traduction des besoins d'un utilisateur pour la dérivation de données géographiques et leur symbolisation par le web*. Thèse de doctorat en informatique, Université de Caen Basse-Normandie, laboratoire COGIT, 2003. URL <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/>.
-

-
- M. Hugentobler, 2004** : *Terrain Modelling with triangle based free-form surfaces*. Thèse de doctorat, University of Zurich, 2004.
- Takeo Igarashi, Tomer Moscovich et John F. Hughes, 2005** : As-rigid-as-possible shape manipulation. *ACM Transactions on Graphics*, 24(3):1134–1141, 2005. ISBN / ISSN : ISSN 0730-0301.
- IGN** : Guide opérateur en généralisation, chapitre ii.
- IGN, 2002** : Bd topo pays, spécifications de contenu. Rapport technique Edition1, Version 1.2, Service des bases de données vecteur, 2002. URL http://www.ign.fr/telechargement/MPro/produit/BD_TOPO/JT_Agglo/DC_BDTopoPays_1_2.pdf.
- E. Imhof, 1982a** : Generalization of contours. *In cartographic relief representation*, chapitre C, pages 126–139. ESRI Press, 1982a.
- E. Imhof, 1982b** : interplay of elements. *In cartographic relief representation*, chapitre 14, pages 325–345. ESRI Press, 1982b.
- R. Inoue et E. Shimizu, 2006** : A new algorithm for continuous area cartogram construction with triangulation of regions and restriction on bearing changes of edges. *Cartography and Geographic Information Sciences*, 33(2):115–125, 2006.
- direction technique Institut géographique national, 1997** : Qualité d'une base de données géographique : concepts et terminologie. bulletin d'information scientifique et technique de l'institut géographique national, numéro 67, 1997. URL <http://recherche.ign.fr/publications.htm>.
- A. Iwaniak et W. Paluszynsky, 2003** : Implementation of a knowledge database for the generalisation of topographic maps in gis systems. *In 21st International Cartographic Conference*, Durban, South Africa, 2003. International Cartographic Association.
- N. Jabeur, 2006** : *A multi-agent system for on-the-fly web map generation and spatial conflict resolution*. thèse de doctorat en informatique, Université Laval, 2006. URL <http://www.theses.ulaval.ca/2006/23356/23356.html>.
- N. Jabeur, B. Moulin et E. Gbei, 2003** : Une approche par compétition d'agents pour la résolution de l'encombrement spatial lors de la généralisation automatique de cartes. *In Jean-Pierre Briot et Khaled Ghédira, éditeurs : JFSMA'03 - RSTI, Déploiement des SMA, vers un passage à l'échelle*. Hermès-Lavoisier, 2003.
- C. Jones, 1997** : Map generalisation. *In Geographical information systems and computer cartography*, chapitre 16, pages 271–289. Addison Wesley Longman, 1997.
- J. Joubran Abu Daoud et Y. Doytsher, 2004** : A combined automated generalization model of spatial active objects. *In ISPRS Commission IV, WG IV/3*, Istanbul, Turkey, 2004.
- J. Joubran Abu Daoud et Y. Doytsher, 2005** : A combined automated generalization model based on the relative forces between apatial objects. *In International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
-

- A. Koch et C. Heipke, 2006** : Intergrating 2d topographic vector with a digital terrain model ; a consistent and semantically correct approach. *In GISRUK'06*, 2006.
- T. Koch, 2004** : The map as intend : variations on the theme og john snow. *Cartographica*, 39(4):1-14, 2004.
- C. J. Kocmoud, 1997** : Constructing continuous cartograms : a constraint-based approach. master's thesis, Texas A&M visualisation laboratory, Texas A&M university, College Station, Texas, 1997. URL <http://www-viz.tamu.edu/faculty/house/cartograms/>.
- C. J. Kocmoud et D. H. House, 1998** : A constraint-based approach to constructing continuous cartograms. *8th international symposium on Spatial Data Handling*, 1:236-246, 1998. URL <http://www-viz.tamu.edu/faculty/house/cartograms/>.
- K. Kremeike, 2004** : Generalization of dense digital terrain models while enhancing important objects. *In International Archive of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume 35, Istambul, Turquie, 2004.
- P. G. Kry, J. Doug L. et K. P. Dinesh, 2002** : Eigenskin : real time large deformation character skinning in hardware. *In ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pages 153-159. ACM Press, 2002.
- S. Lamy, A. Ruas, Y. Demazeau, C. Baeijs, M. Jackson, W. Mackaness et R. Weibel, 1999a** : Agent project : Automated generalisation new technology. *In 5th EC-GIS Workshop*, Stresa, Italy, 1999a.
- S. Lamy, A. Ruas, Y. Demazeau, M. Jackson, W. Mackaness et R. Weibel, 1999b** : The application of agents in automated map generalisation. *In 19th International Cartographic Conference*, Ottawa, Canada, 1999b. International Cartographic Association.
- A. Langlois et M. Phipps, 1997** : *Automates cellulaires - application à la simulation urbaine*. Hermès, 1997. ISBN 2-86601-609-2.
- P. Langlois, 2003** : Anamorphose par transformations pseudo-équivalentes - application à la cartographie thématique. *In 6ièmes rencontres ThéoQuant*, 2003.
- G. Langran, 1991** : Generalization and parallel computation. *In* Barbara P. Buttenfield et robert B. McMaster, éditeurs : *Map generalization : making rules for knowledge representation*, numéro 12 in GISdata1, pages 204-216. Longman scientific and technical, 1991.
- R. Laurini et D. Thompson, 1994** : continuous variation over and in space. *In Fundamentals of spatial information systems*, the APIC series, chapitre 3.5, pages 87-92. academic press, 1994.
- H. Le Men, 1996** : Généralisation cartographique pour l'occupation du sol : application au passage v1 à v2 pour la bd carto. *Revue internationale de géomatique*, 6(2-3):227-248, 1996.
-

-
- F. Lecordix, Y. Jahard, C. Lemarié et E. Hauboin, 2005a** : The end of carto 2001 project : Top100 based on bdcarto database. *In workshop in generalisation and multiple representation*, A Corona, Spain, 2005a. International Cartographic Association, commission on map generalisation and multiple representation.
- F. Lecordix, J.-M. Le Gallic et L. Gondol, 2007a** : Development of a new generalisation flow line for topographic maps. *In workshop on generalisation and multiple representation*, Moscow, Russia, 2007a. ICA.
- F. Lecordix, J.-M. Le Gallic et L. Gondol, 2007b** : Development of a new generalisation flow line for topographic maps. *In International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007b. International Cartographic Association.
- F. Lecordix, C. Plazanet, F. Chirié, J.-P. Lagrange, T. Banel et Y. Cras, 1994** : Placement automatique des écritures d'une carte avec une qualité cartographique. *In sixième rendez-vous européen des acteurs de l'information géographique numérique MARI*, pages 22–32, Paris, France, 1994.
- F. Lecordix, C. Plazanet et J.-P. Lagrange, 1997** : A platform for research in generalization : application to caricature. *geoinformatica*, 1(2):161–182, 1997.
- F. Lecordix, N. Regnaud, M. Meyer et Féchir A., 2005b** : Magnet consortium. *In workshop on generalisation and multiple representation*, A Coruna, Spain, 2005b. ICA, commission on map generalisation and multiple representation.
- D. Lee, 2003** : recent generalisation development and road ahead. *In fifth workshop on progress in automated map generalisation*, Paris, France, 2003. ICA commission on map generalisation.
- C. Legrand, C. Duchêne et F. Lecordix, 2005** : Propagation of the displacements and deformations during a generalisation process. *In International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- C. Lemarié, 2003** : generalisation process for top100 : research in generalisation brought to fruition. *In fifth workshop on progress in automated map generalisation*, Paris, France, 2003. ICA commission on map generalisation.
- B. Li, G. G. Wilkinson et S. Khaddaj, 2001** : Cell-based model for gis generalization. *In Geocomputation'01*, 2001.
- X. Li et A. Gar-On Yeh, 2000** : Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and gis. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2):131–152, 2000.
- Z. Li, H. Yan, T. Ai et J. Chen, 2004** : Automated building generalisation based on urban morphology and gestalt theory. *International Journal of Geographical Information Systems*, 18(5):513–534, 2004. ISSN 1365-8816.
- Z. L. Li, 2007** : Essential operations and algorithms for geometric transformations in digital map generalization. *In International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
-

- W. Lichtner, 1979** : Computer-assisted processes of cartographic generalisation in topographic maps. *geoprocessing*, 1:183–199, 1979.
- W. Liu, J. Chen, Z. Li, R. Zhao et T. Cheng, 2005** : Detection of spatial conflicts between rivers and contours in topographic database updating. *In 4th ISPRS workshop on dynamic & multi-dimensional GIS*, volume 36, Pontypridd, United-Kingdom, 2005.
- W. A. Mackaness, 2006** : Automated cartography in a bush of ghosts. *Cartography and geographic information science*, 33(4):245–256, 2006.
- W. A. Mackaness, 2007** : Understanding geographic space. *In* W.A. Mackaness, A. Ruas et L.T. Sarjakoski, éditeurs : *Generalisation of Geographic information : cartographic modelling and applications*. Elsevier Ltd, 2007.
- W. A. Mackaness et K. Beard, 1994** : Graph theory and network generalization in map design. *In International cartographic conference*, pages 352–362, koln, germany, 1994. ICA.
- W. A. Mackaness et O. Chaudhry, 2005** : exploring representational issues in the visualisation of geographical phenomenon over large scale changes in scale. *In in proceedings of the GIS Research UK, 13th annual conference*, university of Glasgow, Scotland, 2005.
- W. A. Mackaness et G. Edwards, 2002** : The importance of modelling pattern and structure in automated map generalisation. *In Workshop on map generalization*, page 11, Ottawa, Canada, 2002. ACI commission on map generalisation.
- W. A. Mackaness et M. Steven, 2006** : An algorithm for localised contour removal over steep terrain. *The Cartographic Journal*, 43(2):144–156, 2006.
- E. Maillé et B. Espinasse, 2007** : Un cadre de modélisation pour la simulation de dynamiques spatiales complexes. application à l'évolution de la carte du risque d'incendie de forêt. *In SAGEO'07*, 2007.
- D. Manley, R. Flowerdew et D. Steel, 2006** : Scales, levels and processes : studying spatial patterns of british census variables. *Computers, environment and urban systems*, 30:143–160, 2006. URL <http://www.sciencedirect.com/>.
- J. S. Marino, 1979** : Identification of characteristic points along naturally occurring lines; an empirical study. *The canadian cartographer*, 16(1):70–80, 1979.
- A. S. Massasati, 2000** : An exercise in digital elevation/terrain models : From point to mathematics. NCGIA Core Curriculum in GIScience, 2000. URL http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/extra/e001/e001_f.html.
- H. Masuda, Y. Yoshioka et Y. Furukawa, 2006** : Interactive mesh deformation using equality-constrained least squares. *Computers and Graphics*, 30(6):936–946, 2006.
- K. Matuk, C. M. Gold et Z. Li, 2005** : 3d terrain skeleton approximation from contours. *In 4th ISPRS workshop on dynamic & multi-dimensional GIS*, volume 36, Pontypridd, United-Kingdom, 2005.
-

-
- K. Matuk, C. M. Gold et Z. Li, 2006** : Skeleton based contour line generalisation. *In SDH'06*, 2006.
- M. Maugenest, 1949** : La représentation du relief sur les cartes. *In congrés international de géographie*, 1949.
- R. B. McMaster et K. S. Shea, 1988** : Cartographic generalization in a digital environment : a framework for implementation in a gis. *In GIS/LIS'88*, pages 240–249, San Antonio, Texas, USA, 1988.
- R. B. McMaster et K. S. Shea, 1992** : *Generalization in digital cartography*. Association of american geographers, 1992.
- D. Merrick, M. Nöllenburg, A. Wolff et M. Benkert, 2007** : Morphing polygonal lines : a step towards continuous generalization. *In GISRUK'07*, 2007.
- T. Meurisse, 2004** : *Simulation Multi-agent : du modèle à l'opérationnalisation*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, laboratoire LIP6, 2004.
- C. Mezura, M. Occeolo, Y. Demazeau et C. Baeijs, 1999** : Récursivité dans les systèmes multi-agents : vers un modèle opérationnel. *In M-P Gleizes et P. Marcenac, éditeurs : Ingénierie des systèmes multi-agents, actes des 7ièmes journées francophones d'intelligence artificielle distribuée et systèmes multi-agents JFIADSMA '99*, pages 41–52. Hermès, 1999.
- ministère de l'équipement, du logement, des transports et de l'espace et ministère de l'environnement, 1991** : *Environnement et aménagement : cartes utiles*. les éditions du STU, 1991. ISBN 2-11-082059-4.
- M. L. Minsky, 1965** : Matter, minds and models. *International process congress*, 1:45–49, 1965.
- V. Mitropoulos, A. Xydia, B. Nakos et V. Vescoukis, 2005** : The use of epsilon-convex area for attributing bends along a cartographic line. *In International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- J.-C. Müller, 1991** : Generalisation of spatial databases. *In D. Maguire, M. Goodchild et D. Rhind, éditeurs : Geographical Information Systems*, volume 1, pages 457–475. Longman, 1991.
- J.-C. Müller et W. Zeshen, 1992** : Area-patch generalisation : a competitive approach. *Cartographic Journal*, 29(2):137–144, 1992. URL <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=4520978>.
- P. Monier, 1997** : *Caractérisation du terrain en vue de son traitement numérique. Application à la généralisation de l'orographie*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg, laboratoire COGIT, 1997. URL <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/>.
- P. Monier, E. Beauvillain et O. Jamet, 1996** : Extraction d'éléments caractéristiques pour une généralisation automatique du relief. *revue internationale de géomatique*, 6(2–3):191–201, 1996.
-

- M. Monmonier, 1996** : *How to lie with maps ?* University of Chicago press, Chicago, 2nd edition édition, 1996.
- J.-L. Monnot, D. Lee et P. Hardy, 2007** : Topological constraints, actions, and reflexes for generalization by optimization. *In workshop on generalisation and multiple representation*, Moscow, Russia, 2007. ICA.
- S. Mustière, 1998** : Généralisation adaptative du lineaire basée sur la détection d'empatement, application au routier. *In Bulletin d'information scientifique et technique de l'IGN n°75*, Saint Mandé, France, 1998.
- S. Mustière, 2001** : *Apprentissage supervisé pour la généralisation cartographique*. thèse de doctorat en informatique, université Pierre et Marie Curie Paris VI, laboratoire COGIT, 2001. URL <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/>.
- S. Mustière, 2005** : Cartographic generalization of roads in a local and adaptative approach : a knowledge acquisition problem. *international journal of geographical information science*, 19(8–9), 2005. Fisher P., Gahegan M., Lees B. (ed.).
- S. Mustière et B. Moulin, 2002** : What is spatial context in cartographic generalisation? *In Geospatial theory, processing and applications*, volume 34, pages 274–278, Ottawa, Canada, 2002.
- S. Mustière, J.-D. Zucker et L. Saitta, 2000** : Abstraction et changement de langage pour automatiser le généralisation cartographique. *In congrès AFRIF-AFIA, Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*, Paris, France, 2000.
- B. Nakos et V. Mitropoulos, 2003** : Local length ratio as a mesure of critical points detection for line simplification. *In fifth workshop on progress in automated map generalization*, 2003.
- M. Neun et D. Burghardt, 2005** : Web services for an open generalisation research platform. *In workshop on generalisation and multiple representation*, A Coruna, Spain, 2005. ICA commission on generalisation and multiple representation. URL http://aci.ign.fr/Acoruna/Papers/Neun_Burghardt.pdf.
- M. Neun et S. Steiniger, 2005** : Modelling cartographic relations for categorical maps. *In International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- M. Neun, R. Weibel et D. Burghardt, 2004** : Data enrichment for adaptive generalisation. *In workshop on generalisation and multiple representation*, Leicester, England, 2004. ICA/EuroSDR.
- N. J. Obermeyer, 2007** : Gis : the maturation of a profession. *Cartography and geographic information science*, 34(2):129–132, 2007.
- Open GIS consortium** : Geography markup langage (gml) 3.1. source ISO/TC 211/WG4/PT19136.
- Open GIS Consortium, 2001** : Opengis implementation specification : grid coverage. Rapport technique Revision 1.00, OGC, 2001.
-

-
- H. Oudin, 2002** : Méthode des éléments finis. cours de l'école centrale de Nantes, laboratoire mécanique et matériaux, division mécanique des structures, 2002.
- Jean Perdijon, 1998** : *La mesure, science et philosophie*. Perdijon, J., dominos flammarion édition, 1998. ISBN 2 08 035580-5.
- B. Peter, 2001** : Measures for the generalisation of polygonal maps with categorical data. *In fourth ICA workshop on progress in automated map generalisation*, Beijing, China, 2001.
- Platon, 1926** : *Cratylus. Parmenides. Greater Hippias. Lesser Hippias*. Loeb Classical Library, 1926.
- C. Plazanet, 1996** : *Enrichissement des bases de données géographiques : analyse de la géométrie des objets linéaires pour la généralisation cartographique (application aux routes)*. thèse de doctorat en informatique, spécialité sciences de l'information géographique, université de Marne La Vallée, Laboratoire COGIT, 1996. URL <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/>.
- C. Plazanet et M. Spagnuolo, 1998** : Seafloor valley shape modeling. *In Spatial Data Handling 1998*, 1998.
- Projet AGENT, 2001** : Esprit/ltr/24939. site internet, 2001. URL <http://agent.ign.fr>.
- R. S. Purves, P. Clough, C. B. Jones, A. Arampatzis, B. Bucher, D. Finch, G. Fu, H. Joho, A. K. Syed, S. Vaid et B. Yang, 2007** : The design and implementation of spirit : a spatially aware search engine for information retrieval on the internet. *International journal of geographical information science*, 21(6-7):717-754, 2007.
- H. Qian, L. Meng et Zhang M., 2007** : Network simplification based on the algorithm of polarization transformation. *In International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
- H. Qian, F. Wu et H. Deng, 2003** : New methods to map generalisation based on delaunay triangle net and the survival of the fittest theory. *In 21st international cartographic conference*, Durban, South Africa, 2003. international cartographic association. ISBN : 0-958-46093-0.
- P. Raven, G. Johnson, J. Losos et S. Singer, 2007** : *Biologie*. De Broeck, 2007. traduction de Biology, 7th edition.
- N. Regnaud, 1998** : *Généralisation du bâti : structure spatiale de type graphe et représentation cartographique*. thèse de doctorat, université de Provence-Aix-Marseille I, 1998. URL <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/>.
- N. Regnaud, 2003** : Algorithms for the amalgamation of topographic data. *In fifth workshop on progress in automated map generalization*, 2003.
- N. Regnaud, 2005** : Spatial structures to support automatic generalisation. *In International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
-

- N. Regnaud, 2007** : Evolving from automating existing map production systems to producing maps on demand automatically. *In workshop on generalisation and multiple representation*, Moscow, Russia, 2007. ICA. URL <http://aci.ign.fr/BDpubli/moscow2007/Regnaud-ICAWorkshop.pdf>.
- N. Regnaud, A. Fehir, F. Lecordix et Rejkjaer D., 2007** : NmaŠs collaborations on generalisation : The magnet consortium. *In International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
- N. Regnaud et W. A. Mackaness, 2006** : Creating a hydrographic network from its cartographic representation : a case study using ordnance survey mastermap data. *International journal of geographical information science*, 20(6):611–631, 2006.
- P. Revell, 2004** : Building on past achievements : generalising os master map rural buildings 1 :50000. *In ICA/EuroSDR workshop on generalisation and multiple representation*, Leicester, Royaume-Uni, 2004.
- P. Revell, N. Regnaud et T. Stuart, 2005** : Generalising os mastermap topographic buildings and itn road centerlines to 1 :50000 scale using a spatial hierarchy of agents, triangulation and topology. *In International Cartographic Conference*, A Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- M. K. Rieger et M. R. Coulson, 1993** : Consensus or confusion : cartographers' knowledge of generalisation. *Cartographica*, 30(2&3), 1993.
- V. F. Rozhkov, S. V. Koloskov et T. A. Khlebnikova, 2007** : Results of development and problems of automated generalization technology in mapping. *In International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
- A. Ruas, 1998** : A method for building displacement in automated map generalisation. *international journal of geographical information sciences*, 12(8):789–803, 1998.
- A. Ruas, 1999a** : *Modèle de généralisation de données géographiques a base de contraintes et d'autonomie*. Thèse de doctorat en informatique, spécialité science de l'information géographique, Université de Marne la Vallée, laboratoire COGIT, 1999a. URL <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/RUAS/>.
- A. Ruas, 1999b** : Modèle de généralisation de données urbaines à base de contraintes et d'autonomie. *Revue européenne de géographie, Cybergeo*, 107, 1999b. URL <http://www.cybergeo.presse.fr>.
- A. Ruas, 2000** : The roles of meso objects for generalisation. *9th international symposium on Spatial Data Handling*, 3b:50–63, 2000.
- A. Ruas, 2004** : Le changement de niveau de détail dans la représentation de l'information géographique. mémoire d'habilitation à diriger les recherches, spécialité sciences de l'information géographique, université de Marne la Vallée, 2004.
- A. Ruas et C. Duchêne, 2007** : A prototype generalisation system based on the multi-agent system paradigm. *In W.A. Mackaness, A. Ruas et L.T. Sarjakoski, éditeurs : Generalisation of Geographic information : cartographic modelling and applications*, chapitre 14, pages 269–284. Elsevier Ltd, 2007.
-

-
- A. Ruas et W. A. Mackaness, 1997** : Strategies for urban map generalisation. *In 18th International Cartographic Conference*, Stockholm, Sweden, 1997.
- A. Ruas et S. Mustière, 2005** : Bases de données géographiques et cartographiques à différents niveaux de détail. *In Bulletin du comité français de cartographie*, numéro 185, pages 5–14, 2005.
- A. Ruas et C. Plazanet, 1996** : strategies for automated generalization. *In 7th international symposium on spatial data handling*, pages 319–336, Delft, Pays-Bas, 1996.
- S. Russell et P. Norvig, 2006** : *Intelligence artificielle*. Pearson education, 2006.
- N. Sahli et B. Moulin, 2003** : La planification agent dans un environnement dynamique et distribué : entre la réalité et la simulation. *JFSMA 2003, RSTI/hors série*, pages 115–128, 2003.
- T. Sarjakoski et T. Kilpeläinen, 1999** : Holistic cartographic generalisation by least squares adjustment for large data sets. *In ICA workshop on map generalisation*, Ottawa, Canada, 1999. ICA.
- E. Saux, 1999** : *Lissage de courbes par des B-splines. Application à la compression et à la généralisation cartographique*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, faculté des sciences et techniques, 1999.
- E. Saux, 2003** : B-spline functions and wavelets for cartographic line generalization. *Cartography and geographic information science*, 30(1):33–50, 2003.
- E. Saux, R. Thibaud, T. Devogele, R. Béra et E. Guilbert, 2002** : la généralisation des cartes marines. *In A. Ruas, éditeur : généralisation et représentation multiple*, chapitre 17, pages 303–317. Hermès Lavoisier, 2002.
- S. Schaefer, T. McPhail et J. Warren, 2006** : Image deformation using moving least squares. *ACM Transactions on Graphics*, 25(3):533–540, 2006. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1141911.1141920>. ISBN / ISSN : ISSN 0730-0301.
- Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, 1977** : *Cartographic generalisation, topographic maps*. Cartographic publication series. Zürich, 1977.
- Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, 2002** : Topografische karten : kartengrafik und generalisierung, 2002.
- D. Servat, 2000** : *Modélisation de dynamiques de flux par agents. Application aux processus de ruissellement, infiltration et érosion*. Thèse de doctorat, university Paris 6, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), 2000.
- M. Sester, 2000** : Generalization based on least square adjustment. *International archives of photogrammetry and remote sensing*, 23, part B4:931–938, 2000.
- M. Sester, 2005** : Optimization approaches for generalisation and data abstraction. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(8–9):871–897, 2005. Fisher, P. and Gahegan, M. and Lees, B. (ed.).
-

- M. Sester et C. Brenner, 2004** : Continuous generalisation for visualisation on small mobile devices. In Peter Fisher, éditeur : *Developments In Spatial Data Handling*. Springer-Verlag, New York, 2004. ISBN/SKU 3540226109.
- K. Shea et R. McMaster, 1989** : Cartographic generalization in a digital environment : When and how to generalize. In *AutoCarto 9*, pages 56–67, Baltimore, Etats-Unis, 1989.
- O. Simonin et J. Ferber, 2003** : Un modèle multi-agent de résolution collective de problèmes situés multi-échelles. In *JFSMA 2003, RSTI/hors série*, 2003.
- K. Singh et E. Kokkevis, 2000** : skinning characters using surface-oriented free-form deformations. In *Graphics Interface 2000*, pages 35–42, 2000.
- J. Skinberg, 1982** : Principes de la generalisation et la symbolique de la carte topographique. In *La carte topographique*, chapitre 3, pages 53–76. Sedes, 1982.
- W. Song, T. L. Haithcoat et J. M. Keller, 2006** : A snake-based approach for tiger road data conflation. *Cartography and Geographic Information Science*, 33(4):287–298, 2006.
- E. Spiess, 1995** : The need for generalisation in a gis environment. In Jean-Claude Müller, Jean-Philippe Lagrange et Robert Weibel, éditeurs : *GIS and Generalization, methodology and practice*, chapitre 3 The need for generalization in a GIS environment, pages 31–46. Taylor and Francis, 1995.
- G. Stadler, T. Steiner et J. Beiglböck, 2006** : A practical map labeling algorithm utilizing morphological image processing and force-directed methods. *Cartography and geographical information science*, 33(3):53–64, 2006.
- S. Steiniger, 2006** : Classifying urban structures for mapping purposes using discriminant analysis. In *GISRUK'06*, 2006.
- S. Steiniger, D. Burghardt et R. Weibel, 2006** : Recognition of island structures for map generalization. In Rolf A. de By et Silvia Nittel, éditeurs : *14th annual ACM international symposium on Advances in geographic information systems*, pages 67–74, Arlington, Virginia, USA, 2006. ACM. ISBN 1-59593-529-0. URL <http://dblp.uni-trier.de/db/conf/gis/gis2006.html#SteinigerBW06>. ISBN :1-59593-529-0.
- S. Steiniger et S. Meier, 2004** : Snakes : a technique for line smoothing and displacement in map generalisation. In *ICA/EuroSDR workshop on generalisation and multiple representation, Leicester, England*, 2004.
- S. Steiniger et R. Weibel, 2005** : A conceptual framework for automated generalisation and its application to geologic and soil maps. In *International Cartographic Conference, la Corona, Spain*, 2005. International Cartographic Association.
- J. E. Stöter, 2005** : generalisation within nmaŠs in the 21st century. In *International Cartographic Conference, la Corona, Spain, 2005*. International Cartographic Association, 2005.
- S. Thom, 2007** : Automatic resolution of road network conflicts using displacement algorithms orchestrated by software agents. In *workshop on generalisation and multiple representation, Moscow, Russia*, 2007. ICA. URL http://aci.ign.fr/BDpubli/moscow2007/Thom_ICA_Workshop.pdf.
-

-
- N. Thomas, J. M. Ware et C. B. Jones, 2003** : Resolving graphic conflict in scale reduced maps : refining the simulated annealing technique. *In GISRUK'03*, pages 244–248, 2003. session 7a, cartographic visualisation.
- R. C. Thomson, 2006** : The 'stroke' concept in geographic network ; generalization and analysis. *In SDH'06*, 2006.
- W. Tobler, 1986** : Pseudo-cartogramms. *The American Cartographer*, 13(7):43–50, 1986.
- J.-C. Torrel, C. Lattaud et J.-C. Heudin, 2005** : Un modèle multiagents pour l'étude des dynamiques évolutives au niveau cosmologique. *In 7ièmes rencontres nationales des jeunes chercheurs en intelligence artificielle*, Nice, France, 2005.
- P. M. Torrens, 2005** : A behavioural model for simulating agent movement. *In 8th international conference on geocomputation*, Ann Arbor, Michigan, Etats-Unis, 2005.
- K. Toth, 2007** : Data consistency and multiple-representation in the esdi. *In workshop on generalisation and multiple representation*, Moscow, Russia, 2007. ICA. URL <http://aci.ign.fr/BDpubli/moscow2007/Toth-ICAWorkshop.pdf>.
- G. Touya, 2007a** : River network selection based on structure and pattern recognition. *In International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007a. International Cartographic Association.
- G. Touya, 2007b** : A road network selection process based on data. enrichment and structure detection. *In workshop on generalisation and multiple representation*, Moscow, Russia, 2007b. ICA. URL <http://aci.ign.fr/BDpubli/moscow2007/Touya-ICAWorkshop.pdf>.
- G. Touya, 2008** : First thoughts for the orchestration of generalisation methods on heterogeneous landscapes. *In workshop on generalisation and multiple representation*, Montpellier, France, 2008.
- J.-P. Treuil, C. Mullon, E. Perrier et M. Piron, 2001** : Simulation multi-agents de dynamiques spatialisées. *In* Lena Sanders, éditeur : *Modèles en analyses spatiale*, numéro 7, chapitre 7. Simulation multi-agents de dynamiques spatialisées. Hermès, 2001.
- University of Edinburgh, IGN, 1999** : Measures on meso level and organisation. Rapport technique DC3, AGENT consortium, 1999.
- University of Edinburgh, IGN, university of Zurich, 1999** : Specifications for measures on meso level and organisation. Rapport technique DC4, AGENT consortium, 1999.
- M. Van Kreveld, 2001** : Smooth generalisation for continuous zooming. *In fourth workshop on progress in automated map generalisation*, Beijing, China, 2001. International Cartographic Association, commission on map generalisation and multiple representation.
- J. Van Smaalen, 2003** : *automated aggregation of geographic objects*. Thèse de doctorat, Wageningen university, 2003.
-

- D. Vanbergue et A. Drogoul, 2002** : Approche multi-agent pour la simulation urbaine. *In Actes des Journées Cassini*, Brest, France, 2002.
- H.-I. Wang, F. Wu, H.-Y. Deng, L. Ge et Q. Huang, 2005** : The application of mathematical morphology and pattern recognition to building polygon simplification. *In International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- J. M. Ware, S. Anand, G. E. Taylor et N. Thomas, 2006** : Automated production of schematic maps for mobile applications. *Transaction in GIS*, 10(1):25–42, 2006.
- J. M. Ware et C. B. Jones, 1998** : Conflict reduction in map using iterative improvement. *GeoInformatica*, 2(4):383–407, 1998.
- J. M. Ware, C. B. Jones et N. Thomas, 2003** : Automated map generalization with multiple operators : a simulated annealing approach. *international journal of geographical information sciences*, 17(8):743–769, 2003.
- G. Weger, 1997a** : La généralisation cartographique. *In Cours de cartographie*. Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Marne la Vallée, 1997a.
- G. Weger, 1997b** : la représentation du relief. *In Cours de cartographie*, chapitre 7. Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Marne la Vallée, 1997b.
- G. Weger, 1998** : les contraintes du langage cartographique. *In Cours de cartographie*, chapitre 7. Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Marne la Vallée, 1998.
- R. Weibel, 1989** : *Konzepte und Experimente zur Automatisierung des Reliefgeneralisierung*. Thèse de doctorat, geographisches Institut, Zurich Universität, 1989.
- R. Weibel, 1992** : Models and experiments for adaptative computer-assisted terrain generalization. *Cartography and Geographic Information Systems*, 19(3):133–153, 1992.
- R. Weibel et G. Dutton, 1999** : Generalising spatial data and dealing with multiple representations. *In* P.A. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire et D.W. Rhind, éditeurs : *Geographical Information Systems : Principles, Techniques, Application and Management*, volume 1, pages 125–155. Longman, 1999.
- G. Weiss, 1999** : *Multiagent systems. A modern approach to distributed artificial intelligence*. The MIT Press, 1999.
- U. Wilensky, 1998** : Netlogo ants model. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, 1998. URL <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Ant>.
- I. D. Wilson, J. M. Ware et Ware J. A., 2003** : Reducing graphic conflict in scale reduced maps using a genetic algorithm. *In fifth workshop on progress in automated map generalisation*, Paris, France, 2003. commission on map generalisation, International Cartographic Association.
- J. Wood, 1996** : *the geomorphological characterisation of digital elevation models*. Thèse de doctorat, department of geography, university of Leicester, Leicester, England, 1996. URL <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd/>.
-

- S. Ying, L. Lin et Y. Zhang, 2003** : Consistent line simplification based on constraint points. *In 21st International Cartographic Conference*, Durban, South Africa, 2003. International Cartographic Association.
- K. Zaksek et T. Podobnikar, 2005** : An effective dem generalization with basic gis operations. *In workshop in generalisation and multiple representation*, la Corona, Spain, 2005. ICA commission on map generalisation and multiple representation.
- J.-M. Zaninetti, 2005** : approximation et interpolation. *In statistiques spatiales, méthodes et applications géomatiques*, chapitre 10. Hermès-Lavoisier, 2005.
- Q. Zhang, 2004** : Modelling structure and patterns in road network generalization. *In ICA/EuroSDR workshop on generalisation and multiple representation*, Leicester, England, 2004.
- Q. Zhang et L. Harrie, 2006** : Placing text and icons labels simultaneously : a real-time method. *Cartography and geographical information science*, 33(1):53–64, 2006.
- S. Zhou et C. B. Jones, 2004** : Shape aware line generalisation with weighted effective area. *In Peter F. Fisher, éditeur : Developments In Spatial Data Handling*. Springer-Verlag, New York, 2004. ISBN/SKU 3540226109.
-

Publications

J. Gaffuri et J. Trevisan, 2004 : Role of urban patterns for building generalisation : An application of agent. *In ICA Workshop on Generalisation and Multiple representation*, august 2004.

J. Gaffuri, 2005 : Toward a taken into account of the background themes in a multi-agent generalisation process. *In workshop in generalisation and multiple representation*, A Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association, commission on map generalisation and multiple representation. URL <http://aci.ign.fr/Acoruna/Papers/Gaffuri.pdf>.

J. Gaffuri, 2006 : Système multi-agent pour la déformation en généralisation cartographique. *In Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, Annecy, France, 2006c.

J. Gaffuri, 2006 : Deformation using agents for map generalisation - application to the preservation of relationships between fields and objects. *In AutoCarto'06*, Vancouver, United-States, 2006a. ACMS. URL <http://www.cartogis.org/publications/autocarto-2006/gaffuri.pdf/view>.

J. Gaffuri, 2006 : How to merge optimization and agent based techniques in a single generalisation model? *In workshop on generalisation and multiple representation*, Vancouver, United-States, 2006b. International Cartographic Association, commission on map generalisation and multiple representation. URL <http://aci.ign.fr/Portland/paper/ICA2006-Gaffuri.pdf>.

J. Gaffuri, 2007 : Field deformation in an agent-based generalisation model : the GAEL model. *GI-days 2007 - young researches forum*, 30:1–24, September 2007b. URL <http://gi-tage.de/archive/2007/downloads/acceptedPapers/gaffuri.pdf>.

J. Gaffuri, 2007 : Déformation pour la généralisation à base d'agents : le modèle GAEL. *In Bulletin d'information scientifique et technique*. Institut géographique national, 2007a. URL <http://recherche.ign.fr/publications.htm>.

J. Gaffuri, 2007 : Outflow preservation of the hydrographic network on the relief in map generalisation. *In International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, August 2007c. International Cartographic Association.

J. Gaffuri, 2007 : Préservation de l'écoulement du réseau hydrographique sur le relief en généralisation cartographique. *le Monde des cartes, bulletin trimestriel du comité français de cartographie*, 194, 2007d.

J. Gaffuri, C. Duchêne et A. Ruas, 2008 : Object-field relationships modeling in an agent-based generalisation model. *In workshop on generalisation and multiple representation*, Montpellier, France, 2008. URL <http://aci.ign.fr/montpellier2008/workshop.php>.

C. Duchêne et J. Gaffuri, 2008 : Combining three multi-agent based generalisation models : Agent, CartACom and GAEL. *In SDH'2008*, Montpellier, France, 2008.

B. Nakos, S. Mustière et J. Gaffuri, 2008 : A transition from simplification to generalisation of natural occurring lines. *In workshop on generalisation and multiple representation*, Montpellier, France, 2008.

Glossaire

Agent : Entité autonome capable d'agir. Le comportement d'un agent est la conséquence de ses perceptions, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents. Cf. partie 1.3.1.1 page 57.

Agent-champ : Cf. les définitions de *champ*, *agent élastique* et *contrainte objet-champ*. Un agent-champ est un agent élastique qui a pour particularité de partager des relations objet-champ avec les objets géographiques. Pendant le processus de généralisation, l'agent-champ se déforme pour tenter de préserver ces relations.

Agent élastique : Agent géographique ayant la capacité de se déformer. Cette déformation est obtenue par décomposition en objets submicros contraints, suivie de l'activation des agents-point.

Agent géographique : Objet géographique ayant pour objectif de se généraliser.

Agent-point : Points composant la géométrie d'un agent élastique. Ils ont pour objectif d'atteindre une position d'équilibre entre leurs contraintes.

Champ : Ensemble des valeurs prises par une grandeur en tout point de l'espace (cf. partie 2.1.1 page 2.1.1). Dans le modèle GAEL, les champs sont modélisés comme des agents (cf. la définition de *agent-champ*).

Contrainte : Propriété imposée à un caractère (d'après (Ruas, 1999a)).

Contrainte élastique : Contrainte portant sur un agent élastique. Une contrainte élastique est traduite en contraintes submicros et est satisfaite par déformation.

Contrainte relationnelle : Contrainte portant sur une relation entre deux objets.

Contrainte submicro : Contrainte portant sur un caractère d'objet submicro.

Cycle de vie : Succession de tâches effectuées par un agent lors de son activation.

Modèle de généralisation hybride : Modèle de généralisation capable de gérer à la fois des opérations discrètes et continues.

Niveau macro : Niveau des populations d'objets géographiques (d'après (Ruas, 1999a)).

Niveau meso : Niveau des groupes d'objets géographiques (d'après (Ruas, 1999a)).

Niveau micro : Niveau des objets géographiques (d'après (Ruas, 1999a)).

Niveau submicro : Niveau interne des objets géographiques.

Objet submicro : Groupe d'agents-point dont la position relative peut être caractérisée. (NB : les objets submicros ne sont pas des agents).

Opération continue (ou déformation) : Opération de généralisation provoquant un changement de représentation relativement faible pouvant sembler réversible (cf. partie 2.2.2.1) page 95).

Opération discrète : Opération de généralisation provoquant un changement de représentation relativement fort et irréversible (cf. partie 2.2.2.1) page 95).

Relation objet-champ : Relation entre un objet et un champ. Elle est caractérisée par la position de l'objet sur le champ.

Système multi-agents : Ensemble d'agents dont le comportement résulte des interactions entre eux. (cf. partie 1.3.1.1 page 57).

Généralisation automatique pour la prise en compte de thèmes champ : le modèle GAEL

La généralisation de données géographiques est l'opération de simplification de ces données effectuée lors de la diminution de leur échelle de représentation. Cette thèse s'appuie sur le modèle de généralisation automatique à base d'agents de (Ruas et Duchêne, 2007), qui a été mis en œuvre avec succès pour la généralisation des objets géographiques discrets (bâtiments, routes, etc.). L'objectif est de permettre une prise en compte d'un nouveau type de thèmes, appelés « thèmes champ », comme le relief ou l'occupation du sol. Ces thèmes ont pour particularité d'être définis en tout point de l'espace. Nous souhaitons permettre une préservation des relations pouvant exister entre les objets géographiques et les champs, comme par exemple le fait qu'un cours d'eau s'écoule sur le relief.

Pour répondre à cet objectif, nous proposons le modèle de généralisation GAEL (Généralisation à base d'Agents ELastiques) qui permet d'appliquer des déformations aux champs pour préserver les relations objet-champ. Les champs sont modélisés comme des agents, dits élastiques, qui ont la capacité de se déformer pour amortir les opérations de généralisation appliquées aux objets géographiques (bâtiments, routes, etc.). Ces déformations sont obtenues en s'appuyant sur une décomposition des champs en petits éléments contraints (points, segments, triangles, etc.) et sur une modélisation des points composant les champs sous forme d'agents. Couplé au modèle de (Ruas et Duchêne, 2007), le modèle GAEL permet de disposer d'un modèle de généralisation hybride, capable d'effectuer à la fois des opérations discrètes et continues.

Mots clefs : généralisation cartographique, système multi-agents, déformation, champ, modèle GAEL, submicro, géomatique, SIG.

Automated generalisation to take fields into account : the GAEL model

Geographic data generalisation is the process of simplification of these data when their representation scale decreases. This thesis is based on the automated generalisation model of (Ruas et Duchêne, 2007), which has been successfully applied to the generalisation of discrete geographic objects (buildings, roads, etc.). Our purpose is to take into account a new kind of themes, the "field themes", such as the relief and the land use cover. These themes have the specificity to be defined at each point of the space. We aim at preserving the relationships between geographic objects and fields, such as for example, the fact that a river should flow down on the relief.

To reach this goal, we propose a generalisation model called GAEL (Generalisation based on Agents and ELasticity). This model allows to apply deformations to the fields in order to preserve the object-field relationships. Fields are modelled as "elastic agents", which are able to deform themselves to propagate the generalisation operations applied on the geographic objects (buildings, roads, etc.). These deformations are performed by using a decomposition of the fields into small constrained elements (points, segments, triangles, etc.) and by modelling the points composing the fields as agents. Because it is merged with the model of (Ruas et Duchêne, 2007), the GAEL model offers a hybrid generalisation model, able to manage both discrete and continuous operations.

Keywords : map generalisation, multi-agents system, deformation, field, GAEL model, submicro, geoinformatics, GIS.