

PRÉSERVATION DE L'ÉCOULEMENT DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE SUR LE RELIEF EN GÉNÉRALISATION CARTOGRAPHIQUE

par Julien Gaffuri

Laboratoire COGIT
Institut géographique national,
2-4 avenue Pasteur 94165 Saint-Mandé Cedex
Julien.Gaffuri@ign.fr

Introduction

Dans la majorité des logiciels SIG, les données géographiques sont souvent stockées et gérées sous forme de couches d'objets indépendantes. Beaucoup de relations existant entre les objets de ces couches ne sont pas explicites et peuvent ainsi être rompues par certains traitements sur ces données (comme par la généralisation) et, en conséquence, créer des incohérences entre les données.

Dans cet article, nous nous intéressons à la relation existant entre le relief et le réseau hydrographique. Cette relation est particulièrement importante : dans le monde réel, les cours d'eau s'écoulent sur le relief. Beaucoup de cours d'eau se trouvent dans des vallées (ou thalwegs) profondes qui ont été creusées par les cours d'eau eux-mêmes. Les données géographiques représentant le relief et le réseau hydrographique doivent donc respecter cette relation d'écoulement, qui ne l'est pas toujours dans les jeux de données géographiques. Cette incohérence est souvent la conséquence de la collecte séparée des données altimétriques et hydrographiques (avec des processus d'acquisition différents et indépendants ayant parfois des niveaux de détail différents) sans que leur relation soit prise en compte. Une autre cause est l'utilisation de certains traitements sur le relief, sur le réseau hydrographique ou sur les deux, qui peut altérer la relation d'écoulement. Par exemple, lors du processus de généralisation cartographique, les tronçons hydrographiques peuvent être déplacés afin d'éviter une superposition avec d'autres objets telle une route longeant le tronçon hydrographique (comme c'est souvent le cas dans les vallées). En conséquence, la relation

d'écoulement entre le relief et le réseau hydrographique peut être rompue. Notre objectif est de fournir une méthode pour corriger de telles incohérences.

Plusieurs travaux concernent l'incohérence entre les réseaux et le relief. (Rousseaux et Bonin 2003) proposent une méthode pour corriger l'incohérence entre des routes et un MNT en déformant localement le MNT pour prendre en compte les données altimétriques des routes. Dans (Kremeike 2004), la même approche est proposée pour l'intégration d'un réseau routier généralisé : les routes généralisées (qui ont été élargies à cause de la taille de leur symbole) sont utilisées pour déformer les MNT en utilisant une structure de Voronoï. (Koch et Heipke 2006) proposent une méthode pour l'intégration cohérente de routes et surfaces hydrographiques, et de données altimétriques : une déformation des objets et du MNT est calculée à l'aide d'une méthode d'optimisation. Plus spécifiquement dans le cas du réseau hydrographique, (Wanzeng et al. 2005) proposent une méthode de détection de conflits entre courbes de niveaux et tronçons hydrographiques. Cette méthode est basée sur l'analyse des intersections.

Dans cet article, nous présentons une application du modèle de généralisation automatique GAEL (Généralisation à base d'Agents ELastiques (Gaffuri 2007)) pour corriger les incohérences entre le relief et le réseau hydrographique. Ce modèle fournit une méthode de déformation d'objets que nous appliquons ici au relief et au réseau hydrographique pour préserver la relation d'écoulement. Le but de ce modèle est de traiter le cas général des relations pouvant exister entre des objets (qui sont usuellement représentés sous forme de points, lignes ou

surfaces, comme les bâtiments, routes, rivières...) et les champs (qui représentent des données comme le relief, qui permettent d'affecter une valeur en tout point de l'espace géographique, comme défini dans (Cova et Goodchild 2002)). Dans un travail précédent (Gaffuri 2006b), nous avons proposé une application du modèle GAEL à la préservation de l'altitude des bâtiments pendant le processus de généralisation. Dans cet article, nous nous intéressons au cas plus complexe d'une relation pouvant exister entre un réseau et le relief.

Ce papier est composé de deux parties. Dans un premier temps, nous présentons une méthode de mesure d'écoulement du réseau hydrographique sur le relief. Le but de cette mesure est de déterminer les parties du réseau hydrographique pour lesquelles l'écoulement est mauvais. Cette mesure permet de détecter les endroits où des corrections d'écoulement sont nécessaires. Dans une seconde partie, nous présentons une application de notre modèle de déformation dans le but de transformer le relief et le réseau hydrographique pour corriger l'écoulement. Enfin, nous commentons les résultats de cette méthode avant de conclure et donner des perspectives.

1 Mesure de qualité d'écoulement

Afin de corriger l'incohérence entre le réseau hydrographique et le relief, il est nécessaire de disposer d'une mesure permettant d'évaluer cette incohérence. Notre objectif est de mesurer comment le réseau hydrographique s'écoule, dans le but de détecter où l'écoulement est mauvais et doit être corrigé.

Une première possibilité serait d'utiliser la coupe altimétrique de chaque tronçon hydrographique (qui donne l'altitude en fonction de l'abscisse curviligne). La forme de cette coupe donne beaucoup d'informations sur la relation entre le tronçon hydrographique et le relief, mais n'est pas vraiment adaptée pour l'écoulement. En effet, l'écoulement résulte d'une relation entre les valeurs de pente (et non d'altitude) du relief et du tronçon. Dans le cas général d'une ligne reposant sur une surface, la relation d'écoulement peut se traduire mathématiquement en utilisant le vecteur de pente (ou gradient) de la ligne et de la surface : une ligne s'écoule parfaitement sur une surface lorsque, en tout point de la ligne, le vecteur de pente de la ligne et de la surface sont égaux.

Ainsi, afin de mesurer l'écoulement en un point $P(s)$ d'une ligne (cf. fig. 1a), nous proposons d'utili-

ser les valeurs des angles α et φ (cf. fig. 1b) pour définir un indicateur de qualité d'écoulement Q . α est la différence entre la direction du vecteur tangent à la ligne et la direction de la pente dans le plan horizontal. Cette valeur est dans l'intervalle $[-\pi, \pi]$. φ est la valeur de l'angle entre le vecteur de pente de la surface et le plan horizontal. Sa valeur est dans l'intervalle $[0, \pi/2]$. Lorsque α est nul, la ligne s'écoule parfaitement. Lorsque φ est nul, la surface est horizontale, et l'écoulement peut être considéré comme bon. Plus grandes sont les valeurs de $|\alpha|$ et φ , pire est l'écoulement. Si $|\alpha|$ est plus grand que $\pi/2$, cela signifie que la ligne "remonte" la surface.

Nous proposons de définir un indicateur de qualité d'écoulement par : $Q = 1 - |\alpha| * \varphi * 2 / \pi$. Q appartient à l'intervalle $[0, 1]$. Une grande valeur de Q est trouvée là où l'écoulement est bon. Un écoulement parfait a lieu quand Q vaut 1. La valeur 0 est trouvée là où la ligne monte la pente ($|\alpha|$ vaut alors $\pi/2$) et que la pente est la plus forte possible (φ vaut alors $\pi/2$). Q varie le long de la ligne en fonction de la valeur d'abscisse curviligne s . La variation de qualité d'écoulement le long de la ligne peut être représentée à l'aide de la variation de Q (cf. fig. 1c).

Pour implémenter cette mesure, nous utilisons une représentation du relief sous forme d'un MNT triangulé (cette triangulation est contrainte par les courbes de niveau). Le vecteur pente est constant sur chaque triangle. Chaque tronçon hydrographique est décomposé en un ensemble de segments connectés. Les angles α et φ sont ainsi calculés pour chaque segment (la pente du MNT sous chacun de ces segments est une valeur moyenne).

La figure 2 donne un résultat de cette mesure sur un tronçon hydrographique. Sur la figure 2a, nous pouvons constater que le tronçon hydrographique ne coule pas parfaitement dans son thalweg. Sur la figure 2b, la partie du tronçon hydrographique qui ne coule pas parfaitement semble avoir été détectée en utilisant la mesure présentée précédemment.

Nous avons présenté une mesure pour détecter les incohérences concernant l'écoulement entre le relief et le réseau hydrographique. Dans la partie suivante, nous présentons une application du modèle GAEL utilisant cette mesure. Notre objectif est de corriger l'incohérence en déformant le réseau hydrographique et/ou le relief.

2 Application du modèle GAEL à la préservation de l'écoulement

Dans cette partie, nous présentons une application du modèle GAEL pour le problème présenté. Dans une première partie, nous donnons les principes de ce modèle. Ensuite, nous présentons son application pour notre cas utilisant la mesure de qualité d'écoulement présentée précédemment.

2.1 Les principes du modèle GAEL

GAEL (Généralisation à base d'Agents ELastiques, (Gaffuri 2007)) est un modèle mis au point pour l'utilisation de déformations en généralisation automatique. Le principe de ce modèle est de donner à certains objets un comportement élastique en les décomposant en petites parties (points, segments, angles, triangles...) et en contraignant certaines caractéristiques de ces parties (cf. fig. 3). Cette modélisation est comparable à celle utilisée dans la méthode de (Kocmoud et House 1998) pour le calcul d'anamorphoses. Ces contraintes dépendent des propriétés de forme spécifiques des objets à déformer. La déformation est obtenue à l'aide d'une méthode d'optimisation à base d'agents : les points composant la géométrie de l'objet sont modélisés comme des agents. Un agent peut être défini comme "une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multi-agent, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agent" (Ferber 1997). Le but de chaque agent-point est d'atteindre une position d'équilibre entre les contraintes auxquelles il est soumis. Chaque point peut être comparés à une "objet vivant", qui se déplace de façon autonome pour atteindre une position d'équilibre. La déformation est le résultat du déplacement progressif des agent-points.

Plusieurs modèles de généralisation à base d'agents sont utilisés en généralisation automatique parmi lesquels celui de (Ruas et Duchêne 2007). Le modèle GAEL est une extension de ce modèle, dont l'objectif est d'accéder à l'utilisation d'opérations de déformations. Le but est de permettre une utilisation conjointe d'opérations discrètes et continues pendant le processus de généralisation afin d'améliorer le résultat (Gaffuri 2006a).

2.2 Application à la préservation de l'écoulement

Pour la contrainte de préservation d'écoulement, nous devons prendre en compte 3 types de contraintes:

- les contraintes de préservation de forme internes du réseau hydrographique,
- les contraintes de préservation de forme internes du relief,
- et la contrainte d'écoulement.

Il n'est pas possible de satisfaire simultanément toutes ces contraintes. Pour préserver l'écoulement, il est nécessaire de déformer le réseau hydrographique et/ou le relief. Un équilibre entre ces contraintes doit être trouvé.

Afin de contraindre le réseau hydrographique à garder sa forme, nous proposons de contraindre la position des points, la longueur et l'orientation des segments. Pour contraindre le relief à garder sa forme, nous proposons de contraindre la position des points, la longueur et l'orientation des segments appartenant à des courbes de niveau, ainsi que la surface des triangles (cf. fig. 3).

Pour la contrainte d'écoulement, nous proposons de contraindre la valeur de l'angle θ défini dans la partie précédente à être nul. Cette contrainte peut être séparée en deux contraintes que nous présentons maintenant: une contrainte pour les segments du réseau hydrographique, et une autre pour les triangles du MNT (cf. figure 4).

Contrainte d'écoulement des segments hydrographiques (cf. fig. 4a) : l'orientation de chaque segment est contrainte pour être la plus proche possible de l'orientation de la pente. Chaque segment se comporte comme une aiguille de boussole placée dans un champ électromagnétique. L'effet de cette contrainte est de faire tourner le segment pour l'orienter vers la pente, et de le déplacer pour le faire glisser vers la pente.

Contrainte d'écoulement des triangles du relief (cf. fig. 4b) : l'orientation de chaque triangle de relief est contrainte afin d'être la plus proche possible de l'orientation du réseau hydrographique éventuellement présent au-dessus de lui afin de le faire s'écouler. Pour chaque triangle, une valeur d'orientation du réseau hydrographique au-dessus de lui est calculée

(il s'agit d'une valeur moyenne). L'effet de cette contrainte est de faire tourner et déplacer le triangle. Le MNT se comporte comme s'il était creusé par le réseau hydrographique qui appuie sur lui.

Après leur activation, les agents-points composant le relief et/ou le réseau hydrographique se déplacent progressivement afin de trouver une position d'équilibre entre leurs contraintes. Comme résultat, le relief et le réseau hydrographique peuvent se déformer et l'écoulement être amélioré. Les contraintes présentées en figure 4 peuvent être utilisées conjointement. Elles ont le même effet sur la valeur de l'angle φ : il diminue. Cette évolution peut être constatée sur la courbe de la figure 1c : la courbe remonte progressivement vers la valeur 1 de Q, ce qui signifie que l'écoulement est amélioré. En fonction de la précision géométrique relative des données hydrographiques et altimétriques, il est possible de paramétrer l'effet relatif des deux contraintes (a.) et (b.). Par exemple, si la précision géométrique des données hydrographiques est meilleure que celle de relief (ce qui est usuellement le cas), il est possible de rendre le relief plus déformable que le réseau hydrographique en favorisant la contrainte d'écoulement (b.) au détriment de (a.).

Les contraintes d'écoulement sont pondérées en fonction de la valeur de l'angle de pente φ (défini en figure 1b). En effet, le non respect de la contrainte d'écoulement est moins grave dans une zone presque plate que dans une zone pentue. C'est pourquoi l'effet des contraintes d'écoulement est plus important pour les grandes valeurs de l'angle de pente φ (autour de $\pi/2$). Les contraintes n'ont quasiment pas d'effet quand la valeur de φ est proche de 0.

3 Résultats et discussion

Résultats

La méthode présentée ici a été implémentée sur le SIG Radius Clarity/Gothic©. Des tests ont été effectués sur des données IGN du RGE© (BDTopo© pour le réseau hydrographique et BDAlti© pour les données altimétriques).

La figure 5 présente un premier résultat. Dans cet exemple, nous appliquons une déformation au réseau hydrographique en utilisant la contrainte d'écoulement de segment du réseau hydrographique présentée sur la figure 4a. Le MNT est fixe. Dans la situation initiale (fig. 5a.), notre mesure d'écoulement met en évidence une partie du tronçon avec un mauvais écoulement

(montré par la flèche noire). La figure 5b présente le résultat de la déformation du réseau (le réseau initial est affiché pour comparer). La rivière semble être tombée dans son thalweg. Le résultat est contrôlé par la mesure d'écoulement: la couleur verte montre confirmant l'amélioration de l'écoulement.

La figure 6 présente un second résultat. Dans ce cas, nous appliquons une déformation au relief en utilisant la contrainte d'écoulement de triangle du relief (cf. fig. 4b). Le réseau hydrographique est fixe. La situation initiale est la même que celle en figure 3a. Le résultat de la déformation du relief est présenté en figure 6c. Les courbes de niveau se sont déformées (voir les flèches noires) et l'écoulement du cours d'eau a été amélioré. Le relief se comporte ici comme une surface élastique qui s'adapte automatiquement au réseau hydrographique pour le faire couler, tout en prenant en compte ses contraintes propres internes de conservation de forme. Les figures 6a et b donnent une évaluation de l'état d'écoulement de chaque triangle du MNT en utilisant un indicateur de qualité analogue à celui présenté dans la première partie : plus un triangle est rouge, pire est l'écoulement du réseau hydrographique au-dessus de lui. Inversement, plus un triangle est vert, meilleur est l'écoulement au-dessus de lui. Dans la situation initiale (cf. fig. 6a.), certains triangles sous le tronçon hydrographique sont rouges. Dans la situation finale (cf. fig. 6b.), les triangles sont globalement devenus plus verts.

Discussion

La méthode présentée a été testée sur de nombreux autres cas. Le principal point faible de cette méthode est sa forte dépendance au calcul de la pente du MNT, dont la valeur dépend surtout du niveau de détail du MNT et de la méthode d'interpolation utilisée. Deux MNTs d'une même zone avec des niveaux de détail différents et qui ont des valeurs d'altitude proches en chaque point peuvent avoir des valeurs de pente très différentes. En conséquence, des résultats insatisfaisants sont obtenus dans certaines parties où le calcul de pente est inexact. Par exemple, la présence de triangles plats (cf. fig. 7a.), plus particulièrement dans des thalwegs profonds, peut avoir de mauvaises conséquences sur l'écoulement. La méthode présentée pourrait être améliorée en corrigeant les artefacts tels que les triangles plats, ou en utilisant une autre méthode d'interpolation.

La méthode est aussi affectée en présence de certaines variations brusques de pente, comme le

cas de la présence de talus (cf. fig. 7b.). La direction d'écoulement d'un cours d'eau dans la réalité peut être influencée par de telles zones de relief à fortes variations de valeur de pente. Ces zones ne sont pas toujours représentées dans les données altimétriques. Sur la figure 7b, la direction d'écoulement du cours d'eau est détectée comme étant mauvaise, alors qu'un talus (représenté par un trait épais) dévie la cours d'eau. Une solution possible serait d'enrichir le MNT avec de tels objets afin d'insérer une zone à forte valeur de pente proche de la rivière. Une autre solution serait d'enrichir les capacités des agents-points du réseau hydrographique: chaque agent-point serait capable de percevoir le talus proche et pourrait se déplacer en conséquence (par exemple, en allant se coller au symbole du talus).

En ce qui concerne les temps de calcul, le processus de déformation prend 2s pour la déformation du réseau hydrographique (fig. 5) et environ 6s pour la déformation du relief (fig. 6). Pendant ces processus, seuls quelques agents-points sont activés (cf. fig. 7c pour la déformation du relief). Les agents-points en mouvement ont la capacité de pouvoir activer eux-mêmes leurs voisins (Gaffuri 2006a). La déformation se propage en fonction de son amplitude et des contraintes de forme du relief. De nombreux enrichissements de la méthode de déformation peuvent être envisagés.

Bibliographie

- Cova T. J., Goodchild M. F., 2002**, "Extending geographical representation to include fields of spatial objects", *International Journal of Geographical Information Sciences*, vol. 16, n° 6, p. 509-532.
- Ferber J., 1997**, *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*, InterEditions.
- Gaffuri J., 2006a**, *How to merge optimization and agent based techniques in a single generalization model?*, Workshop on generalisation, Association cartographique internationale, Commission en généralisation et représentation multiple, Vancouver, Washington, Etats-Unis, juin 2006.
- Gaffuri J., 2006b**, "Deformation using Agents for Map Generalization - Application to the Preservation of Relationships between Fields and Objects", *AutoCarto 2006*, Vancouver, Washington, Etats-Unis, juin 2006.
- Gaffuri J., 2007**, "Field deformation in an agent-based generalisation model: the GAEL model", *dans GI days'07 – forum jeunes chercheurs*, Münster, Allemagne, septembre 2007.
- Koch A., Heipke C., 2006**, "Integrating 2D topographic vector data with a digital terrain model – a consistent and semantically correct approach", *dans 12th International Symposium on Spatial Data Handling*, Vienne, Autriche, p. 353-364.
- Kocmoud C. J., House D. H., 1998**, "A constraint-based approach to constructing continuous cartograms", *dans 8th International Symposium on Spatial Data Handling*, Vancouver, Canada.
- Kremeike, K., 2004**, "Generalization of dense digital terrain models while enhancing important objects", *International Archive of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 35, ISPRS, Istanbul, Turquie.
- Rousseaux F., Bonin O., 2003**, « Towards a coherent integration of 2D linear data into a DTM », *dans: 21^e Conférence cartographique internationale*, Durban, Afrique du Sud, août 2003, p. 1936-1942.

Dans cet article, nous avons présenté une application du modèle GAEL pour le cas particulier de la préservation d'écoulement. La méthode présentée ici pourrait être généralisée à de nombreuses autres relations existant entre d'autres réseaux (en particulier le réseau routier) et d'autres champs. Pour le réseau routier, on constate que de nombreuses routes de montagne ont pour propriété d'avoir une pente constante lorsqu'elles permettent la montée d'un versant. Nous pourrions fournir une contrainte permettant la préservation de cette constance de la pente. (Gaffuri 2007) présente une autre contrainte qui concerne les sections de canaux, qui ont pour propriété d'être horizontales. Le principe est le même que celui présenté dans cet article, sauf que la valeur cible de l'angle α est $\pi/2$ et non 0.

Conclusion et perspectives

Dans cet article, nous avons présenté une application du modèle GAEL pour la préservation de l'écoulement du réseau hydrographique sur le relief. Le principe est de conférer au réseau hydrographique et au relief un comportement élastique en les décomposant en segments et triangles contraints, puis en contraignant l'écart angulaire entre la pente et la direction des segments du réseau à être nul. Cet article propose aussi une mesure de qualité d'écoulement qui peut être utilisée indépendamment de la méthode de déformation pour permettre la détection des zones de mauvais écoulement.



La figure 3 exemple de contraintes de préservation de formes d'objets déformables

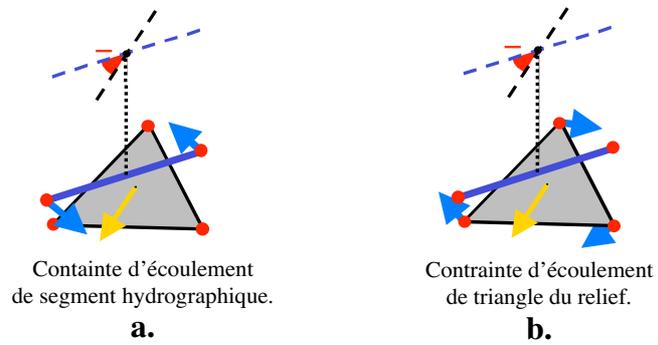


Figure 4 : Les contraintes d'écoulement.

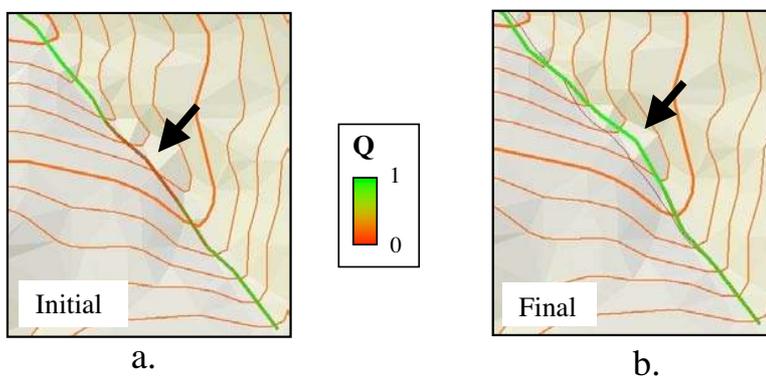


Figure 5 : Déformation du réseau hydrographique pour la préservation d'écoulement

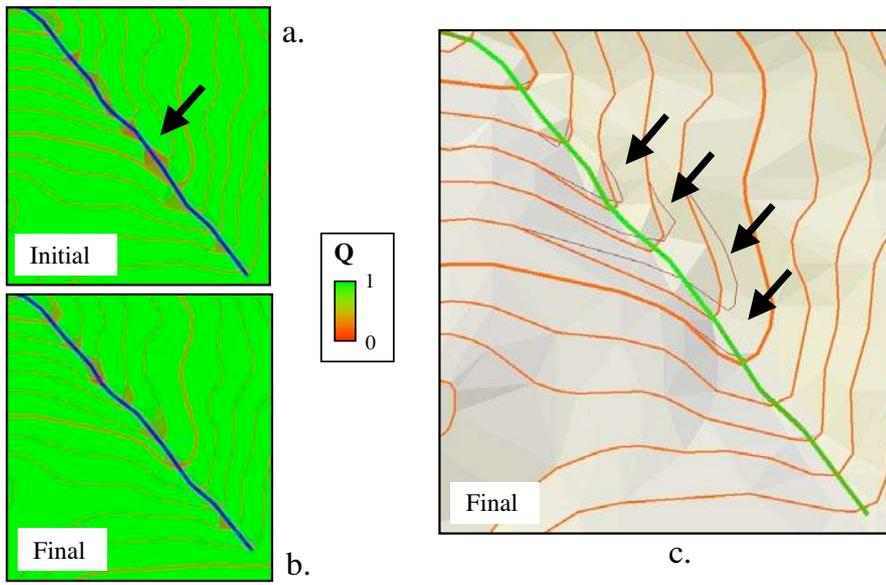


Figure 6 : Déformation du relief pour la préservation d'écoulement

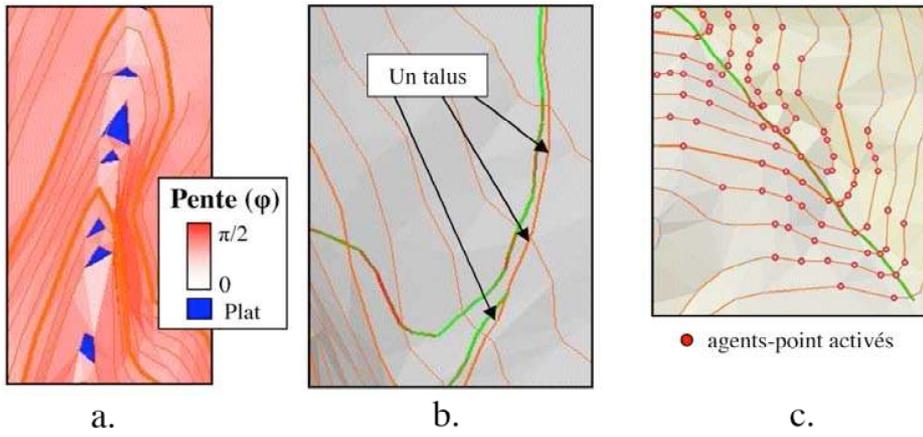


Figure 7