

# Cartographie automatisée des dolines du plateau de Bure (Ajoie, Suisse) et mise en lien avec la fracturation tectonique

RAPHAËL VALLAT | LUC BRAILLARD

**Cet article présente une méthodologie pour repérer puis cartographier de manière automatisée des dolines karstiques à l'aide d'un modèle numérique d'altitude. La région étudiée est le plateau de Bure en Ajoie (JU, Suisse). La cartographie automatisée est réalisée à partir d'outils d'analyse spatiale basés sur des paramètres tels que la pente, la courbure et l'altitude relative des surfaces du terrain. Cette méthode de cartographie novatrice s'est révélée très performante. Elle a permis de fournir un bon aperçu de la distribution et de la surface des dolines sur le plateau de Bure, à une échelle plus étendue que ne le permettrait une cartographie sur le terrain. Par ailleurs, elle permet de mettre en évidence des dolines difficilement visibles, voire non identifiables sur le terrain, telles que les dépressions peu profondes et très évasées ou les dolines situées sous couverture forestière. À partir des résultats cartographiques, une étude du lien entre la répartition des dolines et la fracturation tectonique est menée en utilisant des données de fracturation déjà existantes.**

## Introduction

Le plateau de Bure en Ajoie est caractérisé par l'absence d'écoulements de surface, un réseau de vallées sèches bien développé et de nombreuses dolines et ouvalas (coalescence de dolines). Dans son étude morphogénétique des vallées sèches du Jura tabulaire d'Ajoie, Braillard (2006, p. 76-79) a pu mettre en évidence, en plusieurs endroits localisés, le lien existant entre dolines et fractures tectoniques, ceci sur la base de photographies aériennes. Il n'existe toutefois jusqu'à présent aucune carte détaillée des

dolines qui permette de comparer de manière systématique, sur l'ensemble du plateau de Bure, leur répartition spatiale avec celle des fractures du substrat rocheux. L'examen de l'image ombrée du modèle numérique de terrain (ci-après MNT), disponible depuis 2011 à une résolution de 2 m, montre que les dolines et dépressions fermées figurant sur la carte géologique au 1/25 000 sont largement sous-représentées. Une nouvelle cartographie, basée sur le MNT, doit donc être réalisée pour obtenir un inventaire le plus complet possible des dolines du plateau de Bure, ceci dans une perspective morphogénétique qui cherche à vérifier le lien de causalité existant entre fractures, dolines, ouvalas et vallées sèches. Pour réaliser cette cartographie détaillée des dolines, deux approches sont possibles :

- Une approche dite « manuelle » qui consiste à délimiter le pourtour de chaque doline interprétée comme telle sur la base de la vision à l'écran de l'ombrage du MNT. Cette approche est relativement chronophage et sujette à interprétation.

- Une approche dite « automatisée » qui, sur la base des données numériques du MNT, permet l'identification des dolines grâce à des outils d'analyse de données spatiales.

- Cette deuxième approche automatisée a fait l'objet d'un récent travail de bachelor (Vallat 2015) dont les questions de recherche étaient les suivantes :

- Dans quelle mesure une cartographie automatisée des dolines du plateau de Bure est-elle réalisable ?

- Y a-t-il un lien entre les alignements de dolines et la fracturation tectonique sur le plateau de Bure ?

- La méthodologie développée pour réaliser cette cartographie des dolines, les résultats obtenus, leur validation, ainsi que les liens avec la fracturation tectonique sont résumés dans le présent article.

## Contextes géographique et géologique

La superficie de la zone investiguée du plateau de Bure totalise 79,4 km<sup>2</sup> (fig. 1 et 2). Elle est délimitée à l'est par l'Allaine et au sud par la vallée sèche principale de la Haute-Ajoie qui relie Porrentruy à Damvant. Au nord-ouest, la zone est délimitée par la frontière entre la Suisse et la France, au-delà de laquelle nous ne disposons pas de modèle altimétrique suffisamment précis pour mener notre étude. Le plateau de Bure, surtout

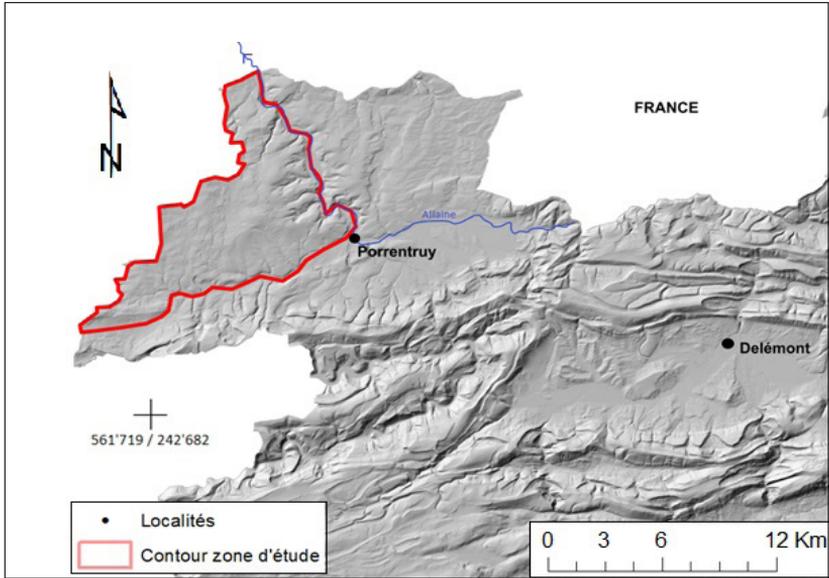


Fig. 1 : Situation générale de la zone d'étude reportée sur l'image ombrée du MNT.

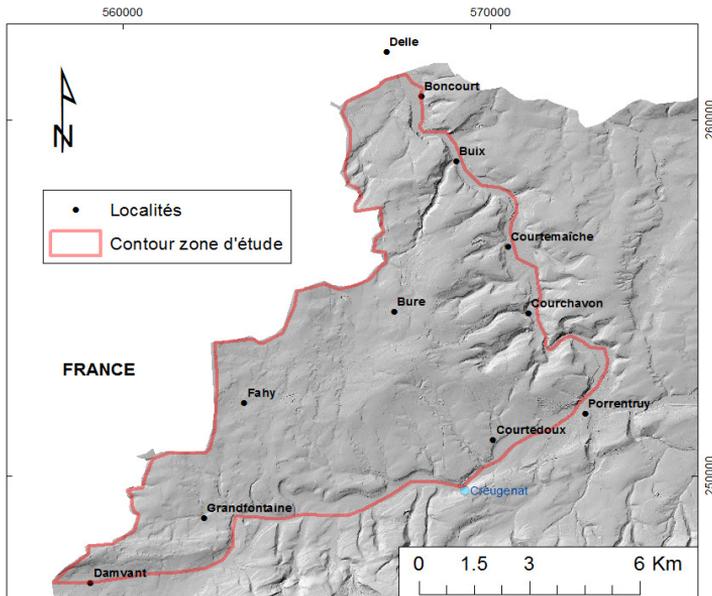


Fig. 2 :  
Détail de la zone d'étude reportée sur l'image ombrée du MNT.

recouvert de cultures et de forêts, possède une faible densité de population. Il présente ainsi une part aménagée relativement limitée en superficie, ce qui est favorable pour notre étude.

Les calcaires et marnes jurassiques qui forment le plateau de Bure sont cisailés par une tectonique cassante qui délimite des blocs disposés en touches de piano (Chauve *et al.* 1985; Diebold *et al.* 1963; Liniger 1969; voir fig. 3). Ils sont localement recouverts par des dépôts quaternaires peu épais (< 2 m), essentiellement constitués de loëss mis en place lors de la dernière glaciation, ou de limons loëssiques remaniés à partir des loëss au Tardiglaciaire ou à l'Holocène. Sur le plateau de Bure, la morphologie karstique s'exprime par un réseau rectangulaire de vallées sèches très

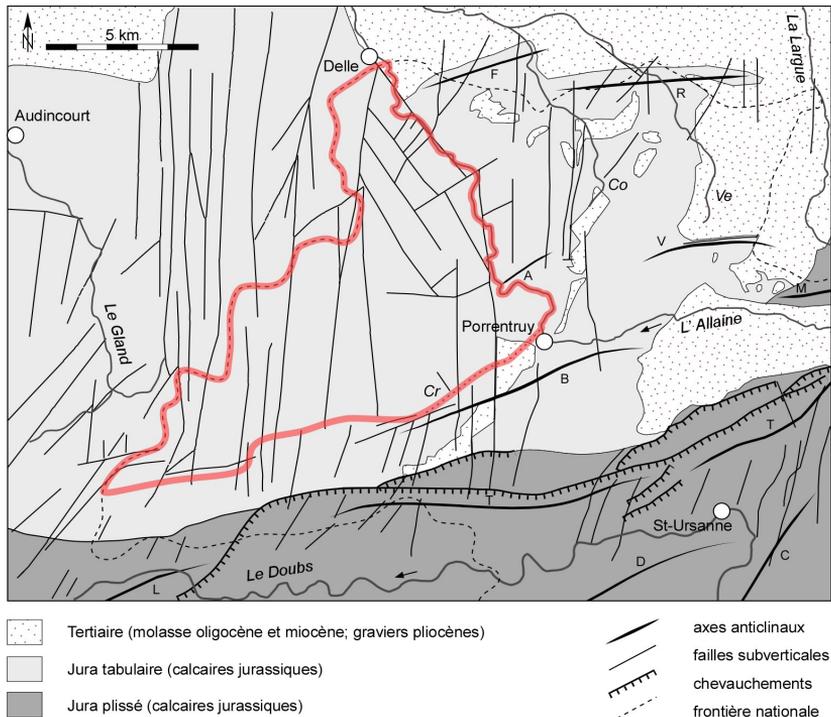


Fig. 3: Carte tectonique de l'Ajoie (compilation d'après Chauve *et al.* 1985; Diebold *et al.* 1963; Liniger 1969), avec la zone de cartographie des dolines (en rouge) sur la partie helvétique du plateau de Bure. Cours d'eau: Co: La Cœuvatte, Ve: La Vendline, Cr: cours d'eau temporaire du Creugenat. Anticlinaux: F: Florimont, R: Réchésy, V: Vendlincourt, M: Morimont, A: Pont d'Able, B: Banné, T: Mont Terri, D: Clos du Doubs, C: Caquerelle, L: Lomont.

émoussées. Les dolines y sont nombreuses et localement alignées sur les directions des vallées sèches. Du sommet du plateau vers ses marges, le réseau de vallées sèches gagne en densité et évolue vers un système radial de vallées sèches bien incisées. La rivière souterraine Milandrine, qui draine une bonne partie du plateau vers le nord, se développe selon deux orientations préférentielles qui coïncident avec les directions des vallées sèches en surface (Braillard 2006).

## Dolines

Les dolines sont des dépressions circulaires fermées de diamètre et de profondeur variable. En Ajoie, les formes rencontrées mesurent de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre pour des profondeurs de quelques décimètres à quelques mètres. Il s'agit de formes karstiques de surface qui résultent de la dissolution des roches calcaires

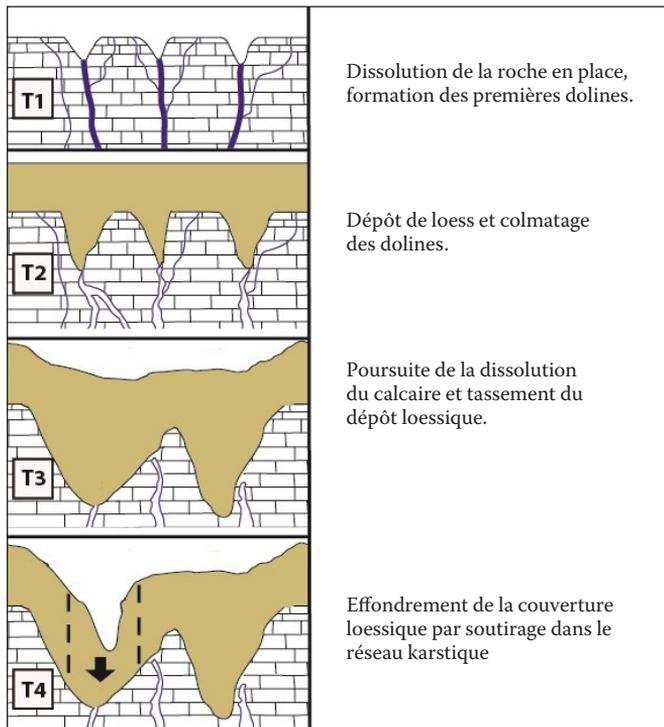


Fig. 4 :  
Schéma  
d'évolution  
morphologique  
possible de  
dolines.

par les eaux météoriques légèrement chargées en dioxyde de carbone. La coalescence de plusieurs dolines originellement individualisées forme une ouvala, dont la forme peut être plus ou moins circulaire ou plus ou moins allongée.

En Ajoie, la plupart des dolines sont partiellement voire totalement colmatées par des dépôts lœssiques (Braillard 2006, Leuenberger & Rauber 2014). Les dolines dans lesquelles aucun soutirage karstique ne s'est produit après le dépôt des lœss peuvent par conséquent n'être que peu, voire pas du tout (selon l'importance de la dissolution karstique postérieure au colmatage) marquées par une dépression topographique en surface (fig. 4). Cela rend leur détection particulièrement difficile tant sur le terrain qu'à l'aide d'un MNT. Il faut donc garder à l'esprit que notre démarche de cartographie automatisée ne peut pas détecter les dolines totalement comblées qui n'auraient été ni réactivées par soutirage karstique ni agrandies par dissolution après leur colmatage.

## Fracturation tectonique

Les assises calcaires du plateau de Bure sont intensément fracturées selon cinq systèmes de fractures subverticales observées à l'échelle de l'affleurement (Braillard 2005) : F1 (N170°±15°), F2 (N125°±10°), F3 (N025°±10°), F4 (N070°±5°) et F5 (N100°±10°). S'y ajoutent trois familles de failles kilométriques également subverticales : FI (N005°±5°), FII (N145°±5°) et FIII (N050°±10°). Ces dernières, qui sont reportées sur les cartes géologiques, ne sont toutefois jamais observées à l'échelle de l'affleurement. Il est ainsi probable que ces accidents FI, FII et FIII correspondent à de grands décrochements qui sont exprimés sur le terrain par des fissures de cisaillement de deuxième ordre F1 à F4 (fig. 5).

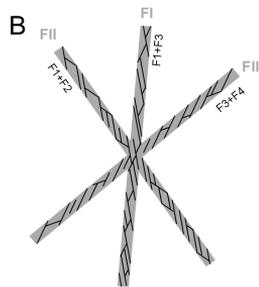
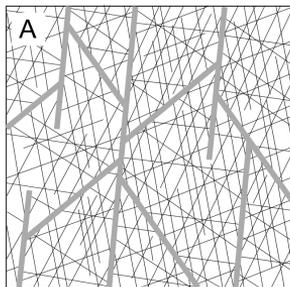


Fig. 5: Fracturation du plateau de Bure. A : schéma synthétique sans échelle, vue en plan (les accidents kilométriques sont en gris) ; B : proposition schématique de relation géométrique entre les grands accidents kilométriques (FI, FII et FIII) et les fractures visibles à l'échelle de l'affleurement (F1 à F4). Modifié d'après Braillard 2005.

## Lien entre la fracturation, les dolines et les vallées sèches

Les résultats de plusieurs travaux dont Aubert (1969), Siméoni & Jamier (1975) et Braillard (2006), montrent que les dolines se développent de manière privilégiée le long des fractures tectoniques. Ce développement résulte d'une combinaison entre l'orientation et la densité des fractures d'une part et la direction des écoulements superficiels et épikarstiques d'autre part. Les vallées sèches semblent ainsi s'être formées par la coalescence de dolines, alignées en chapelets le long des fractures parallèles à l'écoulement des eaux superficielles.

## Méthodologie

Le MNT utilisé est le modèle altimétrique numérique *swissALTI 3D*, qui décrit la surface du terrain sans végétation ni constructions (Swisstopo 2015). Il est construit à partir de mesures laser effectuées depuis un aéronef. Sa résolution est de 2 m, sa précision dans les 3 dimensions de l'espace est de  $\pm 0,5$  m pour les altitudes inférieures à 2000 m au-dessus du niveau de la mer. L'année des mesures du *swissALTI 3D* pour l'Ajoie est 2011.

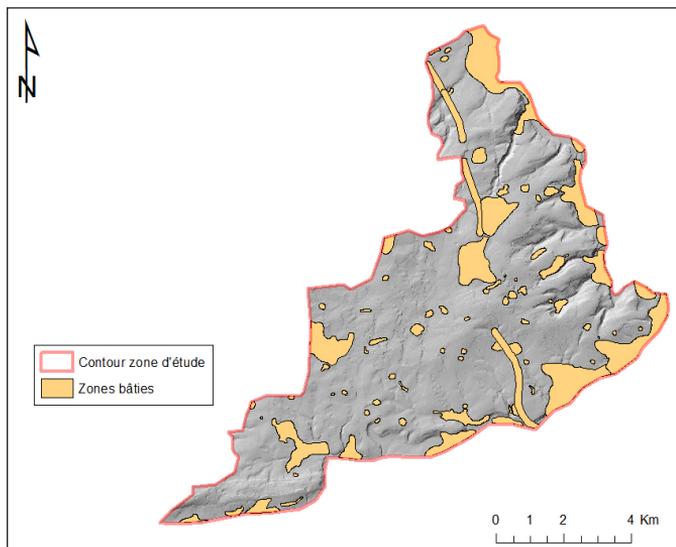


Fig. 6:  
Zones bâties (en couleur) qui ont été exclues de l'analyse spatiale.

Un filtre passe-bas a été appliqué pour permettre une réduction optimale des anomalies et des hétérogénéités d'échelles non pertinentes. Pour la visualisation, un ombrage a été appliqué au MNT, soit une source lumineuse virtuelle qui éclaire le relief avec un azimut de 315° N. et un angle de 45° par rapport à l'horizontale.

La zone d'étude a ensuite été analysée visuellement, avec l'aide de l'ombrage du MNT, des orthophotos, et des couches vectorielles de Swisstopo relatives aux aménagements anthropiques. Les surfaces contenant des bâtiments, routes et autres aménagements qui modifient la topographie du terrain naturel ont été exclus de la zone d'étude (fig. 6).

### Choix de la zone test

La zone test (fig. 7) sert de référence pour la comparaison entre les différents modèles de cartographie automatisée d'une part et la cartographie manuelle des dolines d'autre part. Elle se situe au nord de Chevenez et a été choisie pour sa bonne représentativité de la zone d'étude. La cartographie manuelle a été réalisée visuellement sur la base de la vision à l'écran de l'ombrage du MNT. Plusieurs images du relief (avec variations angulaires de la source lumineuse) ont été utilisées, ceci afin d'être le plus

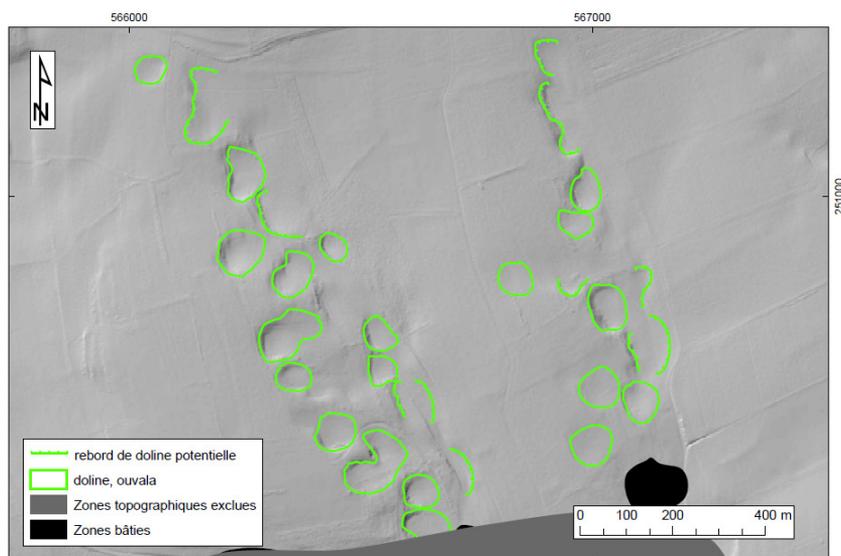


Fig. 7 : Cartographie manuelle des dolines de la zone test, située au nord de Chevenez.

exhaustif possible dans la détection des dolines. Il faut toutefois relever que la cartographie manuelle est empreinte d'un certain degré d'interprétation, qui dépend notamment de l'expertise de l'opérateur. De plus, aucune visite sur le terrain n'a eu lieu préalablement.

## **Paramètres d'identifications des dolines dans le logiciel**

Les dolines du plateau de Bure sont de dimensions variables, de quelques mètres de diamètre à plusieurs centaines pour les plus grandes coalescences. Certaines sont des dépressions fermées tandis que d'autres peuvent être ouvertes, partiellement comblées, ou désagrégées. La difficulté réside donc dans l'identification des paramètres géométriques et statistiques qui permettent de rendre compte de la variété des formes.

La détection de dolines pose naturellement la question de la forme de la représentation cartographique : est-ce la localisation par un point, la surface, ou le contour ou même le volume qui est recherchée ? Considérant les deux questions de recherche, il y a deux buts : d'une part, la cartographie de dolines est le plus clairement représentée par des surfaces. D'autre part, la mise en évidence des alignements de dolines (à mettre en lien avec la fracturation) se fait plus aisément avec des points représentant le centre des dolines. Les deux types de représentation (points et surfaces) sont donc pertinentes.

## **Modélisation**

Trois approches ont été élaborées pour modéliser les dolines et les ouvalas : le remplissage, la courbure et les statistiques de surfaces. Elles se basent sur les particularités morphométriques des dolines de la zone d'étude.

### **Méthode « remplissage »**

Une dépression fermée correspond à une ou plusieurs cellules du MNT qui sont plus basses en altitude que toutes les autres les entourant. C'est donc une statistique de surface recherchant des points minimaux qui permet de repérer ces dépressions. Une fois ces points repérés, ils sont remplis virtuellement jusqu'à leur niveau de débordement (fig. 8). Le

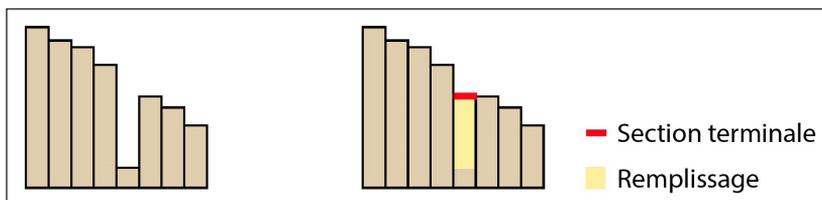


Fig. 8: Illustration en 2D du fonctionnement de l'outil remplissage (ArcGIS, 2010).

volume de la dépression fermée peut alors être calculé, la surface visible de la doline sur le modèle est la section terminale de ce remplissage.

L'outil a été paramétré pour remplir les dépressions de plus de 20 cm de profondeur uniquement. Cette valeur est un choix résultant d'un compromis entre un nombre de dolines surestimé comportant beaucoup d'artefacts et un nombre de dolines sous-estimé, omettant des dépressions.

Cette méthode est fiable et n'établit quasiment pas d'identifications erronées. Elle connaît toutefois des restrictions importantes pour les dolines partiellement ouvertes qui ne sont donc pas détectées par la méthode.

### Méthode « courbure »

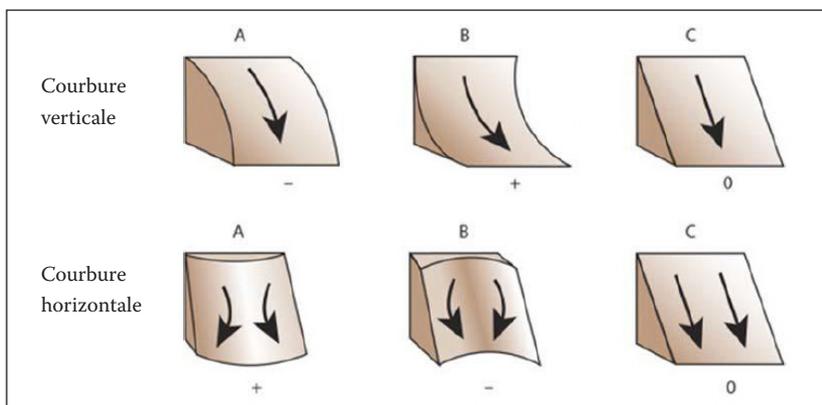


Fig. 9: Illustration des caractéristiques des courbures (adapté de: Kimerling *et al.* 2012).

La courbure est définie comme la dérivée seconde de la surface, soit la pente de la pente. Il existe deux types de courbures dans un espace en trois dimensions (fig. 9) : la courbure verticale qui mesure le changement de pente, la courbure horizontale qui mesure le changement perpendiculairement à la pente.

Les dolines présentent donc une courbure horizontale négative et une courbure verticale positive au fond et négative sur les rebords, ce qui est exprimé par les schémas B- et A- vers B+ (fig. 9).

La méthode « courbure » résulte d'une combinaison entre la courbure horizontale et la variation de la courbure verticale. Au niveau opérationnel, la courbure est dépendante de la résolution du MNT ; la résolution de 2 m est toutefois inadaptée pour le calcul de la courbure horizontale. Pour éliminer des effets de courbure à une échelle non pertinente pour les dolines, la résolution des cellules a été changée de 2 m à 6 m de côté pour le calcul de la courbure horizontale uniquement.

La courbure verticale a été calculée puis la mesure de l'écart-type a été faite sur un rayon de 10 m autour de chaque cellule. Ce rayon reflète la longueur moyenne des pentes constatées sur la zone d'étude. Cette opération met en évidence les changements de courbure, soit la dérivée troisième de la pente. Celle-ci est intéressante, car une doline présente un changement de courbure verticale spécifique, passant de convexe au sommet à concave au fond.

Ensuite, l'outil *Plan curvature* a été appliqué sur le MNT réduit à une résolution de 6 m pour obtenir la courbure horizontale. Celle-ci a été reclassifiée pour graduer les valeurs selon leur pertinence. Un filtre majoritaire y a été appliqué pour éliminer les pixels isolés, non pertinents.

Les courbures horizontales et verticales ont ensuite été reclassifiées pour garder les valeurs intéressantes. Ces nouvelles valeurs ont été multipliées entre elles. Le produit formant une distribution continue qui fait ressortir les courbures intéressantes, il suffit alors de sélectionner les classes de valeurs pertinentes visuellement et de les extraire en polygones.

## **Méthode « statistiques de surfaces »**

L'idée de la méthode « statistiques de surfaces » est de faire des statistiques zonales d'altitude : l'altitude moyenne d'une zone est comparée à l'altitude moyenne d'une zone contenue dans la première. Ainsi une surface peut être classifiée comme globalement plus basse, égale, ou plus

haute que la zone dans laquelle elle est contenue. Le paramétrage des zones est crucial pour faire ressortir les formes du paysage recherchées, la forme et la taille de la zone soumise aux statistiques doivent être adaptées aux formes recherchées.

La méthode utilisée s'inspire de l'extension développée par Jenness Enterprises (2006). Elle repose sur une comparaison entre 2 zones circulaires autour de chaque cellule, la plus petite d'un rayon de 40 m et la plus grande d'un rayon de 80 m. Les rayons des zones ont été choisis en relation avec les particularités morphométriques des dolines de la zone d'étude. L'indice produit ne fait pas la distinction entre les dépressions fermées et les zones basses non fermées. Il est donc intéressant de ce point de vue, car il donne un bon aperçu en calculant la déviation des altitudes

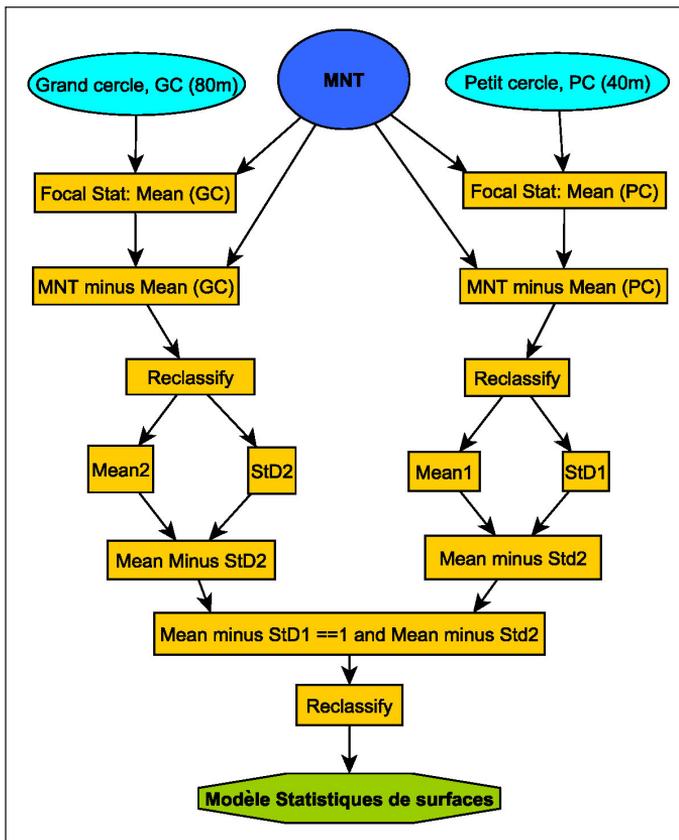


Fig. 10: Schéma de la méthode « statistiques de surfaces » avec les noms des outils dans ArcMap.

par rapport à la moyenne. Les étapes de modélisation sont résumées sur la figure 10. La méthode n'est pas adaptée à la détection de dolines en relief escarpé. Elle est adéquate pour une zone d'étude relativement plane, telle qu'un plateau.

## Résultats

Les résultats sont présentés selon les différentes approches de modélisation, sous la forme de cartes qui sont comparées individuellement à la cartographie manuelle.

### Méthode « remplissage »

Cette méthode a permis de repérer les dolines correspondant à des dépressions fermées. La plupart des zones de remplissage sont circulaires avec parfois un allongement dans une direction préférentielle, le long de laquelle il est intéressant de remarquer qu'il y a souvent d'autres remplissages, parfois également allongés (fig. 11). Ces dispositions se retrouvent de manière récurrente.

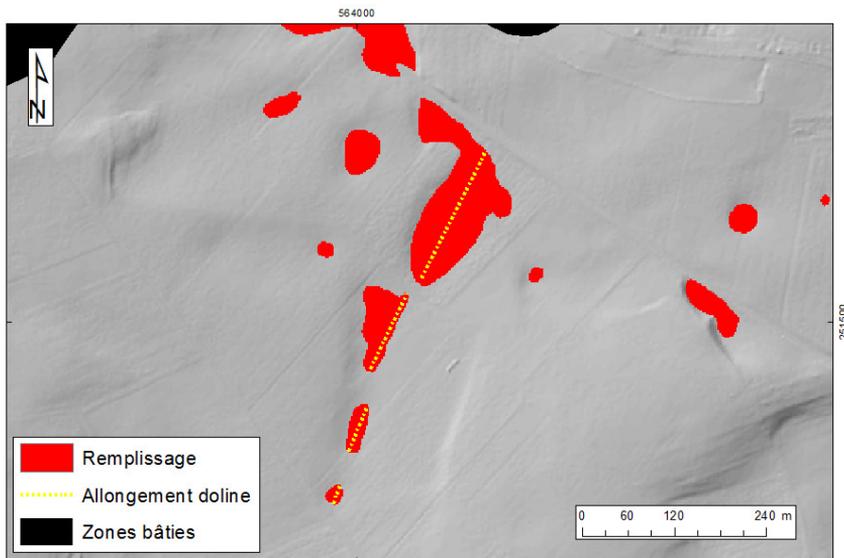


Fig. 11: Modèle « remplissage », détail de la zone centrale montrant des dolines allongées qui présentent une orientation préférentielle.

La superficie des remplissages va de quelques mètres carrés à 140 600 m<sup>2</sup> pour une dépression au sud-ouest (fig. 12). Cela met en évidence qu'il y a une grande diversité de dépressions fermées. Les zones avec des dépressions fermées majeures, visibles sur la figure 13 sont probablement des ouvalas, c'est-à-dire des coalescences d'un nombre important de dolines. Les rebords en arc de cercle du large remplissage elliptique de 450 m sur 300 m visible sur la figure 12 en sont des indicateurs vraisemblables.

La méthode remplissage est particulièrement intéressante pour les larges dépressions fermées, avec des pentes douces, qui ne sont pas mises en évidence par les autres méthodes. De plus, elle est la seule méthode qui donne des résultats viables en zones escarpées.

Sur la zone test (fig. 14), 16 dolines sur 30 cartographiées manuellement sont repérées par la méthode « remplissage ». En résumé, bien qu'elle n'identifie que les dépressions fermées, cette méthode est intéressante, car elle ne fait que très peu de fausses identifications et est indépendante de la pente, ce qui la rend applicable sur tout type de topographie.

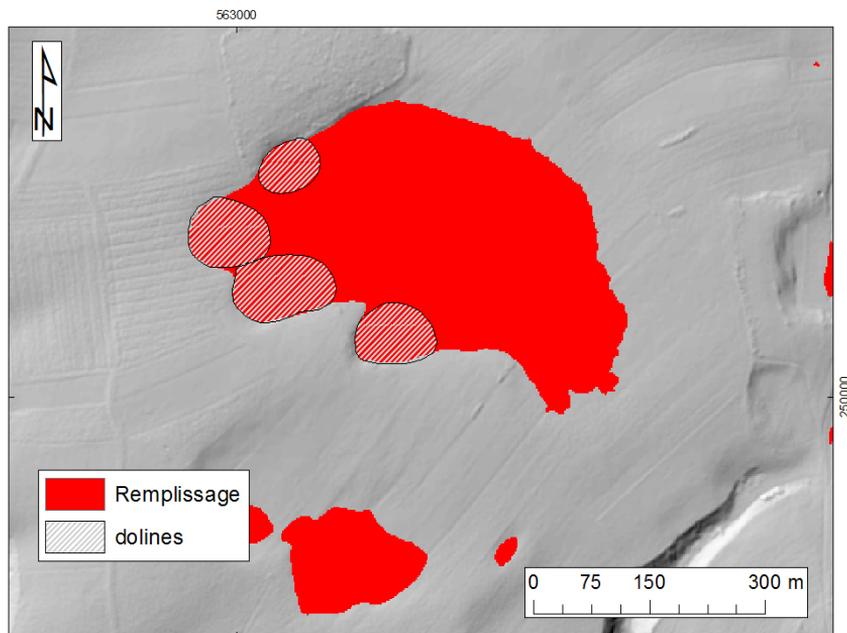


Fig.12: Modèle « remplissage », rebords de dolines en bordure d'une ouvala, zone S.O.

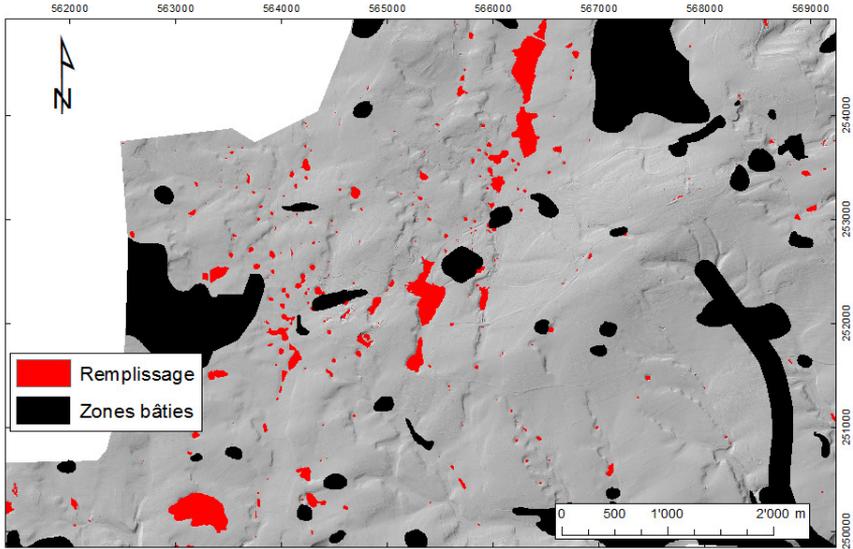


Fig. 13: Modèle « remplissage », zone centrale.

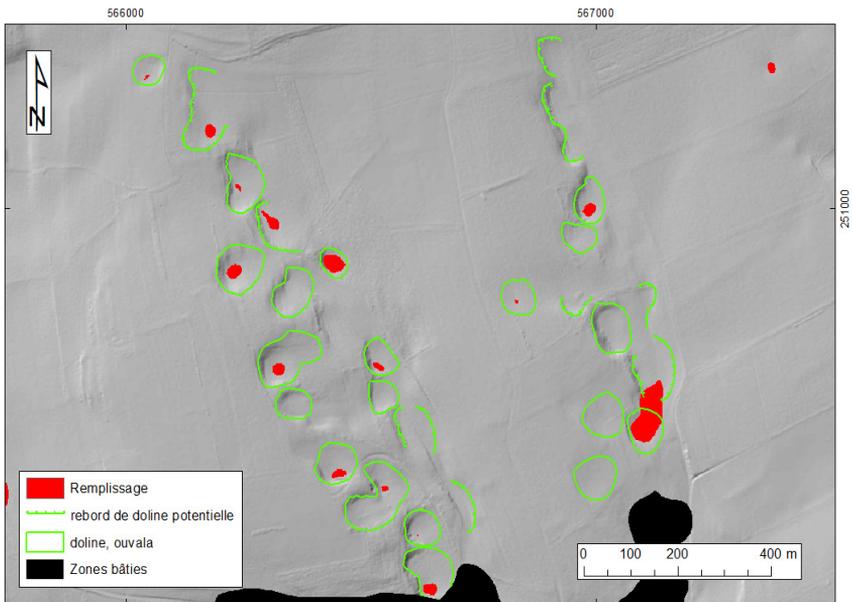


Fig. 14: Polygones du modèle « remplissage », Zone test.

## Méthode « courbure »

Les polygones (fig. 15) de la méthode « courbure » représentant potentiellement des dolines sont près de 12 000 sur la zone d'étude entière, mais seulement 1 928 sur la zone définie comme pertinente pour la méthode (c'est-à-dire sans les surfaces aménagées). Cela démontre la limitation de cette méthode aux zones globalement planes et non bâties. Chacun de ces polygones représente une zone de courbures verticale et horizontale correspondant potentiellement à une doline. Ils ne représentent pas forcément une doline entière, mais peuvent parfois n'en représenter qu'une portion. Il peut donc y avoir plusieurs polygones pour une même dépression, comme cela est visible sur la figure 16. Cette méthode présente donc l'avantage de mettre en évidence les anciennes dolines qui sont à l'origine des ouvalas.

Sur la zone test, la méthode courbure identifie 24 dolines sur les 30 cartographiées manuellement (fig. 16). Elle détecte quelques possibles dolines non repérées visuellement sur la base du MNT, et identifie parfois des courbures qui ne sont pas des dolines, le long d'axes routiers par exemple. La courbure, paramétrée de manière spécifique à la géométrie

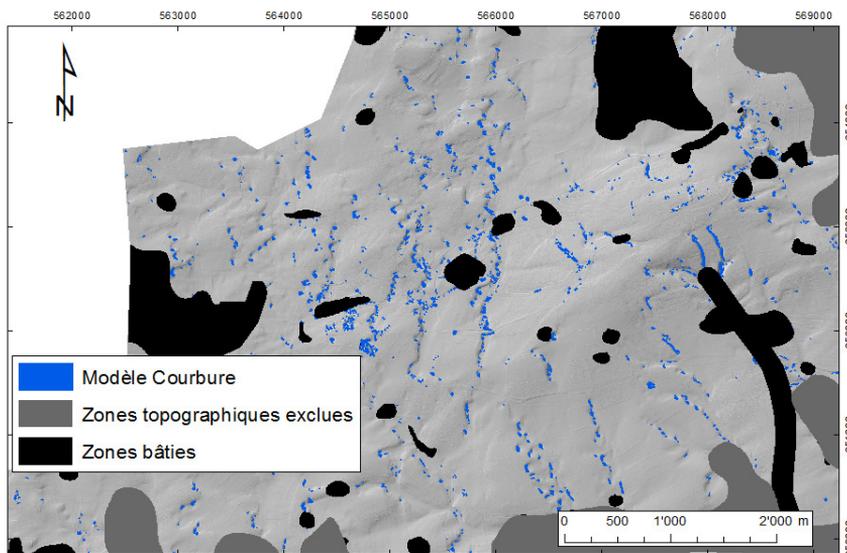


Fig. 15: Polygones du modèle « courbure », zone centrale.

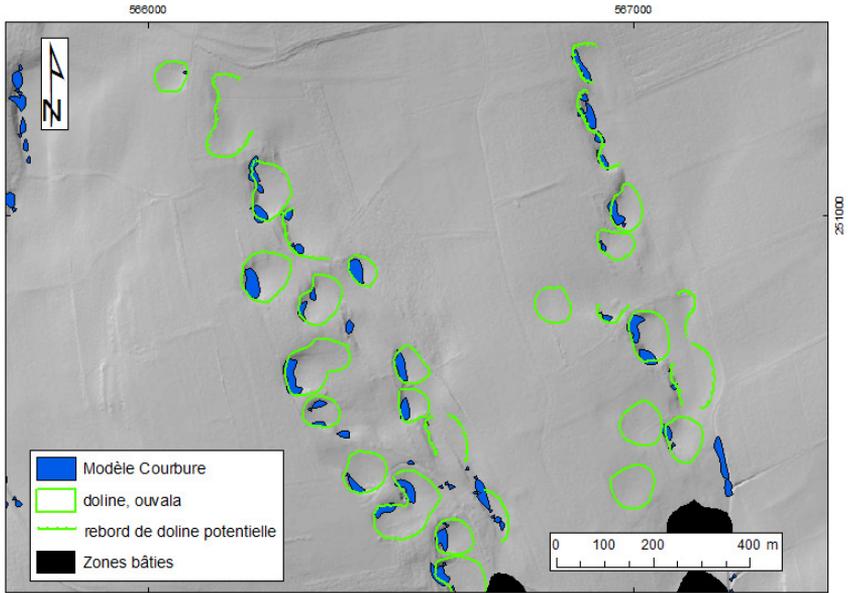


Fig. 16: Polygones du modèle « courbure », zone test.

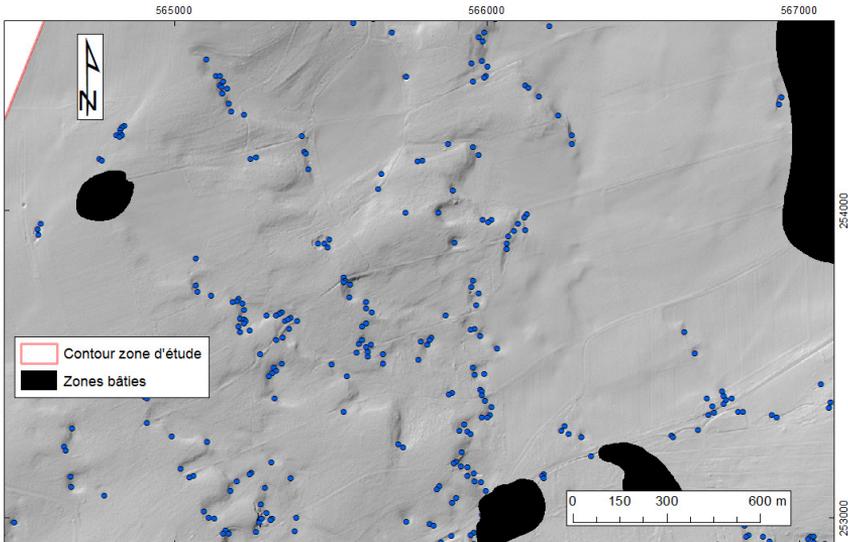


Fig. 17: Centroïdes des polygones du modèle « courbure », détail de la zone centrale.

recherchée, en fait un indicateur très pertinent sur une étendue relativement plane tel que la zone centrale et ouest de la région d'étude.

Elle permet de localiser une partie importante des dolines, sans toutefois en donner le contour. Pour repérer des alignements de dolines, plutôt que le contour de chaque doline, c'est une analyse globale de la distribution des centroïdes des surfaces du modèle « courbure » qui est pertinente (fig. 17).

### Méthode « statistiques de surfaces »

Cette méthode a produit 1073 polygones sur la zone d'étude, soit autant de dolines ou ouvalas potentielles. La superficie moyenne de chacune de ces formes est de 1 008 m<sup>2</sup> pour une surface totale de 1,082 km<sup>2</sup> (fig. 18).

La méthode « statistiques de surfaces » identifie 27 dolines sur les 30 cartographiées manuellement (fig. 19). Elle détecte plusieurs dolines potentielles non repérées visuellement sur la base du MNT.

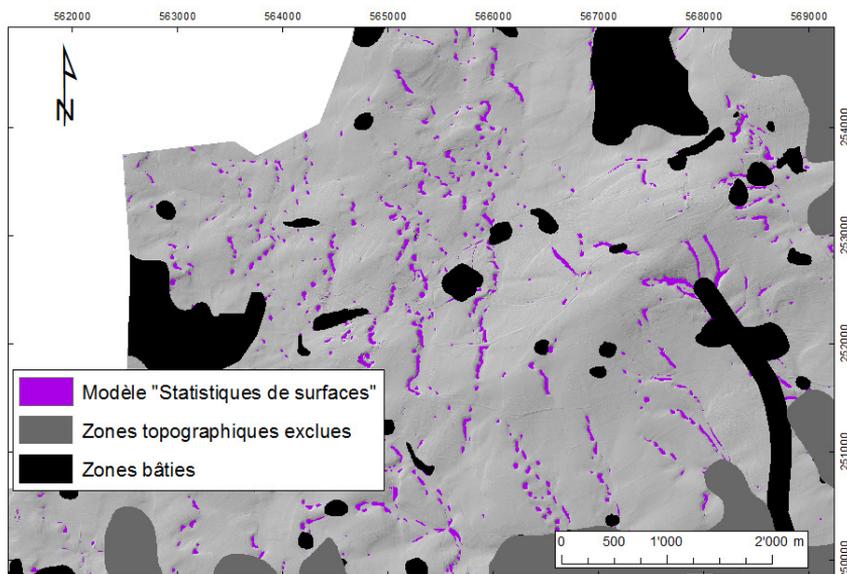


Fig. 18: Modèle « statistiques de surfaces », zone centrale.

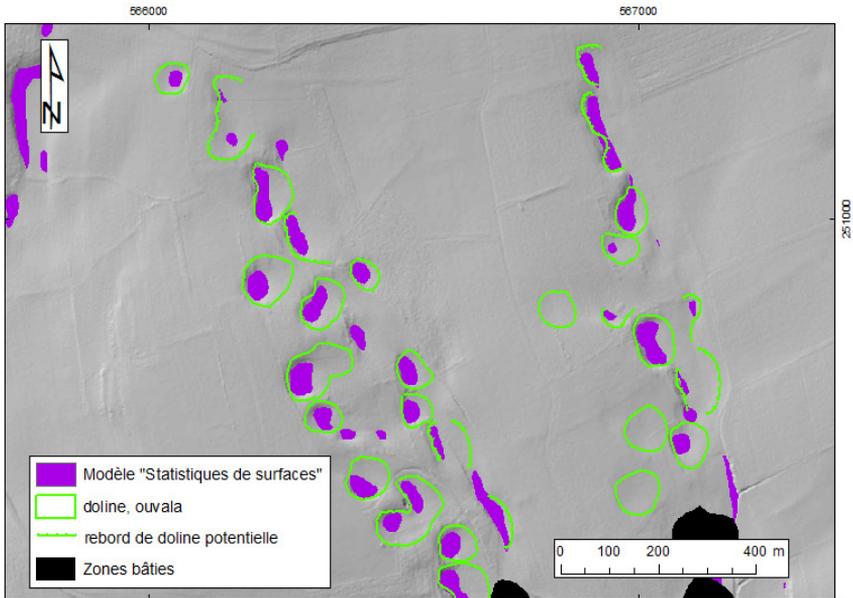


Fig. 19: Polygones du modèle « statistiques de surfaces », zone test.

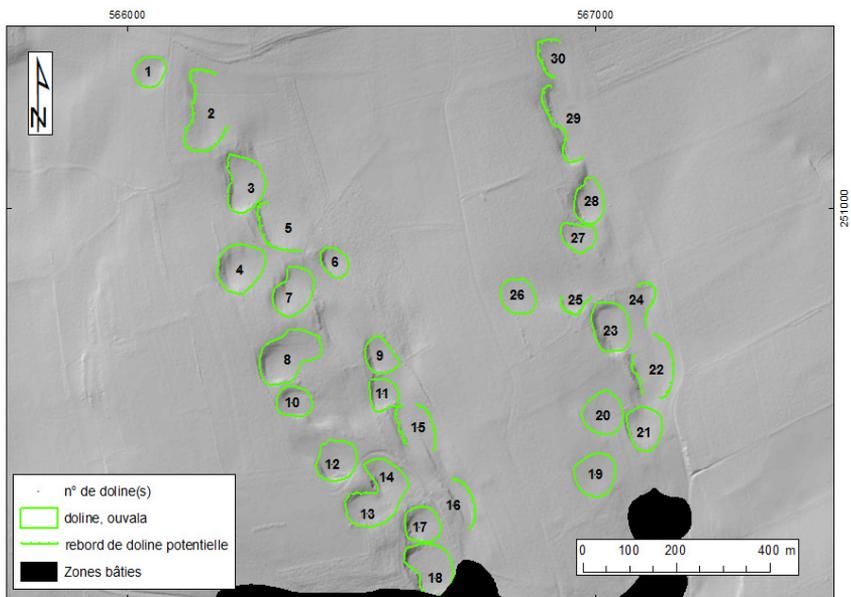


Fig. 20: Dolines de la zone test, numérotées de 1 à 30.

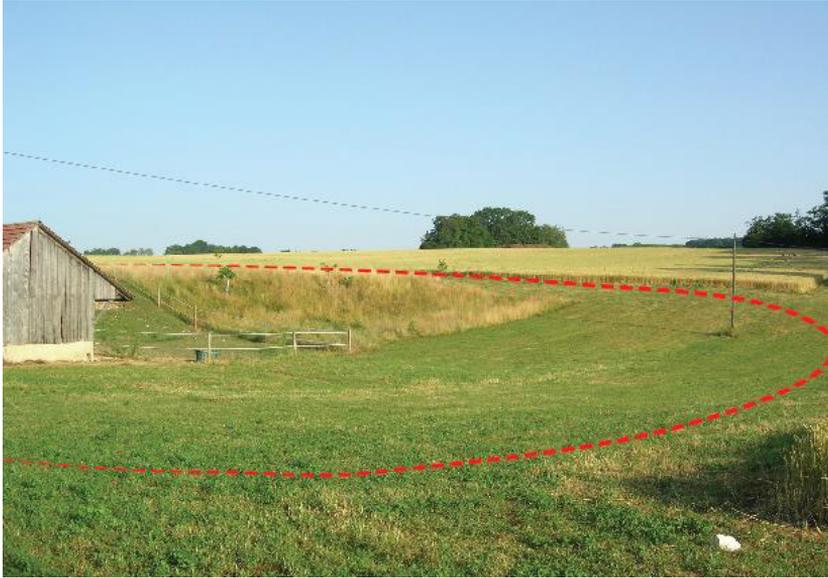


Fig. 21: Vue sur la doline n° 21 depuis l'est, avec contour de la dépression topographique en traitillés. Coordonnées 567 100/ 250 550. Photo R. Vallat, 05.07.2015.



Fig. 22: Vue sur la doline n° 24 depuis l'ouest, avec contour de la dépression topographique en traitillés. Coordonnées 567 110/250 830. Photo R. Vallat, 05.07.2015.

## Illustrations de terrain

La reconnaissance des dolines sur le terrain est généralement favorisée par l'absence de couverture végétale (forêt, cultures de céréales) et la lumière rasante. Les dolines peu profondes et très évasées ou celles situées en forêt sont généralement invisibles au regard. Dans ces cas, seule l'utilisation du MNT permet de les détecter.

La doline n° 21 (fig. 21), morphologiquement bien exprimée sur le terrain, est identifiée par toutes les méthodes, alors que la doline n° 24 (fig. 22), peu profonde et très évasée, n'a été identifiée que par la méthode « statistiques de surfaces ».

## Discussion

### Évaluation des méthodes de cartographie automatisée

La cartographie manuelle réalisée sur la zone test est utilisée comme référence qui est comparée aux modèles produits par les trois méthodes de cartographie automatisée. Les résultats de cette analyse comparative sont résumés dans le tableau 1, qui appelle les explications suivantes :

- Les erreurs de commission apparaissent quand des formes sont incorrectement identifiées comme dolines.
- Les erreurs d'omission surviennent chaque fois qu'une doline identifiée manuellement n'est pas cartographiée par le modèle.
- Taux de correspondance [%]=

$$\frac{\text{identifications positives parmi la cartographie manuelle}}{\text{somme des dolines cartographiées+erreurs de commissions de la méthode}} *100$$

En considérant les trois méthodes sur la zone test (fig. 23), 28 dolines sur les 30 cartographiées manuellement ont été positivement identifiées, 2 dolines n'ont pas été identifiées et 8 ont été faussement identifiées par l'une des méthodes au moins, soit 74% d'identifications correspondantes.

Ces résultats sont toutefois relatifs dans la mesure où la cartographie manuelle présente un certain degré d'interprétation, comme discuté plus haut. Ainsi, une observation détaillée sur le terrain a montré, a posteriori,

	Cartographie manuelle	A) Remplissage	B) Courbure	A ou B	C) Statistiques de surfaces	Combinaison A ; B ; C
Identifications dolines et rebords de doline potentielle	30	15	24	27	27	28
Erreur de commission	?	0	7	6	6	8
Erreur d'omission	?	15	6	3	3	2
Taux de correspondance avec cartographie manuelle	-	50 % (15/30)	65 % (24/37)	75 % (27/36)	75 % (27/36)	74 % (28/38)

Tableau 1 : Comparaison des trois modèles et de la cartographie manuelle sur la zone test. Pour la combinaison des méthodes A ; B ; C, les mêmes erreurs d'identification survenues dans plusieurs méthodes ne sont comptabilisées qu'une seule fois. La méthode « remplissage » identifie 50 % des dolines cartographiées manuellement et n'identifie aucune doline faussement. La méthode « courbure » présente une correspondance de 65 % avec la cartographie manuelle, mais c'est la méthode qui fait le plus de fausses identifications. La méthode « statistiques de surfaces » est la plus performante : elle présente une correspondance de 75 % et ne commet que trois erreurs d'omission.

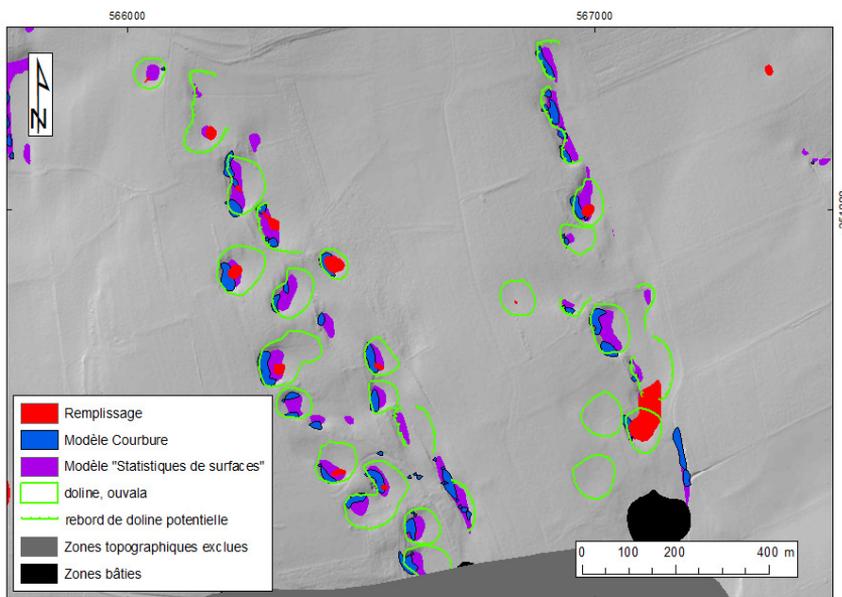


Fig. 23: Combinaison de tous les modèles sur la zone test servant à la validation des méthodes.

que les 2 dolines non identifiées par les méthodes automatisées (erreurs d'omission, n° 19 et n° 20, fig. 20) ont une probabilité assez faible d'être en réalité. Il s'agirait donc plutôt d'une erreur de jugement lors de la cartographie manuelle plutôt que d'un manque de performance des méthodes de cartographie automatisée. Quant aux 8 dolines « faussement » identifiées par les méthodes de cartographie automatisée, elles se sont révélées pour 7 d'entre elles être de véritables dolines lors de l'observation sur le terrain. Il n'y aurait donc a priori qu'une seule erreur de commission produite par les méthodes automatisées.

### Alignements de dolines

Le traçage des alignements de dolines a été réalisé manuellement sur la base des différents modèles de cartographie automatisée (fig. 24). Pour le traçage, c'est à la fois la tendance générale à l'échelle kilométrique et l'alignement local sur quelques dolines qui a été pris en compte. Par conséquent, les lignes tracées sont le résultat d'une interprétation et ont une marge d'erreur estimée à  $\pm 5^\circ$ . Pour des raisons de lisibilité graphique, seule la zone centrale du plateau de Bure est représentée dans le détail sur la figure 24.

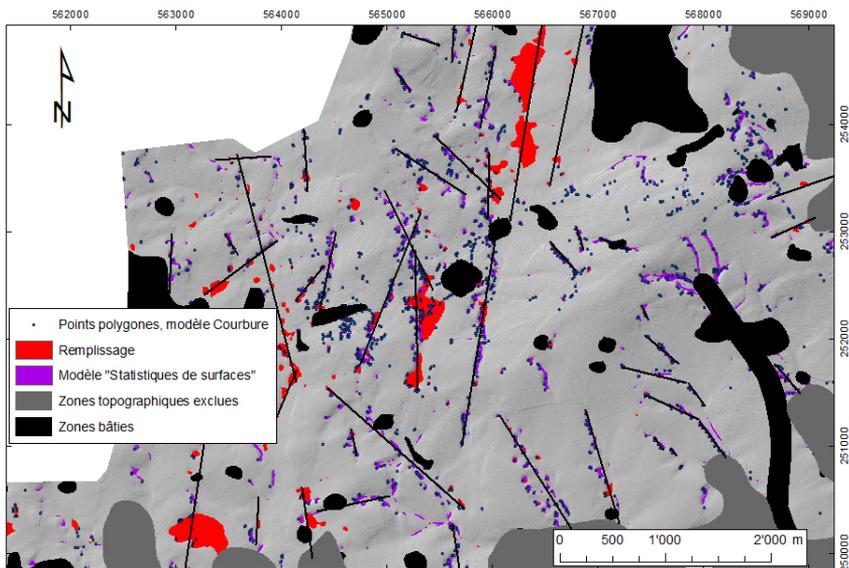


Fig. 24 : Alignements de dolines dans la zone centrale, tracés sur la base des modèles produits par la cartographie automatisée.

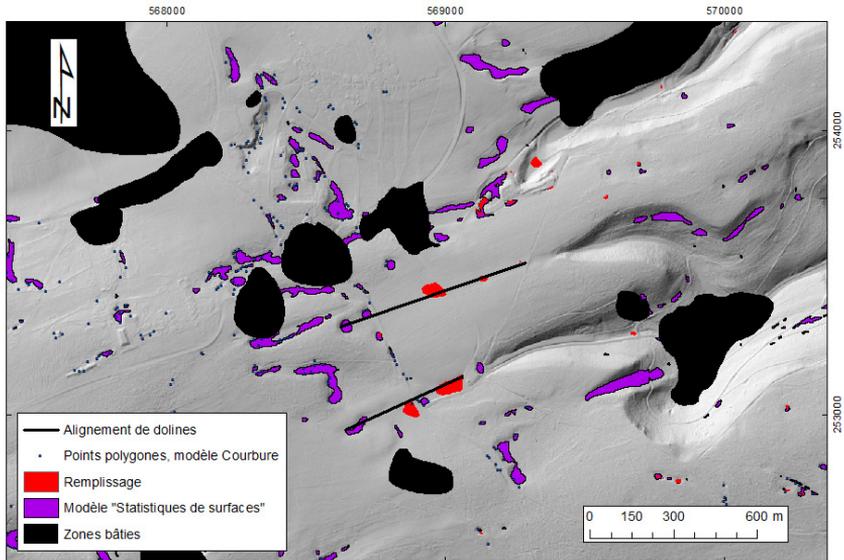


Fig. 25: Exemple d'alignements de dolines situés dans le prolongement amont de vallées (S.E. de Bure).

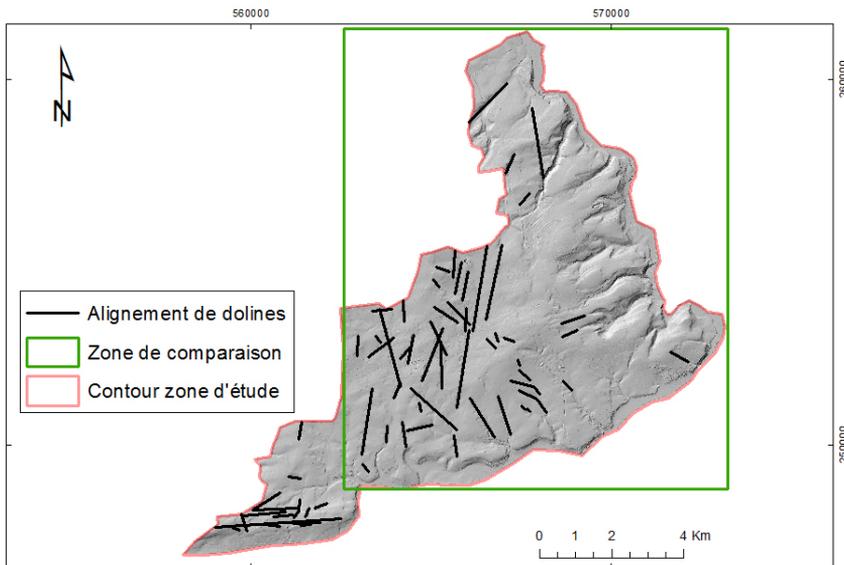


Fig. 26: Alignements de dolines situés sur la zone d'étude.

D'un point de vue géomorphologique, les dolines présentent souvent une morphologie allongée dans la direction de l'alignement. On constate également que certains alignements sont situés dans le prolongement amont de vallées sèches (fig. 25). Cette configuration est visible sur douze d'entre eux situés au sud et à l'est du plateau de Bure.

Si l'on considère la zone d'étude entière, trois directions d'alignements prépondérantes sont visibles : N.-S., N.O.-S.E. et E.-O. (fig. 26).

## Fracturation et alignement de dolines

Pour pouvoir comparer les alignements de dolines aux orientations de la fracturation tectonique à disposition, les zones d'études doivent correspondre. Par conséquent, seule la zone encadrée en vert sur la figure 26, pour laquelle des données de fracturation existent (Braillard 2005), a été prise en compte. Les azimuts des alignements de dolines présents sur cette zone ont été mesurés afin de construire un diagramme en rose (fig. 27, A). Un facteur de pondération relatif à la longueur des tronçons a été appliqué. Les tronçons d'alignements de dolines sont répartis par tranches de 15°, dont la longueur est proportionnelle au nombre de tronçons. Le diagramme en rose fait apparaître deux directions principales (notées D pour « dolines ») : la famille D1, qui présente une assez grande variation angulaire ( $N010^{\circ} \pm 20^{\circ}$ ), avec toutefois un pic bien marqué entre  $N010^{\circ}$  et  $N015^{\circ}$ , et la famille D2 ( $N125^{\circ} \pm 10^{\circ}$ ) qui est moins importante, mais a une faible dispersion angulaire.

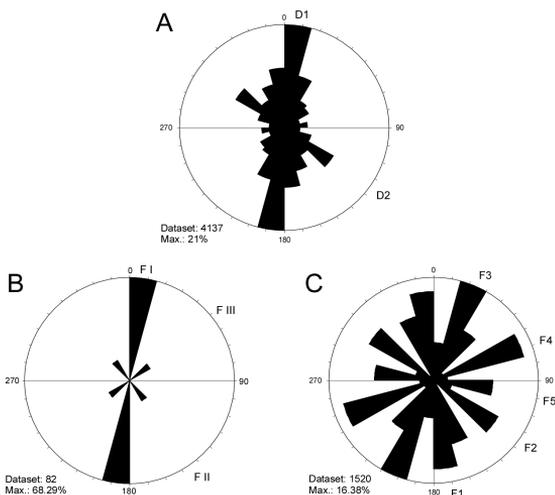


Fig. 27 :  
Rosace des directions des alignements de dolines sur le plateau de Bure (A), des failles kilométriques reportées sur les cartes géologiques (B) et des fractures visibles à l'échelle de l'affleurement (C).

Le pic bien marqué entre N010° et N015° de la famille D1, qui totalise environ 20 % des alignements de dolines, correspond à la direction des failles kilométriques F1. Les autres alignements de cette famille D1 coïncident avec les orientations des fractures F1 et F3. La famille D2 correspond quant à elle à la famille de fractures F2.

Il apparaît donc qu'un lien existe entre les alignements de dolines et la fracturation tectonique, qu'il s'agisse des failles kilométriques ou des fractures visibles à l'échelle de l'affleurement. Il semble que les alignements des dolines isolées correspondent plutôt aux fractures visibles à l'échelle de l'affleurement, tandis que les ouvalas linéaires, qui évoluent vers les vallées sèches, correspondent davantage aux failles kilométriques. Cette hypothèse, qui découle d'un simple examen visuel de la carte des alignements de dolines (fig. 24), nécessiterait d'être validée par une étude plus systématique et plus détaillée.

## Conclusion

La combinaison des différentes méthodes de cartographie automatisée a produit un inventaire très complet des dolines du plateau de Bure. Les zones aménagées, qui produisent beaucoup de fausses identifications, doivent cependant être exclues de la surface analysée. Les méthodes ont mis en évidence un nombre important de dolines invisibles à l'œil tant sur l'ombrage du MNT, sur les photographies aériennes, voire parfois sur le terrain. Parmi les différentes approches de modélisation testées, la méthode « statistiques de surfaces » s'est révélée être la plus performante. La méthode « remplissage » convient quant à elle à l'analyse des zones escarpées, alors que la méthode « courbure » est celle qui fait le plus de fausses identifications.

L'étape de validation des méthodes automatisées a montré que même en utilisant plusieurs ombrages du MNT différents (avec variations angulaires de la source lumineuse), la cartographie manuelle à l'écran reste sujette à interprétation et devrait être complétée par une observation sur le terrain. Ces aspects, qui rendent la cartographie manuelle passablement laborieuse, confèrent donc aux approches de cartographie automatisée un avantage indéniable. Selon les contextes morphologiques et l'étendue des zones à cartographier, la cartographie automatisée peut donc favorablement compléter, voire remplacer une cartographie manuelle.

La cartographie automatisée a permis de mettre en évidence des alignements de dolines sur le plateau de Bure, qui sont vraisemblablement dictés par l'orientation de la fracturation. Une étude plus détaillée, qui tienne compte d'autres paramètres comme notamment la direction des écoulements superficiels et épikarstiques, serait toutefois nécessaire pour déterminer le rôle que chaque type de fractures (failles kilométriques et fractures visibles à l'échelle de l'affleurement) joue dans la formation de ces alignements.

*Raphaël Vallat, originaire de Bure (JU), a obtenu sa maturité au gymnase de la rue des Alpes à Bienne en 2009 et son bachelor en géographie physique à l'université de Fribourg en 2015. La présente étude reprend les principaux résultats de son travail de bachelor. Il poursuit actuellement un master en géographie à l'université de Lausanne.*

*Luc Braillard, docteur en géologie et géomorphologie de l'université de Fribourg, a travaillé de 1998 à 2007 auprès de la Section d'archéologie et paléontologie du canton du Jura (travaux A16). Il est actuellement enseignant-chercheur à l'université de Fribourg (département de Géosciences).*

## RÉFÉRENCES

- Aubert, D. (1969) : Phénomènes et formes du karst jurassien. *Eclogae geologicae Helveticae*. 62/2, 325-399.
- Braillard, L. (2005) : Rôles de la tectonique et de la stratigraphie dans la formation des vallées sèches de l'Ajoie (JU-Suisse). *Actes de la Société jurassienne d'Émulation* 108, p. 33-65.
- Braillard, L. (2006) : Morphogenèse des vallées sèches du Jura tabulaire d'Ajoie (Suisse) : rôle de la fracturation et étude des remplissages quaternaires. *GeoFocus* 14, université de Fribourg, Suisse.
- Chauve, P., Martin, J. & Bailly, C. (1985) : *Carte géologique Delle au 1/50 000 avec notice explicative*. BRGM.
- Diebold, P., Laubscher, H.-P., Schneider, A. & Tschopp, R. (1963) : *Atlas géologique de la Suisse 1/25 000*, feuille Saint-Ursanne. Commission géologique suisse.
- Jenness Enterprises (2006) : Topographic position index. Extension ArcMap téléchargeable en libre accès à l'adresse : <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>.
- Kimerling, A., Buckley, A., Muehrcke, P. & Muehrcke, J. (2012) : *Map Use: Reading, Analysis, Interpretation*. Redlands, CA : Esri Press Academic.
- Leuenberger, H. Rauber, G. (2014) : Fouille de dolines : présentation d'une méthodologie et de son application sur le terrain. *Actes de la Société jurassienne d'Émulation* 117, p. 39-49.
- Liniger, H. (1969) : *Atlas géologique de la Suisse 1/25 000*, feuille Bonfol. Commission géologique suisse.

- Siméoni, G., Jamier, D. (1975): Relations entre éléments structuraux et morphologie dans la région du plateau de Bure (Jura tabulaire). *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie*, université de Neuchâtel, p. 163-173.
- Swisstopo (2015): modèle *swissALTI 3D*. [Consulté le 29 mars 2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/fr/home/products/height/swissALTI3D.html>
- Vallat, R. (2015): *Cartographie automatisée des dolines du plateau de Bure (Ajoie, Suisse) à l'aide d'un modèle numérique d'altitude et mise en lien avec la fracturation tectonique*. Travail de bachelor, université de Fribourg, géographie.