

REPRÉSENTATION DU RELIEF EN ZONE DE MONTAGNE

par François Lecordix, Loïc Gondol, Patrick Julien, Kusay Jaara

Institut géographique national,
73 avenue de Paris - 94160 Saint-Mandé

Courriel : francois.lecordix@ign.fr ; loic.gondol@ign.fr ; patrick.julien@ign.fr ; kusay.jaara@ign.fr

En 2004, l'Institut géographique national a lancé un important projet appelé Nouvelle Carte de Base pour développer une nouvelle ligne de production pour la réalisation des cartes topographiques au 1 : 25 000 et au 1 : 50 000 à partir de la base de données géographique BDUni®. Toutes les cartes de la France (1810 feuilles) doivent être redessinées à partir de cette base géographique, en particulier dans les zones de montagne. Dans le passé, beaucoup d'éléments de ces zones ont été dessinés manuellement par des cartographes expérimentés, en utilisant des outils de dessins et en travaillant avec des photographies aériennes : estompages, rochers, éboulis, glaciers. Un problème spécifique concerne les courbes de niveau qui sont obtenues par restitution photogrammétrique (ou par généralisation de cette restitution) avec un objectif cartographique.

Dans la nouvelle ligne de production par cartographie numérique, les données concernant le relief sont contenues dans des MNT et des orthophotos. Ces données sont issues d'une corrélation automatique ou elles sont produites en utilisant de nouveaux capteurs (lidar ou radar). Il est nécessaire de développer des solutions pour extraire les données cartographiques du MNT : zones de forte pente, orientation de la pente, limite haute des zones de rochers et lignes de plus grande pente. Ces éléments sont utilisés pour symboliser les zones de haute montagne et les courbes de niveau cartographiques qui satisfassent les besoins cartographiques.

Dans ce papier, la première partie concerne les solutions mises en œuvre pour symboliser les données extraites des MNT en zone de haute montagne. La seconde partie propose une nouvelle solution pour extraire les courbes de niveau d'un MNT. Les résultats sont comparés avec les courbes de niveau venant d'une restitution photogrammétrique.

Introduction

En France, la carte de base qui couvre l'ensemble du territoire à l'échelle la plus détaillée est au 1 : 25 000 et comporte 1810 feuilles. Celles-ci ont été établies en première édition entre 1922 et 1980 par le Service géographique des armées (jusqu'en 1940) et par l'Institut géographique national (IGN) qui lui a succédé. Toutes ces cartes ont été, depuis, mises à jour, d'abord manuellement et maintenant interactivement principalement en mode raster. Depuis 1993, 470 feuilles ont été entièrement réfectionnées en mode vecteur en exploitant comme données initiales la base de données topographiques IGN BDTopo® ; mais ces feuilles ont été réalisées en dehors des zones de hautes montagnes qui existent en France, notamment avec le massif des Alpes et celui des Pyrénées. Toutes les cartes les plus détaillées dans les régions de haute montagne ont été réalisées autrefois par des cartographes expérimentés qui utilisaient le dessin manuel et les photographies

aériennes pour représenter, en particulier, les rochers, les éboulis, les glaciers et les estompages. Les courbes de niveau étaient obtenues par restitution photogrammétrique (ou par généralisation de cette restitution) et ensuite redessinées manuellement pour obtenir la carte.

En juin 2004, l'IGN a lancé le projet de la Nouvelle carte de base afin de développer une nouvelle chaîne de production entièrement numérique pour les cartes topographiques aux échelles du 1 : 25 000 et du 1 : 50 000, en exploitant la base de données géographiques vecteur BDUni et diverses sources pour compléter l'information qui doit être présente dans la base de données cartographiques et sur les cartes finales. Pour développer cette nouvelle chaîne de production, le projet a dû travailler sur de nombreux sujets différents : spécifications des sources et des produits, collecte d'informations, extractions de données, mise en cohérence de données, gestion de bases de données, généralisation, symbolisation car-

tographique... Des informations sur cette nouvelle ligne de production ont déjà été présentées à la précédente Conférence cartographique internationale à Moscou (Braun et al. 2007). Dans ce papier, nous nous focaliserons sur les problèmes liés à la représentation cartographique des zones de relief marqué (montagne) ou très marqué (haute montagne) qui peuvent comprendre très localement aussi des zones plus plates (thalwegs ou larges vallées).

Le relief sur ces cartes topographiques est représenté à la fois par l'information orographique (courbes de niveau, estompage et points cotés), mais aussi par la symbolisation spécifique des zones de haute montagne. Dans le nouveau processus numérique étudié, deux problèmes distincts doivent être traités : l'extraction d'informations à partir des nouvelles données disponibles et la symbolisation de cette information. Mais, pour ces deux problèmes, il existe la même contrainte imposée au projet de la Nouvelle carte de base : proposer des processus beaucoup moins coûteux que certaines solutions utilisées dans le passé par des cartographes expérimentés qui pouvaient passer plusieurs centaines d'heures par feuille pour dessiner les zones de haute montagne en exploitant des photographies aériennes.

Dans une première partie, cet article présentera les nouvelles sources d'informations dont dispose le projet de la Nouvelle carte de base pour réaliser sa cartographie et les problématiques auxquelles il est confronté pour obtenir le produit final avec ces nouvelles sources. Les solutions mises en oeuvre pour extraire et représenter l'information sur l'occupation du sol seront ensuite présentées, en deuxième partie, dans le cas des zones de haute montagne. Enfin, la troisième partie s'attachera à décrire les solutions mises en oeuvre localement sur l'extraction des courbes de niveau pour les thalwegs et les larges vallées.

Des nouvelles données aux nouvelles problématiques

Pour réaliser au XX^e siècle la première édition de la Carte de base au 1 : 25 000 en zone de montagne, le cartographe disposait de deux sources d'informations indispensables pour cartographier le relief :

1) Les courbes de niveau, à intervalles de 5, 10 ou 20 m, issues de la restitution photogrammétrique réalisée en atelier par un restituteur, et de levés de terrain complémentaires réalisés par un topographe pour les zones masquées sur les photos aériennes. L'important travail de saisie

de l'information était donc réalisé en amont du travail du cartographe. Disposant de toute l'information géométrique et la symbolisation se limitant à des traits de différentes épaisseurs et couleurs, le cartographe avait essentiellement un travail de mise en forme cartographique à réaliser pour obtenir le rendu final attendu pour les courbes de niveau.

2) Les photographies aériennes pour traiter les zones de haute montagne. À partir de ces photographies et en utilisant différentes techniques de cartographie traditionnelle décrites dans (Imhof 1958) (estompage, rochers à l'effet, variation colorimétrique des courbes de niveau suivant la nature du terrain reconnue sur les photos, représentation de lignes de structure...), le cartographe fournissait un rendu cartographique des plus expressifs de la zone considérée, mais au prix d'une charge de travail conséquente et d'un travail très personnel où les instructions écrites de réalisation étaient peu présentes (fig. 1).

Dans le cas du processus de la Nouvelle carte de base en ce début de XXI^e siècle, les données initiales disponibles pour réaliser la cartographie évoluent de façon significative, en particulier :

1) pour l'information altimétrique où l'arrivée de nouveaux capteurs (lidar, radar) et de nouveaux processus automatiques (corrélation automatique) conduisent à disposer en premier d'un modèle numérique de terrain (MNT) et non directement des courbes de niveau comme autrefois où le MNT était un produit dérivé de la numérisation des courbes de niveau ;

2) pour l'information d'occupation du sol où le MNT précédent permet aussi de générer, avec les photos aériennes, des orthophotos qui sont des images corrigées des déformations liées au relief, et donc superposables avec la carte à réaliser et pouvant remplacer avantageusement les photographies aériennes pour le travail de cartographie.

Dans les deux cas, les données de référence mises à la disposition du projet de la Nouvelle carte de base sont d'une meilleure précision que les données antérieures et d'une meilleure actualité que celles de la carte existante, incitant donc à vouloir exploiter ces nouvelles sources de données. Ainsi, pour l'information altimétrique, on dispose - ou plus exactement on disposera à terme - d'un MNT à pas de 1 m sur tout le territoire obtenu par corrélation

automatique ou par lidar, sauf pour les zones de haute montagne (Alpes, Pyrénées, Corse, Cévennes) où le MNT sera obtenu par des techniques radar avec un pas de 5 m. Pour l'information sur l'occupation du sol, le survol périodique (tous les 3 ans) de tout le territoire français fournit une information permettant d'observer les évolutions que connaissent les zones de haute montagne avec le réchauffement climatique, en particulier sur les glaciers.

Cependant, les premiers essais de rédaction cartographique entrepris avec ces nouvelles données ont fait apparaître cinq problèmes, notamment en les comparant avec les cartes établies précédemment :

- 1) En zone de haute montagne, la disponibilité de l'orthophoto ne résout pas le problème de reconnaissance des différentes zones présentes (glaciers, rochers, éboulis) sur l'image que rédigeait autrefois le cartographe en même temps qu'il effectuait la symbolisation.
- 2) En zone de haute montagne, il n'existe pas de solution opérationnelle pour symboliser en numérique et de manière expressive les différentes zones rencontrées sur l'orthophoto (rochers et éboulis notamment). Les représentations à l'effet utilisées précédemment par les cartographes ne peuvent être reproduites dans un processus numérique, sans un redessin complet de ces zones, et donc sans un coût dépassant très largement les contraintes financières fixées au projet.
- 3) En zone de large vallée, les courbes de niveau obtenues par calcul de lignes isohypses à partir du MNT présentent un niveau de détail beaucoup trop important pour un rendu cartographique.
- 4) En zone de thalwegs, les courbes de niveau obtenues par calcul de lignes isohypses à partir du MNT sont trop arrondies et ne remontent souvent pas assez haut le long du thalweg.
- 5) Les estompages numériques obtenus à partir des nouveaux MNT sont nettement moins satisfaisants, quant au rendu cartographique, que les estompages fournis par les artistes cartographes, surtout en zone de haute montagne.

La suite de cet article va présenter les solutions mises en oeuvre par le projet de la Nouvelle carte de base pour apporter une solution aux quatre premiers points. Le dernier point concernant l'estompage,

important pour obtenir des résultats de cartographie très expressifs quant au relief, n'a pas été encore abordé par le projet et ne sera pas examiné dans cet article.

Extraction et représentation des zones d'occupation du sol pour la haute montagne

Afin de cartographier l'occupation du sol des zones de haute montagne, le projet de la Nouvelle carte de base avec l'aide du laboratoire de recherche MATIS de l'IGN a mis en place une solution permettant d'extraire les diverses informations utiles sur l'occupation du sol (rochers, éboulis, glaciers, forêts, pâturages, lacs) et sur les caractéristiques du relief (crêtes), puis de les représenter.

La méthode d'extraction de l'occupation du sol à partir de l'orthophoto et du MNT a été décrite principalement dans (Le Bris et al. 2007) et (Gondol et al. 2008). Elle repose sur une première étape de segmentation de l'image en régions homogènes proposée par (Guiges 2004) et (Guiges et al. 2006), puis sur une classification de ces régions homogènes en utilisant une approche statistique : les différentes informations sur une région sont interprétées en termes de probabilité, la classe attribuée à une région étant la classe la plus probable selon une méthode proposée par (Trias-Sanz 2006). Pour réaliser cette classification, des données d'apprentissage sont nécessaires en amont, définies préalablement sur l'orthophoto par un opérateur. Les canaux utilisés de l'image sont des canaux dérivés des canaux originaux (rouge, vert, bleu, proche infrarouge), qui permettent de mieux différencier les thèmes d'occupation du sol. Le processus utilise aussi, pour la classification, des connaissances externes introduites sous forme de probabilité, provenant notamment du MNT (altitude, pente, orientation, ombre), mais aussi d'une classification moins résolue provenant d'une information saisie à plus petite échelle comme CORINE Landcover 2000. Au final, la classe attribuée à une région est la classe qui maximise le produit des probabilités relatives à la région sur la base de différentes sources d'information. À l'issue de la classification, un processus automatique de filtrage a été ajouté permettant d'éliminer les trop petites surfaces qui nuiraient à la lisibilité de la carte à l'échelle du 1 : 25 000. Enfin, pour retoucher localement la classification, un processus interactif a été introduit permettant de faire corriger la classification par un opérateur en fonction de son analyse personnelle en s'appuyant sur l'orthophoto, les clichés photographiques permettant de voir en stéréo, et éventuellement sur la carte ancienne (Andrianjafy 2008).

Afin de répondre à des besoins de symbolisation, des outils supplémentaires ont été mis en place pour extraire de l'information du MNT et de la classification précédente : orientation des lignes de plus grande pente des éboulis, lignes de haut et de bas de rochers, crêtes, orientation suivant un pas de 20° et distinction suivant la pente (seuil de 100%) des zones de rochers, pour distinguer au final 36 sous-classes de rochers.

La méthode de représentation des informations précédentes a été décrite dans (Gondol et al. 2008). Les outils utilisés sont ceux, classiques, d'un logiciel de symbolisation -Mercator du groupe Star-Apic dans notre cas - utilisant des symboles ponctuels et linéaires, des poncifs et des trames, avec tous les paramètres permettant de faire varier les couleurs, les épaisseurs, les tailles, les orientations, les espacements, etc. Ces outils sont utilisés automatiquement et le dessin interactif est exclu pour atteindre les objectifs de réduction des coûts déjà évoqués. La plus grande difficulté réside alors, non pas dans l'utilisation des outils logiciels, mais dans les choix sémiologiques effectués pour arriver à représenter les zones de rochers et d'éboulis, à faire ressortir les crêtes et les différents flancs des montagnes. Diverses solutions ont été expérimentées en s'appuyant sur les travaux de (Imhof 1982) et sont encore en cours d'études avec des tests auprès d'utilisateurs de cartes en haute montagne (guides, gendarmes, secouristes...). Des exemples de symboles élémentaires sont fournis en figure 2. On peut citer par exemple les choix suivants :

- Un poncif hachuré irrégulier avec des traits fortement marqués et orientés a été choisi pour les zones de rochers avec des pentes supérieures à 100%, ce poncif étant orienté suivant l'une des 18 orientations déterminées préalablement grâce au MNT (fig. 2a).
- Un autre poncif de hachures moins marquées est choisi pour les zones de rochers avec des pentes inférieures à 100%. Ce motif est orienté suivant la tangente à la courbe de niveau moyenne de la zone considérée (fig. 2b).
- Un symbole ponctuel circulaire et de taille variable est utilisé pour les éboulis en pente raide, ce symbole étant répété le long des lignes de plus grande pente avec un grossissement de la taille du cercle suivant la longueur de la ligne de plus grande pente (fig. 2c).
- Un motif surfacique, composé de points et surfaces arrondies aléatoires, est répété pour les éboulis en terrain relativement plat (fig. 2c).

- Un trait est utilisé pour représenter les lignes de crêtes. Différents essais sont actuellement en cours pour choisir la largeur et la couleur de ces traits (fig. 2a).

- Différents essais sont aussi faits sur les courbes de niveau pour les représenter ou non sur les zones de rochers.

Différents tests ont été réalisés sur les cartes des Pyrénées et des Alpes. Une première impression d'un prototype a été faite sur la feuille de Modane dans les Alpes. Des professionnels de la haute montagne (guides, secouristes, gendarmes...) ont eu l'occasion de visualiser ce prototype et de le comparer avec l'ancienne carte établie manuellement (fig. 3). Des propositions ont été faites pour améliorer le produit et devraient être réalisées d'ici septembre 2009 sur une nouvelle zone (la feuille de Megève) avant de lancer une expérimentation du prototype sur le terrain. Si les résultats sont positifs, la production de la cartographie des zones de haute montagne pourrait commencer en 2010.

Extraction de courbes de niveau pour les thalwegs et les larges vallées de montagne

La Nouvelle carte de base devant couvrir l'ensemble du territoire français, le projet a eu l'occasion d'expérimenter aussi la cartographie sur d'autres feuilles situées non pas en haute montagne, mais en simple montagne où les glaciers, les rochers et les éboulis ne sont pas présents et ne sont pas les éléments principaux pour représenter le relief. Dans ces zones, le relief est représenté principalement par les courbes de niveau et l'estompage. Les problèmes évoqués précédemment disparaissent, mais de nouveaux défauts apparaissent, liés au calcul des courbes d'isohypses à partir des MNT à mailles carrées provenant des nouvelles sources de données.

Afin de faire ressortir ces problèmes, un test de cartographie des courbes de niveau a été mené sur la région de Pau, situé au sud de la France et au nord du massif des Pyrénées. Cette région comporte de la moyenne montagne (début de la chaîne des Pyrénées) avec des thalwegs marqués et des plaines plus larges avec la présence de rivières comme le gave de Pau. Disposant simultanément des courbes de niveau issues d'une restitution par un opérateur - qui correspondent en fait à celles qu'utilisait le cartographe au XX^e siècle pour cartographier sa zone -- et d'un MNT à pas de 1m issu de la corrélation automatique - c'est-à-dire les don-

nées de référence prévues au XXI^e siècle pour la chaîne de la Nouvelle carte de base—, cette zone offre un grand intérêt pour le projet. En effet, elle donne l'occasion de pouvoir comparer sur les courbes de niveau les résultats obtenus par un restituteur – qui seront considérés comme données de référence - et les données de travail constituées par l'extraction à partir du MNT de courbes isohypses avec le même pas d'intercourbes.

La comparaison de ces deux sources de données a permis de faire ressortir les points suivants :

- En montagne, la concordance géométrique des courbes de niveau issues des deux processus (restitution et extraction d'isohypses après corrélation automatique) est très forte sauf en zone de forêts. Ce dernier point est logique puisque le MNT issu de la corrélation est parasité par la présence des forêts. Hors zone de forêts, il est donc possible d'exploiter en cartographie les courbes de niveau dérivées de la corrélation (fig. 4a).
- Au niveau des thalwegs (hors forêts aussi), la correspondance se dégrade avec des courbes issues de la corrélation, plus arrondies au thalweg et remontant moins haut que celles, fournies par le restituteur, représentées sur la carte (fig. 4a).
- En zone de plaine, le calcul direct des courbes isohypses à partir du MNT issu de la corrélation automatique fournit des courbes beaucoup trop détaillées, qui ne répondent pas au besoin cartographique (fig. 4b et 4c).

Ces deux défauts observés ont incité le projet à rechercher des traitements spécifiques à appliquer au MNT afin d'obtenir un nouveau MNT d'où seront extraites les courbes de niveau attendues en cartographie. Ces traitements doivent avoir pour effet de lisser le MNT en plaine, et au contraire de faire réapparaître l'encaissement des thalwegs. La méthode d'ajustement de surface par "grille élastique" (de Masson d'Autume 1978), qui permet d'obtenir simultanément ces deux effets, a été retenue. Son principe est de construire une surface (maillage) de courbure minimale, donc lisse, ajustée sur des points connus (ici le MNT originel à améliorer) ; de plus, en supprimant la condition de courbure minimale le long de certaines lignes, on fait apparaître des "cassures", ce qui est l'effet recherché pour des thalwegs bien marqués (fig. 5). La mise en oeuvre a été réalisée lors d'un stage de fin d'études (Jaara 2008).

Pour traiter le problème des courbes trop détaillées en zone de plaine, la solution proposée consiste à appliquer des réglages différents pour la grille élastique suivant le type de zones : plates ou avec du relief. En faisant varier de façon empirique le pas h de la grille élastique (choisi à une valeur de 5 m en montagne et de 10 m en zone plus plate) et le coefficient de lissage μ (passant de 0.1 à 0.001), il est alors possible d'obtenir sur les zones plates un rendu des courbes de niveau voisin de celui réalisé par le restituteur (fig. 6).

Pour traiter le problème de la forme des courbes au niveau des thalwegs, la solution proposée consiste à détecter d'abord, sur les courbes extraites, les thalwegs marqués. La méthode retenue pour ce type de thalwegs consiste à chercher les portions de courbe présentant une forte courbure (fig. 7a), puis à déterminer des amorces de thalwegs sur chacune de ces courbes en calculant la courbe bissectrice (fig. 7b), puis à chaîner les amorces de thalwegs afin d'obtenir une ligne continue. Cette ligne de thalweg est ensuite utilisée comme ligne de cassure introduite dans le MNT. Les points situés au voisinage de cette ligne de cassure sont éliminés pour ne plus contraindre la surface et pour que les lignes de cassure puissent agir dans la grille élastique (fig. 7c). Un nouveau MNT peut alors être calculé en prenant en compte ces lignes de cassure et d'où les courbes de niveau sont extraites. Un exemple de résultat est fourni dans la figure 8.

Ces travaux de stage visant à obtenir des courbes cartographiques à partir des nouveaux MNT disponibles sur la France au pas de 1 m en plaine et 5 m en montagne sont en cours d'industrialisation. La prise en compte simultanée dans les traitements des deux types de zones évoquées précédemment - plaine et montagne d'une part, thalwegs marqués d'autre part - est en cours et devrait permettre, en 2010, la production de courbes cartographiques sur l'ensemble du territoire français.

Conclusion

Cet article a permis de souligner les difficultés rencontrées pour cartographier en numérique l'ensemble du relief de France à partir des nouvelles sources de données disponibles que sont les MNT et les orthophotos. De nouvelles solutions sont en cours de mise en place pour extraire l'information attendue et la représenter cartographiquement de façon la plus expressive possible, mais aussi la moins onéreuse, afin d'obtenir une cartographie différente mais de même qualité que celle réalisée précédemment en manuel. Si des résultats notables ont été obtenus

sur l'extraction des courbes de niveau à partir des MNT et la représentation des zones de haute montagne, ces méthodes restent à valider par une utilisation effective en production. Ces efforts ne pourront être complètement couronnés de succès que si des progrès sont aussi effectués pour la réalisation

d'estompages numériques qui puissent remplacer avantageusement ceux réalisés en dessin traditionnel. Ce domaine voisin constituera sans doute un nouvel axe de travail pour le projet de la Nouvelle carte de base dans les mois à venir.

Bibliographie

ANDRIANJAFY H., 2008, *Développement d'une interface graphique pour la classification de montagne*, DUT de Montreuil- Institut géographique national.

BRAUN A., HALBECQ X., LECORDIX F., LE GALLIC J.-M., PRIGENT F., 2007, "A new flowline for the French topographic maps in I.G.N.", dans *Proc. of the International Cartographic Conference*, Moscow, Russia.

DE MASSON D'AUTUME G., 1978, « Construction du modèle numérique d'une surface par approximations successives : application aux modèles numériques de terrain (MNT), *Bulletin de la Société française de photogrammétrie et de télédétection*, n° 71-72.

LE BRIS A. et BOLDO D., 2007, « Extraction of landcover themes out of aerial orthoimages in mountainous areas using external information », dans *Proc. of the ISPRS Conference Photogrammetric Image Analysis (PIA)*, Munich, 6p.

GONDOL L., LE BRIS A., LECORDIX F., 2008, "Cartography of High Mountain Areas", *6th ICA Mountain Cartography Workshop*, Lenk, Switzerland.

GONDOL L., LE BRIS A., LECORDIX F., 2008, "A new approach for mountain areas cartography", *SDH*, Montpellier.

GUIGUES L., 2004, *Modèles multi-échelle pour la segmentation d'images*, École doctorale Sciences et ingénierie de l'Université de Cergy-Pontoise, Cergy-Pontoise, 302 p.

GUIGUES L., COQUEREZ J.-P., LE MEN H., 2006, « Scale sets image analysis », *International Journal of Computer Vision*, n°68 (3), p. 289-317.

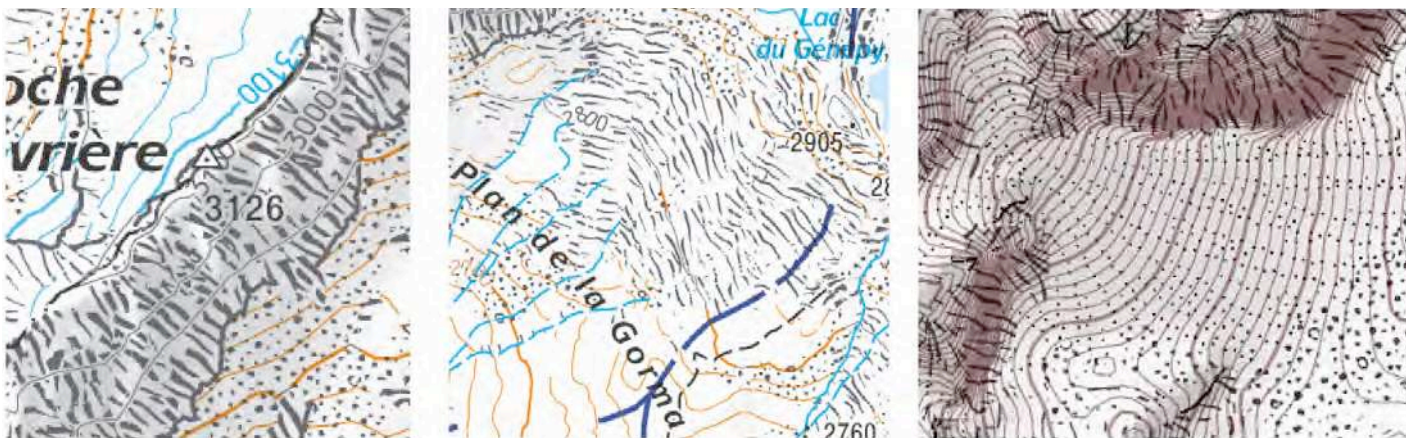
IMHOF E., 1982, *Cartographic Relief Presentation*, W. De Gruyter.

JAARA K., 2008, *Extraction de courbes de niveau cartographiques à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT)*, Rapport de stage de Master 2 recherche en informatique, Université Paris Sud- Institut géographique national.

TRIAS-SANZ R., 2006, *Semi-automatic high-resolution rural landcover classification*, Université Paris 5, Paris, 374 p.



Figure 1 : Cartographie des zones de haute montagne obtenue manuellement avec les courbes représentées en différentes couleur, les rochers dessinés à l'effet, les éboulis



a) Rochers en forte pente

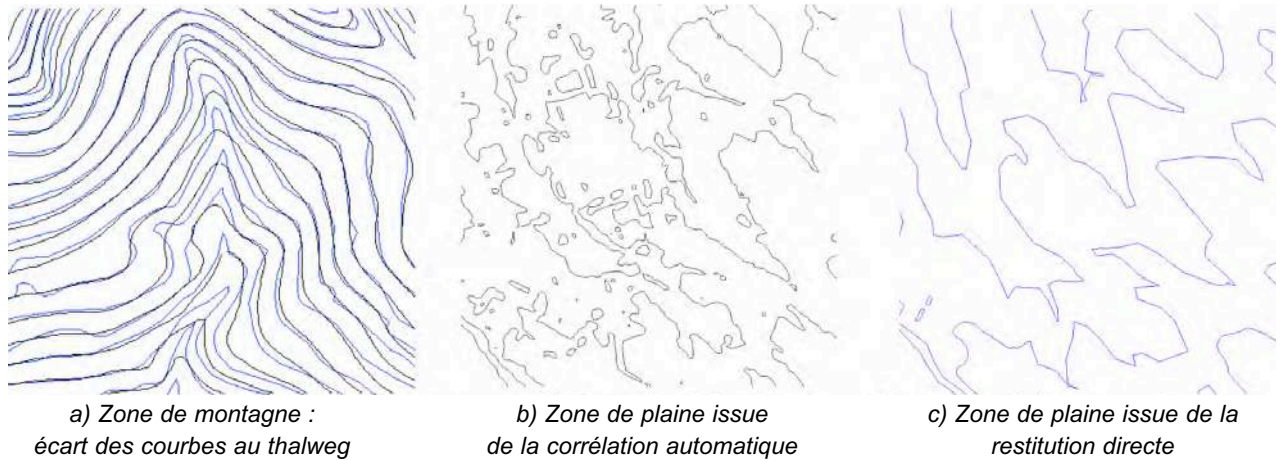
b) Rochers en faible forte

c) Éboulis

Figure 2 : Exemples de symboles cartographiques utilisés pour représenter (a) les rochers en forte pente et les crêtes, (b) les rochers en pente moyenne, (c) les éboulis en pente raide et en terrain relativement plat



a) Ancienne carte dessinée manuellement b) Nouvelle carte obtenue automatiquement
 Figure 3 : Comparaison de représentation du relief en haute montagne sur la feuille de Modane



a) Zone de montagne : écart des courbes au thalweg b) Zone de plaine issue de la corrélation automatique c) Zone de plaine issue de la restitution directe

Figure 4 : Comparaison des courbes obtenues par restitution (en bleu, servant de référence) et les courbes calculées à partir du MNT à pas de 1m issu de la corrélation automatique (en noir)

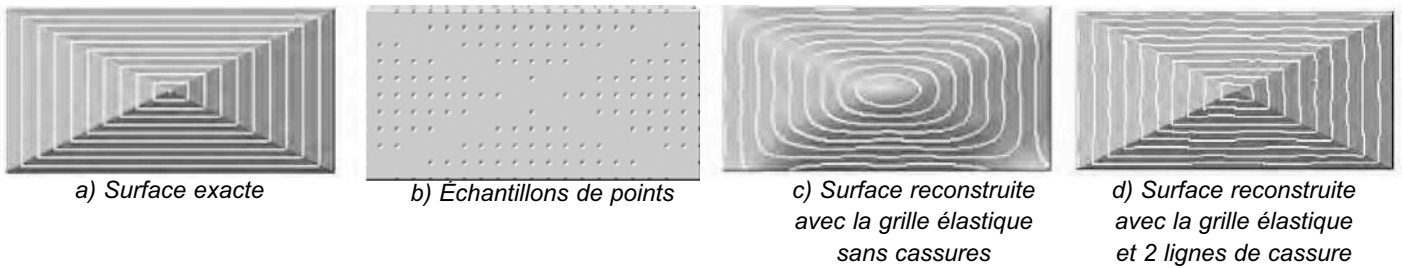


Figure 5 : Effet de l'introduction de lignes de cassure dans la grille élastique pour la reconstruction de surface à partir d'un échantillon de points

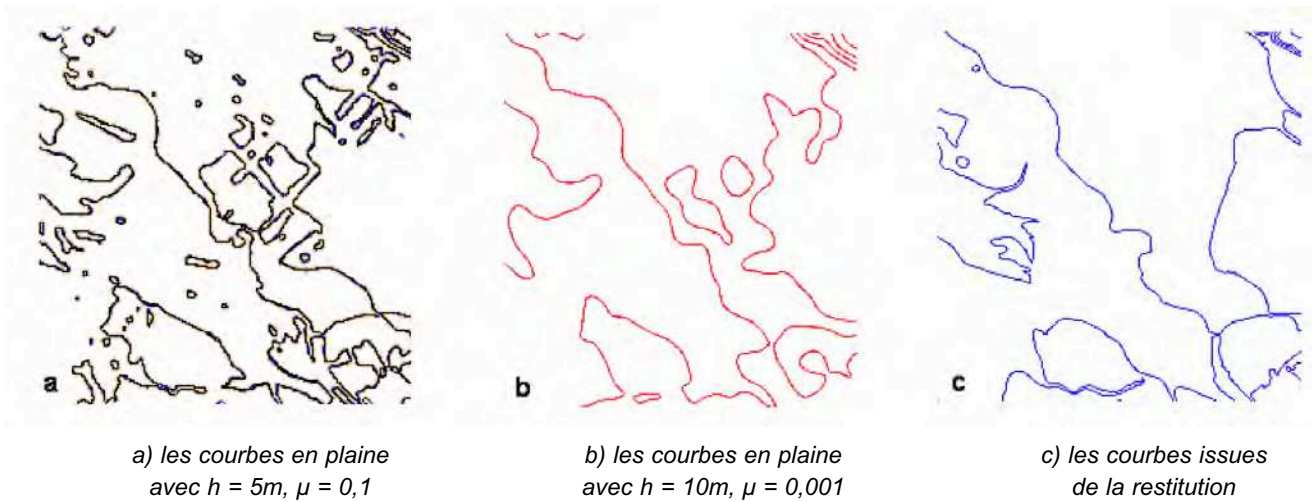


Figure 6 : Choix des paramètres de la grille élastique en plaine pour obtenir un rendu similaire à celui obtenu par un restituteur

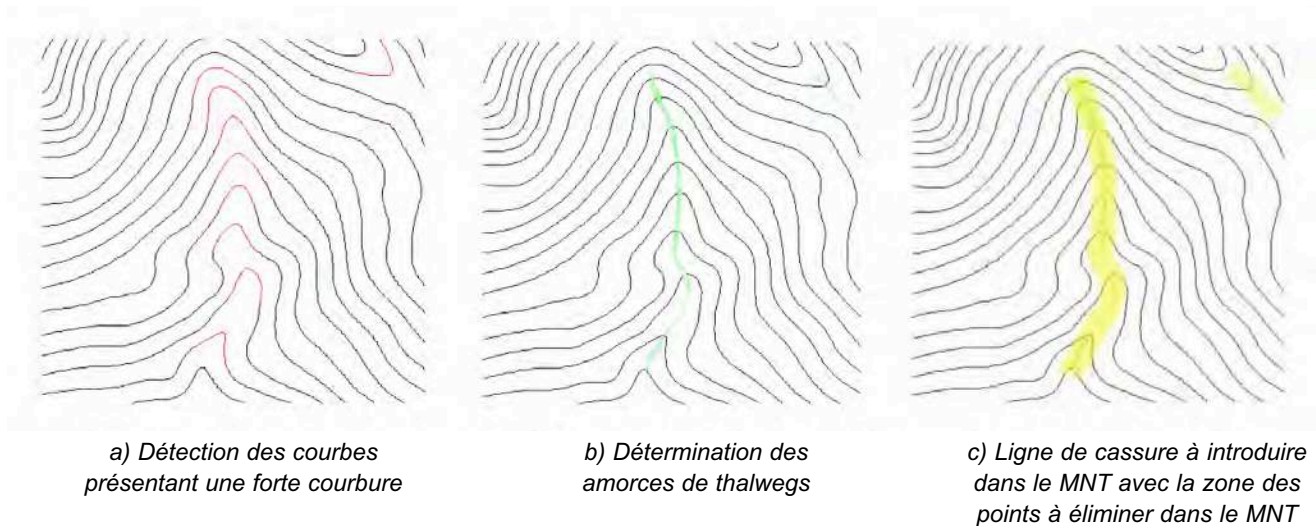
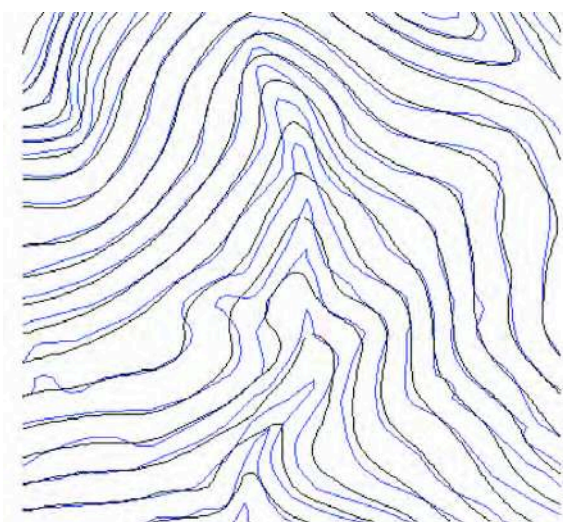
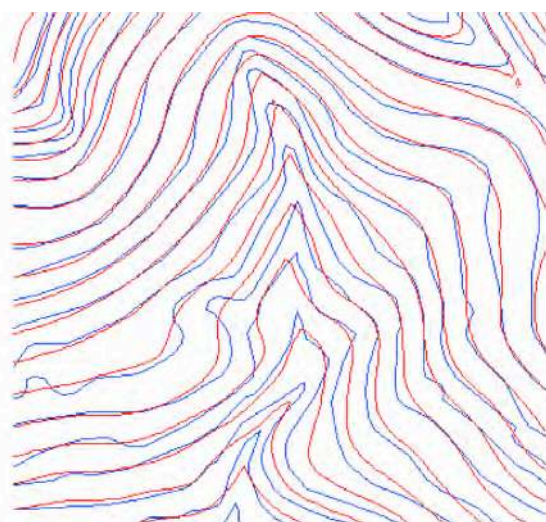


Figure 7: Processus de création des lignes de cassure à introduire dans le MNT



a) Courbes de niveau issues du MNT brut (noir) et les courbes de référence issues de la restitution (bleu)



b) Courbes de niveau issues du nouveau MNT recalculé avec les lignes de cassure (rouge) et les courbes de référence(bleu)

Figure 8 : Comparaison des courbes de niveau obtenues après utilisation de la grille élastique avec des lignes de cassure au niveau des thalwegs marqués