

---

# Système multi-agent pour la déformation en généralisation cartographique

## Un problème multi niveau

**Gaffuri Julien**

*Institut Géographique National, laboratoire COGIT  
2/4 avenue Louis Pasteur, F-94165 Saint-Mandé cedex  
Julien.Gaffuri@ign.fr*

---

*RÉSUMÉ. La généralisation cartographique consiste à simplifier les objets représentés sur une carte afin d'en améliorer la lisibilité. Des travaux antérieurs se sont attachés à mettre au point des modèles de généralisation automatiques basés sur une approche agent: les objets cartographiques sont des agents qui se généralisent en s'appliquant des traitements géométriques. Plusieurs niveaux, appelés niveaux micro et meso, sont considérés. Notre objectif est de compléter ces modèles en permettant de gérer des transformations plus continues, comme des déformations. Le modèle que nous proposons s'appuie sur la recherche d'un équilibre entre des contraintes élastiques. Ces contraintes s'appliquent à un niveau particulière des objets que nous appelons niveau « sub-micro ». Nous appliquons cette méthode à la déformation d'un type d'objets particulier: les objets champs.*

*ABSTRACT. Cartographic generalisation aims at simplifying the objects drawn on a map in order to improve the global legibility of the map. Some generalisation models use agent principles to make this process automatic: the cartographic objects are considered as agents, and compute their own generalisation by applying geometric transformations to themselves. Several levels, called micro and meso levels are considered. Our purpose is to extend these models to manage continuous transformations such as deformations. The model we propose is based on the research of a balance position between elastic constraints. Elemental objects composing a lower level of the object, the so-called «sub-micro» level, carry these constraints. We apply this method to the deformation of a new kind of objects: the field objects.*

*MOTS-CLÉS : généralisation cartographique, déformation, changements continus, agent situés vectoriels, SMA multi niveaux.*

*KEYWORDS: cartographic generalisation, deformation, continuous change, vectorial situated agents, multi levels MAS.*

---

## 1. Introduction

Nous nous intéressons ici à l'utilisation de l'approche agent pour la résolution d'un problème particulier : l'automatisation de la généralisation cartographique. La généralisation cartographique est l'étape de la conception d'une carte qui consiste à simplifier et synthétiser les données à représenter sur la carte pour les adapter à l'échelle de visualisation. La généralisation consiste à trouver un compromis entre des contraintes de lisibilité d'un objet (les objets doivent respecter certaines contraintes, par exemple de taille, pour être suffisamment gros et donc lisibles) et des contraintes visant à conserver certains traits caractéristiques importants des données.

Plusieurs travaux parmi lesquels [BAE 98 ; RUA 99 ; JAB 03 ; DUC 03] ont visé à automatiser ce processus en adoptant une approche agent. Notre travail s'appuie sur les modèles de [RUA 99] et [DUC 04]. Le principe de ces modèles est de considérer les objets géographiques comme des agents. Le but de chaque agent est de satisfaire ses contraintes en s'appliquant des transformations brusques (grossissement, déplacement, agrégation...) en fonction de l'état de violation de ses contraintes. Ces travaux s'appuient sur l'utilisation de plusieurs niveaux, individuel (niveau micro) et collectif (niveau meso).

Ces deux modèles ont été conçus pour gérer des transformations brusques. Or, pendant le processus de généralisation, certains objets nécessitent de subir des transformations plus continues, comme des déformations. Notre objectif est de proposer un modèle complémentaire, s'articulant avec ces deux modèles, et qui permette de gérer ce type de transformations continues. Pour cela, nous proposons d'utiliser un nouveau niveau que nous appelons le niveau « sub-micro » en adoptant l'approche utilisée dans [SER 00] et [BRE 99].

Nous appliquons ce modèle à la déformation d'un certain type d'objets : les « objets champ ». Ces objets représentent des phénomènes tels que le relief (représenté sous forme de courbes de niveau) et l'occupation du sol (partition de l'espace en parcelles: bois, cultures, lacs...). Ils ont la particularité d'être définis de façon continue en tout point de l'espace.

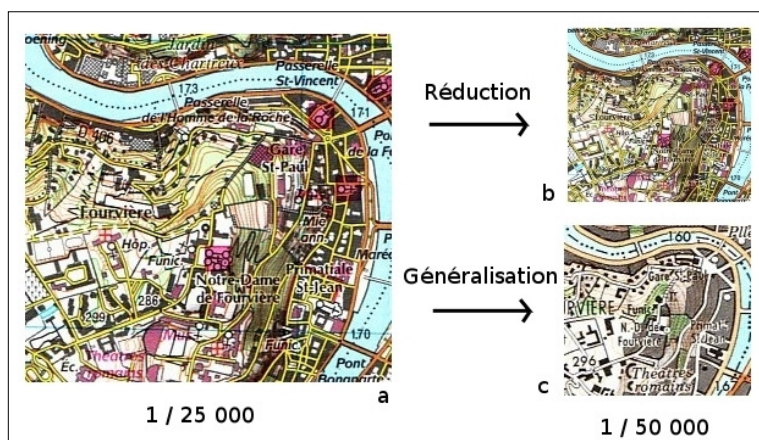
En partie 2, nous présentons le contexte et les enjeux de la généralisation cartographique. Nous donnons ensuite un bref état de l'art non exhaustif de l'utilisation de l'approche agent en généralisation. Nous insistons davantage sur les travaux de [RUA 99] et [DUC 04] sur lesquels nous nous basons. Nous présentons ensuite ce en quoi ces modèles à base de transformations brusques sont limités pour notre objectif. En partie 3, nous proposons un modèle agent permettant de gérer des transformations continues. Nous l'appliquons à la déformation des objets champ, et proposons ainsi un moyen de déclencher à la fois les transformations brusques et continues nécessaires à une bonne généralisation.

## 2. Contexte et objectif

### 2.1. La généralisation cartographique

La généralisation cartographique se définit 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 » [CUE 72, p. 168]. La généralisation cartographique est comparable au résumé de texte: l'information représentée à une certaine échelle doit être synthétisée pour être lisible, tout en conservant les traits caractéristiques du message d'origine [RUA 02].

La figure 1a présente un extrait de carte au 1/25000. La figure 1b est ce même extrait réduit pour le 1/50000 : nous constatons que les objets de la carte (bâtiments, routes, forêts...) ne sont plus lisibles: ils ne respectent pas certaines contraintes de lisibilité (taille, distance de séparation entre eux...). Il est nécessaire d'appliquer des opérations aux objets (grossissements, déplacement, élimination, caricature...) afin d'adapter les objets à l'échelle. La figure 1c montre un résultat possible : des objets ont été supprimés, d'autres grossis pour satisfaire les contraintes de lisibilité tout en conservant une représentation convenable du lieu.



**Figure 1.** Réduction et généralisation d'un extrait de carte. (Cartes IGN)

La généralisation est un problème particulier de satisfaction de contraintes distribué [DUC 04, p. 46-51]. Le manque de place pour représenter les objets force le cartographe à supprimer et à transformer des objets, et donc à éliminer certains traits caractéristiques de la carte. Généraliser consiste alors à trouver un compromis

entre la lisibilité et la conservation de traits caractéristiques. Par exemple, pour rendre les bâtiments et routes de l'extrait de la figure 1b visibles, il est nécessaire de transformer la géométrie de certains et d'en supprimer d'autres, ce qui implique un abandon de certains caractères. Contraintes de lisibilité et de conservation s'opposent.

Il est par ailleurs important de souligner que le contexte spatial des objets à généraliser doit être pris en compte : les opérations à appliquer à un objet dépendent non seulement de ses caractéristiques individuelles mais aussi des autres objets de son voisinage avec lesquels il peut former des structures au niveau collectif. La généralisation doit prendre en compte les différents niveaux d'information de la carte.

Aujourd'hui, les données géographiques servant de source aux cartes sont de plus en plus précises et détaillées. Elles sont disponibles sous forme de bases de données vectorielles (les géométries des objets sont stockées sous forme de suites de coordonnées de points). La généralisation étant une tâche coûteuse, beaucoup de producteurs de cartes cherchent à automatiser ce processus à partir de ces données vectorielles. Une communauté de recherche en généralisation tente d'apporter des solutions à l'automatisation de la généralisation.

Différentes approches sont étudiées pour l'automatisation de la généralisation. Dans certains travaux comme ceux de [BUR 97 ; BAD 01 ; SES 05], la généralisation est vue comme un problème d'optimisation global : l'ensemble des contraintes sont traduites sous la forme d'un système d'équations résolu par des méthodes d'optimisation (moindres carrés, éléments finis). Une autre approche issue de [BRA 88, MCM 88], considère la généralisation comme un processus progressif de résolution de problèmes locaux : le principe est de déterminer quelle transformation appliquer à quel objet au bon moment du processus. Cette approche distribuée a débouché sur l'utilisation de méthodes à base d'agents, en considérant les objets géographiques comme des entités autonomes dotées d'un but et interagissant dans un environnement [FER 95].

Nous présentons maintenant certains de ces travaux.

## ***2.2. Généralisation cartographique et systèmes multi-agents***

[BAE 98] présente un modèle agent pour la généralisation cartographique appelé SIGMA. Dans ce modèle, les agents sont les points composant les géométries des objets. Ces agents subissent des forces traduisant certaines contraintes dépendant de champs de perception et d'action. Leur but est d'atteindre une position d'équilibre entre ces forces.

[JAB 03] présente un modèle de généralisation basé sur la compétition entre agents. Les agents sont des objets géographiques tels que les bâtiments. La généralisation est vue comme un problème d'encombrement. Le but de chaque agent

est d'avoir suffisamment de place pour lui-même. 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.

Le projet AGENT, présenté dans [LAM 99] et basé sur les travaux de [RUA 99], a eu pour objectif de fournir un prototype de généralisation à base d'agents. Ce prototype est aujourd'hui utilisé par plusieurs agences cartographiques européennes. Le modèle de [RUA 99] repose sur 3 principes:

1. Le problème de généralisation est traduit sous forme de **contraintes explicites** sur certaines caractéristiques des objets. Par exemple, un bâtiment doit être suffisamment gros: il est donc lié à une contrainte de taille. Chaque contrainte est caractérisée par une valeur but et une valeur courante.
2. Les objets géographiques sont autonomes: ils deviennent des « **agents géographiques** » dont le but est de satisfaire au mieux leurs contraintes. Pour cela, chaque agent possède des capacités d'analyse pour mesurer l'état de satisfaction de ses contraintes, puis choisit et essaie différents traitements de généralisation *a priori* adaptés pour résoudre ses contraintes insatisfaites, et enfin contrôle après chaque traitement si son état s'est amélioré.
3. La généralisation a lieu à **plusieurs niveaux**. La généralisation d'un objet dépendant fortement de son contexte spatial, il est nécessaire de traiter non seulement les objets pris individuellement, mais aussi, au niveau collectif, les groupes d'objets. Le niveau individuel, ou « niveau micro » est celui des objets géographiques ; le niveau collectif, ou « niveau meso » est le niveau des groupes. Les objets du niveau meso sont aussi considérés comme des agents géographiques: ils ont pour rôle de gérer les contraintes relatives aux groupes (comme par exemple, la conservation de l'alignement au sein d'un groupe de bâtiments) et d'orchestrer la généralisation de leurs composants. Les agents meso peuvent être composés d'autres agents meso de façon à obtenir une structure en arbre traduisant l'organisation des agents sous différents niveaux organisationnels. Par exemple, la généralisation de l'espace urbain se base sur une description hiérarchique: cet espace est modélisé comme une composition d'objets villes, eux-mêmes composées d'îlots, eux-mêmes composés de bâtiments. Chacun de ces objets est un agent. Concernant la dynamique, c'est l'agent meso qui a pour rôle de donner l'autonomie aux agents le composant: la généralisation est ainsi déclenchée en partant du niveau supérieur vers les niveaux inférieurs.

Ce modèle s'applique bien aux données présentant plusieurs niveaux collectifs hiérarchisés, comme en milieu urbain. Il a également été appliqué à la généralisation du réseau routier.

[DUC 04] adopte une approche similaire pour les espaces sans hiérarchie évidente, comme par exemple l'espace rural. Pour ces espaces, il n'est pas utile d'utiliser de niveau collectif, car les violations de contraintes concernent principalement des couples d'objets (par exemple deux bâtiments, ou bien une route

et un bâtiment trop proches). [DUC 04] propose de résoudre ces conflits au niveau individuel en dotant les agents micro de capacités d'analyse de leur environnement, et de communication leur permettant un transfert d'information et une prise de décision directe, sans avoir recours à un niveau meso. Les modèles de [DUC 04] et [RUA 99] sont complémentaires puisqu'ils s'appliquent à des contextes différents.

### ***2.3. Limite des modèles actuels et objectifs***

Les modèles de [RUA 99] et [DUC 04] ont été appliqués principalement à la généralisation des thèmes routier et bâti. Pour traiter ces types d'objets de façon efficace, les transformations utilisées sont des transformations brusques: déplacements, éliminations, changements brusques de forme... La progression des agents route et bâtiment vers un état satisfait est obtenue par une suite de transformations discrètes.

Nous souhaitons maintenant prendre en compte un nouveau type d'objets tels que le relief et l'occupation du sol, jusqu'alors ignorés lors du processus de généralisation. Nous appelons ces objets « les objets champ » : ils ont la particularité d'être définis en tout point de l'espace. Ils forment un support sur lequel les objets micro (bâtiments, routes...) sont positionnés. De nombreuses relations existent entre les objets micro et ces objets champ. Par exemple, la relation entre un objet micro bâtiment et le relief se traduit par l'altitude du bâtiment, la relation entre une route et l'occupation du sol se traduit par le fait que la route traverse une certaine parcelle boisée... Lors de leur processus de généralisation, les objets micro subissent des changements importants (en particulier des déplacements) qui peuvent affecter leurs relations avec certains objets champ. Notre objectif est de permettre une conservation de ces relations en permettant aux objets micro et champ d'interagir. Nous souhaitons en particulier permettre à un objet micro de déformer un objet champ en l'étirant par endroit. La prise en compte de ces objets champs nécessite donc de gérer des transformations continues comme la déformation d'un objet champ.

La limite des modèles de [RUA 99] et [DUC 04] est leur non-adaptation à traiter les transformations continues telles que les déformations. Or, lors du processus de généralisation, les deux types de transformations sont nécessaires : certains objets subissent surtout des transformations continues, d'autres des transformations discrètes. Notre objectif est de proposer un modèle permettant de gérer de telles transformations continues, ce modèle devant être suffisamment ouvert pour permettre d'utiliser conjointement ces transformations continues avec les transformations brusques des modèles existants.

#### 2.4. *Quelle approche pour notre modèle de déformation ?*

Comment déformer un objet ? Les objets à déformer ayant certaines propriétés de forme à conserver, ces déformations ne doivent pas être de simples diffusions isotropes mais doivent prendre en compte certaines propriétés de forme (par exemples, les formes particulières du relief doivent être conservées au mieux). Ces déformations sont le résultat d'un équilibre entre:

- des contraintes internes des champs qui visent à conserver leur forme,
- des contraintes externes aux champs, qui sont appliquées pas des objets micro au champ, et le force à changer : nous appelons ces contraintes « contraintes d'étirement » puisque ces contraintes ont pour effet d'étirer les objets champ. Ces contraintes visent à préserver les relations entre des objets micro et des objets champ (comme par exemple, l'altitude d'un bâtiment).

Nous avons présenté en 2. la généralisation comme un problème de satisfaction de contraintes. Nous constatons qu'en généralisation, deux approches sont utilisées pour traiter des problèmes sur-contraints :

L'approche par choix: cette approche consiste à négliger volontairement certaines contraintes afin d'en satisfaire d'autres. Suivant cette approche, on cherche à satisfaire de préférence certaines contraintes au détriment d'autres, qui sont relâchées. Le choix des contraintes à relâcher est contrôlé. Il est fonction des importances relatives des contraintes. Il est nécessaire de hiérarchiser les contraintes pour déterminer lesquelles seront satisfaites au détriment d'autres.

L'approche par équilibre: cette approche consiste à satisfaire au mieux toutes les contraintes en trouvant un équilibre entre elles. Une moyenne entre les contraintes est cherchée. Aucune est totalement satisfaite.

Pour obtenir des déformations, il est nécessaire de trouver un équilibre entre les contraintes internes de forme du champ, et les contraintes externes: une approche par équilibre est donc nécessaire. La limite des modèles de [RUA 99] et [DUC 04] est qu'ils s'appuient sur une approche par choix : un agent géographique s'applique des transformations brusques pour satisfaire progressivement chacune de ses contraintes. Les contraintes sont traitées par un ordre de priorité. Au contraire, pour obtenir un équilibre entre des contraintes, il est nécessaire de les considérer globalement.

Le tableau 1 établit le parallèle entre l'approche par choix et les transformations brusques des modèles actuels, puis entre l'approche par équilibre et les transformations continues. Ce tableau introduit également les notions de contraintes discrètes et élastiques. Une contrainte discrète est une contrainte considérée dans une approche par choix: sa satisfaction évolue de façon discontinue. Une contrainte élastique est une contrainte considérée dans l'approche par équilibre: sa satisfaction évolue petit à petit vers un équilibre.

<i>Approche</i>	<i>Type de transformations</i>	<i>Type de contraintes</i>
Choix	Brusques	Discrète
Équilibre	Continues	Élastiques

**Tableau 1.** *Parallèle entre approches, transformations et contraintes.*

En généralisation automatique, les travaux reposant sur l'approche par optimisation considèrent les contraintes conformément à l'approche par équilibre. Ces équilibres sont déterminés en utilisant des méthodes de résolution telles que les moindres carrés ou la méthode des éléments finis. Les résultats obtenus donnent d'excellents résultats pour effectuer des déformations continues. Mais, ces méthodes de résolution ont l'inconvénient d'être fermées : Il nous paraît difficile de permettre des transformations brusques avec ces méthodes.

Or, notre objectif est de pouvoir gérer conjointement les transformations continues et brusques. Pour cela, nous proposons un modèle à base d'agents reposant sur une approche par équilibre, afin de permettre d'effectuer des transformations continues telles que des déformations d'objets. La partie suivante présente ce modèle.

### 3. Un modèle de déformation à base d'agents

#### 3.1. Principes du modèle

Notre modèle repose sur les principes suivants:

- Décomposition des objets micro à déformer en objets dits « sub-micro ». Ceci correspond à l'ajout d'un niveau supplémentaire que nous appelons le niveau sub-micro. Les objets sub-micro sont composés de points de l'objet micro ; un même point pouvant appartenir à plusieurs objets sub-micro.
- Ajout de contraintes élastiques aux objets sub-micro.
- Agentification des points composant l'objet à déformer: leur but est d'atteindre une position d'équilibre entre les contraintes élastiques des objets sub-micros auxquels ils appartiennent, et les éventuelles contraintes d'étirement provoquées par les objets micro, qui sont elles aussi élastiques.

Nous présentons maintenant plus en détail notre modèle : tout d'abord, les objets sub-micros et leurs contraintes (3.2), les agents point (3.3), puis comment ils interagissent (3.4), puis enfin comment les modèles sont articulées (3.5).

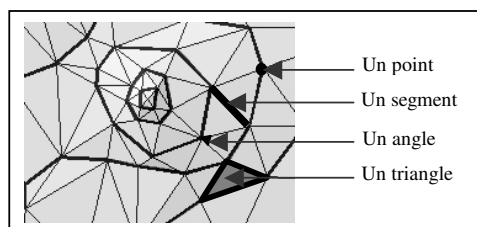


### 3.2 Le niveau sub-micro et ses contraintes élastiques

Nous adoptons ici une approche déjà utilisée dans les travaux de [BRE 99] et [SER 00]. Cette approche consiste à raisonner à un niveau particulière pour décentraliser un problème global formulé suivant des lois continues.

En paragraphe 2.4., nous avons présenté une déformation d'objet comme le résultat d'un équilibre entre des contraintes internes forçant l'objet à garder sa forme, et des contraintes d'étirement provoquées par les objets micros. Ces contraintes ne s'appliquent pas au niveau de l'objet lui-même, mais au niveau de ses parties. Nous appelons ce niveau le niveau « sub-micro ». Nous proposons de distribuer la résolution du problème des déformations au niveau de certains objets de ce niveau : les « objets sub-micro ».

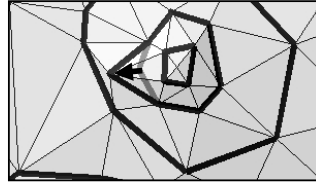
Pour notre problème, nous proposons de nous appuyer sur une triangulation des objets champs. Cette décomposition présente de nombreux avantages parmi lesquels celui d'explicitier les relations entre points ainsi que d'intégrer aux champs des objets ayant des propriétés spécifiques de forme (comme par exemple les courbes de niveau) en contraignant la triangulation. L'objet champ est ainsi décomposé en triangles, segments, angles et points (cf. figure 2). Ces objets sub-micros portent des contraintes élastiques : nous proposons de contraindre les longueurs des segments, les valeurs des angles, les surfaces des triangles et les positions des points à rester égales à leur valeur initiale.



**Figure 2.** Décomposition de l'objet champ représentant le relief en objets sub-micro segments, angles et triangles. Les traits épais représentent les courbes de niveau.

Lorsqu'un objet micro subit une transformation brusque (comme un déplacement) qui altère sa relation avec un champ, il va chercher à étirer le champ localement. Cet étirement va provoquer le déplacement de l'un des points du champ (cf. figure 3). Ce déplacement a pour conséquence de violer les contraintes de certains objets sub-micros, puisque des longueurs de segments, des valeurs d'angles et des aires de triangles ont changé. Notre but est de permettre de diffuser l'effet de ce déplacement en déplaçant les points voisins du point étiré, pour atteindre une situation d'équilibre

entre les contraintes internes et externes. Pour cela, nous proposons de modéliser les points comme des agents.



**Figure 3.** *Déplacement initial d'un point.*

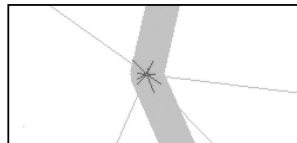
### 3.3. Les agents point

Chaque point est modélisé comme un agent : son but est d'atteindre une position d'équilibre. Pour cela, il dispose des méthodes suivantes :

vérifierEquilibre() : cette méthode calcule, pour chacune des contraintes des objets sub-micro auxquels le point appartient, et pour chacune des contraintes d'étirement auxquelles il est éventuellement soumis, le déplacement à effectuer pour satisfaire totalement cette contrainte. Si la somme vectorielle de ces déplacements est plus petite qu'un certain seuil (égal à la précision des données), alors le point est considéré comme étant en équilibre. Sinon, non. La figure 5 représente un point en équilibre avec, en étoile, l'ensemble des déplacements provoqués par ses contraintes.

calculerDeplacement() : cette méthode fournit à l'agent point un déplacement pour chacune de ses contraintes (celles de ses objets sub-micro et celles des étirements éventuels). Ce déplacement n'est pas le déplacement à effectuer pour satisfaire totalement cette contrainte, mais seulement une part de ce déplacement permettant de progresser vers la satisfaction de cette contrainte. Des détails sur cette méthode se trouvent dans [GAF 06].

progresserVersEquilibre() : le point effectue un déplacement égal à la somme des déplacements donnés par la méthode calculerDeplacement().



**Figure 5.** *Un point en équilibre: la somme vectorielle de ses déplacements est nulle*

Cette modélisation des points sous forme d'agents cherchant une position d'équilibre est analogue à celle proposée dans [BAE 98]. La différence essentielle de notre proposition est l'utilisation d'un niveau sub-micro nécessaire au traitement des déformations, et sur lequel porte les contraintes élastiques. Nous n'utilisons pas cette approche par équilibre au niveau micro : pour le traitement des objets micros, nous pensons que les modèles à base de transformations brusques sont plus adaptés. D'où la nécessité de rendre les modèles compatibles. Nous présentons maintenant comment ces agents point interagissent.

### ***3.4. Dynamique et interactions entre agents point***

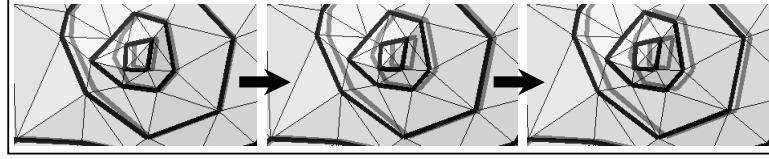
Nous adoptons une méthode spécifique d'activation de nos agents point dans le but de n'activer, lors d'une déformation d'un objet champ, que les agents point devant prendre part à cette déformation. Pour cela, nous donnons la possibilité à chaque agent de « réveiller » ses agents accointants. Les agents accointants d'un agent point P sont les agents dont l'équilibre peut être remis en cause par un déplacement de l'agent P, c'est à dire l'ensemble des agents appartenant aux même objets sub-micro que P.

Le cycle de vie d'un agent point P est le suivant :

- P vérifie s'il est en équilibre.
- Si oui, il se désactive.
- Sinon, il progresse vers son équilibre et active ses points accointants.

Les agents point actifs sont stockés dans une file et sont traités les uns après les autres. A l'état initial, seul le point subissant une contrainte d'étirement provoquée par un objet micro est activé. De proche en proche, les points activés activent leurs points accointants jusqu'à ce que tous aient atteint une position d'équilibre. Ce mécanisme de « réveil » de proche en proche permet de localiser le traitement de déformation : seuls les points devant être déplacés sont considérés, ce qui n'est pas le cas dans les approches par optimisation globale, qui ont tendance à déplacer légèrement des points même très éloignés de l'endroit du déplacement initial.

Ainsi, les agents interagissent via les objets sub-micro : un agent point appartient à plusieurs objets sub-micros et un objet sub-micro est composé de plusieurs agents point. Le comportement individuel des points se traduit au niveau collectif par la déformation de l'objet champ composé par ces points (cf. figure 6).



**Figure 6.** *Progression vers l'état d'équilibre des agents point. (en noir : le relief déformé ; en gris : le relief à l'état initial)*

### 3.5. Articulation du modèle proposé avec les modèles à base de transformations brusques de [RUA 99] et [DUC 04]

Nous avons présenté notre modèle à base de transformations continues. Nous présentons maintenant comment ce modèle d'articule avec les modèles à base de transformations brusques pour la préservation des relations entre objets micro et objets champ. Le problème à résoudre est de faire communiquer les niveaux micro et sub-micro.

L'objet champ à déformer est modélisé comme un agent: son but est que tous les points le composant soient en équilibre. C'est lui qui gère le déclenchement des agents point le composant afin qu'ils atteignent leur équilibre. Nous adoptons ici l'approche proposée dans [RUA 99] et [MEZ 99] sur les systèmes multi-agents récursifs : un agent d'un certain niveau déclenche les agents du niveau inférieur le composant afin d'atteindre son but. Pour notre cas, lorsqu'un objet champ doit se déformer pour satisfaire une certaine contrainte élastique s'appliquant sur un de ses points, il déclenche les agents points qui le composent. Les agents points sont autonomes et atteignent leur état d'équilibre. Une fois la déformation effectuée au niveau sub-micro, l'agent champ reprend la main : il peut alors éventuellement contrôler le résultat de la déformation à son niveau. Cette étape consiste à vérifier si l'état de l'objet champ est toujours satisfaisant, c'est-à-dire s'il ne s'est pas trop déformé.

Pour notre exemple d'application (la préservation de relation entre objets micros et objets champs), ce sont les agents micros tels que les bâtiments et routes qui, après leur généralisation propre, appliquent éventuellement une ou plusieurs contraintes d'étirement à un agent micro champ. Ainsi, si la généralisation d'un bâtiment a débouché sur un changement de son altitude (suite par exemple à un déplacement), alors cet agent micro bâtiment pourra appliquer des contraintes d'étirement adéquates à l'objet champ représentant le relief afin de tenter de rétablir au mieux son altitude. L'objet champ tente alors de se déformer pour atteindre un équilibre entre ses contraintes internes et l'étirement subi. Si l'étirement du champ relief se traduit par un changement de forme trop important de ce relief, le champ peut refuser l'étirement subit, qui sera alors annulé.

#### 4. Conclusion et perspectives

Dans cet article, nous avons souligné que la généralisation cartographique est un processus pour lequel il est nécessaire de gérer conjointement des changements brusques et continus. Il existe des modèles à base d'agent permettant de gérer des transformations brusques. Nous avons proposé un nouveau modèle permettant d'obtenir des transformations continues, et montré comment articuler ce modèle avec ceux existants. La gestion des déformations est un problème difficile à gérer lorsqu'il est traité au niveau de l'objet déformé. L'approche adoptée permet de simplifier le problème en distribuant à la fois sa formulation (au niveau des objets sub-micro, sous forme de contraintes élastiques) et sa résolution (au niveau des agents point).

Cet article illustre la nécessité de faire cohabiter des méthodes basées sur une approche à la fois continue et discrète d'un problème. Ce travail permet de progresser vers un modèle de généralisation de plus en plus complet permettant à la fois des traitements de généralisation au niveau des groupes d'objets (niveau meso), des objets individuels (le niveau micro), et désormais des parties d'objets (le niveau sub-micro) pour les déformations.

Le modèle présenté a été implémenté et testé pour la déformation du relief par un bâtiment en vue de préserver son altitude. Parmi les futurs travaux, nous envisageons de tester ce modèle dans le cas où plusieurs objets agiraient sur un même champ, en particulier des objets linéaires (routes, cours d'eau). Nous envisageons également de mettre au point une mesure de déformation de champ, afin de permettre à un champ de réagir à des contraintes d'étirement trop contraignantes. Parmi les perspectives, nous pourrions utiliser ce modèle pour la déformation d'autres objets tels que les routes et cours d'eau. Il faudrait alors déterminer à quel moment du processus les agents sub-micro sont activés. Nous pourrions également tester l'ajout de nouvelles contraintes et de nouveaux objets au niveau sub-micro, et de mesurer l'impact de ces ajouts au niveau global.

#### 5. Bibliographie

- [BAD 01] Bader M., Energy minimization methods for feature displacement in map generalisation, thèse de doctorat de l'université de Zurich, 2001.
- [BAE 98] Baeijs C., Fonctionnalité émergente dans une société d'agents autonomes ; étude des aspects organisationnels dans les systèmes multi-agents réactifs, thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble, 1998.
- [BRA 88] Brassel K., Weibel R., « A review and conceptual framework of automated map generalisation », *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 2, No 3, p. 229-244, 1988.
- [BRE 99] Breton L., Zucker J.-D., Clément E., Une approche multi-agent pour la résolution d'équations en physique des milieux granulaires, JFIADSMA'99, Gleizes Marie-Pierre, Marcenac Pierre (ed.), Hermès, 1999.

- [BUR 97] Burghardt D., Meier S., "Cartographic displacement using the snakes concept", dans *semantic modeling for the acquisition of topographic information from images and maps*, sous la direction de Foerstner W., Pluemer L., Birkhaeuser verlag, Basel, 1997.
- [CUE 72] Cuenin R., Cartographie générale, tome 1 et 2, Eyrolles, 1972.
- [DUC 04] Duchêne C., Généralisation cartographique par agents communicants: le modèle CartACom, thèse de doctorat, université Pierre et Marie Curie Paris VI, laboratoire COGIT, 2004. Disponible sur <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/>
- [FER 95] Ferber J., Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective, InterEditions, collection Information Intelligence Artificielle, 1995, ISBN 2-7296-0665-3.
- [GAF 06] Gaffuri J., "Deformation using agents: application to the preservation of relationships between fields and objects", actes de AutoCarto 2006, Vancouver, Etats-Unis, 2006.
- [JAB 03] Jabeur N., Moulin B., Gbei E., « Une approche par compétition d'agents pour la résolution de l'encombrement spatial lors de la généralisation automatique de cartes », actes de JFSMA'03 - RSTI, *Déploiement des SMA, vers un passage à l'échelle*, sous la direction de Briot J.-P. et Ghédira K., Hermès-Lavoisier, 2003.
- [LAM 99] Lamy S., Ruas A., Demazeau Y., Jackson M., Mackaness W., Weibel R., "The application of agents in automated map generalisation", *19<sup>th</sup> International Cartographic Conference*, Association Cartographique Internationale, Ottawa, 1999. <http://agent.ign.fr/public/ica/paper.pdf>
- [MCM 88] McMaster R. & Shea K. 1988. « Cartographic Generalization in a Digital Environment: a Framework for implementation in a GIS », Proceedings of GIS/LIS'88, San Antonio, Texas, États-Unis, 1988, pp.240-249.
- [MEZ 99] Mezura C., Occello M., Demazeau Y., Baejs C., « Récursivité dans les systèmes multi-agents : vers un modèle opérationnel », actes de JFIADSMA, sous la direction de Gleizes M.-P. et Marcenac P., Hermès, 1999, pp. 41-52.
- [RUA 99] Ruas A., Modèle de généralisation de données géographiques a base de contraintes et d'autonomie, thèse de doctorat, université de Marne la Vallée, laboratoire COGIT, 1999. Disponible sur <ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/>
- [RUA 02] Ruas A., "les problématiques de l'automatisation de la généralisation", dans *Généralisation et représentation multiple*, sous la directions de Ruas A., chapitre 4, collection Information Géographique et Aménagement du territoire, Hermès Lavoisier, 2002.
- [SER 00] Servat D., Modélisation de dynamiques de flux par agents. Application aux processus de ruissellement, infiltration et érosion, thèse de doctorat de l'université de Paris 6, Institut de Recherche pour le Développement, 2000.
- [SES 05] Sester M., "Optimization approaches for generalization and data abstraction", international journal of geographical information science, sous la direction de Fisher P., Gahegan M., Lees B., vol. 19, No 8-9, 2005.