



HAL
open science

Génération automatique de courbes de niveaux dans les zones de plateaux karstiques

Guillaume Touya, Hugo Boulze, Anouk Schleich, Hervé Quinquenel

► **To cite this version:**

Guillaume Touya, Hugo Boulze, Anouk Schleich, Hervé Quinquenel. Génération automatique de courbes de niveaux dans les zones de plateaux karstiques. *Cartes & géomatique*, 2021, 243-244, pp.193-206. hal-03254114

HAL Id: hal-03254114

<https://hal.science/hal-03254114v1>

Submitted on 8 Jun 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Génération automatique de courbes de niveaux dans les zones de plateaux karstiques

par Guillaume Touya
Univ. Gustave Eiffel, LASTIG GEOVIS, IGN, ENSG
73 avenue de Paris
94160 Saint Mandé
Courriel : guillaume.touya@ign.fr

Hugo Boulze, Anouk Schleich
Univ. Gustave Eiffel, ENSG
73 avenue de Paris
94160 Saint Mandé
Courriel : prenom.nom@ensg.eu

Et Hervé Quinquenel
IGN
73 avenue de Paris
94160 Saint Mandé
Courriel : herve.quinquenel@ign.fr

Résumé : Les courbes de niveau sont l'un des éléments clés des cartes topographiques, car elles facilitent la compréhension du terrain. Mais elles ne sont plus dessinées par des cartographes, elles sont la plupart du temps automatiquement dérivées de modèles numériques de terrain (MNT). Malgré de réels progrès dans cette dérivation automatisée, certains paysages spécifiques restent mal représentés avec de telles techniques, et c'est le cas des plateaux karstiques contenant un grand nombre de dolines (petites dépressions du relief). Cet article propose une méthode automatisée pour obtenir de meilleures courbes de niveau dans ces plateaux, notamment autour des dolines. Le processus détecte d'abord les plateaux karstiques comportant de nombreuses dolines, ainsi que les dolines individuellement. Ensuite, le MNT est lissé afin de mieux refléter le relief du plateau et de ses environs. Dans une troisième étape, les courbes de niveau autour des dolines sont améliorées pour dessiner des éléments ronds lisibles qui reflètent mieux le terrain réel. Le processus a été mis en œuvre dans un plugin QGIS et testé sur une petite zone avec un plateau karstique dans le Jura, en France, et les cartographes de l'IGN, ont évalué les résultats comme une grande amélioration par rapport au processus automatisé générique pour dériver des courbes de niveau.

Mots-clés: courbe de niveau, modèle numérique de terrain, carte topographique, généralisation de la carte

Abstract : Contour lines are a key features of topographic maps as they make the comprehension of terrain more easy. But they are no longer drawn by cartographers, they are mostly automatically derived from digital terrain models. Despite real progress in this automated derivation, some specific terrain landscapes remain incorrectly depicted with such techniques, and this is the case for karstic plateaus full of sinkholes. This paper proposes a specific automated method to derive better contour lines in plateaus, particularly around sinkholes. The process first detects karstic plateaus with many sinkholes, as well as the individual sinkholes. Then, the MNT is smoothed to better reflect the terrain in the plateau and in its surroundings. As a third step, the contour lines around sinkholes are enhanced to draw legible round features that better reflect the real terrain. The process was implemented in a QGIS plugin and tested on a small area with a karstic plateau in the Jura mountain in France, and the cartographers of IGN, the French national mapping agency assessed the results as a great improvement compared to the generic automated process to derive contour lines.

keywords: contour line, digital terrain model, topographic map, map generalization

1. Introduction

Les courbes de niveau sont un élément clé des cartes topographiques car elles facilitent la compréhension du terrain (Wilkening et Fabrikant , 2011; Putto *et al.*, 2014). Afin de produire plus rapidement des cartes topographiques, les cartographes ne dessinent plus les courbes de niveau à partir de vues stéréoscopique, mais elles sont plutôt automatiquement dérivées de modèles numériques de terrain (MNT). Mais les producteurs de cartes ne veulent pas perdre trop de qualité en économisant du temps de production. Des recherches antérieures sur la cartographie de montagne ont proposé des processus automatisés pour tracer des courbes de niveau aussi proches que possible de celles tracées par les cartographes (par exemple, Jaara *et al.*, 2011; Kettunen *et al.*, 2017). Cependant, ces processus automatisés ne fonctionnent pas bien sur des morphologies de terrain très spécifiques, comme par exemple les plateaux karstiques contenant de nombreuses dolines (fig. 1). Les cartographes de l'IGN ont relevé plusieurs problèmes avec les courbes de niveau générées à partir d'un MNT dans cette région spécifique en utilisant le processus de Jaara et al. (2011) (fig. 2):

- des détails insignifiants apparaissent et les courbes ne sont pas assez lisses;
- les courbes relient parfois plusieurs dolines faisant disparaître le motif visuel;
- les courbes ne reflètent pas la morphologie du terrain (la plupart des dolines ne sont pas affichées).



Figure 1. Une doline sur un plateau karstique en France (© [Myrabella](#) / Wikimedia Commons, CC-by-3.0).

Ces problèmes pourraient être en partie résolus avec une sorte de généralisation du relief qui pourrait supprimer les détails insignifiants et améliorer la visualisation des plus importants (les dolines ici) tout en lissant le tout. Suivant le même paradigme que les recherches les plus avancées sur la dérivation de courbes de niveau, c'est-à-dire l'adaptation du processus à la morphologie du terrain (Kettunen *et al.*, 2017), il est clairement nécessaire de mettre au point un processus spécifique pour améliorer la dérivation des courbes de niveau à partir d'un MNT. Cet article propose un tel processus, expérimenté sur les plateaux karstiques des montagnes du Jura en France.



Figure 2. Courbes de niveau dessinées manuellement sur l'image du haut, générées à partir du MNT sur l'image du bas, dans un plateau rempli de dolines.

Dans la deuxième partie, des travaux connexes sont présentés et discutés. La partie 3 décrit le processus complet permettant de déduire automatiquement les courbes de niveau dans les plateaux comportant des dolines. La partie 4 détaille la mise en œuvre et présente les résultats de nos expériences. Enfin, la section 5 présente quelques conclusions et perspectives de ce travail.

1 Recherches connexes

Bien que la dérivation des courbes de niveau à partir d'un MNT soit un processus simple, les techniques standard disponibles dans les outils SIG ne donnent pas des résultats de grande qualité cartographique. C'est pourquoi les chercheurs ont tenté d'améliorer les techniques standard et le traitement du MNT s'est révélé être la meilleure solution par rapport au traitement des courbes de niveau. Le premier problème consiste à caractériser le paysage afin de traiter différemment les zones plates et les zones pentues. Jaara *et al.* (2011) séparent les plaines des montagnes, puis ont identifié des talwegs dans les deux zones. Kettunen *et al.* utilisent l'indice de position topographique (TPI) pour caractériser un relief local. Le TPI est

la différence entre l'altitude en un point du MNT et la moyenne des altitudes environnantes. La cohérence avec les rivières ou les lacs est également un élément clé de la restitution du relief (Gaffuri, 2007), et l'algorithme développé à l'USGS (l'IGN nord-américain) détecte les zones où les courbes de niveau devaient être compatibles avec des étendues d'eau (Tyler et Greenlee, 2012). En ce qui concerne la transformation du MNT, deux méthodes principales ont été proposées : une déformation élastique (Jaara *et al.*, 2011) et un lissage (Rosenkranz *et al.*, 2012; Kettunen *et al.*, 2017). Parfois, les courbes de niveau sont également affinées après le traitement du MNT et la dérivation des courbes (Rosenkranz *et al.*, 2012; Tyler et Greenlee, 2012).

Puisque nous prévoyons de supprimer des détails insignifiants et d'améliorer la lisibilité des structures sous-jacentes du relief, les dolines dans notre cas, ces objectifs sont très proches d'un problème de généralisation cartographique et il semble pertinent de se référer à la littérature sur la généralisation du relief. Guilbert *et al.* (2014) donnent un bon aperçu de ces techniques de généralisation du relief. Une fois de plus, les travaux les plus intéressants portent sur la classification des formes du relief pour adapter les opérations de généralisation à ces formes du relief : par exemple, Guilbert (2013) identifie les formes de relief clés pour obtenir des contours bathymétriques à plusieurs échelles. Mais contrairement aux articles présentés précédemment sur la génération de courbes de niveau, de nombreuses techniques permettent de généraliser les courbes de niveau en supprimant les chevauchements de symboles tout en préservant la forme du terrain (Li et Sui, 2000; Ai, 2004; Gökğöz et Selçuk, 2004; Matuk *et al.*, 2006). Ces techniques sont en fait complémentaires à la transformation du MNT.

Si nous examinons la recherche sur la dérivation automatique de cartes hypsométriques à partir d'un MNT (Leonowicz & Jenny, 2011; Samsonov , 2011) ou sur la visualisation avancée de terrain (Patterson, 2001), les mécanismes sont toujours les mêmes : caractérisation des formes (thalwegs , pics, vallées), puis le lissage des différents reliefs.

Pour résumer cette section sur les travaux connexes, il semble fondamental de commencer par caractériser les formes du relief afin de choisir des processus adaptés à ces formes, puis de traiter le MNT en premier, et enfin d'affiner le résultat avec une généralisation des courbes de niveau. Le processus proposé, décrit dans la section suivante, suit ces principes.

2 Description du processus de dérivation

2.1 Processus complet pour dériver les courbes de niveau

Le processus proposé pour obtenir des courbes de niveau de haute qualité sur des plateaux karstiques comportant de nombreuses dolines, se compose de quatre étapes (fig. 3): (1) lissage global du MNT; (2) en parallèle avec l'étape (1), détection des dolines et détection des plateaux couverts de dolines; (3) exagération des dolines; (4) génération des courbes de niveau à partir des MNT modifiés aux étapes précédentes. Ces quatre étapes sont décrites en détail dans les sous-sections suivantes.

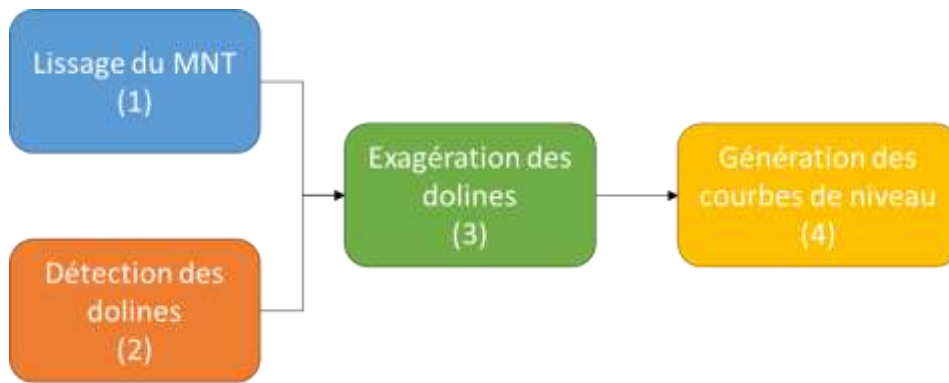


Figure 3. Les quatre étapes principales du flux de travail pour obtenir des courbes de niveau de haute qualité sur les plateaux karstiques.

2.2 Lissage du MNT

Afin de tracer des courbes de niveau lisibles, le MNT d'origine doit être lissé. Pour cela, nous avons utilisé la méthode décrite par Kettunen *et al.* (2017). La méthode dérive deux lissages gaussiens sur le MNT initial (MNT 1 avec un lissage léger et MNT 2 avec un lissage fort). Ensuite, le TPI est calculé et lissé (cTPI). Enfin, nous utilisons ces trois modèles (MNT1, MNT2, cTPI) pour créer un nouveau MNT lissé, appelé cMNT (fig. 4). L'équation (1) montre comment les modèles sont combinés pour créer un cMNT, comme proposé par Kettunen *et al.* (2017).

$$cMNT_{i,j} = cTPI_{i,j} * MNT1_{i,j} + (1 - cTPI_{i,j}) * MNT2_{i,j} \quad (1)$$

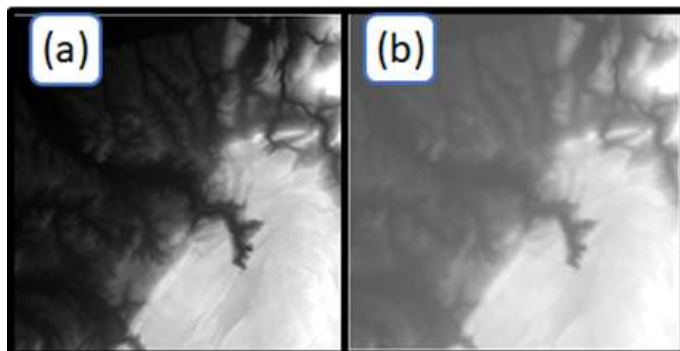


Figure 4. (a) MNT initial. (b) cMNT, le modèle de terrain lissé.

2.3 Détection des dolines

Le but de cette étape (2) est de détecter toutes les dolines des plateaux karstiques, et nous devons d'abord délimiter ces plateaux karstiques. La détection des dolines et des plateaux repose sur la détection de dépressions du relief dans des zones planes. Cette étape (2) est divisée en sept sous-étapes (fig. 5).

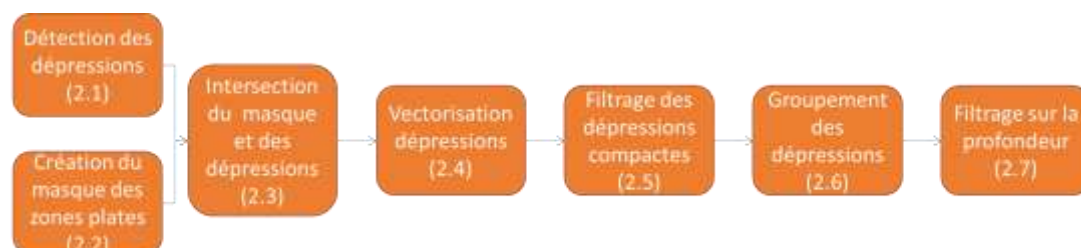


Figure 5. Le processus de l'étape (2) avec les sept sous-étapes de la détection des dolines.

Pour commencer (2.1), nous avons appliqué un lissage gaussien à notre MNT initial (pas le cMNT de l'étape (1)). Ensuite, nous avons soustrait le MNT original à ce MNT lissé et si la différence entre les deux MNT au niveau d'un pixel est supérieure à 1,5 mètre, nous conservons ce pixel comme appartenant à une dépression et comme une doline potentielle. Après cette première sous-étape, nous avons plusieurs pixels qui ont été identifiés, mais tous ne sont pas des dolines. Les étapes suivantes sont donc des filtres différents pour ne conserver que les dépressions qui sont des dolines dans un plateau karstique.

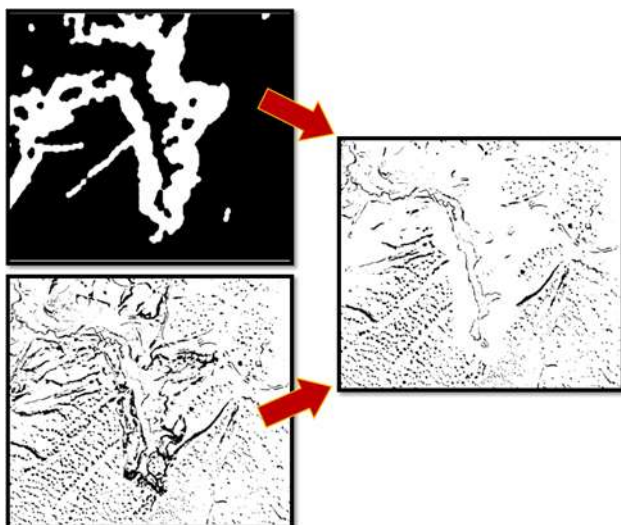


Figure 6. Illustration des étapes (2.1) à (2.3) avec le masque plat / en pente en haut à gauche, la différence entre les MNT donnant des dépressions d'une profondeur supérieure à 1,5 mètre et, à droite, les dépressions situées dans une zone plate.

Ensuite, à l'étape (2.2), nous calculons un masque de régions plates / en pente en utilisant le même principe que Jaara *et al.* (2011). Ce masque est utilisé à l'étape (2.3) pour ne conserver que les dépressions situées dans des régions plates. Les étapes (2.1) à (2.3) sont illustrées sur la figure 6.

Après l'application de ce masque sur nos dolines potentielles, le modèle raster est vectorisé pour le traiter avec des mesures vectorielles (2.4). Nous avons décidé de supprimer les dépressions trop petites et de diviser les dolines en deux catégories en fonction de leur compacité de Miller (équation 2). L'indice de Miller est souvent utilisé pour mesurer la compacité des polygones, en particulier pour détecter des polygones ronds tels que des ronds-points dans un réseau routier (Touya, 2010).

$$compactness = \frac{4 \cdot \pi \cdot area}{perimeter^2} \quad (2)$$

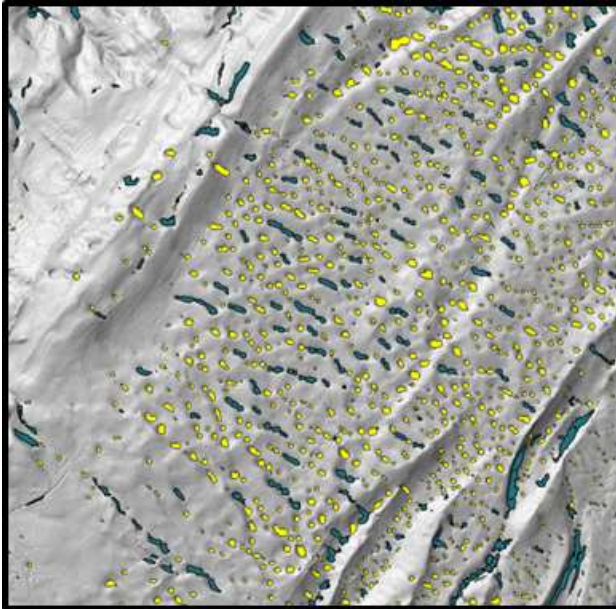


Figure 7. En jaune, les dépressions rondes et en bleu, les longues dépressions, sous le seuil de compacité.

Dans l'étape (2.5), les dépressions avec un indice de compacité supérieur à 0,33 sont désignées comme dépressions rondes et les dépressions avec un indice inférieur à ce seuil sont désignées comme dépressions longues (fig. 7).

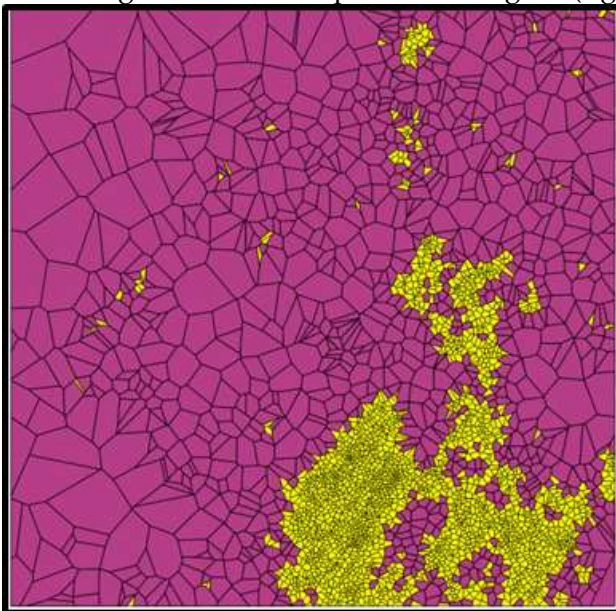


Figure 8. Regroupement des dépressions à base de Voronoï (cellules regroupées en jaune).

Séparer les dépressions rondes et les dépressions longues est utile car différents filtres seront utilisés pour déterminer si elles sont ou non des dolines : les dépressions pas trop longues qui se trouvent sur des plateaux karstiques peuvent être considérées comme des dolines, alors que les dépressions rondes, même si elles ne sont pas dans des zones denses en dolines peuvent également être considérées comme des dolines. Pour identifier les régions denses en dolines, à l'étape (2.6), nous calculons un diagramme de Voronoï sur les centroïdes des dépressions rondes. Ensuite, nous ne conservons que les régions de Voronoï dont la surface est inférieure à 60 000 m² et nous les fusionnons (fig. 8). Ensuite, nous ne conservons que les surfaces fusionnées qui couvrent au moins 200 000 m² et appliquons une dilatation morphologique de 100 m. Ces zones sont nos régions denses en dolines. Puis, nous trions les

polygones de longues dépressions qui se croisent avec la région dense. Sur ces dépressions longues sélectionnées, nous conservons celles ayant une superficie comprise entre 700 et 9 500 m² (c'est-à-dire les petites) et une compacité supérieure à 0,11 (c.-à-d. les plus compactes). Toutes les autres longues dépressions sont supprimées car elles sont plus vraisemblablement des thalwegs.

Nous séparons ensuite les dolines arrondies de la zone dense et les dolines arrondies situées en dehors de la zone dense. Ensuite, un seuil de compacité est fixé plus haut pour les dépressions hors des régions denses. Nous ne conservons que les dépressions supérieures à 1 000 m² et d'indice de compacité supérieur à 0,38, c'est-à-dire que seules les plus compactes sont conservées en dehors des régions contenant de nombreuses dépressions.

À ce stade (2.7), nous avons trois couches différentes avec des dolines potentielles qui ont franchi nos étapes de filtrage: des dépressions arrondies dans les zones denses, des dépressions très rondes et assez grandes en dehors de la zone dense et des dépressions longues dans les régions denses. En fusionnant les trois couches, nous avons constaté qu'il restait quelques fausses dolines. Nous avons constaté qu'elles étaient souvent situées dans des thalwegs. Pour filtrer ces thalwegs, nous avons créé une zone dilatée de 15 m autour des dolines. Cette zone dilatée nous donne des informations importantes sur le terrain autour de la doline et garantit que nous incluons bien le point le plus haut du bord de la doline pour calculer sa profondeur (fig. 9).

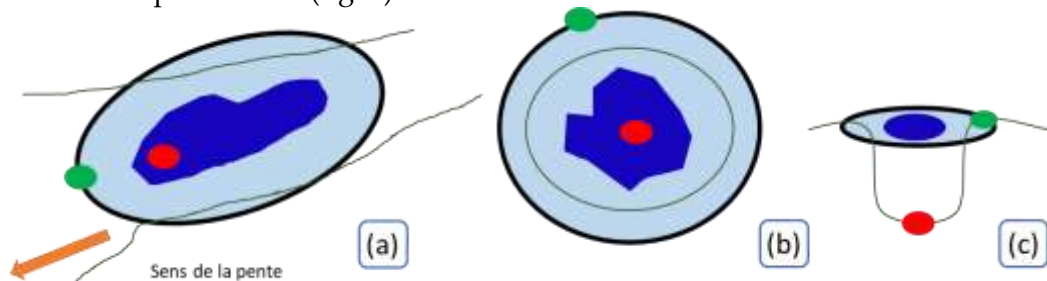


Figure 9. Le point vert représente l'altitude minimale du contour de la zone dilatée, le point rouge représente l'altitude minimale de la doline détectée (a) un thalweg ; (b) une doline; (c) vue en coupe de la doline.

Ensuite, le contour de ce polygone dilaté est extrait et sa hauteur variable est mesurée. Nous utilisons ensuite l'altitude minimale du polygone de dépression et l'altitude minimale du contour du polygone dilaté pour trier les thalwegs des dolines (fig. 9). Si la différence entre l'altitude minimale du contour (point vert de la figure 9) et l'altitude minimale de la dépression (point rouge de la figure 9) est inférieure à 0,8 m, nous considérons alors la dépression détectée comme un thalweg et non comme une doline, et elle est supprimée de notre ensemble de dolines. Comme on le voit sur les figures dans le cas d'un thalweg, le minimum de l'altitude de la dépression est très proche de l'altitude minimale du contour. Contrairement au cas où nous avons une véritable doline dont la forme est une cuvette et dont l'altitude minimale est très inférieure à l'altitude minimale du contour.

À la fin de cette étape (2.7), nous avons une couche de vecteur contenant toutes les dolines détectées ainsi que les régions présentant une densité élevée de dolines.

2.4 Exagération des courbes de niveau autour des dolines

L'étape suivante (3) consiste à exagérer ou caricaturer les dolines. La caricature est une opération générique de généralisation cartographique qui exagère certaines caractéristiques

d'une carte pour la rendre plus lisible. Par exemple, les routes de montagne sont souvent caricaturées en supprimant certains virages pour éviter l'empâtement des symboles (Lecordix *et al.*, 1997). L'objectif ici est de s'assurer qu'une courbe de niveau sera tracée autour de la doline. Pour dilater les dolines, nous n'avons pas utilisé l'approche des filtres morphologiques (dilatation / érosion), mais nous avons mis en place un algorithme d'exagération de la profondeur. Nous « remplissons » les dolines jusqu'à ce qu'elles doublent leur surface d'origine. Une fois les dolines « inondées », nous calculons l'altitude minimale, l'altitude maximale et la profondeur à l'aide du cMNT créé à l'étape (1).

Si les courbes de niveau des dolines n'apparaissent pas sur les cartes topographiques, c'est parce qu'elles ne sont pas situées à une altitude à laquelle une courbe de niveau est tracée. La plupart du temps, elles sont situées entre deux courbes de niveau équidistantes (fig. 10). Notre idée est de faire que la doline intersecte artificiellement l'altitude de ces courbes de niveau. Par conséquent, nous appliquons un algorithme de réglage de l'altitude de la doline. Il ajuste les dolines à la courbe de niveau. Si la doline est plus proche de la courbe équidistante inférieure, elle est alors croisée avec celle-ci (fig. 10, à droite). Sinon, elle est déplacée vers la courbe de niveau supérieure.

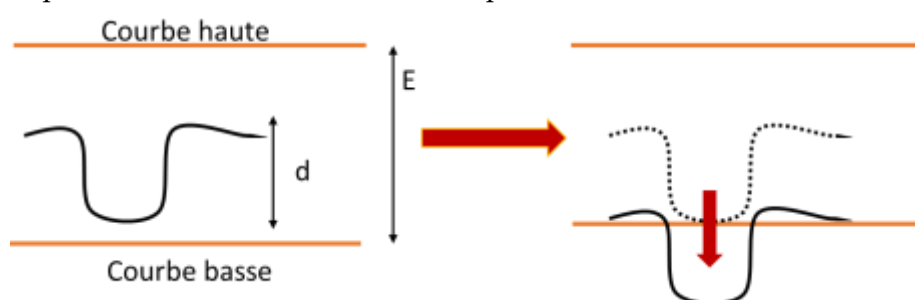


Figure 10. Quand une doline a des altitudes maximales et minimales entre deux altitudes de bourbes successives, l'altitude de la doline est ajustée pour intersecter l'altitude de la courbe de niveau la plus proche.

Cependant, il reste à déterminer quelle zone de la doline doit se croiser avec la courbe de niveau. L'intersection doit se situer dans la zone qui donne la courbe la plus proche de la forme de la doline. Pour s'en assurer, la doline est en fait déplacée à deux hauteurs d'intersection différentes, une fois avec un seuil de 3 et une fois avec un seuil de 1,2. Ces seuils empiriques sont notés s dans l'équation (3).

$$\text{niveau_intersection} = \max(\text{altitudes}) - d/s \quad (3)$$

où d est la profondeur de la doline et $s = 3$ lorsque celui-ci est symétrique (figure 11, cas 1) et $s = 1,2$ lorsque celui-ci est asymétrique (cas 2 de la figure 11). Concrètement, pour déplacer les dolines, nous abaissons ou élevons l'altitude des pixels qui les composent.

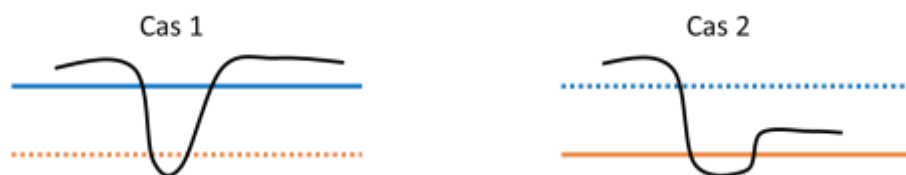


Figure 11. Quand une doline est symétrique (cas 1), une courbe de niveau est dessinée dessus. Lorsque la doline est asymétrique (cas 2), la courbe de niveau est dessinée au bas de celle-ci.

Nous avons uniquement traité le cas où la profondeur des dolines est inférieure à l'équidistance des courbes de niveau. Nous considérons que lorsque les dolines ont une profondeur supérieure à l'équidistance, elles coupent nécessairement une courbe de niveau et qu'il n'est pas nécessaire de les caricaturer.

2.5 Génération des courbes de niveau

Enfin, nous générons les courbes de niveau à l'étape (4). Tout d'abord, nous générons un premier ensemble de courbes à partir du cMNT créé à l'étape (1). Cela nous donnera les courbes de niveau lissées qui donnent les formes générales du relief, mais ces courbes ne décrivent pas les dolines ajustées. Nous générons donc de nouvelles courbes de niveau à partir des deux MNT créés juste avant à l'étape (3) (c'est-à-dire avec $s = 3$ et $s = 1,2$). La figure 12 montre les courbes de niveau générées à partir de ces deux MNT.

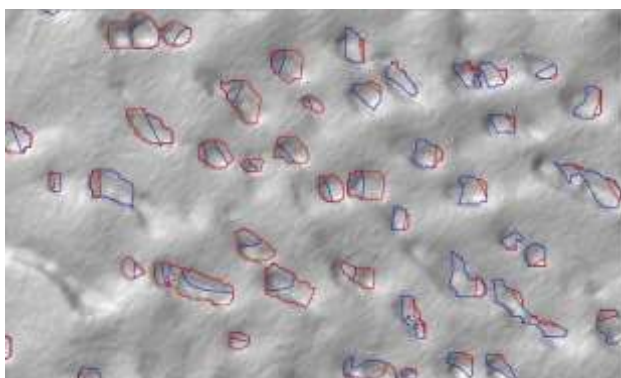


Figure 12. En rouge, les courbes de niveau du MNT de réglage avec $s = 3$ (cas 1) et en bleu du réglage avec $s = 1,2$ (c 2).

À ce stade du processus, nous avons 3 couches de courbes de niveau différentes :

- C1: courbes de niveau générées à partir du cMNT
- C2: courbes de niveau générées au seuil $s = 3$
- C3: courbes de niveau générées au seuil $s = 1,2$

Pour fusionner ces trois couches, nous supprimons d'abord les courbes de niveau de S2 et S3 qui sont en commun avec S1 car ces lignes sont redondantes dans toutes les couches.

Puis, nous choisissons pour chaque doline la courbe de C2 ou C3 qui la représente le mieux. Pour choisir celle qui représente le mieux la doline, nous proposons de conserver le contour extérieur, c'est-à-dire la courbe la plus grande. Nous pouvons maintenant fusionner les trois couches et obtenir notre résultat final des courbes de niveau d'un plateau karstique (et des régions voisines).

3 Résultats et évaluation

Ce processus a été implémenté en tant que plug-in QGIS qui devrait être publié dans le dépôt open source QGIS au moment de la publication de cet article. Le MNT utilisé dans nos expériences a été obtenu à partir d'un levé LIDAR aérien, avec une résolution de 5 m. La zone d'essai mesure 20,4 km sur 20,4 km, près d'Arbois, dans le Jura, en France, avec quelques plateaux karstiques, des plaines et des vallées. La figure 13 montre quelques résultats de la détection des dolines dans cette zone de test. La figure 13c montre que certaines dolines ont été filtrées alors qu'elles auraient pu être conservées. L'évaluation que nous avons effectuée a montré que 91% de ce que nous avons évalué visuellement comme

des dolines avait été détecté. Il reste donc 9% de dolines manquantes et cette partie du processus pourrait être améliorée. La figure 14 montre combien de dépressions ont été filtrées à l'étape (2) pour conserver les dolines.

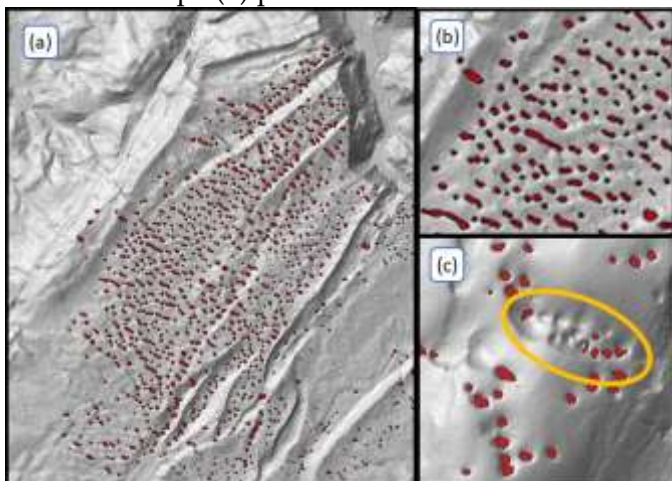


Figure 13. Résultats de la détection des dolines dans la zone d'Arbois. (b) montre un extrait zoomé et (c) montre une petite zone où il manque des dolines.

Les courbes de niveau générées à l'issue de notre processus complet sont présentées dans la figure 15. Le résultat est prometteur, car il transmet bien la structure du paysage karstique avec des courbes de niveau. Cependant, les zones mises en évidence dans la figure 15 montrent certains problèmes non résolus:

- lorsque les courbes de niveau sont affichées avec un symbole de ligne d'une certaine largeur, les symboles peuvent s'intersecter quand des dolines sont situées près d'une courbe de niveau « principale »;
- certaines très petites dolines qui ne devraient pas être affichées à cette échelle sont conservées.

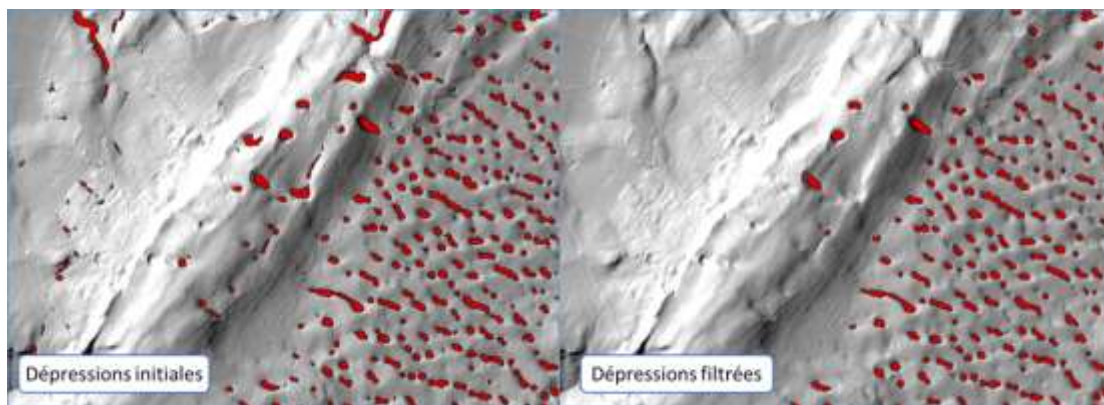


Figure 14. Dépressions au-dessus du MNT avant et après l'étape de filtrage s.

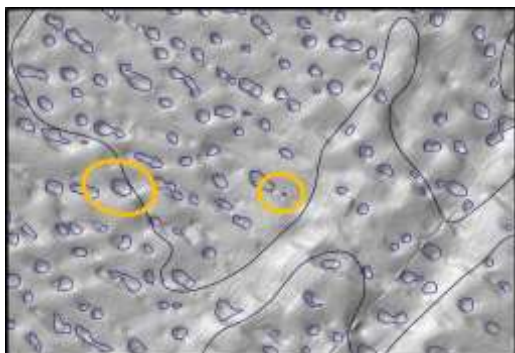


Figure 15. Courbes de niveau finales affichées en haut du MNT. Les courbes en noir sont celles du cMNT et les courbes en bleu sont celles qui ont été ajoutées avec exagération des dolines. Les zones entourées montrent les problèmes restants.

Enfin, la figure 16 montre les courbes de niveau générées avec le processus proposé, intégrées dans une carte topographique au 1 : 25000. Le résultat est clairement meilleur que la carte initiale, et les cartographes de l'IGN qui ont évalué ce résultat ont confirmé sa qualité supérieure et pourraient utiliser notre proposition dans un avenir proche.



Figure 16. Courbes de niveau obtenues avec la méthode présentée, intégrées dans la carte topographique au 1: 25k et comparées à la carte actuelle.

4 Conclusion et perspectives

En conclusion, nous proposons dans ce document un nouveau processus automatique pour générer des courbes de niveau d'un MNT qui va au-delà de l'état de l'art en préservant mieux les formes spécifiques des plateaux karstiques. L'originalité de cette approche réside dans la combinaison de techniques raster et vectorielles, ainsi que dans l'utilisation de la caricature qui découle davantage de la généralisation des cartes que des techniques de rendu de terrain.

Nous avons différentes idées pour prolonger ce travail. Premièrement, le processus proposé peut être amélioré à toutes les étapes. Par exemple, nous avons mesuré que seulement 91% des zones couvertes par des dolines identifiées manuellement étaient automatiquement détectées à l'étape (2). Ensuite, pour améliorer la dérivation des courbes de niveau, nous aimerions intégrer des opérations de généralisation autres que la caricature. Par exemple, fusionner deux dolines en une pourrait être parfois une meilleure opération que d'agrandir / creuser les deux dolines. Nous prévoyons également d'intégrer d'autres types d'algorithmes de généralisation pour affiner les courbes de niveau et supprimer les conflits visuels restants lorsque deux lignes sont trop proches l'une de l'autre (Li & Sui, 2000; Ai, 2004; Gökçöz et Selçuk, 2004; Matuk et al., 2006). En complément de la généralisation, des symbolisations alternatives pourraient être utilisées pour améliorer le rendu des plateaux karstiques, telles que l'utilisation de symboles ponctuels pour les petites dolines. Toutes ces propositions de représentation du terrain doivent ensuite être évaluées à l'aide de tests auprès d'utilisateurs pour s'assurer que l'utilisateur comprend mieux les formes du relief avec les courbes de niveau améliorées.

En outre, le processus proposé dans cet article a été mis au point pour les cartes topographiques au 1: 25 000, mais à présent, les cartes sont principalement utilisées en ligne dans des applications permettant de zoomer et dézoomer dans les cartes à différentes échelles. Ainsi, de manière similaire à la généralisation cartographique (Dumont, al., 2017), le processus de génération de courbes de niveau devrait être étendu pour en déduire des courbes de niveau pour des cartes à plusieurs échelles. Enfin, nous prévoyons d'utiliser une approche similaire pour d'autres morphologies de terrain spécifiques, où la génération de courbes de niveau génériques est loin de la qualité des courbes dessinées manuellement. Par exemple, les terrains karstiques ruiniformes ressemblent beaucoup aux terrains avec des dolines en ce qui concerne les courbes de niveau, sauf que les pics remplacent les dépressions.

Bibliographie

- Ai T., 2004, « A Generalization of Contour Line Based on the Extraction and Analysis of Drainage System ». *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXV (IV/3). ISPRS. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm4/papers/549.pdf>
- Dumont M., Touya G., Duchêne C., 2017, « Alternative transitions between existing representations in multi-scale maps ». *Proceedings of the 2017 International Cartographic Conference*, Washington, DC, USA. ICA.
- Gaffuri J., 2007, « Outflow preservation of the hydrographic network on the relief in map generalisation », *23rd International Cartographic Conference*. Moscow, Russia.
- Gökgöz T., Selçuk M., 2004, « A New Approach for the Simplification of Contours ». *Cartographica*, vol. 39, n°4, p. 37–44.
- Guilbert E., 2013, « Multi-Level Representation of Terrain Features on a Contour Map ». *GeoInformatica*, vol. 17, n°2, p. 301-324. <https://doi.org/10.1007/s10707-012-0153-z>
- Guilbert E., Gaffuri J., Jenny B., 2014, « Terrain Generalisation », dans Burghardt D., Duchêne C., Mackaness W. A., *Abstracting Geographic Information in a Data Rich World*, p. 227–258. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00203-3_8
- Jaara K., Lecordix F., 2011, « Extraction of Cartographic Contour Lines Using Digital Terrain Model (MNT) ». *The Cartographic Journal*, vol. 48, n°2, p. 131-137. <https://doi.org/10.1179/1743277411Y.0000000011>.
- Kettunen P., Koski C., Oksanen J., 2017, « A Design of Contour Generation for Topographic Maps with Adaptive DEM Smoothing ». *International Journal of Cartography*, vol. 3, n°1, p. 19-30. <https://doi.org/10.1080/23729333.2017.1300998>.
- Lecordix F., Plazanet C., Lagrange J.-P., 1997, « A Platform for Research in Generalization: Application to Caricature ». *GeoInformatica*, vol.1, n°2, p. 161–182. <https://doi.org/10.1023/A:1009736628698>
- Leonowicz A., Jenny B., 2011, « Generalizing Digital Elevation Models for Small Scale Hypsometric Tinting ». *Actes de la 25ème International Cartographic Conference*. Paris, France.
- Li Z., Sui H., 2000, « An Integrated Technique for Automated Generalization of Contour Maps ». *The Cartographic Journal*, vol. 37, n°1, p. 29-37.
- Matuk K., Gold C., Li Z., 2006, « Skeleton Based Contour Line Generalization », *actes du 12th International Symposium on Spatial Data Handling*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, p. 643–658. https://doi.org/10.1007/3-540-35589-8_41.

- Patterson T., 2001, « DEM Manipulation and 3-D Terrain Visualization: Techniques Used by the U.S. National Park Service ». *Cartographica*, vol. 38, n°1–2, p. 89–101.
- Putto K., Kettunen P., Torniainen J., Krause C. M., Sarjakoski L. T., 2014 « Effects of Cartographic Elevation Visualizations and Map-Reading Tasks on Eye Movements ». *The Cartographic Journal*, vol. 51, n°3, p. 225–36. <https://doi.org/10.1179/1743277414Y.0000000087>.
- Rosenkranz B., Knudsen T., Mortensen H. E., Michealsen P. B., 2012. *Automatic generation of contour lines based on DK-DEM* (Tech. Rep. No. 13). National Survey and Cadastre – Denmark. ftp://ftp.kms.dk/download/Technical_Reports/KMS_Technical_Report_13.pdf
- Samsonov T., 2011, « Multiscale Hypsometric Mapping », dans Ruas A., *Advances in Cartography and GIScience*, vol. 1. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlin, Heidelberg: Springer. p. 497–520. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19143-5_28.
- Touya G., 2010, «A Road Network Selection Process Based on Data Enrichment and Structure Detection ». *Transactions in GIS*, vol. 14, n°5, p. 595–614. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2010.01215.x>.
- Tyler D. J., Greenlee S. K., 2012, *Creation of digital contours that approach the characteristics of cartographic contours* (Tech. Rep. No. 2012-5167). U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/sir/2012/5167/sir2012-5167.pdf>
- Wilkening J., Fabrikant S. I., 2011, « How Do Decision Time and Realism Affect Map-Based Decision Making? », dans Egenhofer M., Giudice N., Moratz R., Worboys M., *Spatial Information Theory*. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg : Springer, p. 1–19.