

EXTRACTION DES COURBES DE NIVEAU CARTOGRAPHIQUES À PARTIR D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN (MNT)

par Kusay Jaara et François Lecordix

Institut géographique national
73 avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé
kusay.jaara@ign.fr, francois.lecordix@ign.fr

L'Institut géographique national (IGN) étudie le renouvellement de l'ensemble des cartes topographiques aux 1 : 25 000 et 1 : 50 000. Le projet « Nouvelle carte de base » a été lancé afin de développer une ligne de production pour des cartes topographiques à partir des bases de données géographiques, et de diminuer les coûts de production des cartes topographiques. Le projet vise également à automatiser l'extraction des courbes de niveau, et à profiter des MNT de haute résolution récemment disponibles à l'IGN. Ces données sont issues de corrélation automatique, où elles sont produites en utilisant des nouveaux capteurs (lidar ou radar). La haute résolution de MNT est une percée pour extraire des éléments cartographiques tels que les courbes de niveau cartographiques, les cols et les sommets. Dans un article précédent (Lecordix, 2009), nous avons présenté un projet de recherche pour produire des courbes de niveau cartographiques à partir de MNT. Depuis lors, la méthode a été développée et mise en œuvre à l'IGN, afin de disposer d'un outil de production des courbes de niveau. La première partie du papier donne des détails techniques concernant l'extraction des courbes de niveau avec les problèmes résolus au cours de l'implémentation. La seconde partie va introduire notre méthode pour extraire les cols de montagne et les sommets du MNT. La dernière section comprend les résultats et un résumé des avancées.

1 Objectif et contexte

La carte de base couvre l'ensemble du territoire français et comporte 1810 titres. La mise à jour de cette série est faite manuellement depuis plus de 30 ans et, récemment, interactivement. Les courbes de niveau présentes sur ces cartes ont été obtenues initialement par restitution photogrammétrique ou par généralisation de cette restitution. En 2004, l'Institut géographique national (IGN) a lancé le projet « Nouvelle carte de base » pour pouvoir réaliser des cartes topographiques aux échelles du 1 : 25 000 et du 1 : 50 000 à partir des bases de données topographiques BD TOPO®, disponibles récemment sur l'ensemble de la France (Braun et al., 2007). Ce travail implique le développement d'une nouvelle chaîne de production entièrement numérique des cartes topographiques en exploitant la base de données vecteur BD TOPO® et diverses sources complémentaires. Le projet comporte un travail spécifique sur l'automatisation de la production des courbes de niveau de « qualité cartographique » – appelées par la suite courbes de niveau cartographiques – à partir des MNT haute résolution (5 m ou moins) progressivement dispo-

nibles à l'IGN. Ces MNT offrent aussi la possibilité d'extraire d'autres éléments topographiques, comme les cols et les sommets. De nombreux articles focalisent sur la production de courbes de niveau comme (Riegler et al., 2006) et (Wang, 2008). La différence apportée par notre travail est que nous faisons la plupart des manipulations sur le MNT, et non pas sur les courbes qui rendent les courbes davantage liées au paysage réel.

Dans cet article, on se focalise sur l'extraction des courbes de niveau cartographiques avec des inter-courbes de 5 ou 10 m, à partir de MNT d'une résolution suffisante (pas de 5 m), puis nous présentons nos méthodes pour extraire les points sommets et les points de cols nécessaires pour la carte, et enfin sont décrits quelques résultats obtenus dans différentes régions.

2 L'approche

Les isohypses – nous utiliserons ce terme pour les distinguer des courbes de niveau de qualité cartographique – obtenues directement des MNT n'ont pas la

qualité requise pour les besoins cartographiques : trop détaillées en zone de plaine, nuisant par conséquent à la lisibilité de la carte, elles peuvent manquer, à l'inverse, de formes en zone de montagne en particulier pour faire ressortir les thalwegs. Lors d'une restitution photogrammétrique, le restituteur de courbes de niveau cartographiques va s'attacher à réaliser cette tâche de généralisation en lissant les isohypses en zone de plaine pour simplifier les formes et en marquant plus nettement les thalwegs dans certains endroits en zone de relief pour montrer plus aisément à l'utilisateur, par les courbes, certaines caractéristiques topographiques.

Notre méthode, qui a été présentée au cours de la 24e Conférence cartographique internationale (Lecordix et al., 2009), consiste à lisser les MNT en plaine et préserver, voire marquer plus nettement, l'encaissement des thalwegs. La méthode d'ajustement de surface utilisée est l'algorithme de "la grille élastique" (Masson d'Autume, 1978). Cette grille peut être représentée physiquement comme un assemblage de tiges rigides, deux tiges placées bout à bout étant reliées par une articulation élastique qui tend à les maintenir alignées. De plus, la grille est attachée par des liens élastiques (ressorts) aux points d'échantillon. La surface de la grille élastique est définie par la position d'équilibre de l'assemblage. Pour rendre les courbes moins détaillées en zone de plaine, la solution proposée consiste à appliquer des réglages pour la grille élastique qui diffèrent suivant le type de zone (plaine ou relief). Pour cela, une détection automatique du type de terrain doit être faite afin de régler les paramètres de la grille élastique. Pour bien marquer les thalwegs sur les courbes de niveau cartographiques, la solution proposée consiste à détecter d'abord les thalwegs, puis à introduire dans le MNT des cassures autour des lignes de thalweg. Les points situés au voisinage de chaque ligne de cassure seront éliminés pour ne plus contraindre la surface et pour que les lignes de cassure puissent agir dans la grille élastique. Après traitement, on dispose d'un nouveau MNT sur lequel les courbes de niveau cartographiques - qui seront alors les isohypses de ce MNT - seront calculées. La méthode a été développée et implémentée au sein du projet de la Nouvelle carte de base.

2.1 Les données nécessaires à nos méthodes

Nos méthodes bénéficient des données altimétriques en cours d'acquisition à l'IGN. Suivant les zones, ces données viennent de sources différentes : soit des données lidar pour les zones littorales ou d'inondation et les grandes zones de forêt ; soit des données radar pour la haute montagne ; soit des

données issues de corrélation automatique d'images aériennes pour les autres zones. À partir de ces moyens de collecte de l'information altimétrique, on dispose au final de modèles numériques de terrain à pas de 5m pour le radar et de 1m pour le lidar et la corrélation automatique. Il est important de souligner que ces méthodes de production des MNT inversent l'ordre de production de la méthode ancienne qui utilisait des courbes de niveau pour construire les MNT. Ces nouvelles données altimétriques ont une meilleure résolution par rapport à ce qui était disponible auparavant sur l'ensemble de la France comme données altimétriques (pas de 25 m), mais elles conduisent à la nécessité, pour la cartographie, d'extraire des courbes de niveau cartographiques du MNT. Pour les courbes de niveau des besoins cartographiques au 1 : 25 000, on travaille uniquement sur des MNT de pas de 5m, et, par conséquent, dans le cas des MNT plus résolus (pas de 1 m), on rééchantillonne le MNT à un pas de 5 m. Une résolution plus forte du MNT (1 m par exemple) ralentit le calcul et n'apporte aucune amélioration de qualité pour les besoins cartographiques du 1 : 25 000.

2.2 Détails techniques de l'extraction des courbes de niveau :

- 1 L'extraction des courbes de niveau est composée de 5 étapes :
- 2 Détection des zones plates sur le MNT.
- 3 Détection des lignes de thalwegs.
- 4 Calcul d'un nouveau MNT par la grille élastique.
- 5 Tracé des courbes de niveau cartographiques sur ce nouveau MNT, avec des post-traitements sur les courbes.
- 6 Processus pour obtenir les courbes intercalaires.

Étape 1 : Détection des zones plates sur le MNT

On se sert de réglages différents pour les paramètres de la grille élastique selon le type de terrain (plat ou montagneux) pour obtenir un lissage différent du MNT et donc des courbes. Pour ce faire, on avait besoin d'un algorithme permettant de distinguer les deux types de relief. De nombreuses méthodes existent comme la méthode de (Chaudhry and Machaness, 2008) qui utilise les courbes de niveau, mais on voulait une méthode précise liée directement au MNT. L'algorithme que nous avons développé consiste à diviser le MNT en carrés d'une surface minimum de 900 m², puis on calcule trois valeurs pour chaque carré : altitude minimum Z_{\min} , altitude maximum Z_{\max} et la moyenne des altitudes Z_{moyenne} .

Ensuite on calcule la différence :

$$D = 2 \cdot Z_{\max} - Z_{\text{moyenne}} - Z_{\min}$$

Si D est plus élevé qu'un seuil donné, on considère le carré comme une zone montagneuse, sinon la zone est plate. Le seuil est déterminé de manière empirique, mais peut être modifié par l'utilisateur. Cet algorithme permet de construire, pour la grille élastique, un masque dont chaque pixel indique s'il est dans une zone plate ou pas. Par ailleurs, cet algorithme est aussi utilisé pour distinguer cols et sommets et ne pas traiter les zones plates, et, dans l'algorithme de la distinction des thalwegs, pour éliminer la partie des thalwegs qui passent par des zones plates et dans le tracé des courbes intercalaires pour déterminer les zones où calculer ces courbes.

À la sortie de cette étape, on dispose d'un masque qui indique les deux types de terrain pour la grille (fig. 1).

Étape 2 : Détection des lignes de thalwegs

Dans l'article présenté au cours de la précédente Conférence cartographique internationale (Lecordix et al., 2009), on traçait les thalwegs en cherchant les points de courbure maximale sur les courbes de niveau extraites du MNT initial (Jaara, 2008). L'inconvénient de cette méthode était qu'on ne pouvait pas reconnaître les thalwegs qui sont peu marqués sur les courbes issues du MNT initial. Or, en regardant les données de référence qui sont les courbes issues d'une restitution photogrammétrique, on a constaté que certains thalwegs moins marqués présentaient aussi un renforcement de forme effectué par le restituteur. C'est pourquoi, il était nécessaire de trouver un autre algorithme pour détecter les lignes de thalwegs. L'algorithme qu'on a choisi est l'algorithme de (Jamet, 1994) qui est basé sur la méthode de (Rieger, 1992). D'autres méthodes peuvent être utilisées pour distinguer les thalwegs que les cartographes marquent en utilisant une exagération des courbes de niveau. Cette méthode de calcul de réseaux de thalwegs consiste à déterminer en permanence le débit et la quantité d'une pluie homogène sur tous les points du MNT, le débit étant calculé par unité de longueur orthogonale à la pente. À la fin de cette étape, on aura une carte superposable au MNT, sur laquelle les thalwegs recherchés correspondent aux extrema locaux orthogonalement à la pente calculée sur le MNT. On construit la représentation vecteur des thalwegs de manière récursive, en commençant par les drains de plus fort débit. Puis on construit les thalwegs selon le débit et l'accélération de l'eau entre les points (Kasser et Egels, 2002). L'application de cette méthode ne répond pas

entièrement à nos besoins, parce que le réseau des thalwegs détectés est trop dense et une adaptation a dû être faite pour ajouter des critères afin de limiter la détection. Le premier critère ajouté concerne la position morphologique du point : on passe sur chaque point du MNT, puis on descend vers le point le plus bas suivant. On continue à descendre jusqu'à ce qu'on ne trouve pas un point plus bas ou quand on descend un nombre maximum de points fixé à 20, la figure 2 montre que le nombre maximum est 6.

Pour corriger certains défauts, on refait le passage en commençant par les points n'ayant reçu aucun passage lors de la première passe.

Enfin, le critère sera représenté par un masque de valeurs entières qui sont le nombre de passages (du deuxième passage) de chaque point ; ensuite les points qui ont une valeur plus importante qu'un seuil fixé seront considérés comme points possibles d'un thalweg. Des chapelets de cuvettes peuvent se situer au milieu d'un thalweg (fig. 3) et conduire dans notre méthode à des interruptions de la ligne de thalweg.

Pour prendre en compte cette réalité, on construit un autre arbre d'écoulement en utilisant un MNT fait par rééchantillonnage du MNT d'origine vers un MNT de pas de 20 m. Cet arbre sera utilisé uniquement dans le cas d'un blocage de l'eau présent dans le premier arbre. Pendant la construction des arbres et dans le cas où on ne trouve pas un fils pour un point, on cherche dans son voisinage un point plus bas pour qu'il soit le fils. Pour assurer aussi la continuité des courbes, on accepte des petites parties de courbes qui ne répondent pas aux critères, sauf si le nombre des points hors critères est trop élevé. La distinction des thalwegs nécessite certains paramètres et seuils qui sont fixés expérimentalement et sont modifiables par l'utilisateur. À la fin de cette étape on obtient les lignes de thalweg.

Étape 3 : Calcul d'un nouveau MNT par la grille élastique

Du fait de l'utilisation importante de mémoire dans l'algorithme de la grille élastique, on ne peut pas traiter en une seule fois une dalle complète utilisée pour la cartographie de la Nouvelle carte de base (20 km par 20 km). On est amené par conséquent à diviser le MNT en dalles plus petites, pour pouvoir les traiter séparément, puis à traiter les zones entre les dalles pour corriger des artefacts qu'on peut avoir suite à la division. Cette division nous a permis aussi de paralléliser le processus. On a ajouté la possibilité de passer l'algorithme plusieurs fois pour traiter des zones différemment même si elles sont dans le même MNT.

Pour répondre à nos besoins il faut fournir le MNT avec le masque qui indique le type de relief (plaine ou montagne) et les lignes de thalweg. Il faut aussi fournir les informations comme :

- les paramètres pour chaque type de terrain (plat et montagneux),
- le prolongement demandé pour marquer les lignes de thalweg,
- la taille des dalles de division,
- la largeur de la zone entre les dalles qu'il faut prendre en compte pour ne pas avoir des artefacts.

Pour que l'algorithme réponde à nos besoins, on assigne des valeurs de paramètres pour lisser le MNT dans les régions plates, et pour faire un lissage beaucoup moins fort dans les zones montagneuses; la grille utilise le masque pour distinguer les deux types de terrain. En plus du lissage en zone de plaine, et suivant le paramétrage qu'on a mis, l'algorithme va effacer les points autour des lignes de thalwegs, puis mettre des cassures sur ces lignes en prenant en compte les altitudes de ces lignes. Pour marquer les thalwegs pendant le traitement de la grille élastique, on efface les points du MNT qui sont autour les lignes de thalwegs, on ajoute les points de thalweg au MNT et on met des cassures sur les lignes. En mettant la cassure, les zones concernées ne seront pas lissées et on aura des thalwegs plus marqués. Pour davantage marquer les thalwegs, on peut aussi avoir besoin de les prolonger. Dans ce but on peut modifier les altitudes des lignes de thalwegs en mettant quelques mètres en plus, et après le traitement on aura des courbes pointues et prolongées dans les zones de thalwegs. La distance de prolongement est décidée par l'utilisateur, selon le type de terrain ou selon la source et la qualité du MNT. À la sortie de cette étape, nous obtenons un nouveau MNT traité.

Étape 4 : Tracé des courbes de niveau sur le MNT de sortie, avec des post- traitements sur les courbes

À la fin de traitement du MNT, on trace les courbes sur le MNT de sortie. Ces courbes sont de meilleure qualité cartographique que les courbes extraites du MNT d'entrée. Mais il y aura toujours des artefacts ou des courbes indésirables. Pour les traiter, il faut faire deux post-traitements :

1) L'erreur des courbes isolées : cette erreur est une erreur inévitable, produite par la discrétisation dans les zones de thalwegs (Julien, 1994). Pour la traiter, il faut chercher automatiquement les petites courbes isolées qui sont proches des lignes des thal-

wegs, puis effacer la petite courbe, et étirer la courbe du thalweg sur la courbe effacée (fig. 4).

2) Si la courbe est fermée, trop petite et isolée sans une courbe proche, on l'efface simplement. Par contre, il faut que la taille minimum dans les zones plates soit plus grande que la taille minimum dans les zones montagneuses.

D'autres erreurs sont identifiées et corrigées dans (Rieger et al., 2006).

Étape 5 : L'extraction des courbes intercalaires

Quand les courbes de niveau normales ne sont pas suffisantes pour décrire certaines zones avec des formes de relief non déductibles de deux courbes voisines, on ajoute en cartographie des courbes intercalaires entre les courbes normales. Ces courbes se trouvent généralement dans les zones qui n'ont pas un fort changement d'altitude. Ces courbes sont extraites de la même manière que celle utilisée pour les courbes normales, mais on fait ensuite une élimination pour les parties des courbes qui sont dans les zones de fort changement d'altitude, en assurant une certaine continuité pour ne pas avoir trop d'interruptions dans ces courbes intercalaires.

2.3 Distinction des cols

Il existe des méthodes pour l'extraction des cols, un exemple est la méthode décrite par (Kasser and Egels, 2002) qui considère que le col est le point de rencontre de deux vallées qui séparent deux sommets ; le processus inclut plusieurs manipulations pour éliminer le nombre important de fausses détections. Dans notre approche, on reconnaît un col dans le MNT quand on a un point avec 4 régions (au minimum) autour, dont deux qui sont plus basses et deux qui sont plus hautes (fig. 5). Ces régions doivent être suffisamment grandes et la différence d'altitude assez importante par rapport au point étudié du MNT.

L'algorithme est basé sur l'examen des altitudes autour de chaque point du MNT, et si on trouve ces 4 régions au minimum, on reconnaît un point de col. On optimise le processus par un travail en 2 étapes : dans la première étape, on utilise un MNT fait par un rééchantillonnage de MNT d'origine (5 m) vers un MNT de 20 m, puis on utilise dans la deuxième étape le MNT d'origine, mais on n'examine que les points autour des points détectés lors de la première étape. En fait, à la fin de la deuxième étape, on aura un groupe de points pour chaque col. Pour en choisir un, on donne un score à chaque point. Ce score est calculé par la recherche des deux points les plus proches (un point de chaque côté) où l'altitude est inférieure à 5 m au minimum. Si la distance entre les

points et le premier point d1 est la distance entre le point de col et le deuxième point d2, le score est égal à $d1+d2$. Ensuite on choisit le point qui a le score le plus bas dans chaque groupe, ces points seront alors nos points de cols.

2.4 Distinction des sommets

Le concept utilisé pour distinguer les sommets est de diviser le MNT en carrés. Puis, pour chaque carré, il faut calculer l'altitude maximum Z_{max} . Si un point maximum est plus haut que tous les points maxima des carrés voisins, ça veut dire que c'est un sommet. La finesse d'analyse est modifiable en fonction de la taille du carré : en choisissant une taille de carré moins importante, on aura des sommets plus locaux (fig. 9).

3 Les résultats

La méthode a été exploitée sur un ordinateur PC avec un processeur Intel Xeon 5110 1.60GHz, avec 2 Go de mémoire. Le temps de calcul varie suivant la zone, par exemple il augmente respectivement avec la quantité des zones plates et le degré de lissage. Le temps moyen pour une dalle de 20 km par 20 km est environ 2 heures.

Les courbes dans le cas de zones de plaines

La zone choisie se situe autour de la ville du Mans qui est une zone plate. Son MNT a été produit en utilisant la corrélation automatique (fig. 6).

Les courbes dans le cas de zones montagneuses

La zone sélectionnée se situe autour de la ville de Megève dans les Alpes, très montagneuse, avec un MNT produit en utilisant le radar (fig. 7).

La distinction des cols et des sommets

La figure 8 figure les cols extraits dans une zone montagneuse autour de Megève.

La figure 9 a extrait les sommets dans une autre zone de Megève et autour le lac de la Girotte.

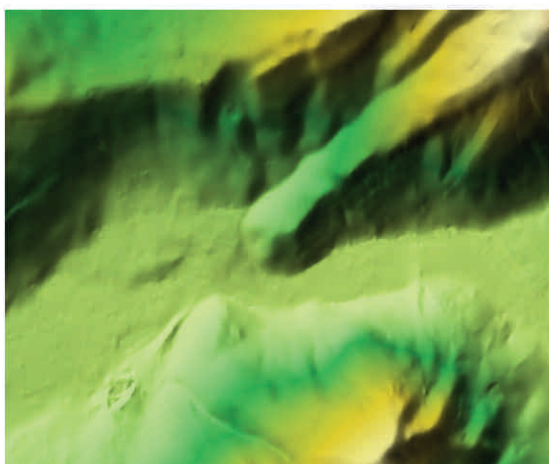
4 Conclusion et perspectives

Lors de notre premier article, nous avons présenté une nouvelle méthode pour extraire les courbes de niveau à partir de MNT. L'IGN a lancé un nouveau processus pour extraire les courbes pour remplacer la méthode manuelle. Dans le présent article, on décrit les détails techniques de l'implémentation de cette méthode qui entre en production, avec les problèmes rencontrés et les solutions mises en place. La distinction automatique du type de terrain a été utilisée pour appliquer différents groupes de paramètres selon la nature de terrain. Le travail inclut la distinction des thalwegs où une méthode d'extraction du réseau de drainage a été utilisée et adaptée avec l'objectif d'extraire les courbes de niveau cartographiques. Enfin, nous avons présenté nos méthodes pour extraire les points de cols et les points sommets. Pour la suite, un traitement similaire peut être fait pour l'extraction de points cuvettes souhaités aussi en cartographie.

Dans notre travail actuel, on suppose que le MNT est homogène, c'est-à-dire issu d'une seule source de saisie (lidar, radar ou corrélation automatique), mais ce ne sera pas toujours le cas. Dans le cas d'un MNT issu de plusieurs sources, des étapes supplémentaires pourront être ajoutées pour traiter chaque zone avec les paramètres correspondants en utilisant à nouveau la grille élastique. L'exploitation des MNT pour des besoins cartographiques à grande échelle doit désormais passer en phase de production pour la Nouvelle carte de base.

Bibliographie

- 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.
- Chaudhry P., Machaness W.**, 2008a, "Creating Mountains out of Mole Hills: Automatic Identification of Hills and Ranges Using Morphometric Analysis" , *Transactions in GIS*, Vol.12 n°5, pp. 567-589.
- 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.
- Duperet A.**, 1999, "Dtm edition in IGN France, an operational process to generate contour lines", dans *Photogrammetric week '99* Heidelberg, Germany.
- Jaara K.**, 2008, *Extraction de courbes de niveau cartographiques à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT)*, Rapport de stage de Master 2 en informatique, Université Paris Sud - Institut géographique national.
- Jamet O.**, 1994, « 'Extraction du réseau des thalwegs sur un MNT », *Bulletin d'information de l'IGN* n°64 : la recherche en 1994.
- Julien P.**, 1994, *Traitements altimétriques (Modèles numériques de terrain)*. Cours du DEA des sciences de l'information géographique.
- Kasser M., Egels Y.**, 2002, « Photogrammétrie numérique », *CRC Press*, p. 277-288.
- Lecordix F., Julien P., Gondol L., Jaara K.**, 2009, « Représentation du relief en zone de montagne », Conférence cartographique internationale, Santiago, Chile.
- Rieger W.**, 1992, "Automated river line and catchment area extraction from DEM data", dans *ISPRS Congress Commission IV, Washington DC*, August, p.642-648.
- Riegler G., Hoepfner E., Li X.**, 2006, "Automatic contour line generation using Intermap's digital terrain model", dans *ASPRS 2006 Annual Conference*, Reno, Nevada, USA.
- Wang T.**, 2008, "An algorithm for extracting contour lines based on interval tree from grid DEM", *Geo-spatial Information Science* 11(2), vol. 11, issue 2, p.103-106.
- Wentworth C.**, 1930, "A simplified method for the determining the average slope of land surface", *American Journal of Science*, 20, p.184-194.



a) Extrait du MNT



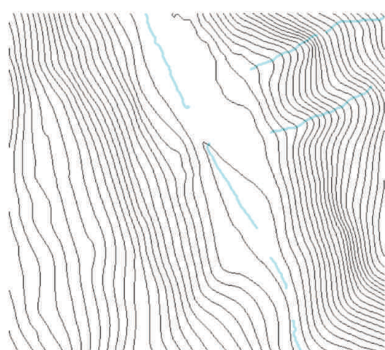
b) Masque du type de terrain

Figure 1 : Masque de type de terrain

100 C=2	105 C=2	107 C=2	108 C=2	109 C=2	110 C=2	115 C=2	120 c=1
104 C=2	102 C=2	103 C=5	105 C=4	102 C=2	105 C=3	110 C=4	112 C=2
105 C=2	101 C=2	100 C=4	101 C=2	105 C=2	100 C=6	104 C=2	101 C=2
90 C=2	80 C=4	90 C=3	92 C=2	90 C=7	101 C=2	102 C=2	100 C=2
80 C=2	65 C=7	70 C=2	80 C=5	95 C=2	100 C=2	105 C=2	101 C=2
70 C=2	60 C=6	72 C=2	80 C=2	98 C=2	102 C=2	103 C=2	105 C=2
75 C=4	70 C=5	83 C=4	82 C=5	100 C=6	104 C=7	105 C=5	110 C=3

100 C=2	105 C=2	107 C=2	108 C=2	109 C=2	110 C=2	115 C=2	120 c=1
104 C=2	102 C=2	103 C=5	105 C=4	102 C=2	105 C=3	110 C=5	112 C=2
105 C=2	101 C=2	100 C=4	101 C=2	105 C=2	100 C=7	104 C=2	101 C=2
90 C=2	80 C=4	90 C=3	92 C=2	90 C=8	101 C=2	102 C=2	100 C=2
80 C=2	65 C=7	70 C=3	80 C=6	95 C=2	100 C=2	105 C=2	101 C=2
70 C=2	60 C=8	72 C=2	80 C=2	98 C=2	102 C=2	103 C=2	105 C=2
75 C=4	70 C=5	83 C=4	82 C=5	100 C=6	104 C=7	105 C=5	110 C=3

Figure 2 : Construction du masque
 Les altitudes de MNT, et la valeur C du masque (à gauche)
 le changement des valeurs après le passage (à droite)

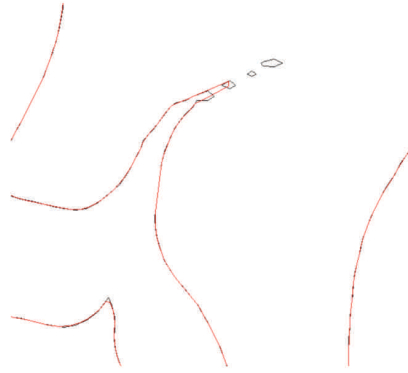


a) Sans élimination



b) Avec élimination

Figure 3 : Élimination de la découpe des thalwegs



*Figure 4 : Effet de post-traitement
 Courbes sans post-traitement (en noir), courbes après le post-traitement (en rouge)*

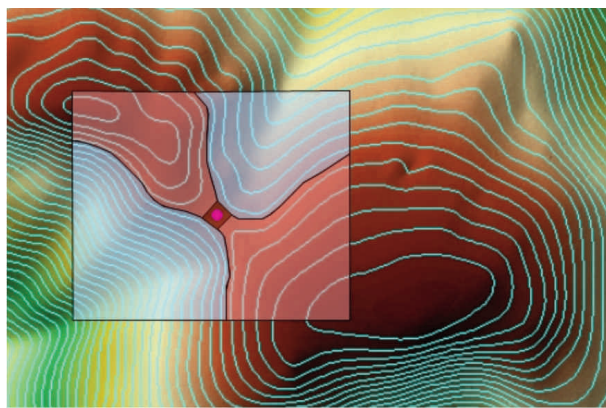
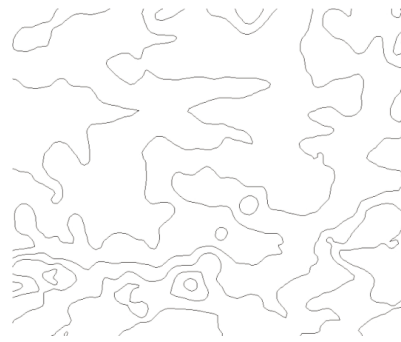


Figure 5 : Extraction des cols



a) Isohypses issues directement du MNT d'origine



b) Courbes de niveau cartographiques issues après traitement du MNT



c) Courbes de référence issues de la restitution directe puis numérisées

Figure 6 : Comparaison des courbes cartographiques sur une zone plate (autour du Mans)

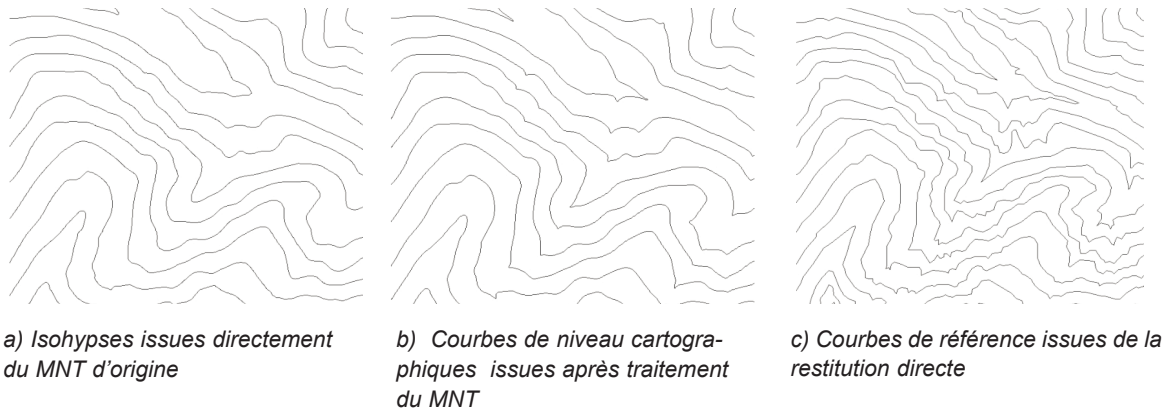


Figure 7 : Comparaison des courbes d'une zone montagneuse (autour de Megève dans les Alpes)

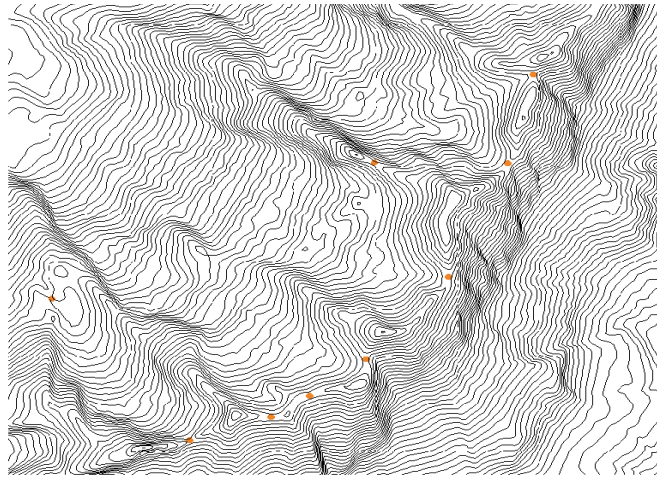
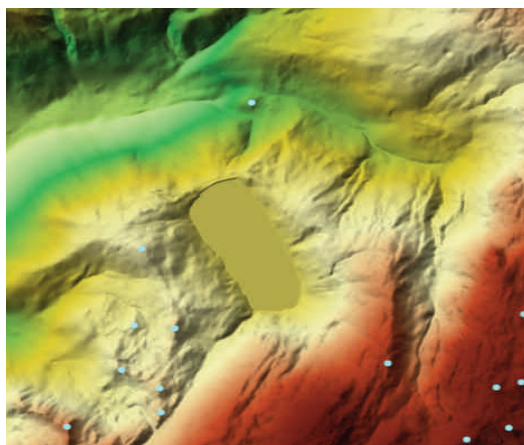
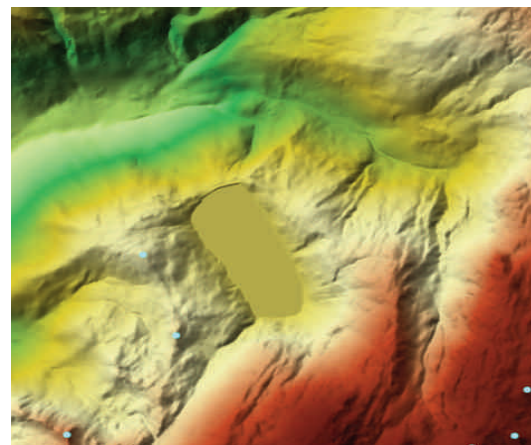


Figure 8 : Les cols d'une zone de Megève



a) Avec une taille de carré 75 m



b) Avec une taille de carré 150 m

Figure 9 : Extraction des sommets d'une zone de Megève

