



HAL
open science

Imagerie LIDAR et cartographie semi-automatique de l'exokarst de la Montagne de Reims (Champagne, France)

Julien Berthe, Olivier Lejeune, Alain Devos, Nicolas Bollot

► **To cite this version:**

Julien Berthe, Olivier Lejeune, Alain Devos, Nicolas Bollot. Imagerie LIDAR et cartographie semi-automatique de l'exokarst de la Montagne de Reims (Champagne, France). *Karstologia*, 2021, 78, pp.41-48. hal-03543184

HAL Id: hal-03543184

<https://hal.science/hal-03543184v1>

Submitted on 10 Feb 2022

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.

Julien BERTHE¹,
Olivier LEJEUNE²,
Alain DEVOS³ et
Nicolas BOLLOT⁴

UR3795 GEGENAA (Groupe
d'étude sur les géomatériaux,
les environnements naturels,
anthropiques et archéologiques)
Université de Reims

Champagne-Ardenne (URCA),
57, rue Pierre Taittinger,
51571 Reims Cedex

(1) Julien.berthe@univ-reims.fr ;
(2) olivier.lejeune@univ-reims.fr ;
(3) alain.devos@univ-reims.fr ;
(4) nicolas.bollot@univ-reims.fr

Imagerie LiDAR et cartographie semi-automatique de l'exokarst de la Montagne de Reims (Champagne, France)

RÉSUMÉ : La Montagne de Reims possède un front de karstification au contact des formations tertiaires et de la craie dont l'exokarst a été cartographié de longue date sur son versant nord. Toutefois, le versant sud n'avait jamais vraiment fait l'objet d'investigation en raison de l'inaccessibilité des terrains situés en propriétés privées. Une campagne LiDAR aéroporté acquise par l'ONF (Office National des Forêts) et le Parc Naturel Régional de la Montagne de Reims durant l'hiver 2018 dans le cadre du programme « Forêt d'exception » a permis la cartographie précise de l'intégralité des formes exokarstiques de ce massif forestier. Cependant, la réalisation de ces cartes a été rendue difficile par la multiplicité des formes anthropiques (minières, cratères d'obus, structures archéologiques diverses...) dont la morphologie est proche des formes

exokarstiques et qui rendaient la lecture et l'interprétation du LiDAR difficiles. L'objet de cet article est double : d'une part, il montre l'organisation spatiale de l'exokarst en Montagne de Reims et d'autre part il est d'ordre méthodologique afin de discriminer les dépressions fermées.

MOTS-CLÉS : exokarst, LiDAR, Montagne de Reims, formes anthropiques.

ABSTRACT: LIDAR IMAGING AND SEMI-AUTOMATIC MAPPING OF THE EXOKARST OF THE MONTAGNE DE REIMS (CHAMPAGNE, FRANCE). Reims Mountain has a lithostratigraphic contact karst whose exokarst has been mapped for a long time on its northern slope. However, the south slope had never really been investigated because of the inaccessibility of the land held under private hunting property. The use of LiDAR imagery

excised by ONF (Office National des Forêts) and the Parc Naturel de la Montagne de Reims as part of the "Exceptional Forest" programme and made available to us has enabled the precise mapping of all the exokarstic forms of this forest massif. However, the realization of these maps was made difficult by the multiplicity of anthropogenic forms (mining, shell crater, various archaeological forms...) whose morphology is close to exokarstic forms and which made the reading and interpretation of the LiDAR difficult. The purpose of this article is therefore to present the results of this study LiDAR but also the methodology of the treatment that allowed the discrimination of these forms and the obtaining of these maps.

KEY WORDS: exokarst, LiDAR, Reims Mountain, anthropogenic forms.

Introduction

La majorité des karsts des bas plateaux de l'est de la France sont des karsts de contact lithostratigraphique et des karsts couverts [Nicod, 1995 ; Lejeune et Devos, 2001]. C'est le cas de la Montagne de Reims qui constitue un promontoire du revers de la Côte d'Île-de-France, en Champagne crayeuse, entre les vallées de la Vesle et de la Marne (figure 1). En limite orientale sur le front de côte, la karstification se développe au contact des formations tertiaires et de la craie sous-jacente du Crétacé supérieur. [Martel, 1902 ; Lejeune et al., 2007 ; Rodet, 1992]. Plusieurs réseaux karstiques sont reconnus par les spéléologues locaux et les karstologues depuis la fin du 19^e siècle

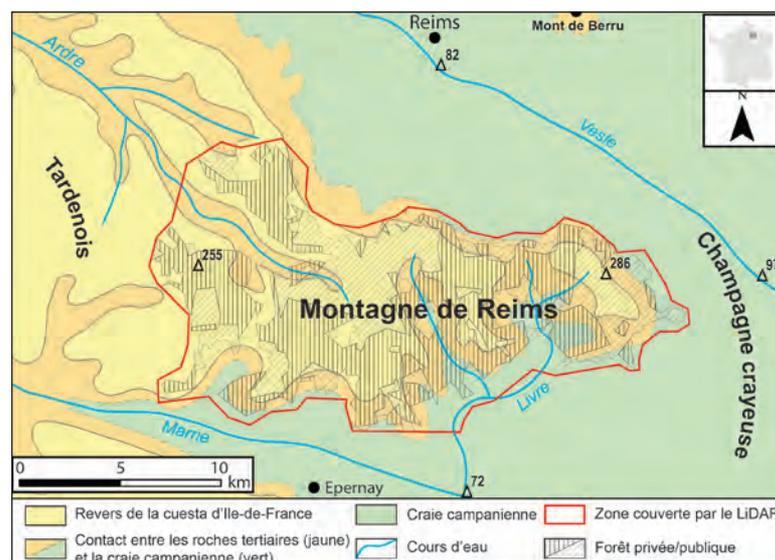


Figure 1 : Carte de localisation du secteur d'étude, géologie simplifiée et délimitation des forêts publiques et privées. Location map of the study area, simplified geology and delineation of public and private forests.

(rivière de Trépail, Fontaine de Verzy, Fontaine Pleureuse, Fosse Martin-Godard).

Toutefois, les données restent fragmentaires car une bonne partie de ce karst sous couverture, se situe en propriétés privées et donc souvent interdit d'accès (20 305 ha soit 78 % des forêts de notre zone d'étude en Montagne de Reims). Les forêts domaniales et communales ne représentent respectivement

que 14 % (3 506 ha) et 8 % (2 019 ha) des surfaces forestières globales.

Les études antérieures s'étaient donc essentiellement concentrées sur le flanc nord couvert plutôt par des forêts domaniales et communales avec un accès plus aisé. De plus, le recouvrement forestier n'avait pas permis non plus une exploration de l'ensemble de la Montagne de Reims par photographie aérienne. La compilation des travaux cartographiques antérieurs [Guérin, 1959 ; Dumont, 1964 ; Rodet, 1992 ; Lejeune, 2000 et 2001, Beaujain, 2009] réalisés par prospection pédestre avait permis de montrer l'existence de 291 formes exokarstiques au géoréférencement hétérogène (photos 1 et 2). Cependant, ces travaux concernaient essentiellement les flancs nord et est de la Montagne de Reims, le versant sud restant alors quasiment inaccessible. En effet, la présence de propriétés privées et un couvert végétal trop dense (roncier, taillis sous futaie) ne permet pas une bonne observation des formes. Ce n'est que tout récemment, avec le survol de la forêt par une mission LiDAR aéroporté du 21 au 23 février 2018 commandée dans le cadre du label « Forêt d'Exception® » et mis à disposition par conventionnement entre l'ONF, le Parc Naturel de la Montagne de Reims et l'Université de Reims-Champagne-Ardenne (URCA), qu'un inventaire exhaustif des formes karstiques est réalisé. De plus la Montagne de Reims a fait l'objet d'une occupation humaine assez précoce [David, 2019] plus ou moins morphogène. En effet, les époques protohistoriques, antiques, médiévales, modernes et surtout contemporaines (Grande Guerre) ont lourdement marqué de leurs empreintes les paysages, en particulier par des dépressions circulaires comme des entonnoirs d'obus ou des plates-formes de tir d'artillerie (Photo 4). L'objectif de cette contribution est de proposer une méthode de discrimination des formes karstiques (dépressions fermées) révélées au LiDAR et de soulever des interrogations relatives à leur organisation spatiale.

Les enjeux sont non seulement d'ordre scientifique pour la karstologie mais s'inscrivent également dans les problématiques de protection des ressources en eau. La Montagne de Reims, constitue effectivement un dôme piézométrique de la nappe de la craie, sous couvertures géologique et forestière à forts enjeux patrimoniaux (Réserves biologiques dirigées de l'ONF, label Forêt d'Exception®, Parc Naturel Régional, inscription UNESCO, ZNIEFF). Inscrite entre deux agglomérations (Reims et Epernay), elle est à la fois le poumon vert de ces cités, mais aussi un réservoir en eau souterraine fortement sollicité par l'AEP et l'irrigation en Champagne crayeuse vouée aux agro-ressources.

→ Photo 1: Exemple de dolines emboîtées au-dessus de la commune de Verzy. A. La grande doline est en entonnoir. Les dolines emboîtées sont de type effondrement et entonnoir B. Vue plan des dolines emboîtées, ombrage multidirectionnel. Cliché J. Berthe. *Example of nested sinkholes above the commune of Verzy. A. The large sinkhole is funnelled. The nested sinkholes are of the collapse and funnel type. B. Plan view of nested sinkholes, multidirectional shading.*

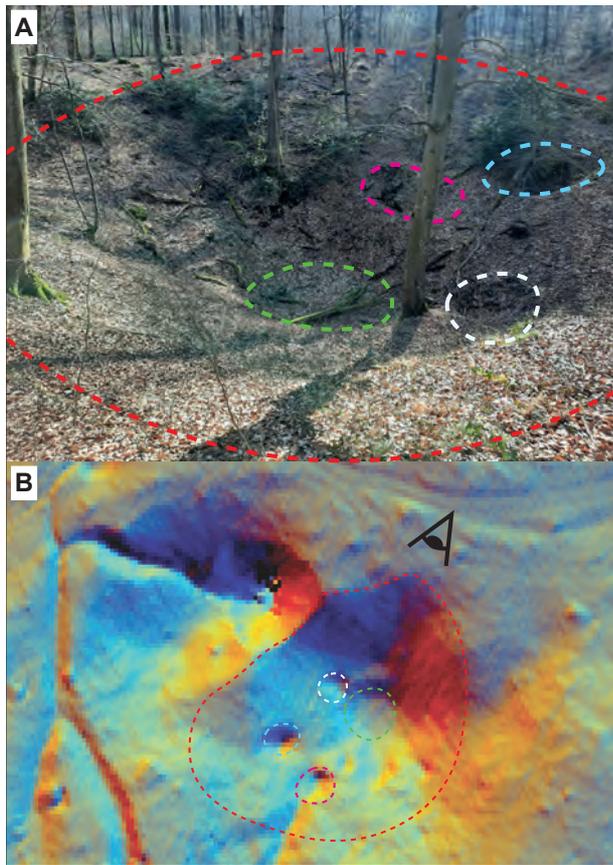


Photo 2: Dolines, au premier plan la Fosse Martin-Godard avec son gouffre béant. La doline est en communication avec la rivière souterraine de Verzy. Cliché J. Berthe. *Dolines, in the foreground the Fosse Martin-Godard with its gaping pit. The doline is in communication with the underground river of Verzy.*

I. Site et méthodes

Les travaux antérieurs [Rodet, 1992 ; Devos et al, 2007a et 2007b ; Lejeune et Devos, 2001 ; Lejeune et al, 2007] ont montré que la Montagne de Reims est affectée par un karst de front de côte en amont pendage, et de versant en aval pendage au cœur du massif. Ce dernier est découpé par les affluents de rive droite de la Marne (Livre, Germaine et Lingonne) en trois plateaux : Saint-Basle (le plus à l'est), Ville-en-Selve et Saint-Imoges (le plus à l'ouest). Le karst se présente sous la forme d'un front de karstification étagé et perché au contact de la craie du Campanien et des formations tertiaires. Ces dernières principalement meubles et imperméables (Argiles à Meulière, marnes lutétiennes et argiles de l'Yprésien supérieur), coiffent les plateaux d'un « cataplasme humide » principalement forestier. Par contre, sur les versants et le front de côte, affleurent les sables grésifiés du Thanétien qui constituent des replats structuraux où le karst d'infiltration se développe avec un étagement caractéristique. En effet, on retrouve des réseaux pénétrables dans ces sables (ex : Fontaine Pleureuse) qui favorisent la concentration des écoulements vers les réseaux de la craie sous-jacente (figure 2). Les exutoires restent perchés en zone vadose une quarantaine de mètres au-dessus de la nappe de la craie et calent l'installation de villages viticoles (Verzy, Verzenay, Trépiail) sur le front

de côte. L'occupation de la Montagne de Reims est potentiellement morphogène depuis l'Antiquité générant de nombreux artefacts archéologiques avec l'installation de communautés monastiques (abbayes de Saint-Basle, Hauvilliers), des déforestations (paléo-parcellaire, rideaux, charbonnage), la pisciculture (étangs et digues), un drainage organisé sur les Argiles à meulière (fossés), de nombreux sites d'extraction de géomatériaux, (meulière, argiles, sables) et enfin des traces des deux guerres mondiales (essentiellement des tranchées et des zones de bombardement). En effet, le versant nord de la Montagne de Reims s'inscrivait dans le quatrième réseau de défense (tranchées, boyaux) en arrière du front durant la Grande Guerre et offrait de nombreux sites favorables pour l'observation et l'artillerie lourde [Devos et al., 2015 et 2016]. Durant la Seconde Guerre mondiale, le tunnel ferroviaire de Rilly-la-Montagne fut la cible de bombardements aériens. La discrimination des formes karstiques s'avère donc difficile parmi les nombreuses structures archéologiques.

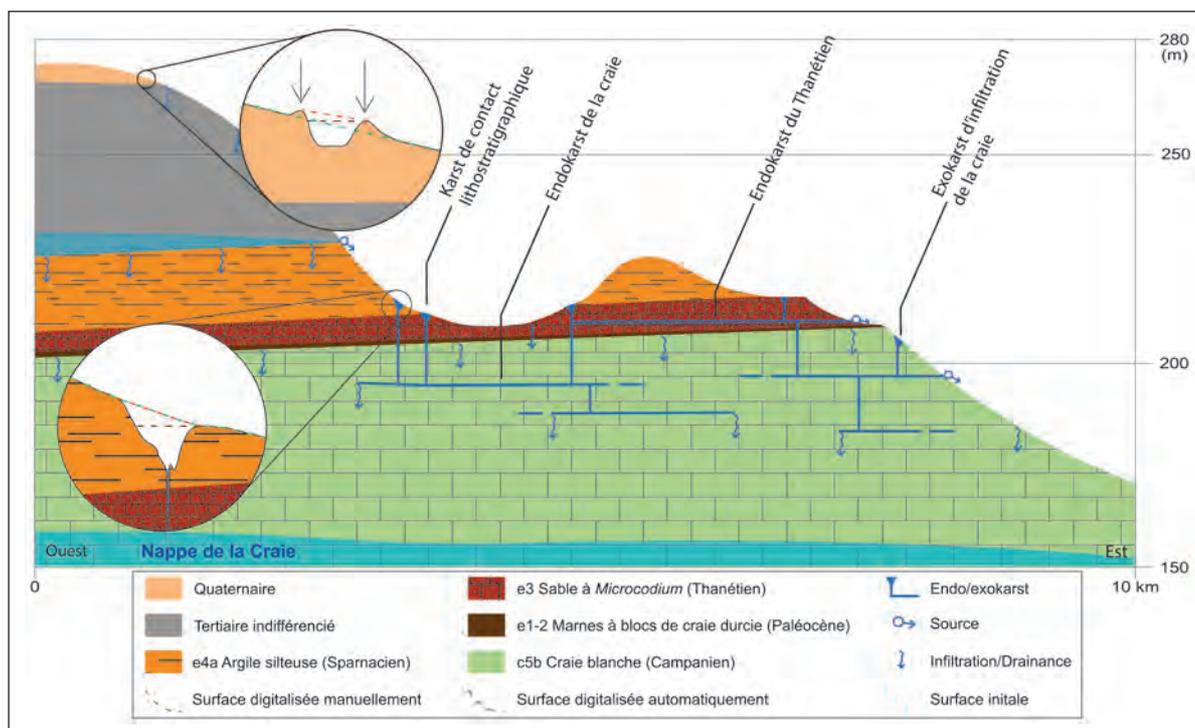
Le LiDAR (*Light Detection And Ranging*) est une technologie laser utilisée au sol, sur trépied [Jaillet et al, 2014] ou aéroporté. Il permet la détection de dépressions sous couvert forestier dense [Weishampel et al, 2011, Hofierka et al., 2018], souvent pour des formes décamétriques [Zhu et Pierskalla, 2016 ; Zhu et al, 2020] et plus

particulièrement les formes karstiques [Wu et al., 2016 ; Panno et Luman, 2018 ; Mihevc A., Mihevc R, 2021]. La campagne LiDAR aéroporté (avion) du 21-23 février 2018 couvre une grande partie de la Montagne de Reims (245 km²) soit 46 % du territoire du Parc Naturel de la Montagne de Reims (533 km²). La campagne a été réalisée durant l'hiver, pour limiter les effets du couvert végétal qui multiplie le nombre d'échos. La densité moyenne d'émission des points est homogène sur la zone d'étude et suffisamment importante (12 points/m²) pour bénéficier d'une bonne résolution au sol (6 points/m²), à la fois latérale (25 cm) et altitudinale (10 cm).

Les résultats sont fournis sous la forme d'un MNT à haute résolution (grille de 50 cm) en RGF93, de 1097 dalles de 500 m x 500 m dont le traitement permet de visualiser les morphologies karstiques. Les données des autres échos laser associés à la stratification végétale (arborée, arbustive) comme le Modèle Numérique d'Élévation (MNE) de la canopée ne sont pas utilisés ici. Des campagnes de terrain complètent les observations révélées par le LiDAR.

II. Les traitements du MNT

Sans traitement, le modèle numérique de terrain d'une résolution de 50 centimètres ne permet pas de discriminer les formes karstiques (figure 3A).



Il existe de nombreux traitements standardisés comme l'ombrage traditionnel. Ce traitement converti le MNT pour représenter l'ombre obtenue par illumination artificielle habituellement d'azimut 315° et un angle d'incidence de 45° (figure 3B). Il est utilisé sur les cartes topographiques de l'IGN pour rendre compte du relief, mais aussi pour l'analyse morphologique des mouvements des terrains [Valdivieso *et al.*, 2018].

L'ombrage multidirectionnel (figure 3C) est une somme d'ombrages d'azimut différent permettant la description détaillée du relief en supprimant les zones d'ombre de l'ombrage traditionnel [Loisios *et al.* 2007]. Il permet également la détection de linéaments [Masoud et Koike, 2010 ; Challis *et al.*, 2008]. L'index topographique de position ou TPI (figure 3D) convertit la valeur de chaque pixel du MNT en rabattant la valeur moyenne de la première couronne de pixels qui l'entoure. Cela permet de décrire de façon très précise les formes en élévation et en dépression comme les polémoformes [Taborelli, 2018] en supprimant le macro-relief pour ne laisser que le micro-relief. La dominance locale ou *Local Dominance* (figure 3E) donne pour chaque pixel la valeur moyenne de l'angle d'observation de la couronne de pixels avoisinants à partir d'une élévation constante au-dessus du sol. Il est utilisé en archéologie pour la détection d'anciens parcellaires [Kokalj

et Hesse, 2017]. Le relief local ou LRM (figure 3F) est la soustraction au MNT d'une version lissée du relief. Il permet de discriminer les zones en élévation des zones en dépression [Buridant *et al.*, 2020]. La rugosité (figure 3G) est la différence maximale entre la valeur d'un pixel et celle de sa couronne. Elle permet de rendre compte des aspérités de la topographie. Il existe des applications de ce traitement pour la détection automatique des glissements de terrain [Roering, 2006]. Le Sky view Factor, facteur d'ensoleillement ou SVF (figure 3H) traduit la part de la demi-sphère céleste vue depuis chaque pixel. Si la valeur vaut 180°, cela signifie que le point est le plus haut de l'espace considéré et donc il n'a aucun obstacle et est capable de voir toute la demi-sphère céleste. Au contraire, plus la valeur se rapproche de zéro plus le point est encaissé. Il existe des applications dans le domaine de la détection de glissements de terrain actuels [Lee, 2018] et ancien [Kokalj *et al.*, 2011]. Enfin les isolignes (figure 3I) sont la conversion des pixels d'élévation du raster en vecteur de type ligne rejoignant les points d'égale altitude. Cela permet notamment de décrire l'emboîtement de formes des dolines [Wu *et al.*, 2016]. L'ombrage multidirectionnel, le Sky-View-Factor et les isolignes sont retenus pour élaborer le protocole de détection des formes exokarstiques.

III. Méthode de discrimination semi-automatique des formes exokarstiques

La détection semi-automatique des formes exokarstiques se développe en cinq étapes :

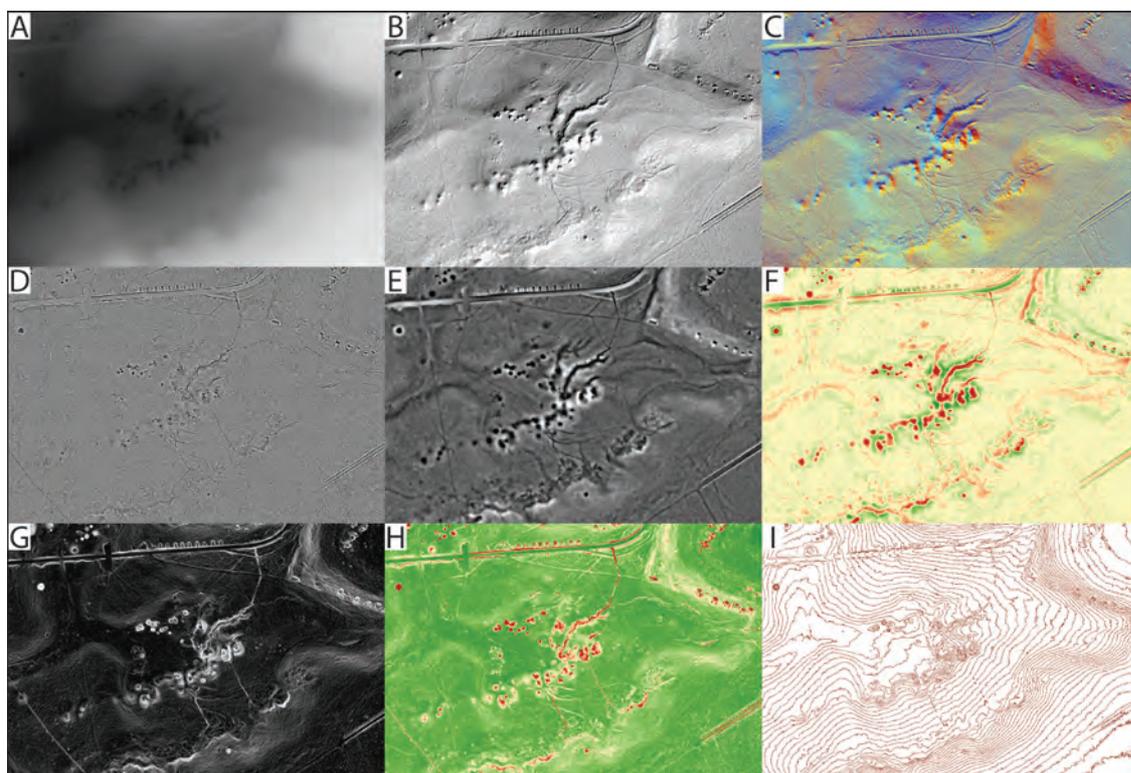
La première étape est de fusionner les 1097 dalles en 95 dalles de 2 km par 2 km pour accélérer les traitements.

La deuxième étape est de convertir la donnée brute du MNT par le biais de différents traitements pour obtenir des données exploitables pour la détection de l'exokarst.

Le logiciel libre Relief Visualization Toolbox, utilisé ici, est un logiciel de traitement standardisé de la donnée LiDAR développée par le centre de recherche de l'Académie slovène des sciences et des arts. L'outil de création du Sky View Factor est utilisé avec les paramètres proposés par défaut, contrairement à l'ombrage multidirectionnel où l'angle d'incidence a été basculé de 45° à 27° à la suite d'observations sur des secteurs tests permettant d'optimiser la calibration (figure 4).

Le logiciel Qgis est utilisé pour générer les isolignes à un pas de 10 centimètres. Il faut ensuite supprimer toutes les informations inutiles, puisque le diamètre de la plus grande forme exokarstique connu en Montagne de Reims est de 50 m soit 157 m de périmètre (doline de Saint-Basle, photo 3). Les isolignes de

Figure 3 : Exemples de traitements d'un MNT haute résolution. A : MNT brut, B : Ombrage, C : Ombrage multidirectionnel, D : Index topographique de position, E : Dominance locale, F : Modèle de relief local, G : Rugosité, H : Sky view factor, I : Isolignes. Example of handling of high-resolution DEM A: DEM, B: Hillshading, C: Hillshading from multiple directions, D: Topographic Position Index, E: Local dominance, F: Local Relief Model, G: Rugosity, H: Sky view factor, I: Isolines.



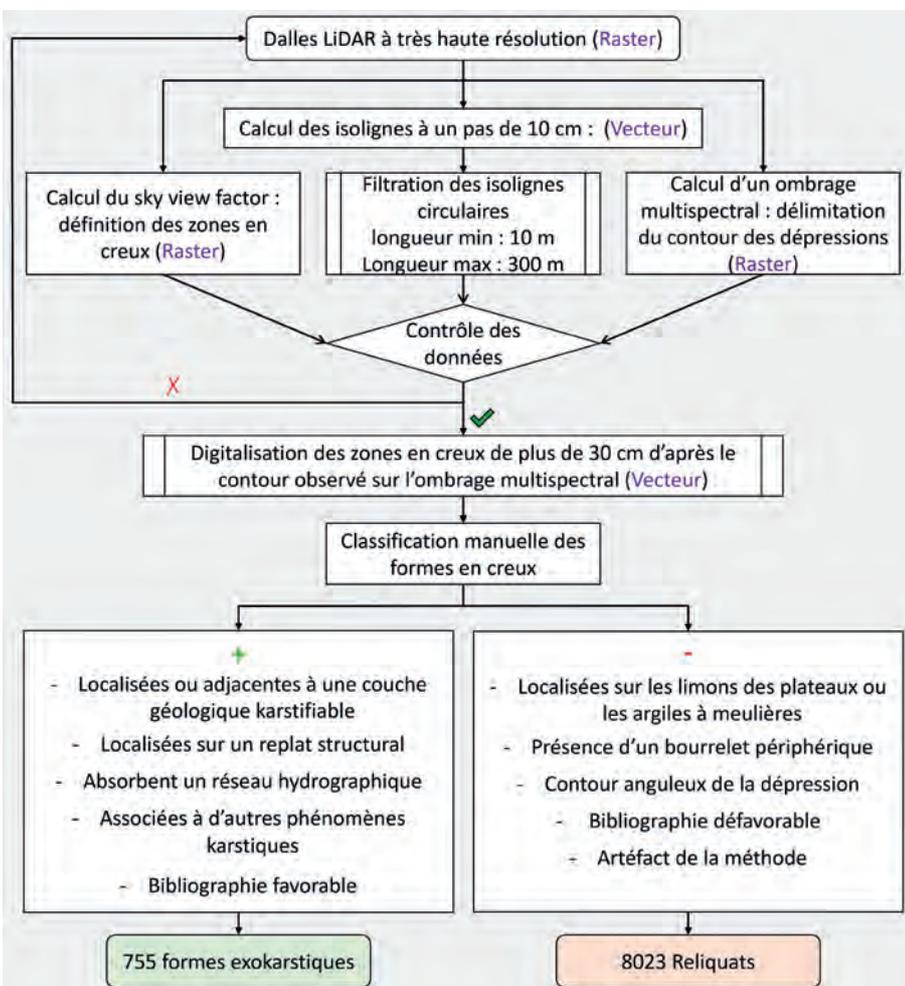
plus de 300 mètres sont supprimées ainsi que celles de moins de 10 mètres, à la suite d'essais sur une zone expérimentale connue. Ces essais ont permis de montrer que la détection des formes en dépression

de moins de 3 mètres de diamètre révèle sur la zone test 10 fois plus de reliquats, sans augmenter la détection des formes exokarstiques (figure 4).



Photo 3: Exemple de forme exokarstique en Montagne de Reims, la doline de Saint-Basle située au-dessus de la commune de Verzy, versant nord de la Montagne de Reims. Cliché J. Berthe.
Example of exokarstic form in the Montagne de Reims, the Saint-Basle sinkhole located above the commune of Verzy, northern slope of the Montagne de Reims.

Figure 4 : Algorithme présentant la méthode de détection semi-automatique de l'exokarst et différenciation avec les autres formes en creux. *Algorithm presenting the method of semi-automatic detection of exokarst and differentiation with other hollow forms.*



Chacune de ces couches a une fonction précise. Le Sky View Factor permet de différencier les reliefs en élévation des reliefs en dépression, retenus pour analyse. Les isolignes permettent de sélectionner les dépressions significatives, dont la profondeur dépasse 30 cm et le diamètre 3 m. L'ombrage multidirectionnel permet de déterminer le contour des dépressions significatives (figure 4).

La troisième étape consiste à vérifier la conformité de toutes les données et leur homogénéité. Les erreurs commises sont alors supprimées et de nouveau traitées (figure 4).

La quatrième étape est de digitaliser les dépressions fermées de plus de 30 cm de profondeur et de plus de 3 m de diamètre. Les contours des dépressions fermées sont digitalisés manuellement conformément à la surface initiale préalable aux creusements de la forme (figure 2). Il existe des traitements de digitalisation automatiques des formes karstiques [Wu, 2016], mais ces derniers se basent sur l'altitude minimale du contour de la forme, cela induit un biais important lorsque les formes se trouvent sur une pente (front de côte).

La cinquième étape est une discrimination manuelle des 8778 formes digitalisées. Les dépressions fermées sont alors séparées en deux groupes, les formes non karstiques et l'exokarst. Les premières ou reliquats du traitement, correspondent aux trous d'obus caractérisés par leur bourrelet périphérique (figure 2) ou aux fosses d'extraction de meulrières localisées sur le pourtour du plateau et possédant des contours rectilignes et des remblais. Les secondes sont caractérisées par leurs morphologies en dépression (entonnoir, cuvette, baquet), leur contexte géomorphologique (replat structural), hydrologique (perte), mais aussi à l'aide de la bibliographie.

IV. Résultats

Le traitement semi-automatique du MNT à haute résolution LiDAR détermine 8778 dépressions fermées dont 755 identifiées comme karstiques. Ces chiffres cachent davantage de dépressions car les secteurs à fortes densités de dépressions coalescentes sont exclus du traitement, comme les fosses d'extraction de géomatériaux et les secteurs marqués par un modelé en « peau d'orange » caractéristiques des effets de l'artillerie de la Grande Guerre [Taborelli et al., 2017].



Photo 4 : Exemple d'une dépression fermée anthropique (plate-forme de tir de la Première guerre mondiale). Cliché J. Berthe
Example of a closed anthropogenic depression (WW1 firing platform).

Figure 5 : Répartition des formes exokarstiques et des principaux réseaux endokarstiques en Montagne de Reims sur les versants et le front de la cuesta d'Île-de-France.
Distribution of the exokarstic forms and the main endokarstic networks in the Montagne de Reims on the slopes and the front of the cuesta of Île-de-France.

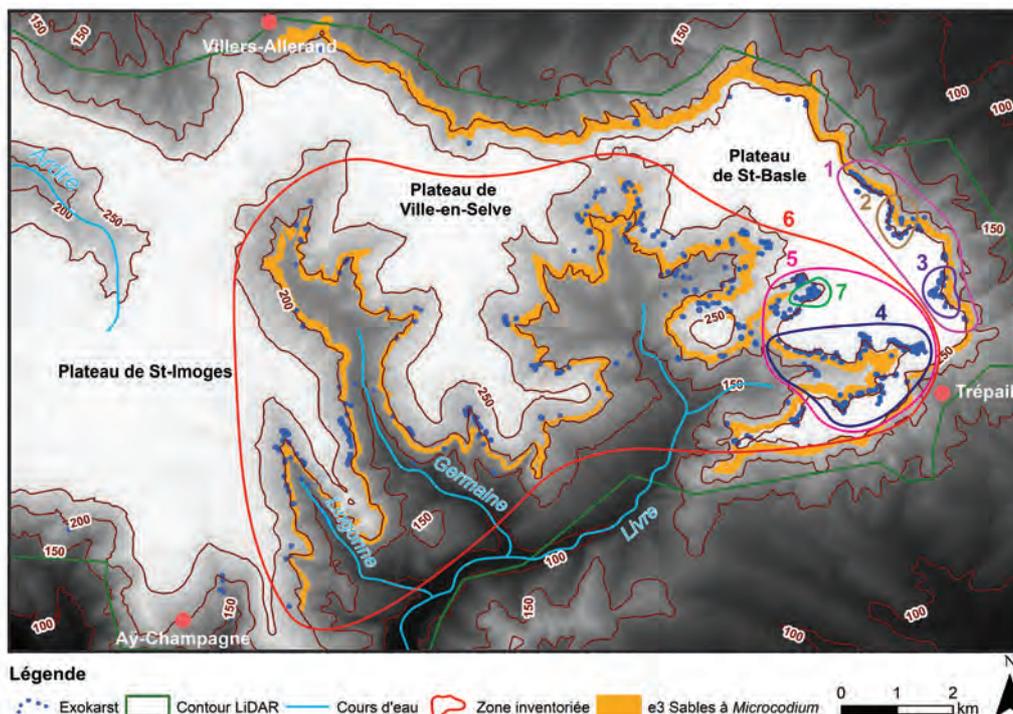
La cartographie des dépressions karstiques détectées en Montagne de Reims montre clairement un liseré karstique de 16 km de linéaire (figure 5). Il est marqué par une double discontinuité, à deux échelles. À l'échelle régionale, il concerne essentiellement la partie orientale du massif avec une limite de karstification passant entre Villers-Allerand et Ay-Champagne. Cette répartition est remarquablement corrélée à celle des sables à *Microcodium* du Thanétien dont l'affleurement atteint un linéaire de 71 km. À l'échelle locale, la discontinuité du liseré est évidente avec un versant nord exempt d'exokarst à la différence des autres versants. Une décroissance vers l'ouest de la densité des dépressions fermées apparaît. Cette répartition peut s'expliquer par le degré de grésification calcaire des sables et le gradient hydraulique qui s'amoindrit, déterminant une perte du potentiel de karstification.

La bibliographie existante fait mention de nombreuses formes exokarstiques au niveau du plateau de Saint-Basle et cette nouvelle représentation permet de se rendre compte que le plateau de Ville-en-Selve est lui aussi une zone fortement karstifiée. Le plateau de Saint-Imoges, quant à lui, ne présente de l'exokarst que dans sa partie orientale. Le bassin versant de l'Ardre est exempt de formes karstiques. Localement, la discontinuité du liseré est corrélée à la présence de mouvements de terrains, nombreux en Montagne de Reims [Van Den Eeckhaut et al., 2010]. Le front de karstification avec ses 755 formes exokarstiques s'avère étroit, limité entre la limite de couverture tertiaire et le front de côte.

V. Discussion

La première étape pour juger de la qualité des résultats est de comparer les résultats obtenus à la bibliographie. Pour cela, trois inventaires de terrain et un inventaire bibliographique ont été retenus pour comparer les secteurs investigués par rapport aux résultats obtenus sur les mêmes zones grâce à la détection assistée par le LiDAR (tableau 1 et localisation des secteurs sur la figure 5). Sur la majorité des sites, le LiDAR détecte davantage de formes exokarstiques que l'œil humain. Cela peut s'expliquer par la couverture végétale, par leur isolement, leur accessibilité ou leur visibilité. Par exemple, dans la partie orientale de la Montagne de Reims (secteur 1), le LiDAR recense 134 % de dépressions karstiques de plus que les inventaires antérieurs (tableau 1). Ce différentiel peut monter à 348 % dans le secteur des dolines de Trépail (secteur 4). Toutefois, il existe un contre-exemple sur le secteur des Monts-Bayons (secteur 2, figure 5) où l'inventaire de terrain est plus prolixe que celui du LiDAR.

La seconde étape de validation de la méthode passe par une comparaison entre les effectifs révélés au LiDAR et observés sur le terrain. À partir d'un site-test dans le secteur sud du gouffre de la Nau (secteur 7, figure 5), 39 formes exokarstiques avaient été recensées sur le terrain au préalable. Le LiDAR apparaît davantage comme un outil de repérage des sites densément karstifiés qu'un outil d'inventaire automatique permettant ensuite



Secteur	Sources	Données bibliographiques	Interprétation lidar	% de dolines supplémentaires détectées grâce au LiDAR
1	Est du front de côte, Lejeune O. 2000	50	117	134
2	Monts Bayons, Lejeune O. 2000	43	35	-19
3	Système du Creusin et de la Pleureuse Lejeune O. et Devos A. 2001	29	32	10
4	Les dolines de Trépail, Lejeune O. et al. 2007	42	188	348
5	Gouffre del a Nau et les dolines de Trépail, Roche D. 2007	96	302	215
6	Bassin de la Livre, Beaujoin S. 2009	298	611	105
7	Gouffre de la Nausud, Beaujoin S. 2009	39	57	46

Tableau 1 : Comparaison entre les inventaires de terrain et l'interprétation LiDAR. *Comparison between field inventories and LiDAR interpretation.*

un décompte détaillé des formes. En effet, 57 dolines ont été détectées par le LiDAR (figure 6A) *versus* 39 observées sur le terrain antérieurement à la campagne LiDAR et 67 formes guidées par le repérage semi-automatique.

Ces différences s'expliquent par la détection des formes inférieures à 3 mètres de diamètre sur le terrain, par l'emboîtement des formes et enfin la présence de dolines en eaux dont la profondeur n'a pas pu être sondée par le LiDAR. Le LiDAR permet donc le repérage des sites karstifiés et leur inventaire. La cartographie automatique à partir d'une image LiDAR traitée constitue un guide de lecture et de reconnaissance du terrain qui permet une augmentation de la détection des formes de 72 % par rapport aux repérages à l'aveugle sans LiDAR et de 18 % par rapport à une simple détection semi-automatique. Dans les secteurs inaccessibles et sous couvert forestier, il s'avère donc indispensable pour une connaissance initiale de la répartition spatiale de l'exokarst. La répartition spatiale du liseré karstique s'explique par la présence des sables grésifiés du Thanétien dont 23 % du linéaire est karstifié. En concentrant les écoulements par leurs systèmes karstiques, ils étagent et favorisent l'énergie à la karstification de la craie sous-jacente. Leur affleurement et leur degré de grésification calcaire sont intimement liés aux conditions paléogéographiques de dépôt durant le Thanétien [Lejeune et Devos, 2001]. Les sables sont effectivement déposés le long d'un couloir littoral le long du continent crayeux, et dans un delta situé dans la partie orientale de la Montagne de Reims [Duprat, 1997]. Ces conditions [Laurain et Meyer, 1986] s'intègrent dans des contextes diversifiés, caractéristiques du Paléocène avec des faciès littoraux, marins, estuariens et continentaux. Dans la partie occidentale de la Montagne de Reims, ou dans le bassin versant de l'Arde, les formations du Lutétien moyen

pourtant calcaires (Calcaires grossiers) sont exemptes d'exokarst ce qui peut s'expliquer par la faible agressivité des eaux d'infiltration soulignées par les tufières de sources issues du Lutétien supérieur [Devos et al., 2009].

Conclusion et perspectives

La méthode proposée ici, traitant des images du LiDAR aéroporté est incontestablement un bon outil pour l'inventaire des formes exokarstiques. Il permet d'explorer les zones inaccessibles

et ainsi de cartographier l'organisation spatiale de l'exokarst. En Montagne de Reims, on dénombre deux fois plus de dépressions fermées karstiques que dans la bibliographie basée sur des enquêtes de terrain. Mais un traitement sévère du MNT s'impose pour les révéler, soulevant de nombreux problèmes méthodologiques. Le Sky View Factor discrimine les formes en élévation et en creux, les isolignes déterminent les dépressions fermées significatives et enfin l'analyse multispectrale permet de délimiter les contours pour une

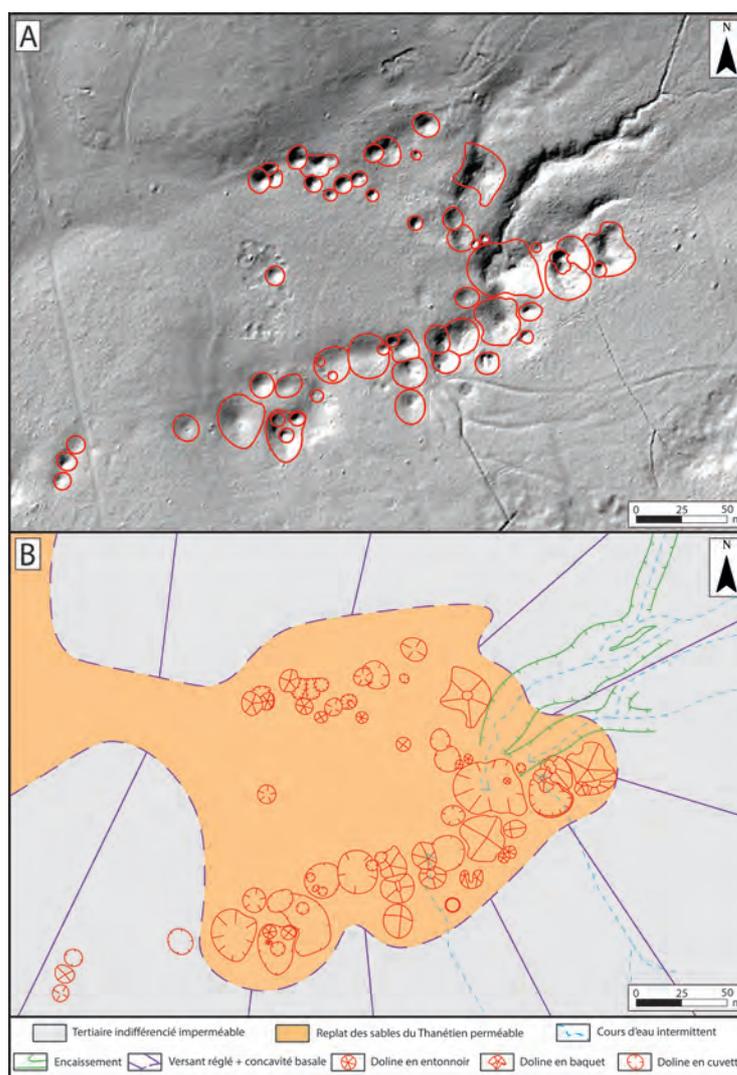


Figure 6 : A. Inventaire de l'exokarst par détection semi-automatique (ombrage multidirectionnel, azimut 315°N, élévation 27°), B. Inventaire de l'exokarst par détection semi-automatique complété sur le terrain. *A. inventory of exokarst by semi-automatic detection (Hillshading from multiple directions, azimuth 315°N, elevation 27°), B. Inventory of exokarst by semi-automatic detection completed in the study site.*

digitalisation des formes. L'échelle spatiale (résolution choisie 1,5 m de rayon) et la résolution des dalles MNT fixent le nombre des dépressions. Une résolution plus fine entraîne une multiplication des formes en amplifiant les difficultés d'interprétation. Outre les problèmes scalaires, la méthode proposée soulève des problèmes de sites avec de nombreux artefacts archéologiques nécessitant un nouveau traitement manuel au cas par cas (discrimination des entonnoirs d'obus) et une connaissance précise des conditions géomorphologiques.

Le liseré karstique révélé au LiDAR en Montagne de Reims, est bien plus

important aujourd'hui. La limite de karstification est corrélée à l'affleurement des sables à *Microcodium*. Mais la discontinuité du liseré karstique reste à expliquer et semble inféodée au degré de grésification des sables et aux mouvements de terrain qui feutrent ou alimentent l'exokarst [Lejeune et Devos, 2001 ; Bollot, 2014]. Une analyse statistique précise des épaisseurs de la couverture tertiaire sur le front de côte, permettrait de connaître les seuils critiques de la karstification en Montagne de Reims. Les applications de la méthode concernent surtout la cartographie de la vulnérabilité à l'infiltration et à la pollution de la

nappe de la craie mais aussi le potentiel d'exploration de l'endokarst sur le versant sud de la Montagne de Reims. Enfin, une validation du protocole de détection semi-automatique des formes karstiques s'avère nécessaire à d'autres sites de bas plateaux calcaires.

Remerciements

Les auteurs remercient le Parc Naturel Régional de la Montagne de Reims et l'Office National des Forêts pour les données LiDAR de la campagne de 2018. Ils tiennent également à remercier les rapporteurs de la revue *Karstologia* pour leurs remarques.

Bibliographie

- BEAUJOUIN S., 2009** - Karst et modalités d'écoulement des eaux versant sud de la montagne de Reims : L'exemple du bassin de la Livre, Mémoire de master 2, Université de Reims Champagne-Ardenne, 144 p.
- BOLLOT N., 2014** - Les mouvements de terrain du vignoble champenois : approche géomorphologique et hydrologique, Université de Reims Champagne-Ardenne, 343 p.
- BURIDANT J., PICHARD C. et GALLER-MORON E., 2020** - L'utilisation de la technologie LiDAR à la connaissance archéologique et géohistorique : Exemples français, *Ransylvanian Review*, Vol XXXIX, Supplement No. 1, p. 291-305.
- CHALLIS K., KOKALJ Z., KINCEY M., MOSCOP D. and HOWARD A. J., 2008** - Airborne LiDAR and historic environment records, *Antiquity*, 82, p. 1055-1064.
- DAVID S., 2019** - Rapport d'analyse des données LiDAR et résultats des prospections archéologiques : Forêts publiques du Parc Naturel régional de la Montagne de Reims (Marne), ONF agence Seine-nord, Fontainebleau, 393 p.
- DEVOS A., LEJEUNE O. and CHOPIN E., 2007a** - Karstic infiltration dynamics and spatialisation of chalk aquifer drain Example of the upper Vesle basin (Dry Champagne, France), *European Journal of water quality*, T. 38, fasc.1, 15 p.
- DEVOS A., LEJEUNE O. and CHOPIN E., 2007b** - Structural control on surface flow in karstic environment, *Geodinamica Acta* 20/6, p. 393-402.
- DEVOS A., SOSSON C., FRONTEAU G. et LEJEUNE O., 2009** - Les tuffières du Vormy et des Fontinettes (Aisne-Marne, France), *Karstologia*, n°54, p. 37-48.
- DEVOS A., TABORELLI P., DODICI M., CHALUMEAU L., BURIDANT J., BOLLOT N., COMBAUD A. et DESFOSSÉS Y., 2015** - Rôle des conditions géographique sur l'organisation spatiale des réseaux de défense de la Grande Guerre. Application à la Champagne (région de Reims), *Physio-Géo*, Volume 9, Varia 2015, p. 157-174.
- DEVOS A., TABORELLI P., DAMIEN T., BOLLOT N., BLANC A., FRONTEAU G., LARATTE S., LEJEUNE O., DESFOSSÉS Y. et EMBRY M., 2016** - La grande guerre sur la côte d'Ile-de-France, en Champagne crayeuse et en Argonne, rapport de journées d'études d'automne 8-9 octobre 2016, *Bulletin Inf. Géol. Bass. Paris*, Vol. 54, n° 3, p. 3-19.
- DUMONT R., 1964** - La spéléologie dans la Montagne de Reims et sa rivière souterraine, *Bull. de la Société d'étude des sciences, des arts et d'histoire d'Épernay* et de la région, n°5, Épernay, 5 p.
- DUPRAT M., 1997** - Modèle tectono-sédimentaire des dépôts paléogènes dans le nord-est du bassin de Paris : Conséquence sur la géométrie du toit de la craie, *Ann. Soc. Géol. du Nord*, T.5 (2^e série), pp. 269-287.
- GUERIN H., 1959** - Exploration de la rivière souterraine de Verzy, n°42, *Bull. Soc. Sci. Nat de Reims*, pp. 3-7.
- HOFIERKA J., GALLAY M., BANDURA P. and ŠAŠAK J., 2018** - Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis, *Geomorphology*, Volume 308, pp. 265-277.
- JAILLET S., SADIÉ B., PERAZIO G. et DELANNOY J.-J., 2014** - Une brève histoire de la 3D en grotte, *Karstologia*, 63, pp. 3-20.
- KOKALJ Ž. and HESSE R., 2017** - Airborne laser scanning raster data visualization, a guide to good practice, Založba ZRC Ljubljana, Research Center of the Slovenian Academy of Sciences and Arts, 88 p.
- KOKALJ Ž., KLEMEN Z. and OŠTIR K., 2011** - Application of shy-view factor for the visualization of historic landscape features in LiDAR-derived relief models, *Antiquity*, pp. 263-273.
- LAURAIN M. et MEYER R., 1986** - Stratigraphie et paléogéographie de la base du Paléogène champenois, *Géologie de la France*, n°1-2, BRGM ed, pp. 103-123.
- LEE C.F., HUANG W. K., CHUI C.L. and CHI C. C., 2018** - Inventory, mapping, geomorphic characterization, and validation of deep-seated landslides using sky-view factor visualization: northern, central, and southern Taiwan, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-3/W4, Geoinformation For Disaster Management (Gi4DM), 18-21 March 2018, Istanbul, Turkey, pp 319-325.
- LEJEUNE O., 2001** - Mouvement de terrain et karst sur le flanc septentrional de la montagne de Reims (Marne/France), Mémoire de DEA, GREURCA, Reims, 139 p.
- LEJEUNE O., 2000** - Relation entre karst et mouvement de terrain sur le flanc septentrional de la montagne de Reims (Marne-France), *Mosella*, tome XXV, n°1-2, p. 116-127.
- LEJEUNE O. et DEVOS A., 2001** - Caractéristiques et spécificités du karst de la Montagne de Reims ; comparaison avec les autres karsts de contact lithostratigraphique de l'est du Bassin parisien, *Revue Géographique de l'Est*, vol. 41/4, 16 p.
- LEJEUNE O., DEVOS A., FRONTEAU G., ROCHE D., LEFEVRE A. et SOSSON C., 2007** - Les *Microcodium* : un traceur naturel des écoulements karstiques dans la craie champenoise à proximité des formations paléocènes (Marne, France), *Karstologia*, n° 50, p. 1-8.
- LOISIOS D., TZELEPIS N. and NAKOS B., 2007** - A methodology for creating analytical hill-shading by combining different lighting directions, Conference Paper, 10 p.
- MARTEL E.-A., 1902** - La caverne de Trépail (Marne) et les rivières souterraines de la craie, *Bulletin du Service de la Carte géographique de France*, T. XIII, pp. 411-431.
- MASOUD A. A. and KOIKE K., 2010** - Auto-detection and integration of tectonically significant lineament from SRTM DEM and remotely-sensed geophysical data, *The ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, p. 818-832.
- MIHEVC A. and MIHEVC R., 2021** - Morphological characteristics and distribution of dolines in Slovenia, a study of lidar-based doline map of Slovenia, *Acta carstologica*, 50/1, p. 11-36. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v50i1.9462>
- NICOD J., 1995** - Carte géomorphologique des Karsts de France, notice d'une maquette au 1/3 000 000 environ, *Karstologia*, 25, pp.21-34.
- PANNO S.V. and LUMAN D.E., 2018** - Characterization of cover-collapse sinkhole morphology on a groundwater basin-wide scale using LiDAR elevation data: A new conceptual model for sinkhole evolution, *Geomorphology*, 318, p. 1-17.
- ROCHE D., 2007** - Le réseau karstique de la rivière de Trépail : Etude des écoulements passés, présents et futurs sur le versant sud de la Montagne de Reims, Mémoire de Master 2, Université de Reims Champagne-Ardenne, 147p.
- RODET J., 1992** - La craie et ses karsts, Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille II, 560 p.
- ROERING J., MACKEY B., MCKEAN J., STALLMAN J. and REAL DE ASUA R., 2006** - Deep-seated landslide and earthflow detection (DSLED): A suite of automated algorithms for mapping landslide-prone terrain with digital topographic data, poster, American geophysical union du 11 au 15 décembre 2006.
- TABORELLI P., 2018** - Les conditions géographiques et l'organisation spatiale du front de la Grande Guerre – Application à l'évaluation environnementale post-conflit en Champagne Ardenne (France), thèse, URCA, Reims, 427 p.
- TABORELLI P., DEVOS A. et LARATTE S., 2017** - Les polymorphes de la Grande Guerre sur la côte 108 révélées par l'outil LiDAR. Colloque « La côte 108 dans tous ses états », 2017, Berry-au-Bac, France.
- VALDIVIESO F., LAHEURTE P., SABATIER D., PERROT X. et VIRELY D., 2018** - Analyse géomorphologique et structurale de MNT obtenus par LiDAR aérien sur des grands glissements, *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Champs-sur-Marne, 8 p.
- VAN DEN ECKHAUT M., MARRE A. and POESEN J., 2010** - Comparison of two landslide susceptibility assessments in the Champagne-Ardenne region (France), *Geomorphology*, Vol. 115, Issues 1-2, p. 141-155.
- WEISHAMPEL J.N., HIGHTOWER J.N., CHASE A.F., CHASE D.Z. and PATRICK R.A., 2011** - Detection and morphologic analysis of potential below-canopy cave openings in the karst landscape around the Maya polity of Caracol using airborne LiDAR. *J. Cave Karst Stud.* 73, p. 187-196.
- WU Q., DENG C. and CHEN Z., 2016** - Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models, *Geomorphology*, 34 p.
- ZHU J., NOLTE M. A., JACOBS N. and YE M., 2020** - Using machine learning to identify karst sinkholes from LiDAR-derived topographic depressions in the Bluegrass Region of Kentucky, *Journal of Hydrology*, Volume 588, p. 1-7.
- ZHU J. and PIERSKALLA W.P. JR., 2016** - Applying a weighted random forests method to extract karst sinkholes from LiDAR data, *Journal of Hydrology*, 533 (2016), p. 343-352.