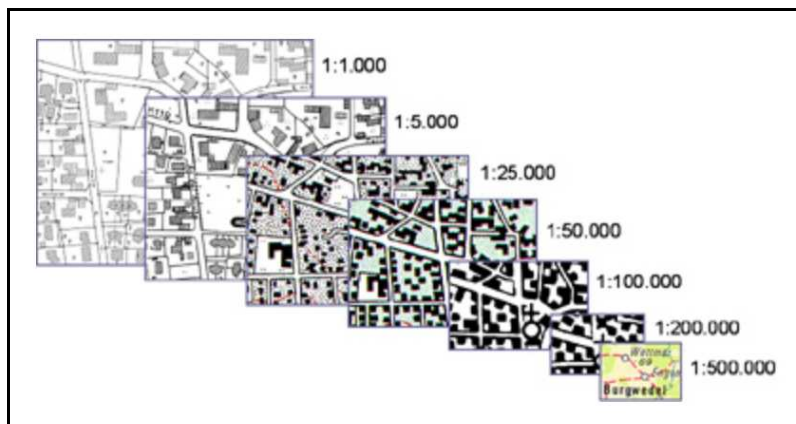




Généralisation Automatique



Julien Gaffuri

Ecole Nationale des Sciences Géographiques
Institut Géographique National – Laboratoire COGIT

octobre 2008

Table des matières

1	Généralisation de données géographiques	5
1.1	Information géographique et cartographie numérique	5
1.1.1	Représentation de l'information géographique	5
1.1.2	Géomatique, SIG et cartographie numérique	7
1.2	La généralisation de l'information géographique	8
1.2.1	Échelle de perception	8
1.2.2	Niveau de détail d'une base de données géographique	9
1.2.3	Généralisation de données géographiques	10
1.2.4	Généralisation cartographique	11
1.2.5	Opérations de généralisation	15
1.2.6	Généralisations de modèle, graphique et cartographique	15
1.2.7	Bases de données géographique et cartographique	17
2	Automatisation de la généralisation	21
2.1	Besoin en généralisation et enjeux de son automatisation	21
2.1.1	Évolution des besoins en données géographiques	21
2.1.2	Progrès des méthodes de généralisation automatique	22
2.1.3	Bénéfices de la production automatique de données généralisées	23
2.2	Algorithmes de généralisation	24
2.2.1	Des algorithmes à plusieurs niveaux	24
2.2.2	Le problème de l'orchestration	25
2.3	Méthodes d'analyse spatiale pour la généralisation	27
2.4	La difficulté de la traduction des besoins utilisateurs	28
2.5	Approches pour l'automatisation du processus	28
2.5.1	Approche par séquence prédéfinie systématique	28
2.5.2	Approches globales	29
2.5.3	Approches locales	32
2.5.4	Synthèse sur les approches	34
3	Généralisation et systèmes multi-agents	37
3.1	Agents et systèmes multi-agent	37
3.1.1	Définitions	37
3.1.2	Exemple : simulation d'une colonie de fourmis	38
3.2	Systèmes multi-agent et généralisation automatique	39
3.3	Le modèle (Ruas et Duchêne, 2007)	40
3.3.1	Les principes	40
3.3.2	Les contraintes	41
3.3.3	Les agents géographiques	44
3.3.4	Les niveaux micro, meso, macro	45
3.3.5	Le modèle CartACom	48
3.3.6	Résultats	49
	Bibliographie	51

Chapitre 1

Généralisation de données géographiques

1.1 Information géographique et cartographie numérique

1.1.1 Représentation de l'information géographique

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 (par exemple un bâtiment décrit par sa nature, son nombre d'étages, sa fonction, etc.) ; cette description peut inclure des relations avec d'autres objets ou phénomènes (par exemple ce bâtiment appartient à telle commune, etc.) ;
- 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 consiste à exprimer directement l'information géographique sous forme littérale en 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.). 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 en facilitent la compréhension. 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.)

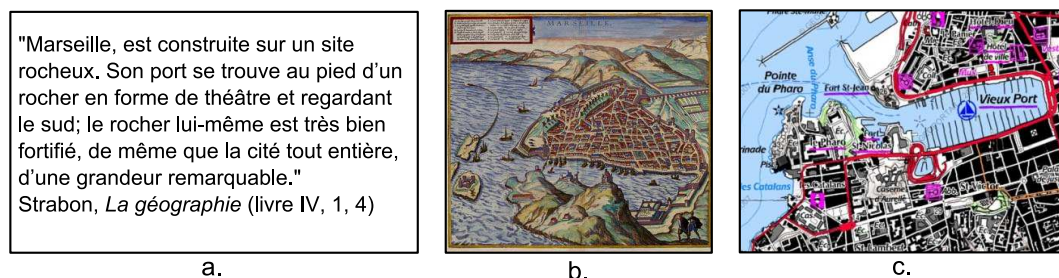


FIGURE 1.1 – Trois représentations de Marseille.

De nos jours, l'information géographique est en majorité 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.

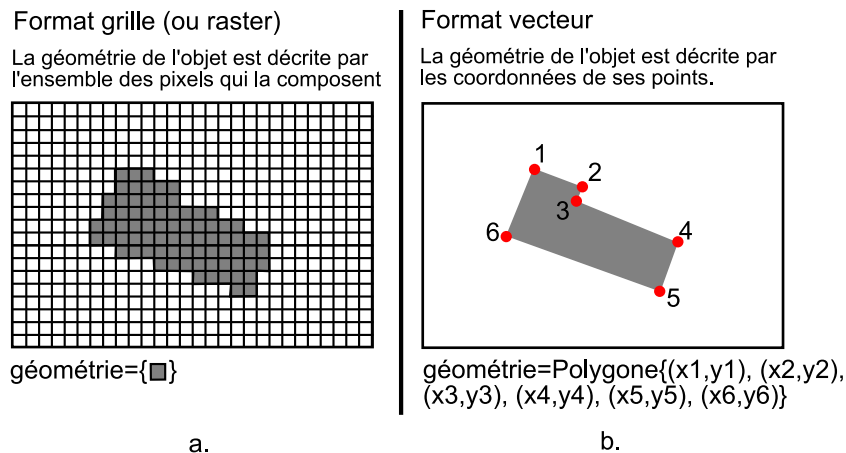
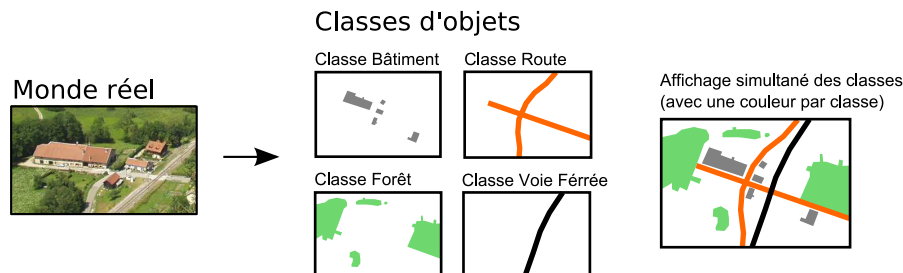


FIGURE 1.2 – Représentation en modes grille et vecteur

Nous nous intéressons ici uniquement aux données géographiques numériques représentées en mode vectoriel. Nous utilisons le terme *base de données géographique* pour désigner une base de données géographique vectorielle plane. Dans ces bases de données, les objets sont classifiés. Une classe rassemble tous les objets représentant des entités géographiques de même nature (par exemple, une classe de bâtiments, de routes, de forêts, de voies ferrées etc. cf. figure 1.3).



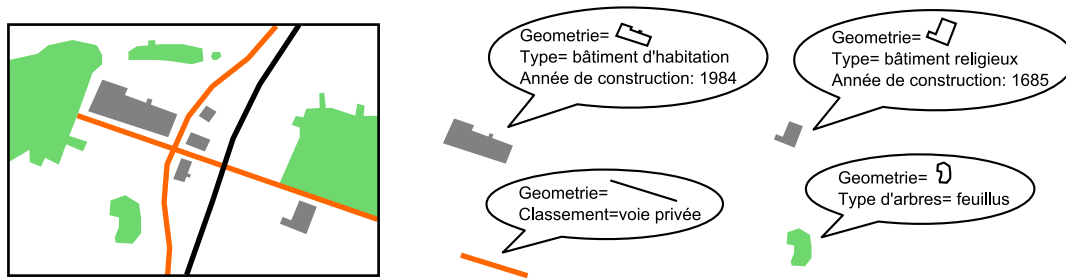


FIGURE 1.4 – Exemples de données attributaires d’objets géographiques

Batiment	Route	Forêt	Voie Ferrée
Géométrie : Surface	Géométrie : Ligne	Géométrie : Surface	Géométrie : Ligne
Année de construction : int	Classement : String	Type d'arbres : String	Largeur : Double
Type : String			

FIGURE 1.5 – Schéma conceptuel de la base de données géographique de la figure 1.3

Ainsi, 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.

1.1.2 Géomatique, SIG et cartographie numérique

Le développement de l’informatique et la constitution de bases de données géographiques a permis le développement de méthodes de traitements informatiques spécifiques aux données géographiques. 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. Les systèmes d’information géographique désignent l’ensemble des moyens (logiciels, données, etc.) utilisés pour la gestion de l’information géographique numérique.

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).

Les méthodes de confection de cartes traditionnelles étaient basées sur le dessin manuel de symboles cartographique à l’aide d’outils graphiques (rotrings, couteaux à graver, etc. cf. figure 1.6) 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 numériques. Ces logiciels permettent d’appliquer automatiquement des symboles aux objets géographiques à partir d’une légende prédéfinie (cf. figure 1.7). Ces symboles peuvent prendre en compte la nature des objets et les valeurs de leurs attribut (par exemple, un bâtiment peut être symbolisé différemment selon son type). Cette étape de symbolisation peut être par ailleurs plus ou moins élaborée.

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).



FIGURE 1.6 – Plumes d’artistes cartographes

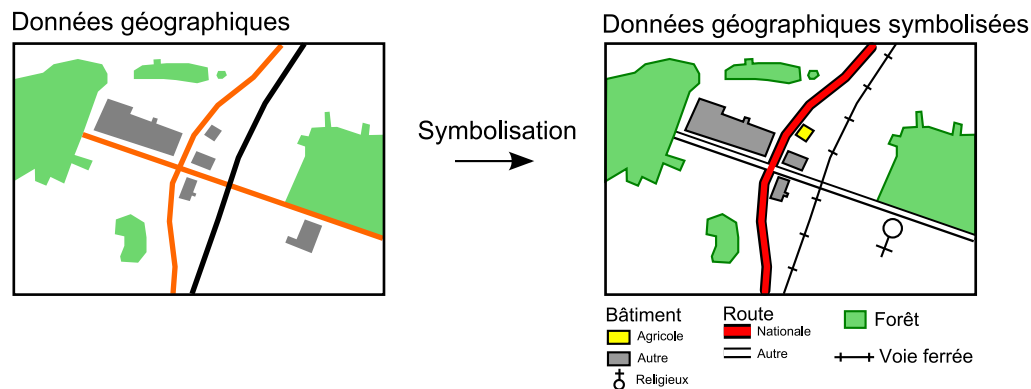


FIGURE 1.7 – Symbolisation automatique de données géographiques

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 géographique, puis le cas particulier de la généralisation cartographique.

1.2 La généralisation de l’information géographique

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 1.8 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 1.8 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 1.8 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 1.8 d.). Si je m’éloigne encore, à partir d’une certaine distance, le pull disparaît (cf. figure 1.8 e.).

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 ; il est 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.

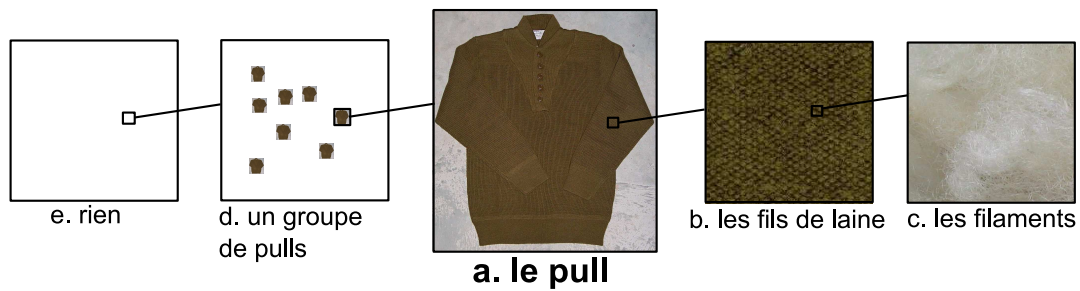


FIGURE 1.8 – Un pull, perçu à différentes échelles

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 page 7 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 ; il 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 1.9 présente un exemple de deux bases de données géographiques ayant des niveaux de détail différents : la BDTopo (a.) a une échelle caractéristique proche de 1 :15 000 ; celle de la BDCarto (b.) est environ 1 :50 000. Les concepts représentés par les deux bases et leur niveau de détail sont différents.

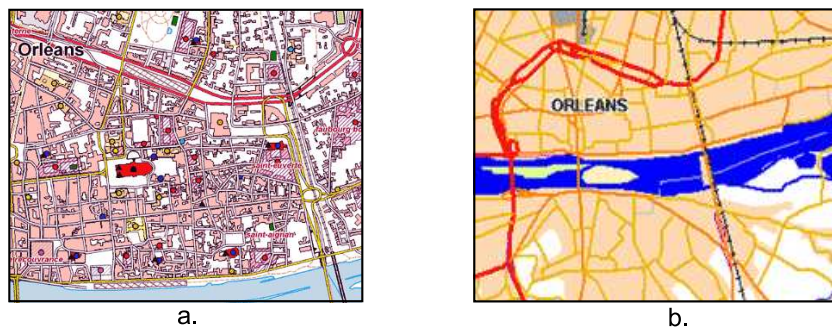


FIGURE 1.9 – Deux bases de données géographiques ayant des niveaux de détail différents. BDTopo IGN (a.) BDCarto IGN (b.)

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) distingue 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 donnée (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 le monde réel de plus en plus finement. Cependant, une base de donnée 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.

1.2.3 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 1.10 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.

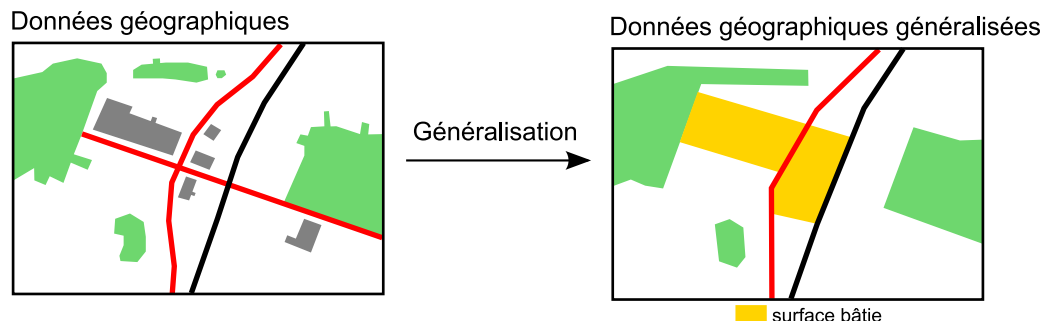


FIGURE 1.10 – Généralisation d'une base de données géographique

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

1.2.4 Généralisation cartographique

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 1.11). Les objets de la carte initiale doivent être transformés pour être adaptés à l'échelle de la nouvelle carte.

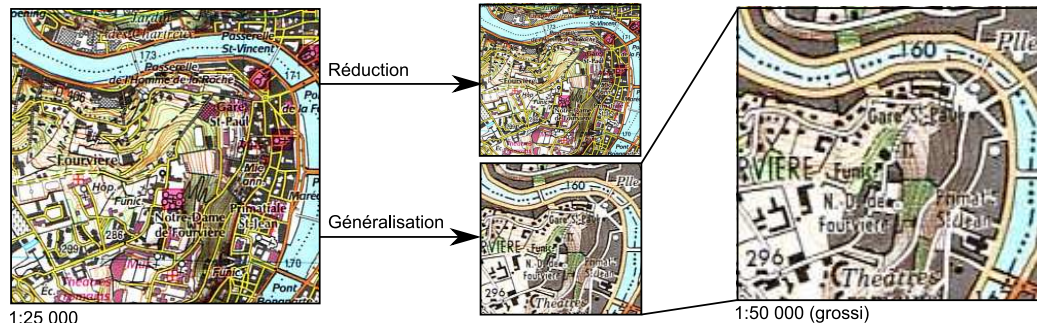


FIGURE 1.11 – Généralisation cartographique du 1 :25 000 au 1 :50 000 (cartes : IGN)

La généralisation cartographique doit prendre en compte des contraintes particulières, appelées **contraintes de lisibilité**. Ces contraintes sont de deux types :

Des contraintes de visibilité L'œil humain est caractérisé par des seuils d'acuité qui limitent la perception visuelle : des objets trop petits ne peuvent être perçus, et des objets trop proches les uns des autres ne peuvent être différenciés. La figure 1.12 permet d'expliquer l'existence de ces seuils. Nous voyons des objets qui nous entourent car ils réfléchissent les rayons lumineux qui les atteignent. Certains de ces rayons pénètrent à l'intérieur de l'œil par l'iris et atteignent la rétine. La rétine est composée de cellules à cônes et à bâtonnets qui transmettent au cerveau via le nerf optique des signaux dépendant de la couleur et de l'intensité des rayons lumineux qui les atteignent. Puisque ces cellules de la rétine ont des tailles finies, des rayons lumineux provenant d'objets trop petits ou trop proches les uns des autres atteignent une même cellule ; ils ne sont pas différenciés par le cerveau, et donc la perception des objets desquels ils proviennent est altérée.

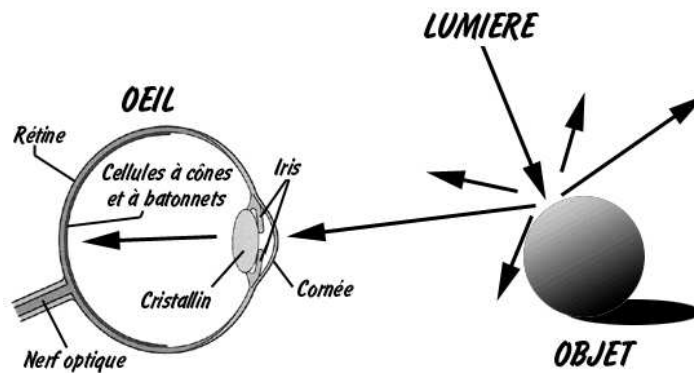


FIGURE 1.12 – Perception visuelle

Même si les valeurs de ces seuils de perception varient d'une personne à l'autre, de nombreux travaux ont visé à déterminer des valeurs limites moyennes. La figure 1.13 présente les valeurs proposées par (Weger, 1998). Il est communément admis que l'œil humain ne peut pas percevoir de détail plus petit qu'une minute sexagésimale

($1^\circ/60$), qui correspond à une taille d'environ un dixième de millimètre pour un objet situé à 30cm de l'œil. Les valeurs des différents seuils dépendent des formes et positions relatives des objets considérés.

CONTRAINTES VISUELLES	REPRÉSENTATION GRAPHIQUE
Acuité visuelle de discrémiation	
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 — 2/10 — 3/10 Ponctuel ■ 2/10
Seuil de différenciation	Ponctuel ● entre 2 paliers le rapport des surfaces doit être au moins de 2 Linéaire — Traits rapprochés écart d'épaisseur 0,1 mm — Traits éloignés 0,3 mm minimum

FIGURE 1.13 – Seuils de visibilité (d'après (Weger, 1998))

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 et détaillés, le message de la carte resterait tout de même difficile à lire, car difficile à appréhender. Une diminution 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.

La figure 1.14 illustre l'importance de cette contrainte. La figure 1.14 a. représente une carte de la répartition des industries dans le Nord-Ouest de la France dont la légende est en figure 1.14 b. Un utilisateur de cette carte souhaitant connaître, par exemple, la répartition des bonnèteries dans cette partie du pays se verra dans l'impossibilité d'obtenir cette information facilement à partir de la carte donnée. Il devra l'analyser visuellement afin d'en extraire une représentation comparable à celle de la figure 1.14 c. qui lui permet de répondre enfin à sa question. Même si les symboles représentés sur cette carte sont tous visibles et différenciables, ils sont trop nombreux et divers pour analysés facilement par le lecteur. L'information représentée doit être simplifiée pour être lisibles.

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 1.15 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, 1982; Skinberg, 1982; Weger, 1997; 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

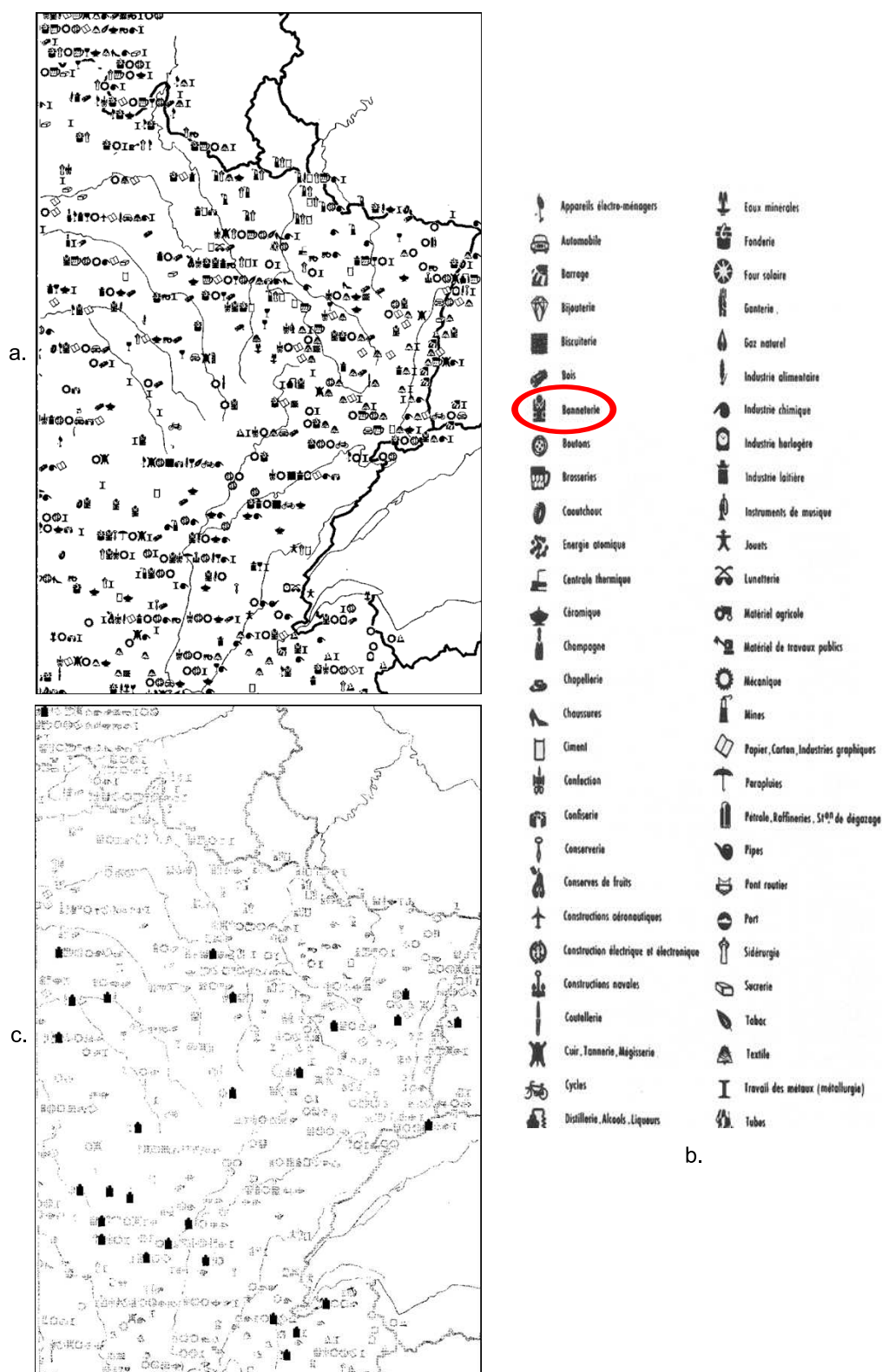


FIGURE 1.14 – Exemple de carte ne prenant pas en compte les contraintes d'interprétation (extrait de (Bertin, 1967))

de données à généraliser étant (presque) unique, seul un processus de généralisation adapté à ces données permet une bonne généralisation.

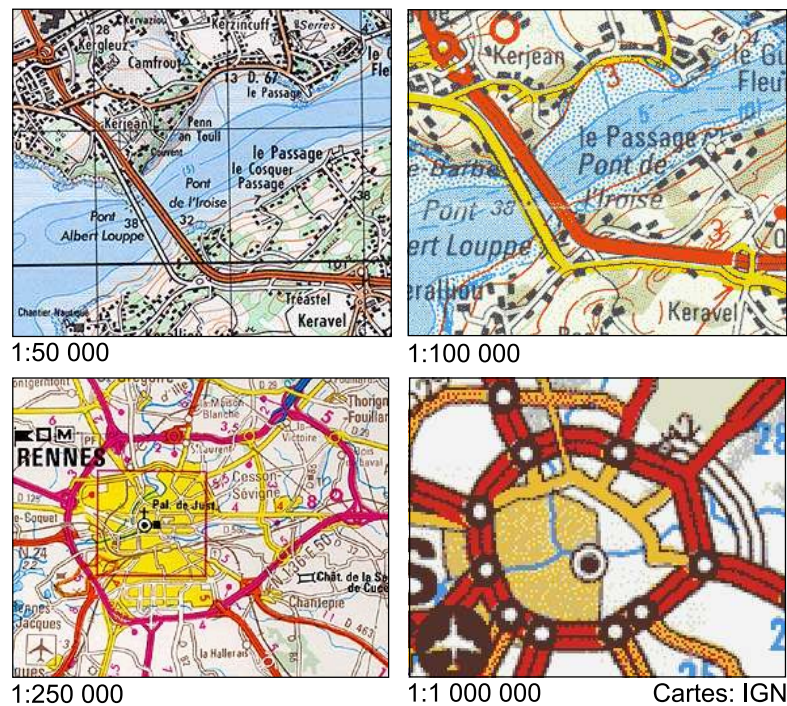


FIGURE 1.15 – Exemples de généralisation cartographique

Qualité de généralisation 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 chacun acceptable. 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 (Haberkorn, 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 1.16 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 1.16 b.) est satisfaisante : aucun conflit cartographique n'est présent. Pour une visualisation à plus petite échelle comme au 1 :50 000 (cf. figure 1.16 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 1.17 montre un autre exemple de symbolisation concernant le réseau routier non généralisé avec des conflits cartographiques.

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.

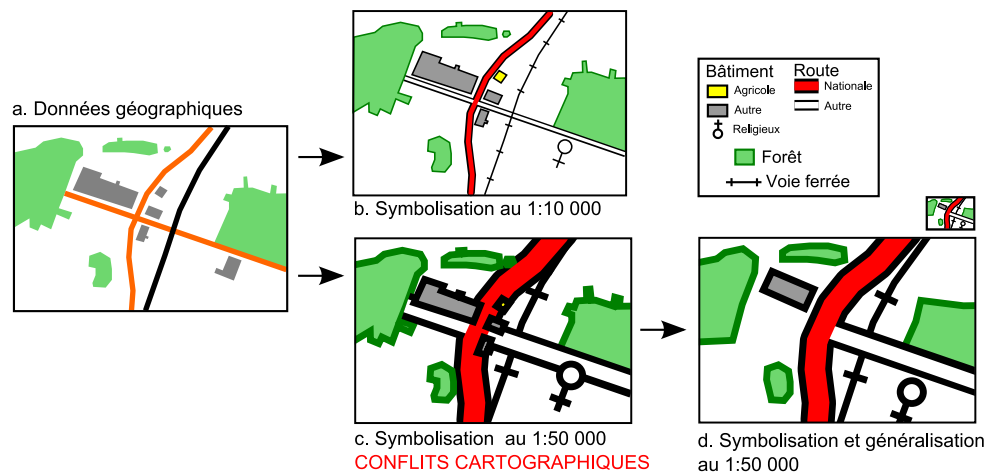


FIGURE 1.16 – Conflits cartographiques en cartographie numérique



FIGURE 1.17 – Conflits cartographiques en cartographie numérique

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).

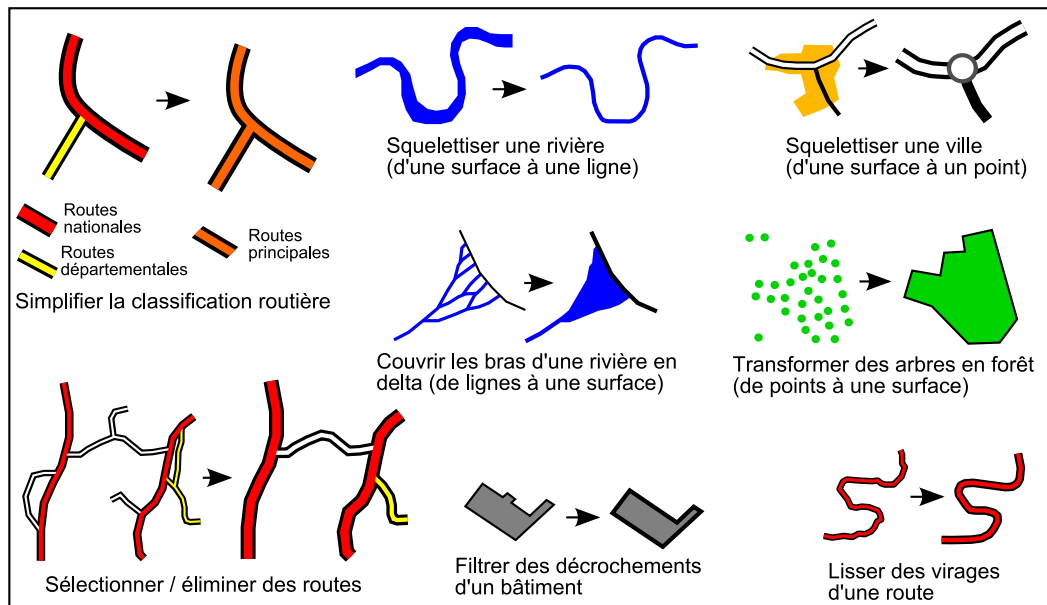
Cette classification s'appuie sur trois grandes familles d'opérations :

- les opérations de **simplification** (cf. figure 1.18 a.) : ces opérations réduisent la quantité d'information. L'information jugée peu ou pas importante est éliminée,
- les opérations de **caricature** (cf. figure 1.18 b.) : ces opérations mettent en valeur l'information. L'information jugée importante est mise en valeur,
- et les opérations d'**harmonisation** (cf. figure 1.18 c.) : ces opérations éliminent des différences entre objets.

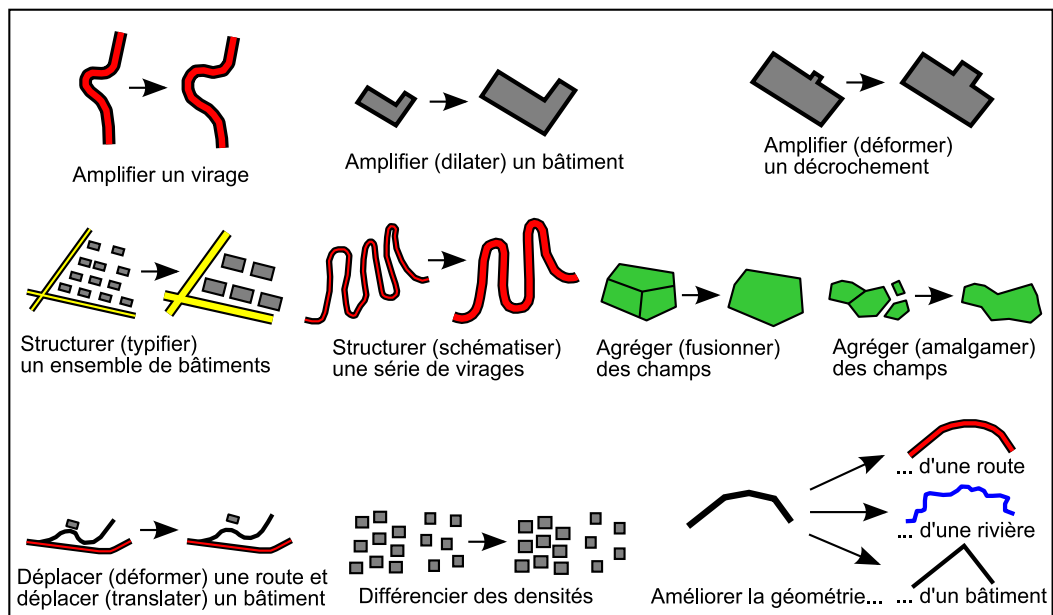
1.2.6 Généralisations de modèle, graphique et cartographique

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 :

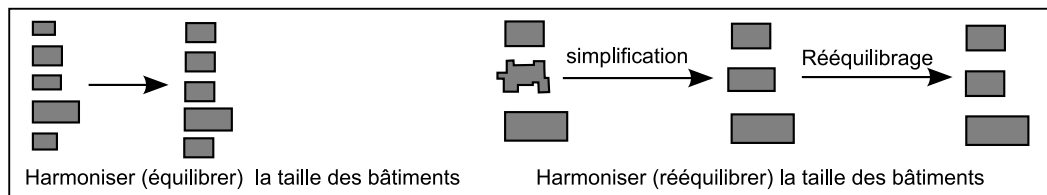
- La **généralisation de modèle** (également appelée *généralisation conceptuelle* dans (Bertin, 1967, p.300) et (Skinberg, 1982, p.64) ou encore *généralisation BD conforme* dans (Ruas, 2004, p.39,40)) : cette généralisation implique un changement dans la façon de modéliser le monde réel. Ses effets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



a. Opérations de simplification



b. Opérations de caricature



c. Opérations d'harmonisation

FIGURE 1.18 – Exemples d'opérations de généralisation (d'après (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 Equarrissage
Harmoniser <i>Gommer les différences</i>	Equilibrage <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))

- 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.

La figure 1.19 illustre l'utilisation de ces types de généralisation. Elle montre l'évolution du niveau de détail de la représentation d'un champ de mines (en ordonnée) en fonction de l'échelle de représentation (en abscisse) : plus l'échelle est petite (vers la droite), moins les représentations sont détaillées. Parmi les changements de représentation effectués lors d'un changement d'échelle, certains correspondent à des généralisations graphiques (seuls quelques objets sont légèrement grossis et déplacés), alors que d'autres correspondent à des généralisations de modèle (les mines ponctuelles sont remplacées par des bassins houillers surfaciques).

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.

1.2.7 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 1.16 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 1.20 a.) et celle de l'objet cartographique (cf. figure 1.20 b.).

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

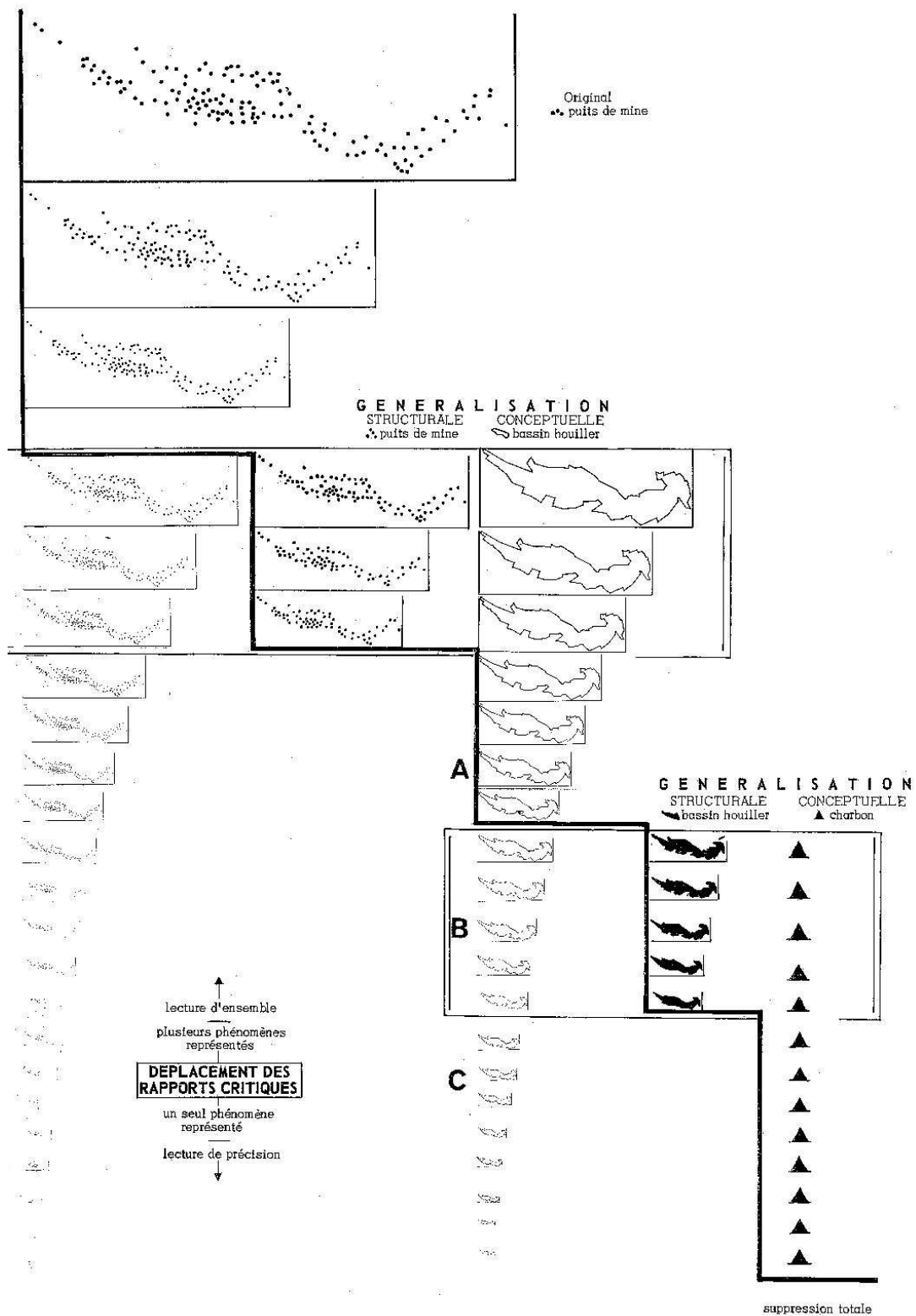


FIGURE 1.19 – (Bertin, 1967, p. 301)

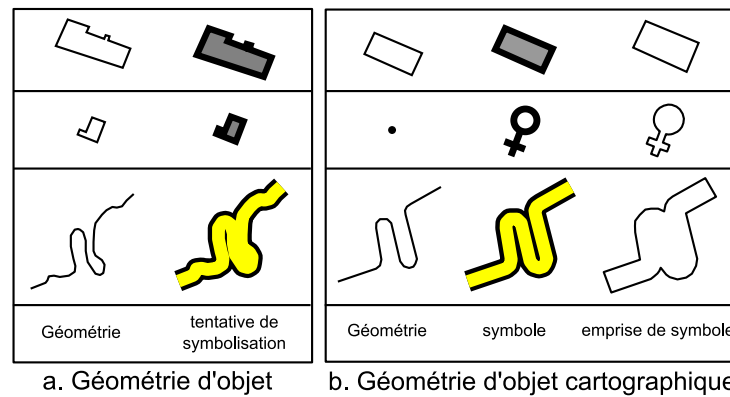


FIGURE 1.20 – Distinction entre géométrie d'un objet et celle d'un objet cartographique

(Brüggeman, 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 un certain niveau de détail et 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 donnée. Les géométries des objets respectent les contraintes de lisibilité pour l'échelle et la symbolisation donnée par la légende. Ce sont des objets cartographiques (cf. figure 1.20 b.). Dans ce cas, les attributs des objets servent uniquement à construire le symbole de chaque objet.

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 1.16 page 15). 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 sur la figure 1.20 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 1.21). Il est d'usage de séparer la généralisation cartographique en généralisation de modèle et généralisation graphique (cf. figure 1.22, 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*.

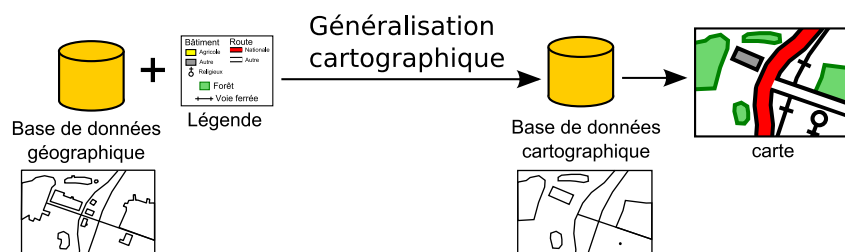


FIGURE 1.21 – La généralisation cartographique numérique : dérivation d'une base de données cartographique à partir d'une base de données géographique

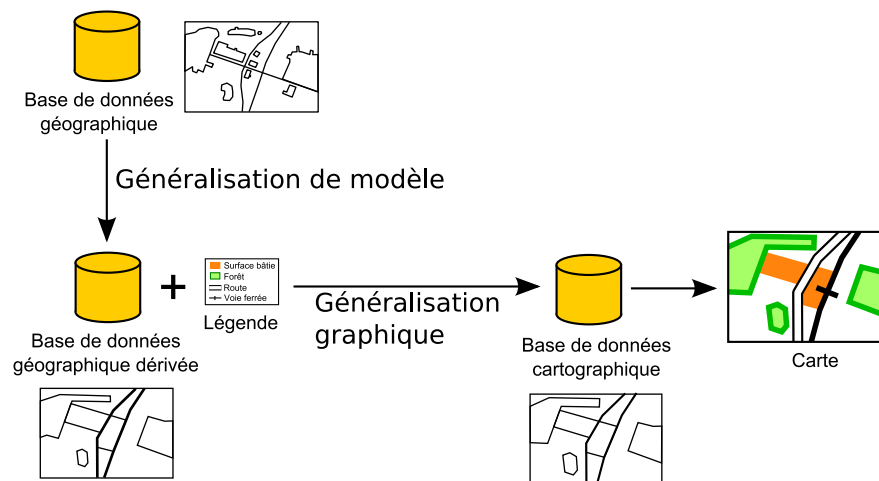


FIGURE 1.22 – Décomposition du processus de généralisation cartographique en généralisation de modèle et généralisation graphique

Nous avons présenté la généralisation de données géographiques ainsi que son cas particulier, la généralisation cartographique. Nous avons souligné la complexité et l'importance de ce traitement pour l'utilisation de données géographiques ou d'une carte. Nous présentons maintenant différentes méthodes visant à automatiser la généralisation à partir de bases de données géographiques vectorielles.

Chapitre 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 automatic process 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 ce processus. Nous insistons particulièrement sur certains travaux à base de systèmes multi agents du laboratoire COGIT.

2.1 Besoin en généralisation et enjeux de son automatisation

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 Ribardi re, 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 structur es 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 ( crans 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)   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 celles concernant la généralisation (cf. figure 2.1). Ces problèmes propres à la cartographie sont souvent négligés au profit d'autres problèmes souvent techniques en apparence plus importants et surtout plus faciles à résoudre. Disposer de méthodes et d'outils de généralisation automatiques est indispensable pour répondre à ce besoin.

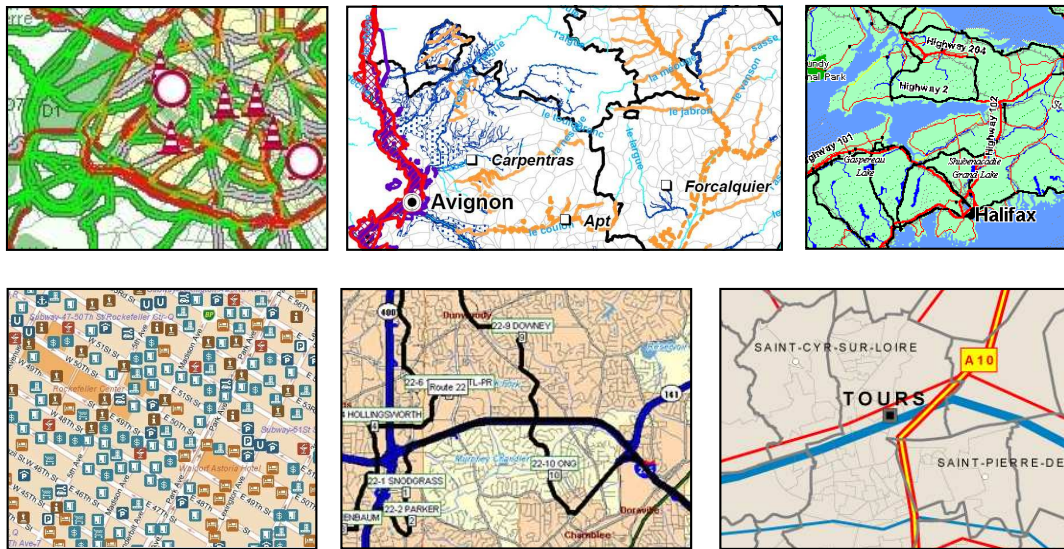


FIGURE 2.1 – Exemples de cartes comportant des défauts de conception cartographiques

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 tiré par un engouement du grand public pour l'information géographique. Les succès du lancement du géoportail en France ou encore de nombreux livres de photographies aériennes de la planète montrent que l'information géographique est très appréciée. Chacun de nous 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 important 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 détails 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 illustré 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.

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 automatiques actuellement disponibles ne permettent pas encore 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 (Le Men, 1996; Lemarié, 2003; Lecordix *et al.*, 2005a, 2007a,b; Touya, 2007b), au Royaume-Uni (Revell, 2004; Revell *et al.*, 2005; Regnaud, 2007; Regnaud *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.

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 2.2 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 beiges). 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).

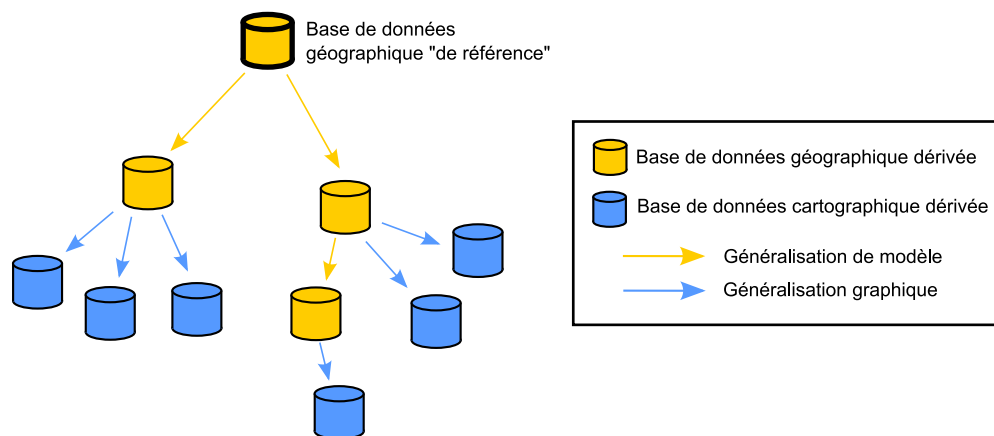


FIGURE 2.2 – Dérivation des bases de données géographiques et cartographiques à partir d'une base de données de référence

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 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 automatiques 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; Regnault, 2007).

Nous avons présenté ici les enjeux de l'automatisation de la généralisation. Nous présentons maintenant différentes approches et méthodes de généralisation automatique.

2.2 Algorithmes de généralisation

2.2.1 Des algorithmes à plusieurs niveaux

La généralisation est un processus de transformation utilisant des opérations présentées en partie 1.2.5 page 15. 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 représentations différentes 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. (NB : Nous ne détaillons pas ici le fonctionnement de ces nombreux algorithmes ; nous présentons uniquement le type d'opération qu'ils permettent d'automatiser. Le lecteur intéressé par certains algorithmes pourra consulter les références données. Bon nombre de ces références sont disponibles sur le site du projet AGENT (<http://agent.ign.fr>) ou encore sur celui de la commission en généralisation et représentation multiple de l'Association Cartographique Internationale (<http://aci.ign.fr/>)).

Algorithmes sur un objet (cf. figure 2.3) 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 relief et permettent de le lisser (Carvalho, 1995; Gabor, 1999; Gökğöz et Selçuk, 2004; Zaksek et Podobnikar, 2005; Danovaro *et al.*, 2006) ou bien de supprimer un thalweg (Ai, 2004).

Algorithmes sur un groupe d'objets (cf. figure 2.4) 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 :

- 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 Regnault, 2005; Bader *et al.*, 2005),
- les algorithmes d'agrégation/amalgamation de bâtiments en groupes de bâtiments (Regnault, 1998, chap. III.2.2), (Regnault, 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).

Algorithmes sur les parties d'objets (cf. figure 2.5) 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

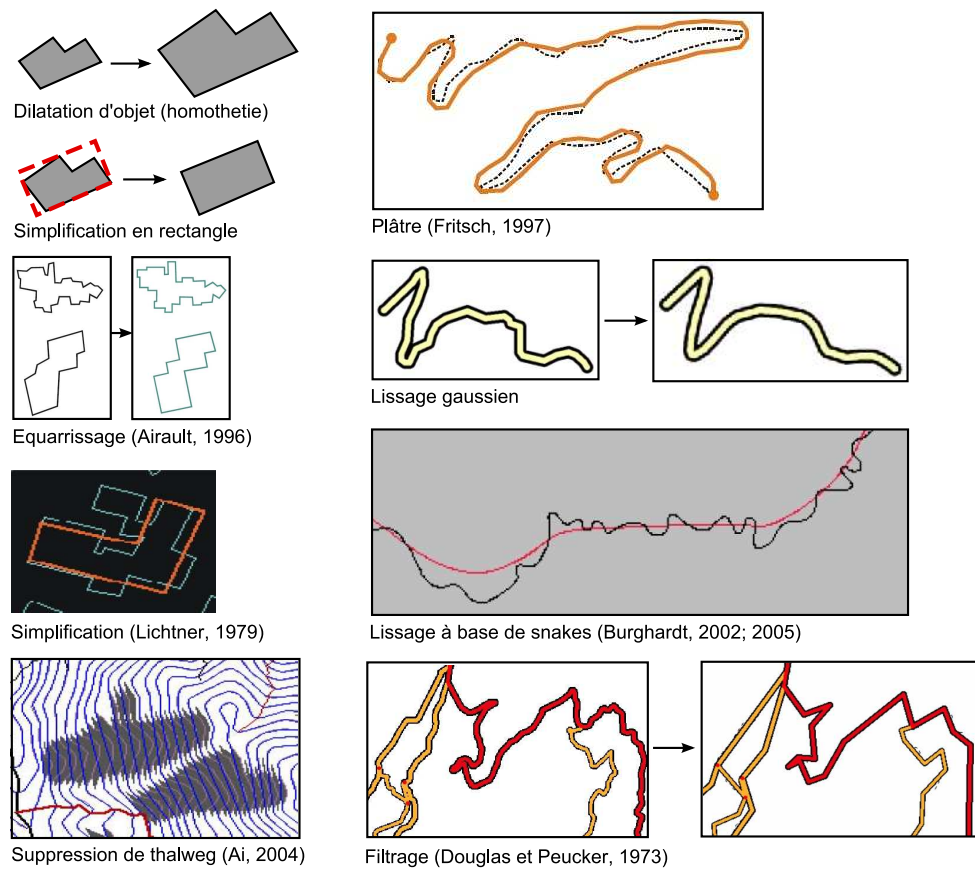


FIGURE 2.3 – Exemples de résultats d’algorithmes sur objets

(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.

Il existe de nombreux algorithmes de généralisation. Notons que plusieurs algorithmes peuvent correspondre à la même opération. Ces algorithmes varient :

- en efficacité (capacité à fournir un résultat satisfaisant),
- en genericité (certains s’appliquent à des bâtiments surfaciques, d’autres à tout type d’objet surfacique),
- et en complexité (compréhension du fonctionnement de l’algorithme et de l’effet de la variation de ses paramètres sur le résultat).

Chronologiquement, la conception d’algorithmes a constitué la première phase de l’automatisation du processus de généralisation. De nombreux travaux actuels 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. Il est de plus en plus admis que les nombreux algorithmes mis au point jusqu’à présent suffisent à l’automatisation des opérations de généralisation de base. Nous présentons maintenant le problème de l’orchestration du déclenchement de ces algorithmes.

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 complète 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

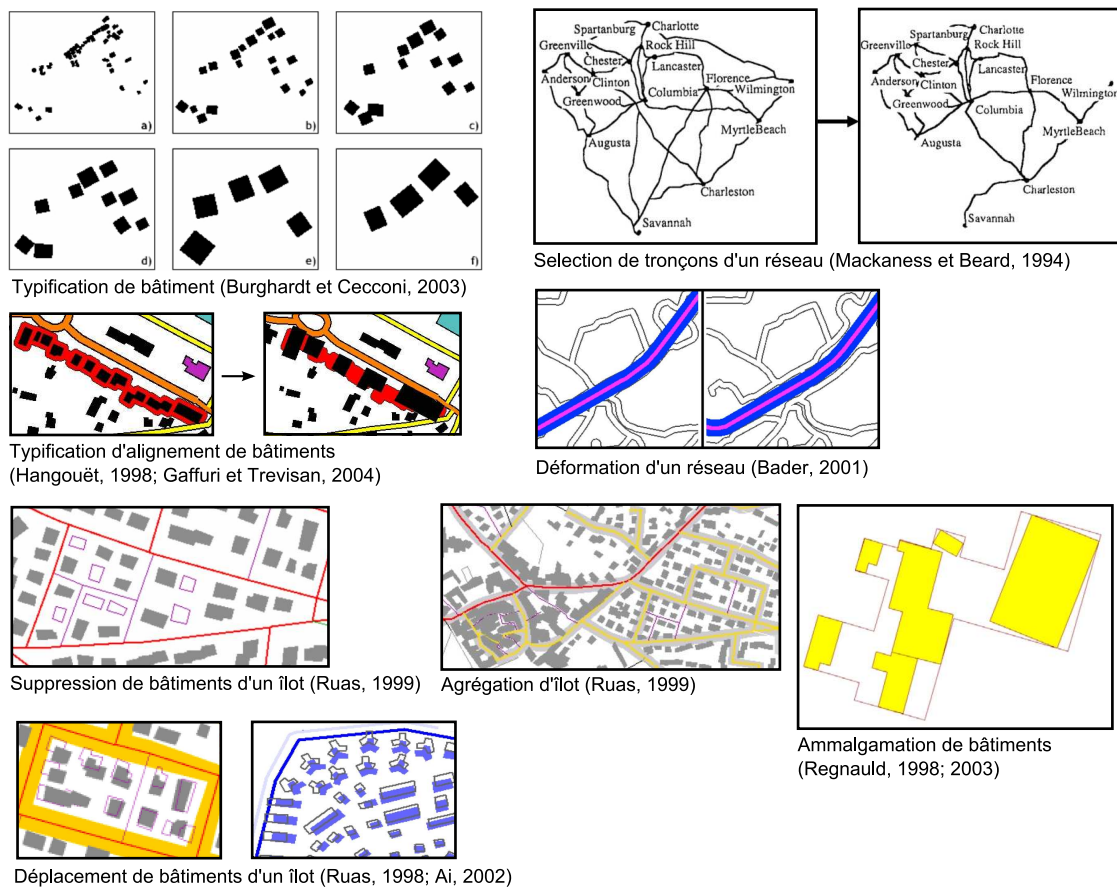


FIGURE 2.4 – Exemples de résultats d'algorithmes sur des groupes d'objets

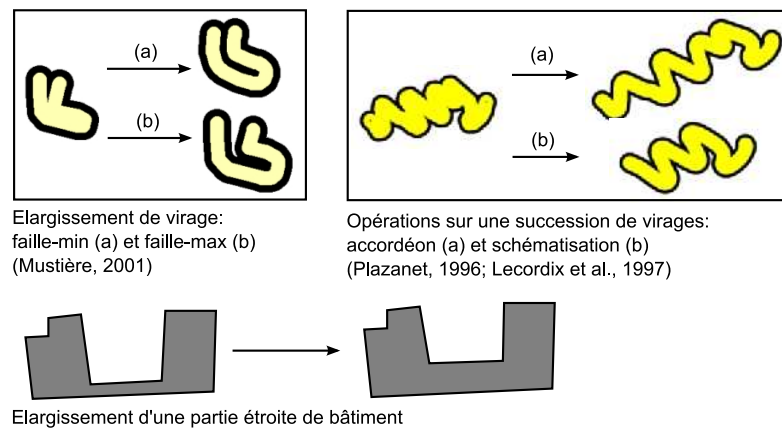


FIGURE 2.5 – Exemples de résultats d'algorithmes sur des parties d'objets

automatiquement à quel(s) objet(s) appliquer quel(s) algorithme(s) et avec quel paramétrage (Shea et McMaster, 1989).

Par exemple, les algorithmes d'élargissement de virage *faille-min* et *faille-max* présentés en figure 2.5 page 26 nécessitent, pour être appliqués correctement, de détecter ces zones de virages empâtées nécessitant d'être élargies. De même, l'algorithme de typification d'alignement de bâtiments de la figure 2.4 page 26 nécessite de détecter au préalable de ces groupes de bâtiments alignés.

Il est fréquent que la conception des méthodes d'analyse spatiale permettant d'appliquer correctement un algorithme soient plus complexes que l'algorithme lui-même. Nous pouvons considérer l'exemple de l'algorithme de déplacement : si cet algorithme est trivial à mettre au point, la méthode permettant une paramétrisation

automatique correcte (c'est à dire permettant de déterminer dans quelle direction et à quelle distance un objet doit être déplacé pour résoudre certains conflits de superposition et/ou proximité avec d'autres objets) est nettement plus complexe.

Nous présentons maintenant certains travaux d'analyse spatiale visant à caractériser des données géographiques dans le but de les généraliser.

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. Un système de généralisation automatique doit ainsi être capable de comprendre les données à généraliser (Neun *et al.*, 2004; Mackaness, 2007). (Mackaness et Edwards, 2002), compare l'espace géographique et ses objets à un palimpseste de structures organisées que le cartographe est capable de percevoir et qu'il utilise pour généraliser. Des méthodes d'analyse spatiale doivent être utilisées pour *révéler* ce palimpseste automatiquement 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 ».

(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 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; Regnauld, 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; Heinzle *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; Monier *et al.*, 1996; Monier, 1997; Plazanet et Spagnuolo, 1998; Fisher *et al.*, 2004; 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 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). Notons aussi 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.

2.4 La difficulté de la traduction des besoins utilisateurs

Nous présentons dans cette partie un obstacle important à l'automatisation de la généralisation. Cet obstacle concerne la difficulté de paramétrer un système de généralisation en fonction des besoins particuliers d'un utilisateur.

Importance de la traduction des besoins utilisateurs 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. Une 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 maintenant répandu de traduction 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 souhaité des données géographiques à la fin du processus de généralisation. Elles permettent de guider le processus automatique 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. L'utilisation de contraintes nécessite de disposer de mesures d'analyse spatiales pour permettre l'évaluation de l'état de satisfaction de chaque 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 modèle d'aide à la saisie de spécifications utilisateur pour un processus de généralisation automatique. Le principe de cette méthode est de montrer à l'utilisateur des échantillons de données généralisés avec des contraintes et des paramètres différents, et de lui permettre d'évaluer qualitativement la qualité de ces échantillons (en fonction de son besoin) : l'utilisateur note ce que le système lui propose. En fonction des préférences fournies par l'utilisateur, le système détermine une paramétrisation optimale en fonction des paramètres ayant permis d'obtenir les échantillons les mieux notés par l'utilisateur.

2.5 Approches pour l'automatisation du processus

De nombreux modèles de généralisation ont été mis au point pour permettre d'automatiser le processus de généralisation. Nous présentons dans cette partie différentes approches utilisées, avec des exemples de travaux pour certaines d'entre elles. Cette classification s'appuie en partie sur celle proposée par (Duchêne, 2004, chap.A3).

2.5.1 Approche par séquence prédéfinie systématique

L'approche par séquence prédéfinie systématique consiste à prédéfinir des séquences figées d'algorithmes à déclencher sur des objets. Les algorithmes spécifiés sont appliqués automatiquement les uns après les autres sur les objets spécifiés, avec des paramètres prédéfinis. 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 2.6). 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.

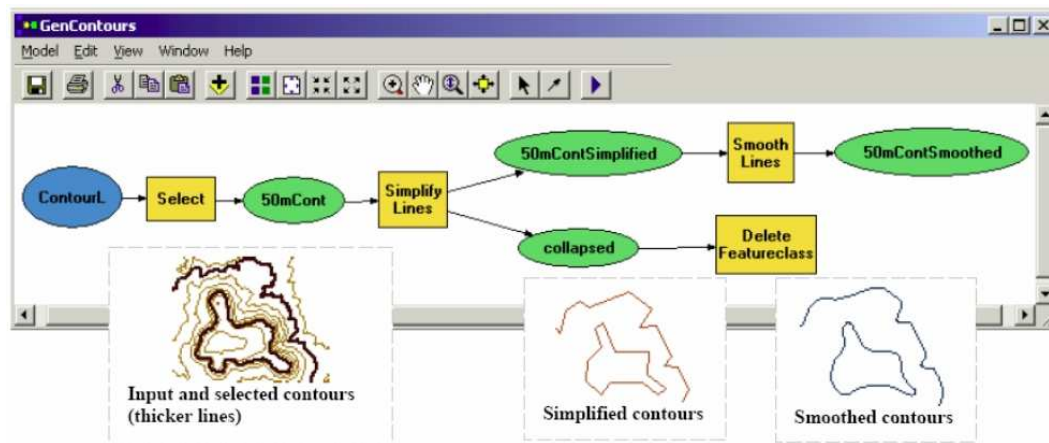


FIGURE 2.6 – Mise au point d’une suite de traitements prédéfinis (outils ModelBuilder du logiciel ArcGIS 9.1, d’après (Lee, 2003))

Cette approche nécessite de disposer d’algorithmes de généralisation. Son avantage essentiel est sa simplicité de mise en œuvre : les algorithmes sont simplement 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.

2.5.2 Approches globales

La transformation d’un objet géographique pendant le processus influençant ses objets voisins, il semble judicieux de prendre en compte l’espace géographique dans sa globalité pour le généraliser. Cette approche propose de prendre en compte cet aspect holistique de la généralisation en cherchant un état optimum de l’ensemble des données. Le processus de généralisation est traduit sous la forme d’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. Pour une valeur extrême de cette fonction (un maximum ou un minimum suivant sa définition), l’état de généralisation est considéré comme meilleur.

Différents travaux sont basés sur cette approche. Nous en présentons certains, classés suivant la méthode de recherche de maximum de 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 surcontraint 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 calculer la valeur du vecteur inconnu du système qui minimise la norme du vecteur des résidus. La fonction donnant cette valeur joue un rôle de fonction d’évaluation, dont la valeur doit être la plus petite possible. Le vecteur inconnu minimisant la fonction de cout est déterminé 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) proposent des adaptations de cette méthode au processus de généralisation automatique. Le principe de ces méthodes est de traduire chaque contrainte portée par les données par une ou plusieurs équations portant sur les coordonnées des points composant les géométries des objets concernés par la contrainte. 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 une étape obligatoire de linéarisation des équations, une solution moyenne est calculée par moindres carrés ((Harrie et Sarjakoski, 2002) détermine cette solution par itérations successives en utilisant la méthode du gradient conjugué). Cette solution fournit une position de tous les points qui satisfait au mieux toutes les contraintes. Cette nouvelle position correspond à un équilibre entre les différentes contraintes. Cet équilibre peut être pondéré, si on considère que certaines contraintes sont plus importantes que d'autres, par l'intermédiaire de la matrice des poids de la méthode des moindres carrés : une contrainte plus importante se verra affectée un poids plus fort pour ses équations correspondantes.

Les figures 2.7 a. et b. présentent un résultat de cette méthode. Par exemple, sur la 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.

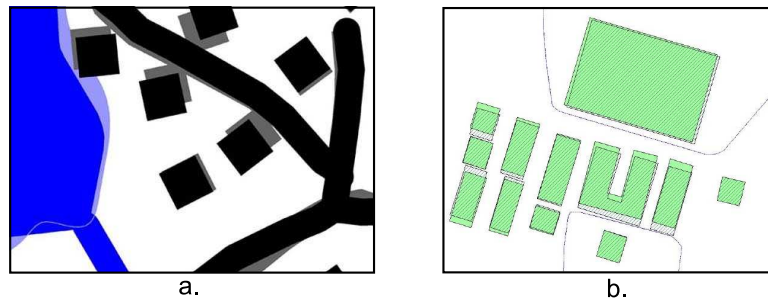


FIGURE 2.7 – Exemple de généralisation par moindres carrés. D'après a. (Harrie, 2001) et b. (Sester, 2000)

Généralisation basée sur la méthode des éléments finis La méthode des éléments finis est une méthode de simulation numérique 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 un état d'équilibre d'un objet déformable soumis à des contraintes de déformation (Garrigues, 2002a). Le principe de cette méthode est de traduire l'équation différentielle à satisfaire au niveau de petites parties composant l'objet, les éléments finis. Le problème à résoudre est traduit au niveau des éléments finis pour être résolu à travers une inversion de matrice (Garrigues, 2002b, p.9).

De nombreux travaux proposent d'adapter cette méthode à la généralisation. Le principe de ces travaux est de modéliser les objets géographiques comme des objets réels déformables. Les données à généraliser sont caractérisées par une valeur souvent comparée à une énergie. Cette énergie est composée de deux termes :

- une énergie *interne*, qui traduit la différence entre les données dans leur état courant et dans leur état initial. Dans l'état initial, cette énergie est nulle. Plus les données sont modifiées, plus cette valeur est forte. Ce terme exprime donc l'écart des données à leur état initial,
- une énergie *externe*, qui traduit le manque de lisibilité des données. Plus l'état courant des données comporte de conflits cartographiques de lisibilité, plus cette valeur est importante. Dans l'état initial, ce terme est important.

L'objectif de cette approche est de permettre de minimiser la valeur de l'énergie totale des données. Cette valeur minimale correspond à un état d'équilibre entre contraintes de préservation de forme (l'énergie interne) et contraintes de lisibilité (énergie externe). Dans l'état final, l'énergie interne a augmenté (les données ont été transformées) et l'énergie externe a diminué (des conflits ont été résolus).

(Højholt, 1998, 2000) propose par exemple de modéliser une carte comme une surface élastique déformable. Des paramètres de rigidité sont alloués aux objets de la carte en fonction de leur contraintes. Par exemple, des objets surfaciques trop petits ou fins seront incités à 'gonfler' (comme par exemple les tronçons routiers). L'espace

vide entre les objets joue le rôle d'une surface déformable qui permet de propager et amortir les transformations de certains objets. La carte est ainsi décomposée en une partition triangulaire (cf. figure 2.8 a.). Une position d'équilibre des points des géométries est calculée par la méthode des éléments finis (cf. figure 2.8 b.). Au résultat, l'ensemble des objets de la carte ont été déformés pour résoudre les conflits cartographiques.

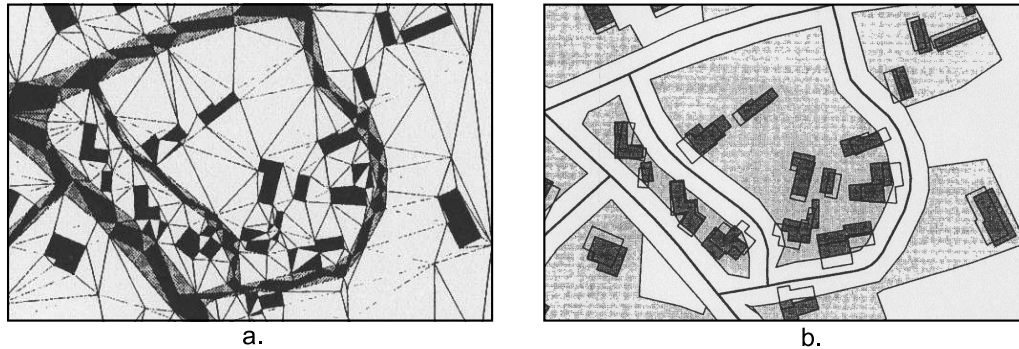


FIGURE 2.8 – Exemple de généralisation par la méthode des éléments finis. D'après (Højholt, 1998)

La méthode des éléments finis a également été appliquée avec succès 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 poutres 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 incitent l'objet à conserver sa forme) et des forces internes (qui incitent l'objet à se déformer pour satisfaire des contraintes cartographiques). La figure 2.9 montre un résultat de ces travaux issus de (Bader, 2001). Sur la 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 cette même modélisation.

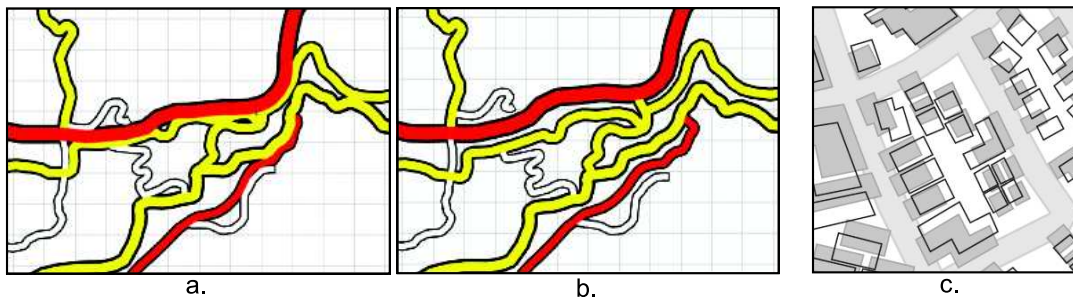


FIGURE 2.9 – Exemple de généralisation par déformation par poutres élastiques (Bader, 2001)

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 atteindre progressivement des états voisins d'un état courant pour lesquels la valeur de la fonction de coût est meilleure (Ferber, 1997, chap. 4.9, p.216), (Russell et Norvig, 2006, chap. 4.3.1, p.126) : l'état voisin de l'état courant permettant la plus forte amélioration de la fonction de coût est choisi comme nouvel état, et ainsi de suite. 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 présentée dans (Russell et Norvig, 2006, chap.4.3.2 p.130) permet de palier 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 2.10 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 2.10 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.

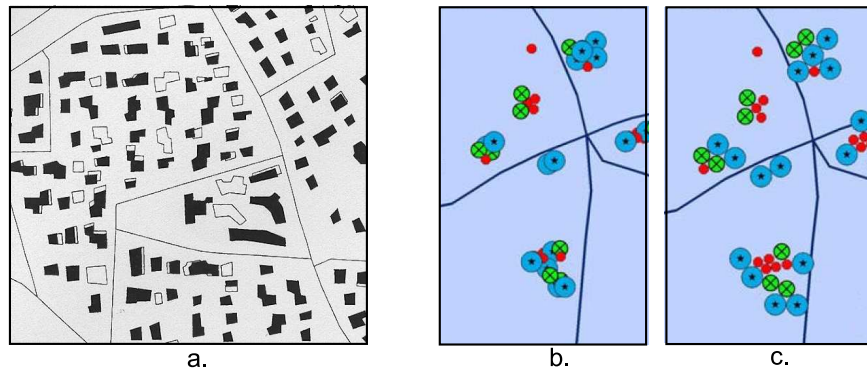


FIGURE 2.10 – Exemple de généralisation par recuit simulé; d'après (Ware *et al.*, 2003) (a.) et (Monnot *et al.*, 2007) (b. et c.)

L'obstacle principal à l'utilisation de ces méthodes à base d'exploration par escalade et de recuit simulé en 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 données), 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. Nous verrons en partie 3 que l'approche à base d'agents géographiques pallie ces défauts.

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 (exploration dites 'en faisceau'), et que les états successifs sont produits par combinaison d'états courants. Les états courants les meilleurs, 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, comme pour tous les travaux s'inscrivant dans l'approche globale, de la difficulté de concevoir une fonction de coût traduisant efficacement la qualité d'un état des données. A cette difficulté s'ajoute celle de la conception d'une opération de combinaison adaptée et judicieuse. Si les algorithmes génétiques permettent d'obtenir de bons résultats pour de nombreux problèmes, il est communément admis que leur utilisation en généralisation automatique n'est pas adaptée en comparaison d'autres méthodes de résolution.

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 Pour résoudre un problème complexe, il est souvent utile de le décomposer en plusieurs problèmes plus simples à résoudre. Cette règle est souvent désignée sous la forme « diviser pour mieux régner ». De nombreuses méthodes de généralisation automatique considèrent 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 plutôt 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 vient de la nécessité de disposer de méthodes permettant de décomposer le processus de généralisation, c'est à dire de déterminer quelles parties des données traiter, et comment. (Shea et McMaster, 1989; McMaster et Shea, 1988) 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 évoqué plusieurs de ces méthodes partie 2.3 page 27.
- 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 considérées, en utilisant certaines connaissances sur les algorithmes disponibles et le conflit à résoudre.

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 5 phases :

1. Analyse des données : cette phase consiste à expliciter les structures et les relations entre les objets présent dans les données. Ces données enrichies sont ensuite analysées afin d'explicitier les caractéristiques importantes pouvant influencer le déroulement du processus de généralisation,
2. Reconnaissance de processus : cette phase consiste à déterminer quels algorithmes seront appliqués aux données en fonction du résultat de leur analyse.
3. Modélisation des processus : durant cette phase, la succession des algorithmes à appliquer et leur(s) paramètre(s) éventuels est construite.
4. Traitement des données : les processus sont exécutés.
5. Affichage des données : les données généralisées sont affichées en leur appliquant un symbole.

Le modèle de (Ruas et Plazanet, 1996) (cf. figure 2.11) s'appuie sur le modèle précédent. Il comporte, en plus, 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. Cette amélioration est essentielle : elle permet d'adapter l'algorithme appliqué à l'état courant des données. La succession d'algorithme appliqués est dynamique.

Plusieurs travaux sont basés sur cette approche. Parmi ces travaux, le modèle GALBE (Mustière, 1998), (Mustière, 2001, chap.B), (Mustière, 2005) est appliqué 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 pour lesquelles le symbole se superpose à lui-même ; cf figure 2.12 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 2.12 présente le résultat de ce processus sur un tronçon.

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.

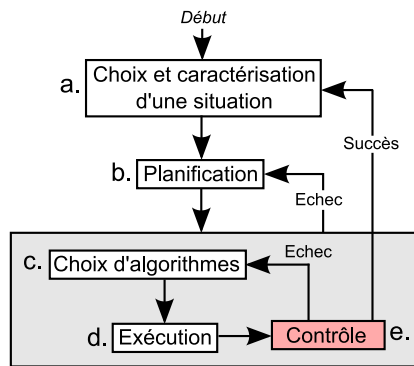


FIGURE 2.11 – Le modèle de (Ruas et Plazanet, 1996)

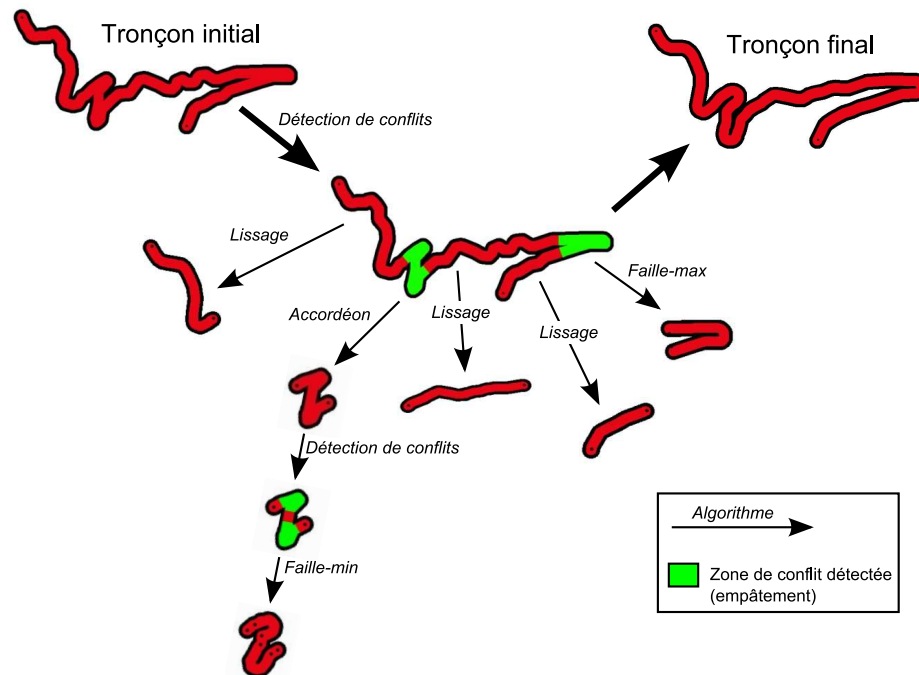


FIGURE 2.12 – Généralisation d'un tronçon routier avec le modèle GALBE, d'après (Mustière, 2001, chap.B)

Enfin, des modèles de généralisation à base de systèmes multi-agents s'inscrivent dans cette approche. Dans ces modèles, les objets géographiques sont considérés comme des *agents* et s'appliquent de façon autonome des opérations de généralisation dans le but de maximiser une fonction appelée *satisfaction* dépendant de leur état. Nous présentons plus en détail en partie 3 page 37 ces modèles.

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 de classer ces travaux. Diverses dichotomies entre les approches sont possibles :

- approche *continue* VS *discontinue* : pour des travaux, la généralisation est vue comme une opérations continue (déformation). Pour d'autres travaux, la généralisation est un processus composé de plusieurs opérations discontinues.
- approche itérative directe, 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.

- approche stochastique VS déterministe : les travaux présentés considèrent le processus de généralisation comme un processus soit stochastique, soit déterministe. La part de hasard dans l'évolution de l'état des données varie.
- approche stochastique VS basée sur des heuristiques : 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).
- approche ouverte VS opaque (ou *boîte noire*) : 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. Une approche ouverte permet, pendant la mise au point d'un processus d'automatisation, d'en améliorer la compréhension.
- approche 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.) que ce soit dans l'approche globale ou locale.
- et enfin approches globale VS locale : 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 constatons cependant des corrélations entre certaines approches. Par exemple, les approches globales sont le plus souvent continues, en une seule passe, opaques et déterministes.

Notons également que la majorité des 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 impossible à prendre en compte.

Dans cette partie, nous avons présenté les différentes approches proposées pour l'automatisation le processus de généralisation. Nous avons évoqué différents travaux s'inscrivant dans ces approches. Nous présentons maintenant plus en détail les travaux à base d'agent.

Chapitre 3

Généralisation et systèmes multi-agents

Parmi les modèles de généralisation automatique utilisés aujourd'hui, certains sont basés sur une approche agent. Nous présentons dans ce chapitre d'une part les systèmes multi-agents et certaines applications, en particulier en généralisation automatique. Nous présentons en détail le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007).

3.1 Agents et systèmes multi-agent

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 ».

Un agent peut être considéré comme un objet amélioré, qui possède des capacités de communication, de perception, et surtout d'autonomie. C'est en quelque sorte un objet *vivant* qui décide lui-même de s'appliquer des méthodes particulières en fonction de son but et de son environnement.

Ce pouvoir de décision conféré à chaque agent qui évolue de façon autonome en interagissant avec son environnement permet de donner à l'ensemble des agents un comportement collectif particulier. Cet ensemble d'agents compose un système multi-agent, 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 ».

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. 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.

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 3.1 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 aller-retour 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 aller-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 d'elles 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 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.

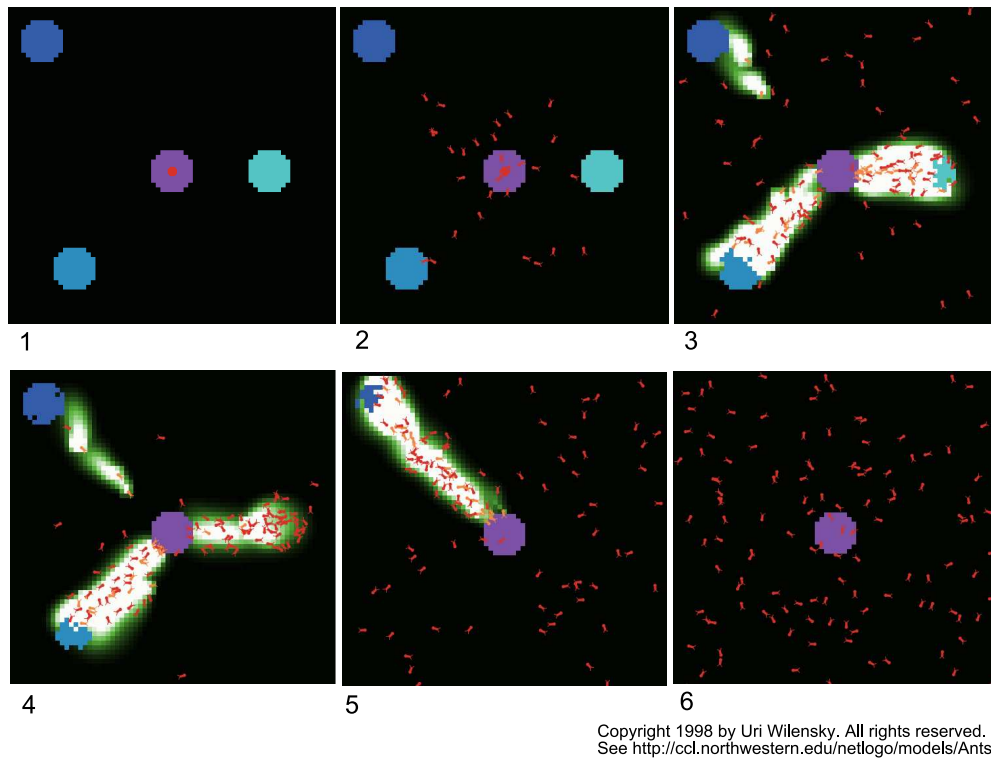


FIGURE 3.1 – Exemple de simulation multi-agent : une colonie de fourmi (d’après (Wilensky, 1998))

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 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. Un des domaines d’application de cette approche est l’automatisation de la généralisation.

3.2 Systèmes multi-agent et généralisation automatique

La capacité d’un agent à évoluer pour répondre à un objectif en fonction de la perception de son contexte et en particulier des organisations auxquelles il appartient motive l’utilisation de cette approche en généralisation automatique comme présenté dans (Barrault *et al.*, 2001). Un système multi-agents possède de plus l’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 dans la partie suivante.

(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. La présentation la plus détaillée de ce modèle est disponible dans (Fritsch, 1997, p.183). Chaque agent A perçoit d'autres agents à travers 5 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 (a 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 est soumis à des forces. Quatre types de forces sont définies :

- des forces de *répulsion* : lorsque deux points sont trop proches, ils se repoussent,
- des forces 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,
- des forces 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),
- des forces 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. 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.

3.3 Le modèle (Ruas et Duchêne, 2007)

Le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) est un modèle de généralisation automatique à base d'agents. Il s'appuie sur le travail de thèse de (Ruas, 1999a) progressivement enrichi par divers travaux parmi lesquels ceux du projet AGENT (Lamy *et al.*, 1999; Barrault *et al.*, 2001; Projet AGENT, 2001), le modèle CartACOM de (Duchêne, 2004), puis le modèle GAEL (Gaffuri, 2008). Ces travaux ont permis la mise au point d'un modèle de généralisation à base d'agents générique et de plus en plus performant. Ce modèle est aujourd'hui utilisé dans différentes agences cartographiques européennes (en particulier l'Institut Géographique National français) pour la production de certaines séries de cartes. Nous présentons dans cette partie les principes de ce modèle.

3.3.1 Les principes

Le modèle de (Ruas et Duchêne, 2007) repose sur 3 principes principaux :

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 d'effectuer 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 ses contraintes.
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. Il sont aussi considérés comme des agents géographiques : leur rôle est 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 est ainsi hiérarchisée 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 composées d'autre 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 2 à 2 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.

3.3.2 Les contraintes

Une contrainte porte sur un caractère d'un agent géographique. 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 :

$$\begin{aligned} Taille(bâtiment) &\geq 300m^2 \\ |Forme(bâtiment - initial) - Forme(bâtiment - généralisé)| &\leq \varepsilon \end{aligned}$$

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 qu'il porte (cf. figure 3.2). Chaque contrainte est caractérisée par :

- sa **valeur courante** : c'est la valeur en cours du caractère contraint. Elle est calculée grâce à une mesure approprié 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 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 est 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 peut être moins importante.

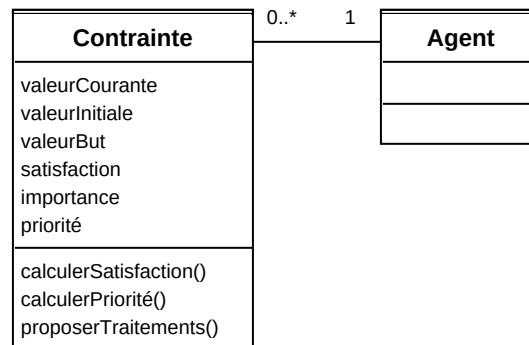


FIGURE 3.2 – La classe contrainte

Une contrainte dispose par ailleurs des méthodes suivantes (cf. figure 3.2) :

- **calculer satisfaction** et **calculer priorité** : ces méthodes permettent de mettre à jour les valeurs 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 de ses contraintes et de leur état. 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 (majoritairement des contraintes de maintien), qui ne proposent aucun traitement mais dont la satisfaction doit être prise en compte pour caractériser l'état de l'agent.

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 les systèmes par le concepteur des contraintes en fonction de ses connaissances cartographiques et des algorithmes concernés. Un exemple de règle est :

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 3.3 et 3.4 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'équarrissage 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 3.3.4 page 45. Ces contraintes ainsi que leur valeur but sont définies sur les objets en fonction des spécifications souhaitées des données finales.

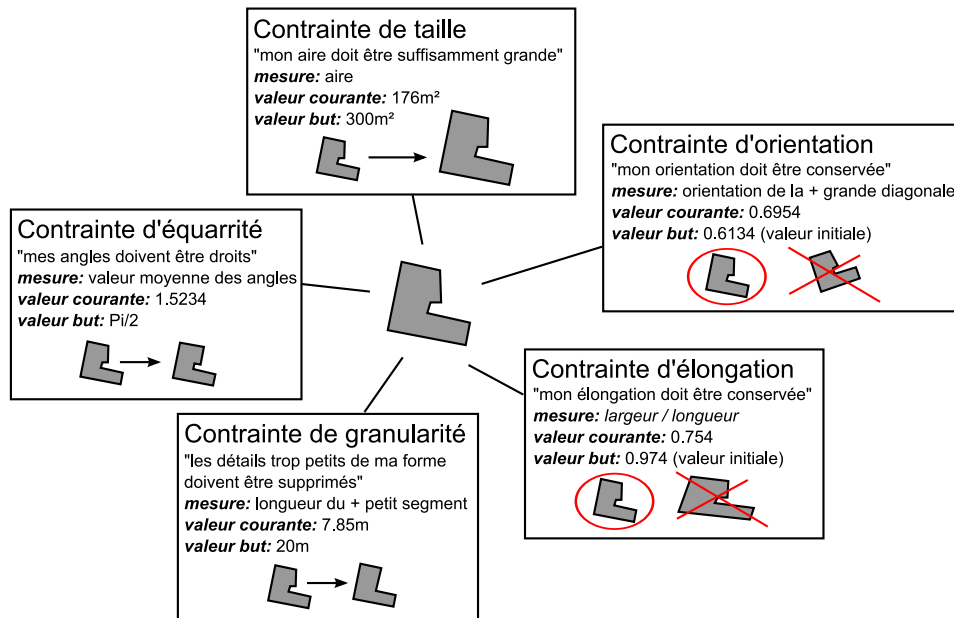


FIGURE 3.3 – Exemples de contraintes sur un agent micro bâtiment

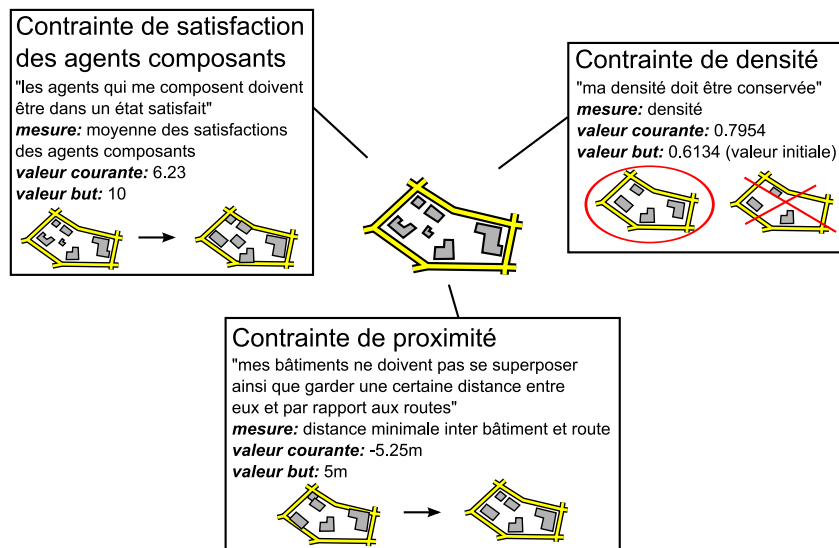


FIGURE 3.4 – Exemples de contraintes sur un agent meso îlot

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.

3.3.3 Les agents géographiques

Chaque agent effectue sa propre généralisation en suivant le cycle de vie présenté figure 3.5.

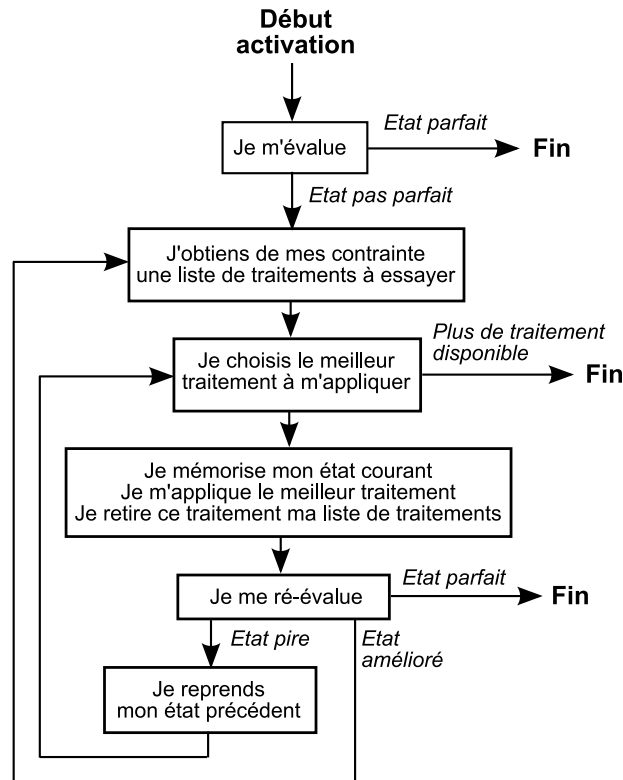


FIGURE 3.5 – Cycle de vie d'un agent géographique d'après (Ruas, 1999a)

La classe *agent* est présentée figure 3.6. 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 validé (il devient le nouvel état courant de l'agent) s'il a une satisfaction meilleure que la satisfaction de l'état précédent. D'autres règles de validation peuvent être utilisées.

Durant ce cycle de vie, l'agent s'applique des traitements lui permettant a priori d'améliorer son état. Il s'applique ainsi un processus de généralisation adéquat, 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 dans certains cas être dépassée par l'ajout d'un nouvel algorithme ou un changement des connaissances procédurales. Dans de nombreux cas, le système ne trouve pas d'état parfait lorsque cet état ne peut pas non plus être déterminé non plus par un opérateur humain : le choix de la meilleure solution est la seule possibilité.

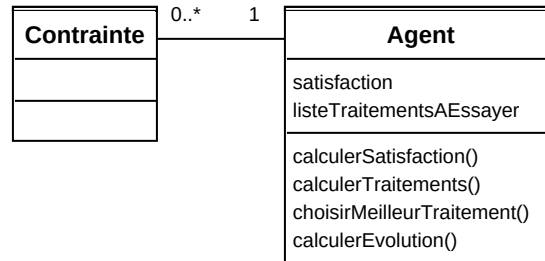


FIGURE 3.6 – La classe agent

Dans le cadre du projet européen AGENT (<http://agent.ign.fr/>), le cycle de vie des agents géographiques a été perfectionné. Une limite du cycle de vie présenté figure 3.5 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 pour lesquels l'agent n'a pas pu atteindre d'état parfait à l'issue de son cycle de vie, 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 3.7 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 finir d'essayer les traitements proposés restant dans cet état et ainsi tenter de trouver un état meilleur, voire parfait. 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).

Chaque agent géographique dispose ainsi d'un cycle de vie qui lui permet d'améliorer son état. Nous présentons maintenant comment les agents interagissent. Les interactions sont hiérarchiques et utilisent plusieurs niveaux.

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 mesos) 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 3.8 donne un exemple d'une telle structure composée d'une ville, d'îlots, d'un alignement et de bâtiments.

La figure 3.9 présente les classes d'agent du modèle. Un agent géographique est soit micro, soit meso. Un agent meso est composé de plusieurs agents, mesos ou micros 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 3.8).

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 3.4, page 43). Cette contrainte permet à l'agent meso de connaître l'état de

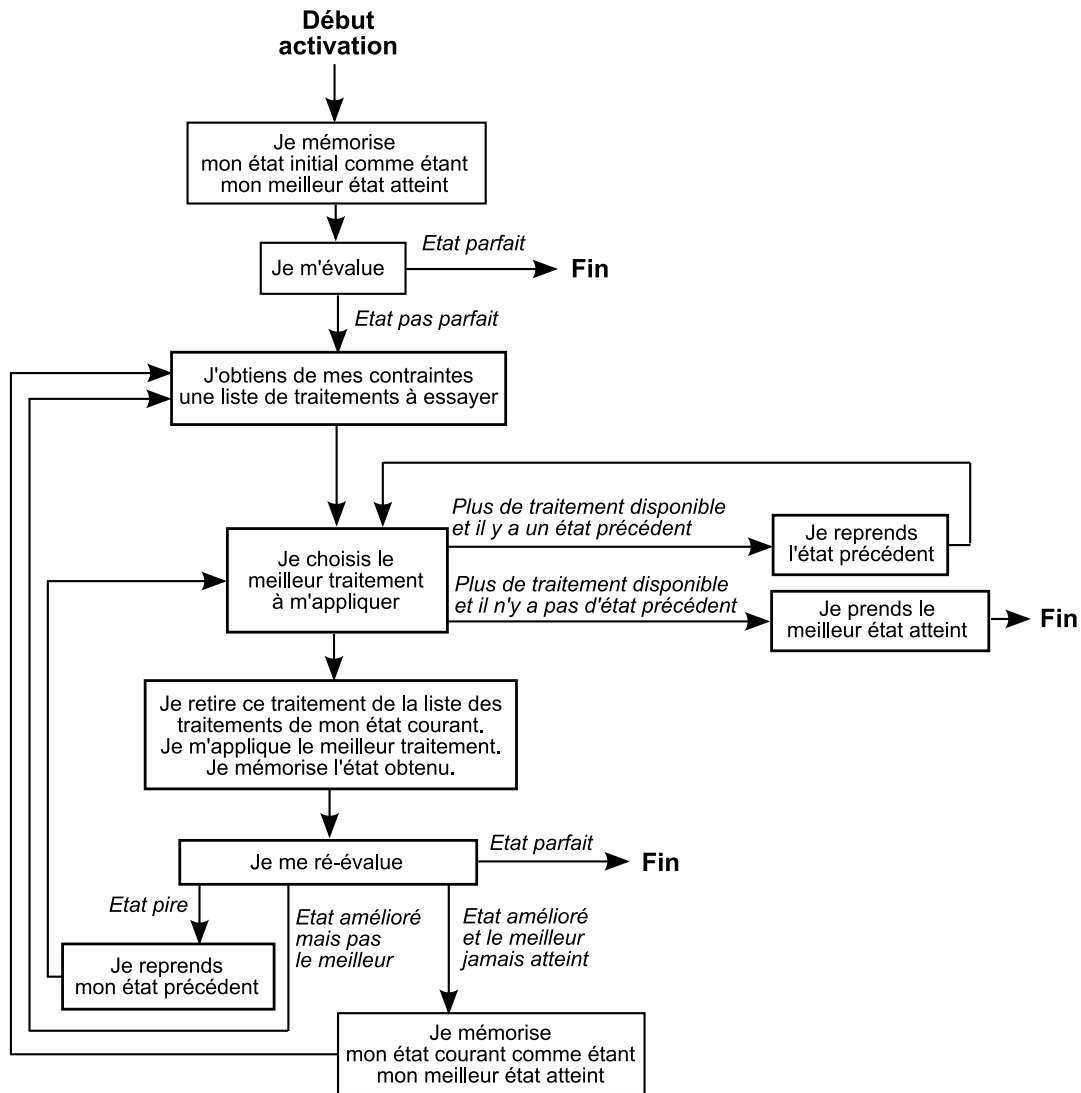


FIGURE 3.7 – Cycle de vie d'un agent géographique, avec exploration en arbre

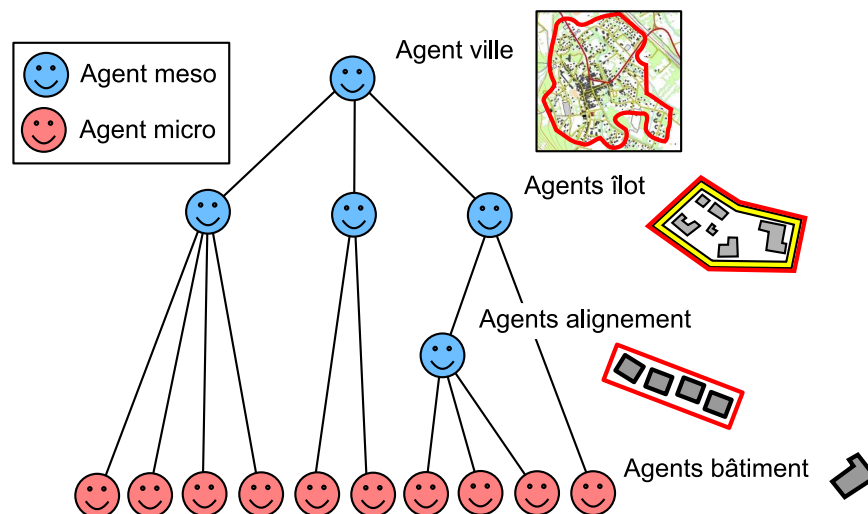


FIGURE 3.8 – Hiérarchie de l'espace urbain pour la généralisation

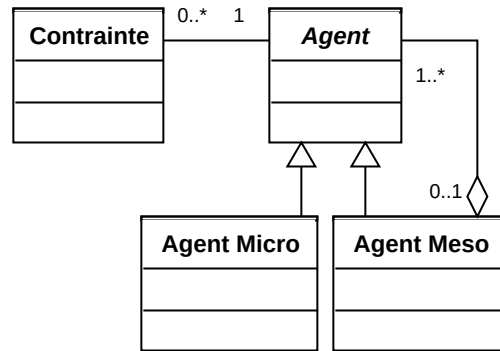


FIGURE 3.9 – Les agents meso

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 composants l'agent meso comme présenté sur la figure 3.10. 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 puis contrôle le résultat de son activation. Durant la phase d'activation (représentée par un rectangle rouge sur la figure 3.10), chaque agent composant effectue son propre cycle de vie.

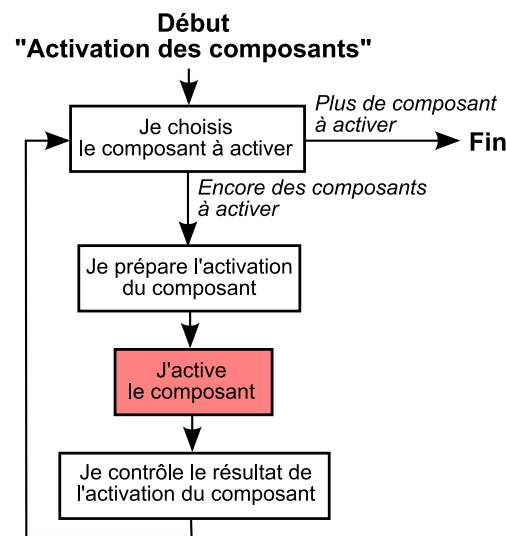


FIGURE 3.10 – Opération d'activation des composants d'un agent meso

L'agent meso a 4 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 bâtiments 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 sur la figure 3.8, 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.

Décomposition d'agents micros 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 routier. Cette généralisation nécessite en effet, comme pour le modèle GALBE présenté figure 2.12 page 34, des opérations de décomposition des tronçons routier.

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 types (résidentiel, commercial, industriel etc.) doit être préservée. Les objets du niveau macro ne sont pas des agents. Ils ont, comme les agents meso, un rôle de législateur et de contrôleur (Ruas, 1999b, p.229).

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 3.8 page 46). 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 micros la capacité de se généraliser et d'interagir sans 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 3.11 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 souci d'interopérabilité, les méthodes et attributs de ces classes sont analogues à ceux de la figure 3.2 du modèle de (Ruas, 1999a).

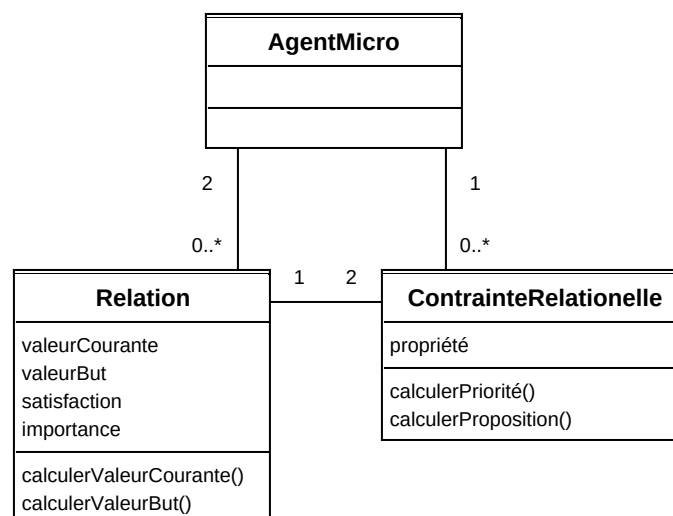


FIGURE 3.11 – Les classes du modèle CartACom

Satisfaction des contraintes relationnelles par communication Un agent micro effectue sa propre généralisation via le cycle de vie générique présenté figure 3.7. 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 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 3.12 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 pas 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.

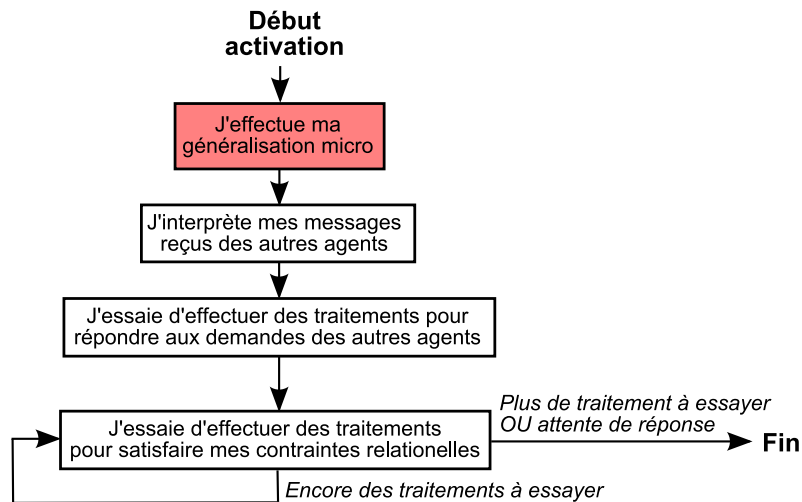


FIGURE 3.12 – Le cycle de vie d'un agent micro CartACom

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.

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. Ce modèle est utilisé par plusieurs producteurs de données européens pour la production de plusieurs séries de cartes.

La figure 3.13 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 3.13 – 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.

Le lecteur curieux pourra visiter le site de la commission de l'ACI en généralisation et représentation multiple (<http://aci.ign.fr/>), qui rassemble les travaux les plus récents en généralisation automatique.

Bibliographie

- T. AI : A generalisation of contour line based on the extraction and analysis of drainage system. In *ISPRS*, Istanbul, Turquie, Juillet 2004.
- T. AI et P. VAN OOSTEROM : displacement methods based on field analysis. In *ISPRS, technical commission 2 symposium*, 2002.
- S. AIRAULT : De la base de données à la carte : une approche globale pour l'équarrissage de bâtiment. *Revue Internationale de Géomatique*, 6(2-3):203-217, 1996.
- S. ANAND, S. AVELAR, J. M. WARE et M. JACKSON : Automated schematic map production using simulated annealing and gradient descent approaches. In *GISRUK'07*, 2007.
- K.-H. ANDERS et M. SESTER : 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>.
- ASSOCIATION CARTOGRAPHIQUE INTERNATIONALE : *Dictionnaire multilingue de termes techniques de cartographie*. Franz Steiner Verlag, Wiesbaden, 1973.
- T. BADARD : *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 : *Energy minimization methods for feature displacement in map generalisation*. thèse de doctorat, université de Zurich, 2001.
- M. BADER, M. BARRAULT et R. WEIBEL : Building displacement over a ductile truss. *IJGIS*, 19(8-9), septembre - octobre 2005. Fisher P., Gahegan M., Lees B. (ed.).
- M. BADER et R. WEIBEL : 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 : *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 : 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 : 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, April 2003. ICA commission on map generalisation.
- B. BAELLA, M. PLA, J. PALOMAR-VASQUEZ et J. PARDO-PASCUAL : 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.
- X. BARILLOT : mesures et structures d'analyse. In *généralisation et représentation multiple*, chapitre 10, pages 187-200. Hermès Lavoisier, 2002.
- X. BARILLOT et C. PLAZANET : *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 : 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 : Constraints on rule formation. In Barbara BUTTENFIELD 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.
- J. BERTIN : *Sémiologie graphique*. Mouton, Gauthier-Villars, 1967.
- M. BÉGUIN et D. PUMAIN : *La représentation des données géographiques, statistique et cartographie*. Géographie. Armand Colin, juillet 2001. ISBN 2-200-25144-0.
- I. O. BILDIRICI : 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 : *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. : Automated derivation of a 1 :300 000 topographic map from swiss dlm vector 200. In *ICC*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
- A. BOFFET : Creating urban information for cartographic generalization. In *international Symposium on Spatial Data Handling (SDH)*, pages 3b4-3b16, 2000.

- A. BOFFET : *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 : *The unified language user guide*. Addison-Wesley, 1999. URL <http://www.rational.com/uml/>.
- K. BRASSEL et R. WEIBEL : A review and conceptual framework of automated map generalisation. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2(3):229–244, 1988.
- H. BRÜGGEMAN : die topographisch-kartographische datenbank in der standardisierung. In *Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen*, numéro 95 in I, page 43, 1985.
- D. BROSSET et T. DEVOGELE : Algorithmes génétiques et généralisation de mnt marins. In *7ième conférence du GDR SIGMA*, Grenoble, France, 2004.
- A. BUCKLEY et P. HARDY : Cartographic software capabilities and data requirements : current status and look toward the future. *Cartography and Geographic Information Science*, 34(2):155–157, 2007.
- G. LI, BUNDY, C. B. JONES et E. FURSE : 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 : smoothing of line objects with optimization techniques. In *ISPRS workshop on multi-scale representations of spatial data*, Ottawa, Canada, Juillet 2002.
- D. BURGHARDT : controlled line smoothing by snakes. *Geoinformatica*, 9(3):237–252, 2005.
- D. BURGHARDT et A. CECCONI : Mesh simplification for building typification. In *fifth workshop on progress in automated map generalisation*, Paris, France, avril 2003. ICA commission on map generalisation.
- D. BURGHARDT et S. MEIER : 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 : Generalization services on the web - classification and an initial prototype implementation. *Cartography and Geographic Information Science*, 32(4):257–268, 2005.
- B. BUTTENFIELD : 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 : 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 : *Extraction automatique d'informations géomorphométriques (réseaux et surfaces enveloppes) à partir de modèles numériques de terrain*. thèse de doctorat, université Paris 7, avril 1995.
- L. CHARLEUX : Gwr, maup et lissage par potentiel. *Revue Internationale de Géomatique*, 15(Martin, Hervé):195–209, 2005. Hermès Lavoisier.
- O. CHAUDHRY et W. MACKANESS : 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>.
- A.H.J. CHRISTENSEN : Two experiments on stream network generalisation. In *21st International Cartographic Conference*, Durban, South Africa, Août 2003. International Cartographic Association.
- S. CHRISTOPHE : 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, septembre 2001.
- S. CHRISTOPHE et A. RUAS : 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 : Initiation théorique et pratique à la méthode d'estimation par moindres carrés. Notes de cours, 'Ecole Nationale des Sciences Géographiques, octobre - novembre 2002.
- R. CUENIN : *Cartographie générale*. Collections scientifiques de l'institut géographique national, 1972.
- E. DANOVARO, L. DE FLORIANI, L. PAPALEO et M. VITALI : A multi-resolution representation for terrain morphology. In M. RAUBAL et al., éditeurs : *GIScience'06*, pages 33–46. springer verlag, 2006.
- H. DENG, W. FANG, O. YANG et Y. LI : A model of road network generalisation based on genetic algorithms. In *21st International Cartographic Conference*, Durban, South Africa, Août 2003. International Cartographic Association.
- J. DENÈGRE : *Sémiologie et conception cartographique*. collection ENSG - IGN. Hermès Lavoisier, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, 2005.
- J. DENÈGRE et F. SALGÉ : *Les systèmes d'information géographique*. Que sais-je ? Presses universitaires de France, octobre 1996.
- DEPARTEMENT OF GEOGRAPHY, UNIVERSITY OF ZURICH : Selection of basis measures. Rapport technique DC1, AGENT consortium, march 1999.
- DIRECTIVE INSPIRE : 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, avril 2007. URL <http://inspire.jrc.it/>.
- D.H. DOUGLAS et T.K. PEUCKER : 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 : *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 : Quantitative and qualitative description of building orientation. In *fifth workshop on progress in automated map generalization*, Paris, France, april 2003.

-
- R. EDSALL : Cultural factors in digital cartographic design : implications for communication to diverse users. *Cartography and Geographic Information Science*, 34(2):121–128, 2007.
- Y. EGELS, éditeur. *Photogrammétrie numérique*. Ecole nationale des sciences géographiques, 2002.
- J. FERBER : *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*. collection Information Intelligence Artificielle. InterEditions, 1997. ISBN 2-7296-0665-3.
- J. FERBER et A. DROGOU : 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 : Systèmes multi-agents réactifs et résolution de problèmes spatialisés. *Revue d'intelligence artificielle*, 12(1):37–72, 1998.
- P. FISHER, J. WOOD et T. CHENG : Where is helvellyn? fuzziness of multi-scale landscape morphology. *transactions of the Institute of British Geographers*, 29(1):106–128, 2004. URL http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/tibg/TRAN_0242.pdf.
- T. FOERSTER et J. STÖTER : 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 : Towards a formal classification of generalization operators. In *International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
- J.-C. FRANÇOIS et A. RIBARDIÈRE : 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 : *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 : *A thorough investigation of digital terrain model generalization using adaptative filtering*. Thèse de doctorat, Ohio state university, 1999.
- J. GAFFURI : *Généralisation automatique pour la prise en compte de thèmes champs : le modèle GAEL*. thèse de doctorat en sciences de l'information géographique, Université Paris-Est, 2008. URL <http://recherche.ign.fr/labos/cogit/accueilCOGIT.php>.
- J. GAFFURI et J. TREVISAN : Role of urban patterns for building generalisation : An application of agent. In *ICA Workshop on Generalisation and Multiple representation*, august 2004.
- M. GALANDA : Optimization techniques for polygon generalization. In *Fourth ICA workshop on progress in automated map generalization*, Beijing, august 2001. ICA commission on automated map generalization.
- M. GALANDA : *Automated Polygon Generalization in a Multi Agent System*. Thèse de doctorat, Department of Geography, University of Zurich, 2003.
- M. GALANDA et R. WEIBEL : 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 : 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 : Road line classification for cartographic generalization : a neural net approach. In *International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- J. GARRIGUES : Statique des poutres élastiques. cours de l'École Centrale de Marseille, mai 1999. URL <http://jgarrigues.perso.egim-mrs.fr/>.
- J. GARRIGUES : Mécanique des milieux continus en déformations finies. cours de l'École Centrale de Marseille, septembre 2002a. URL <http://jgarrigues.perso.egim-mrs.fr/>.
- J. GARRIGUES : La méthode des éléments finis. cours de l'École Centrale de Marseille, janvier 2002b. URL <http://jgarrigues.perso.egim-mrs.fr/>.
- T. GÖKGÖZ et M. SELÇUK : A new approach for the simplification of contours. *Cartographica*, 39(4), 2004.
- C. GOLD et D. THIBAUT : Map generalisation by skeleton retraction. In *20th International Cartographic Conference*, pages 2072–2081. International Cartographic Association, 2001.
- E. GROSSO et N. REGNAULD : warping techniques : a new tool for cartographic generalisation. In *GIS Research UK, 13th annual conference*, university of Glasgow, Scotland, april 2005.
- E. GUILBERT : Détection des conflits entre isobathes en généralisation cartographique. *Revue Internationale de Géomatique*, 12(4):421–438, 2002. Hermès Lavoisier.
- E. GUILBERT, E. SAUX et M. DANIEL : conflict removal between b-spline curves for isobathymetric line generalization using a snake model. *Cartography and Geographic Information Science*, 33(1):37–52, 2006.
- M. HABERKHORN : *Manuel pratique des sports d'orientation : de l'initiation à la compétition*. Amphora, avril 2004.
- J.-F. HANGOUËT : *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 : Storing voronoï diagrams in geographical databases. In *GeoComputation'00*, 2000.
- P. J. HARDY, J.-L. MONNOT et D. LEE : An optimization approach to constraint-based generalization in a commodity gis framework. In *International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
- L. HARRIE : The constraint method for solving spatial conflicts in cartographic generalization. *Cartography and Geographic Information Science*, 26(1):55–69, 1999.
-

- L. HARRIE : *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 : Simultaneous graphic generalisation of vector data sets. *GeoInformatica*, 6(3):233–261, 2002.
- J. HASTHORPE et N. MOUNT : The generation of river channel skeletons from binary images using raster thinning algorithms. In *GISRUK'07*, 2007.
- J.-H. HAUNERT : 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 : Using a straight skeleton for generalisation in a multiple representation environment. In *ICA/EuroSDR workshop on generalisation and multiple representation*, Leicester, England, august 2004.
- J.-H. HAUNERT et M. SESTER : 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 : 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 : 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 : Solving space conflicts in map generalisation : using a finite element method. *Cartography and Geographic Information Science*, 27(1):65–74, 2000.
- F. HOLZAPFEL et A. RUAS : 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. ZELENJAK et M. JANDRIS-SACER : Generalisation of geographic elements on aeronautical chart. In *21st International Cartographic Conference*, Durban, South Africa, august 2003. International Cartographic Association.
- F. HUBERT : *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, juillet 2003. URL <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/>.
- IGN : Guide opérateur en généralisation, chapitre ii.
- IGN : 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_T0P0/JT_Aggl0/DC_BDTP0Pays_1_2.pdf.
- E. IMHOF : Generalization of contours. In *cartographic relief representation*, chapitre C, pages 126–139. ESRI Press, 1982.
- direction technique Institut géographique NATIONAL : 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 : Implementation of a knowledge database for the generalisation of topographic maps in gis systems. In *21st International Cartographic Conference*, Durban, South Africa, august 2003. International Cartographic Association.
- N. JABEUR : *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 : 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 : Map generalisation. In *Geographical information systems and computer cartography*, chapitre 16, pages 271–289. Addison Wesley Longman, 1997.
- J. JOUBRAN ABU DAOUD et Y. DOYTHER : 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. DOYTHER : A combined automated generalization model based on the relative forces between spatial objects. In *International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- T. KOCH : The map as intended : variations on the theme of John Snow. *Cartographica*, 39(4):1–14, 2004.
- S. LAMY, A. RUAS, Y. DEMAZEAU, M. JACKSON, W. MACKANESS et R. WEIBEL : The application of agents in automated map generalisation. In *19th International Cartographic Conference*, Ottawa, Canada, August 1999. International Cartographic Association.
- G. LANGRAN : 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.
- H. LE MEN : 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 : 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 : 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 : Development of a new generalisation flow line for topographic maps. In *International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007b. International Cartographic Association.
- F. LECORDIX, C. PLAZANET et J.-P. LAGRANGE : A platform for research in generalization : application to caricature. *GeoInformatica*, 1(2):161–182, 1997.

-
- F. LECORDIX, N. REGNAULD, M. MEYER et Féchir A. : Magnet consortium. *In workshop on generalisation and multiple representation*, A Coruna, Spain, July 2005b. ICA, commission on map generalisation and multiple representation.
- D. LEE : recent generalisation development and road ahead. *In fifth workshop on progress in automated map generalisation*, Paris, France, avril 2003. ICA commission on map generalisation.
- C. LEMARIÉ : generalisation process for top100 : research in generalisation brought to fruition. *In fifth workshop on progress in automated map generalisation*, Paris, France, avril 2003. ICA commission on map generalisation.
- B. LI, G. G. WILKINSON et S. KHADDAJ : Cell-based model for gis generalization. *In Geocomputation'01*, 2001.
- Z. LI, H. YAN, T. AI et J. CHEN : 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 : Essential operations and algorithms for geometric transformations in digital map generalization. *In International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
- W. LICHTNER : Computer-assisted processes of cartographic generalisation in topographic maps. *Geoprocessing*, 1:183–199, 1979.
- W. A. MACKANESS : 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 : 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 : 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, april 2005.
- W. A. MACKANESS et G. EDWARDS : 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.
- D. MANLEY, R. FLOWERDEW et D. STEEL : 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 : Identification of characteristic points along naturally occuring lines ; an empirical study. *The canadian cartographer*, 16 (1):70–80, 1979.
- K. MATUK, C. M. GOLD et Z. LI : 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 : Skeleton based contour line generalisation. *In SDH'06*, 2006.
- R. B. McMASTER et K. S. SHEA : 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 : *Generalization in digital cartography*. Association of american geographers, 1992.
- M. L. MINSKY : Matter, minds and models. *International process congress*, 1:45–49, 1965.
- V. MITROPOULOS, A. XYDIA, B. NAKOS et V. VESCOUKIS : The use of epsilon-convex area for attributing bends along a cartographic line. *In International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- P. MONIER : *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, juillet 1997. URL <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/>.
- P. MONIER, E. BEAUVILLAIN et O. JAMET : Extraction d'éléments caractéristiques pour une généralisation automatique du relief. *Revue Internationale de Géomatique*, 6(2–3):191–201, 1996.
- M. MONMONIER : *How to lie with maps ?* University of chicago press, Chicago, 2nd edition édition, 1996.
- J.-L. MONNOT, D. LEE et P. HARDY : Topological constraints, actions, and reflexes for generalization by optimization. *In workshop on generalisation and multiple representation*, Moscow, Russia, 2007. ICA.
- S. MUSTIÈRE : Généralisation adaptative du lineaire basée sur la détection d'empâtement, application au routier. *In Bulletin d'information scientifique et technique de l'IGN n°75*, Saint Mandé, France, 1998.
- S. MUSTIÈRE : *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 : Cartographic generalization of roads in a local and adaptative approach : a knowledge acquisition problem. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(8–9), septembre - octobre 2005. Fisher P., Gahegan M., Lees B. (ed.).
- S. MUSTIÈRE, J.-D. ZUCKER et L. SAITTA : 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 : Local length ratio as a mesure of critical points detection for line simplification. *In fifth workshop on progress in automated map generalization*, april 2003.
- M. NEUN et D. BURGHARDT : 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 : Modelling cartographic relations for categorical maps. *In International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- M. NEUN, R. WEIBEL et D. BURGHARDT : Data enrichment for adaptive generalisation. *In workshop on generalisation and multiple representation*, Leicester, England, august 2004. ICA/EuroSDR.
-

- H. OUDIN : Méthode des éléments finis. cours de l'école centrale de Nantes, laboratoire mécanique et matériaux, division mécanique des structures, 2002.
- Jean PERDIJON : *La mesure, science et philosophie*. Perdiyon, J., dominos flammarion édition, 1998. ISBN 2 08 035580-5.
- B. PETER : Measures for the generalisation of polygonal maps with categorical data. In *fourth ICA workshop on progress in automated map generalisation*, Beijing, China, August 2001.
- C. PLAZANET : *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 : Seafloor valley shape modeling. In *Spatial Data Handling 1998*, 1998.
- PROJET AGENT : 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 : 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, July-August 2007.
- H. QIAN, L. MENG et Zhang M. : 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 : 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, Août 2003. International Cartographic Association. ISBN : 0-958-46093-0.
- N. REGNAULD : *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. REGNAULD : Algorithms for the amalgamation of topographic data. In *fifth workshop on progress in automated map generalization*, avril 2003.
- N. REGNAULD : Spatial structures to support automatic generalisation. In *International Cartographic Conference*, la Corona, Spain, 2005. International Cartographic Association.
- N. REGNAULD : 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/Regnauld-ICAWorkshop.pdf>.
- N. REGNAULD, A. FECHIR, F. LECORDIX et Rejkjaer D. : NmaŠs collaborations on generalisation : The magnet consortium. In *International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
- N. REGNAULD et W. A. MACKANESS : 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, July 2006.
- P. REVELL : Building on past achievements : generalising os master map rural buildings 1 :50000. In *ICA/EuroSDR workshop on generalisation and multiple representation*, Leicester, Royaume-Uni, août 2004.
- P. REVELL, N. REGNAULD et T. STUART : Generalising os mastermap topographic buildings and its 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 : Consensus or confusion : cartographers' knowledge of generalisation. *Cartographica*, 30(2&3), 1993.
- V. F. ROZHKOV, S. V. KOLOSKOV et T. A. KHLEBNIKOVA : Results of development and problems of automated generalization technology in mapping. In *International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, 2007. International Cartographic Association.
- A. RUAS : A method for building displacement in automated map generalisation. *International Journal of Geographical Information Sciences*, 12(8):789-803, 1998.
- A. RUAS : *Modèle de généralisation de données géographiques à 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 : Modèle de généralisation de données urbaines à base de contraintes et d'autonomie. *Revue européenne de géographie, Cybergeog*, 107, oct 1999b. URL <http://www.cybergeog.presse.fr>.
- A. RUAS : The roles of meso objects for generalisation. *9th international symposium on Spatial Data Handling*, 3b:50-63, August 2000.
- A. RUAS : 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, novembre 2004.
- A. RUAS et C. DUCHÈNE : 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 : Strategies for urban map generalisation. In *18th International Cartographic Conference*, Stockholm, Sweden, 1997.
- A. RUAS et C. PLAZANET : strategies for automated generalization. In *7th international symposium on spatial data handling*, pages 319-336, Delft, Pays-Bas, 1996.
- S. RUSSELL et P. NORVIG : *Intelligence artificielle*. Pearson education, 2006.
- T. SARJAKOSKI et T. KILPELÄINEN : Holistic cartographic generalisation by least squares adjustment for large data sets. In *ICA workshop on map generalisation*, Ottawa, Canada, 1999. ICA.
- SCHWEIZERISCHE GESELLSCHAFT FÜR KARTOGRAPHIE : *Cartographic generalisation, topographic maps*. Cartographic publication series. Zürich, 1977.

-
- SCHWEIZERISCHE GESELLSCHAFT FÜR KARTOGRAPHIE : Topografische karten : kartengrafik und generalisierung, 2002.
- M. SESTER : Generalization based on least square adjustment. *International archives of photogrammetry and remote sensing*, 23, part B4:931-938, 2000.
- M. SESTER : Optimization approaches for generalisation and data abstraction. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(8-9):871-897, September - October 2005. Fisher, P. and Gahegan, M. and Lees, B. (ed.).
- M. SESTER et C. BRENNER : 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 : Cartographic generalization in a digital environment : When and how to generalize. In *AutoCarto 9*, pages 56-67, Baltimore, Etats-Unis, 1989.
- J. SKINBERG : Principes de la generalisation et la symbolique de la carte topographique. In *La carte topographique*, chapitre 3, pages 53-76. Sedes, 1982.
- E. SPIESS : 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.
- S. STEINIGER : Classifying urban structures for mapping purposes using discriminant analysis. In *GISRUK'06*, 2006.
- S. STEINIGER, D. BURGHARDT et R. WEIBEL : 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 : 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 : 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 : generalisation within nmaŠs in the 21st century. In *International Cartographic Conference, la Corona, Spain, 2005*. International Cartographic Association, 2005.
- N. THOMAS, J. M. WARE et C. B. JONES : 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 : The 'stroke' concept in geographic network ; generalization and analysis. In *SDH'06*, 2006.
- K. TOH : 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 : River network selection based on structure and pattern recognition. In *International Cartographic Conference*, Moscow, Russia, August 2007a. International Cartographic Association.
- G. TOUYA : 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>.
- J.-P. TREUIL, C. MULLON, E. PERRIER et M. PIRON : 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 : Measures on meso level and organisation. Rapport technique DC3, AGENT consortium, september 1999.
- UNIVERSITY OF EDINBURGH, IGN, UNIVERSITY OF ZURICH : Specifications for measures on meso level and organisation. Rapport technique DC4, AGENT consortium, september 1999.
- H.-I. WANG, F. WU, H.-Y. DENG, L. GE et Q. HUANG : 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 : Automated production of schematic maps for mobile applications. *Transaction in GIS*, 10(1):25-42, 2006.
- J. M. WARE et C. B. JONES : Conflict reduction in map using iterative improvement. *GeoInformatica*, 2(4):383-407, 1998.
- J. M. WARE, C. B. JONES et N. THOMAS : Automated map generalization with multiple operators : a simulated annealing approach. *International Journal of Geographical Information Sciences*, 17(8):743-769, 2003.
- G. WEGER : La généralisation cartographique. In *Cours de cartographie*. Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Marne la Vallée, janvier 1997.
- G. WEGER : les contraintes du langage cartographique. In *Cours de cartographie*, chapitre 7. Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Marne la Vallée, janvier 1998.
- R. WEIBEL : *Konzepte und Experimente zur Automatisierung des Reliefgeneralisierung*. Thèse de doctorat, géographisches Institut, Zurich Universität, 1989.
- R. WEIBEL : Models and experiments for adaptative computer-assisted terrain generalization. *Cartography and Geographic Information Science*, 19(3):133-153, 1992.
- R. WEIBEL et G. DUTTON : 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.
- U. WILENSKY : 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. : Reducing graphic conflict in scale reduced maps using a genetic algorithm. *In fifth workshop on progress in automated map generalisation*, Paris, France, april 2003. commission on map generalisation, International Cartographic Association.
- J. WOOD : *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 : Consistent line simplification based on constraint points. *In 21st International Cartographic Conference*, Durban, South Africa, August 2003. International Cartographic Association.
- K. ZAKSEK et T. PODOBNIKAR : 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.
- Q. ZHANG : Modelling structure and patterns in road network generalization. *In ICA/EuroSDR workshop on generalisation and multiple representation*, Leicester, England, 2004.
- S. ZHOU et C. B. JONES : 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.
-