



HAL
open science

Le LiDAR

Kamila Bensaadi, Anne Hecker

► **To cite this version:**

Kamila Bensaadi, Anne Hecker. Le LiDAR : vers une meilleure connaissance des paysages du karst. Projets de paysage: revue scientifique sur la conception et l'aménagement de l'espace, 2019, 20, 10.4000/paysage.669 . hal-03100537

HAL Id: hal-03100537

<https://hal.science/hal-03100537>

Submitted on 3 Feb 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Le LiDAR : vers une meilleure connaissance des paysages du karst

LiDAR: Towards a Better Understanding of Karst Landscapes

Kamila Bensaadi et Anne Hecker



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/paysage/669>

DOI : 10.4000/paysage.669

ISSN : 1969-6124

Éditeur :

École nationale supérieure du paysage de Versailles-Marseille, Institut national des sciences appliquées Centre Val de Loire - École de la nature et du paysage, École nationale supérieure d'architecture et de paysage de Bordeaux, École nationale supérieure d'architecture et de paysage de Lille, Agrocampus Angers

Référence électronique

Kamila Bensaadi et Anne Hecker, « Le LiDAR : vers une meilleure connaissance des paysages du karst », *Projets de paysage* [En ligne], 20 | 2019, mis en ligne le 23 juin 2019, consulté le 28 novembre 2019. URL : <http://journals.openedition.org/paysage/669> ; DOI : 10.4000/paysage.669

Ce document a été généré automatiquement le 28 novembre 2019.

Projets de paysage

Le LiDAR : vers une meilleure connaissance des paysages du karst

LiDAR: Towards a Better Understanding of Karst Landscapes

Kamila Bensaadi et Anne Hecker

Introduction – Le karst, un paysage de l'eau

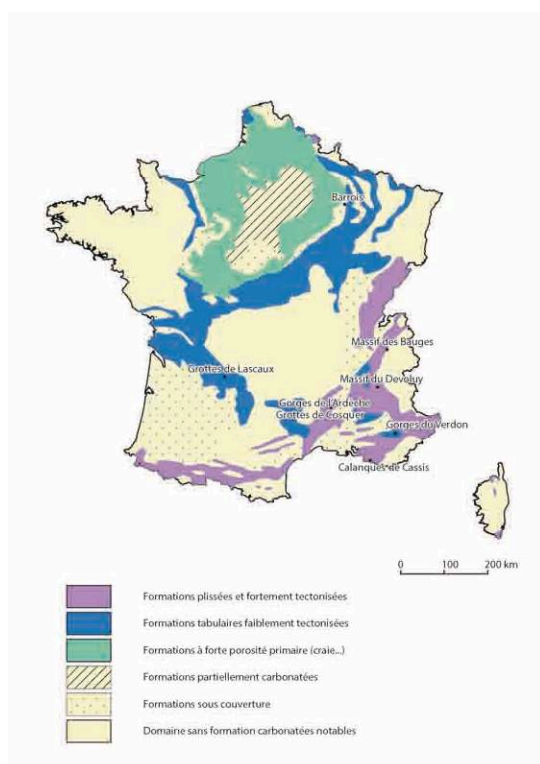
- 1 Cours d'eau, littoraux, zones humides... autant d'images et de mots qui s'imposent spontanément lorsqu'on évoque les paysages de l'eau. On en oublie alors d'autres paysages, tels que le karst, pourtant tout autant intimement liés à l'eau.
- 2 Carso italien, kras slovène, causses français, de nombreux espaces en Europe et dans le monde portent en eux la racine de ce terme de « karst » (Nicod, 1972). Ces territoires distants et variés présentent des caractéristiques paysagères communes, qui les rattachent au même phénomène. Ce sont en effet des paysages, aériens ou souterrains, constitués dans des formations géologiques dont les roches présentent la caractéristique d'être solubles sous l'action de l'eau météorique. Les roches carbonatées (calcaire, dolomie, craie...), mais aussi le gypse et le sel en constituent les principaux exemples (Gilli, 2011). L'originalité du milieu, et des formes karstiques résultantes, découle ainsi de cette sensibilité variable à l'action érosive de l'eau, s'exerçant sur des formations géologiques différentes et soumises à des conditions diverses selon le climat et l'environnement dans lesquels elles s'inscrivent. Cette diversité a donné lieu à différents types de paysages, aériens ou souterrains.
- 3 Si certains de ces paysages sont particulièrement connus et ont fait l'objet de mise en valeur patrimoniale et touristique, d'autres s'avèrent plus discrets et sont encore insuffisamment étudiés, en dépit d'enjeux en matière d'aménagement. Leur connaissance a longtemps été entravée par la difficulté de les identifier, mais de nouveaux outils, notamment le Light Detection And Ranging (LiDAR), sont porteurs de grands espoirs dans la connaissance de ces paysages aériens moins remarquables dans

leur extension. Ils permettent notamment d'envisager la reconstitution des paysages antérieurs, tant anthropiques que « naturels ».

Les paysages du karst

- 4 Peu connu du grand public, le karst occupe néanmoins une vaste superficie, estimée entre 30 à 50 % du territoire métropolitain (figure 1). Le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) évalue ainsi à 500 000 le nombre de cavités souterraines, naturelles ou anthropiques, dont seulement 10 % bénéficieraient d'une réelle connaissance à ce jour (BRGM, 2004). Certes, l'évolution lente des formes souterraines et leur présence fréquente sous un couvert forestier ou agricole participent à leur faible reconnaissance, à l'exception de quelques cas exceptionnels, comme les grottes Chauvet ou Cosquer.

Figure 1. Étendue des zones potentiellement concernées par l'aléa karstique sur le territoire métropolitain, et localisation des lieux cités dans le texte



Source : D'après Bruno Marsaud, modifiée par Kamila Bensaadi et Anne Hecker.

- 5 Différentes typologies ont été mises en œuvre pour différencier les formes issues de l'évolution karstique des roches. Nous retiendrons ici une présentation simple et surtout appuyée sur les paysages nés de l'action de l'eau, séparant les formations en trois grandes catégories.

Figure 2. Un paysage de l'eau souterrain, attractif et reconnu, et souvent patrimonialisé, massif des Bauges (73 et 74).



© Matthieu Thomas – Karst-3E.

- 6 La première regroupe les formations souterraines : puits, rivières souterraines, grottes et cavités, popularisés par l'image des stalactites et des stalagmites (figure 2). L'aspect mystérieux de ces paysages a alimenté l'imaginaire autour d'eux. Les découvertes (grottes Chauvet ou Cosquer), l'art pariétal qui orne certaines salles (Lascaux), la littérature ou le cinéma ont renforcé leur image et leur attractivité, tandis que la volonté de transmettre ces paysages, « qu'une société reconnaît à un moment donné comme constitutif[s] de son identité et dont la perte est jugée irremplaçable » (Duval, 2007), a conduit à leur patrimonialisation. Pour qu'il y ait adhésion au processus de patrimonialisation, la mise en scène du paysage s'avère nécessaire (cheminements sécurisés, mise en lumière...), et favorise la mise en œuvre de son exploitation touristique (visites, via Souterrata du massif du Dévoluy).
- 7 Mais avant que les paysages puissent être ainsi exploités, leur formation a été longue, au gré de l'infiltration de l'eau via des fissures ; la roche se dissout, élargissant les vides qui donnent naissance à des puits, puis à des cavités et enfin à de véritables salles, parfois coalescentes. L'évolution ultime est l'amincissement du toit, provoquant son effondrement et l'ouverture à l'air libre du karst – ces évolutions ne demeurent pas sans conséquence en surface.

Figure 3. Un karst ouvert remarquable. Les calanques de Cassis (13)



© Yannick Cordel.

- 8 La seconde catégorie recouvre les formes aériennes les plus remarquables, notamment les calanques (figure 3), véritables paysages calcaires modelés par l'eau, ou les gorges, qui ont pour certaines abrité d'anciennes rivières souterraines dont le toit s'est effondré. De karst couvert, on passe alors au karst ouvert. Ces paysages bien connus ont donné lieu à des formes de patrimonialisation et de protection à l'image des gorges du Verdon, site classé depuis 1990 et partie intégrante de l'Unesco Géoparc de Haute-Provence depuis 2000, ce qui n'exclut pas son importante mise en tourisme. Les gorges de l'Ardèche illustrent également ces interrelations entre paysages naturels remarquables, patrimonialisation, mise en tourisme et protection (Duval, 2008).

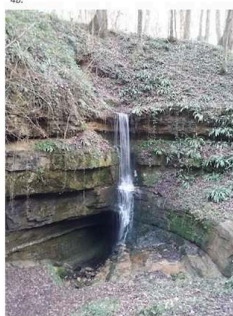
Figures 4. Un karst aérien plus discret, mais aux grandes conséquences sur le paysage et l'aménagement



4a.



4b.



4c.

4a. Lapiez Las Tuerces (Castille-et-León, Espagne).

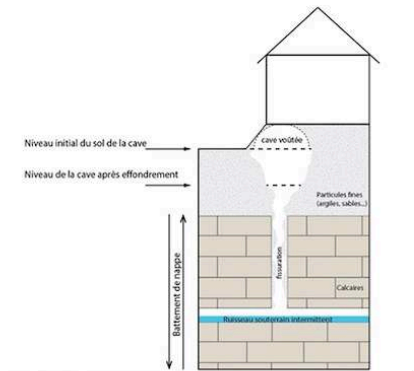
4b. Alignement de dolines, Beurey-sur-Saulx (55).

4c. Grotte des Sarrasins, Ancerville (55).

4a © Daniel Herrero-Luque ; 4b © Jean-Marie Goutorbe, GERSM ; 4c © Kamila Bensaadi.

- 9 L'action de l'eau en sous-sol donne également naissance à des formes ouvertes moins spectaculaires. Pertes et résurgences, dolines, ouvalas, lapiez... constituent ce karst aérien « ordinaire » (figure 4). Moins exceptionnel, il ne présente pas l'imaginaire attractif des paysages énigmatiques du sous-sol. Il a donc longtemps été ignoré, alors qu'il constitue un paysage de l'eau dont l'étude s'avère fondamentale.
- 10 Ces formes karstiques sont en effet porteuses d'enjeux, concernant notamment la compréhension de l'évolution des formations en sous-sol, de leurs conséquences en surface. En effet, la circulation de l'eau en sous-sol érode et dissout les roches à son contact, donnant naissance à des vides souterrains. La présence de failles, mais aussi la fissuration des roches sous l'action de l'eau créent des passages à travers les roches en place, favorisant la migration de l'eau mais aussi des résidus de l'érosion des couches supérieures (soutirage). Le principal aléa, lié à la présence de ces cavités, consiste en l'affaissement progressif du sol là où l'eau entraîne les matières fines dans les fissures, puis l'écroulement du toit des cavités lorsque celui-ci devient trop fin (figure 5). Cette évolution souvent invisible et ignorée apparaît brutalement au jour lorsqu'elle provoque l'effondrement des terrains en surface.

Figures 5. Effondrement d'une cave dans la commune d'Ancerville (55)



L'action érosive d'un ruisseau souterrain intermittent a affiné peu à peu le sol par le soutirage des particules fines, et provoqué des effondrements en surface.

© Kamila Bensaadi.

- 11 Les conséquences lourdes sur les installations humaines ont favorisé une meilleure connaissance de ces phénomènes karstiques en milieu urbanisé, conduisant à l'éviction des secteurs à risque des zones constructibles dans le cadre des plans locaux d'urbanisme. Mais hors de ces zones à enjeux, la connaissance a longtemps été plus restreinte. Les méthodes d'exploration des cavités souterraines n'ont favorisé qu'une progression lente de leur connaissance, tandis que les formes aériennes associées, fréquemment situées sous couvert forestier et agricole, demeuraient peu étudiées.
- 12 La moindre attention longtemps portée à cette forme plus ordinaire ne doit pas occulter l'intérêt de son étude. Identifier, analyser et comprendre l'articulation des formes aériennes, même les plus simples, induit la découverte d'informations, à même de reconstituer des pans manquants de la formation et de l'évolution des paysages. Aujourd'hui, de nouvelles technologies à disposition telles que le LiDAR permettent d'enrichir l'analyse des formes de surface, et d'accroître la connaissance et la compréhension du réseau souterrain. Ainsi, les formes superficielles ordinaires, longtemps peu étudiées, sont mises en avant pour asseoir la compréhension du karst et des paysages qu'il fait naître.

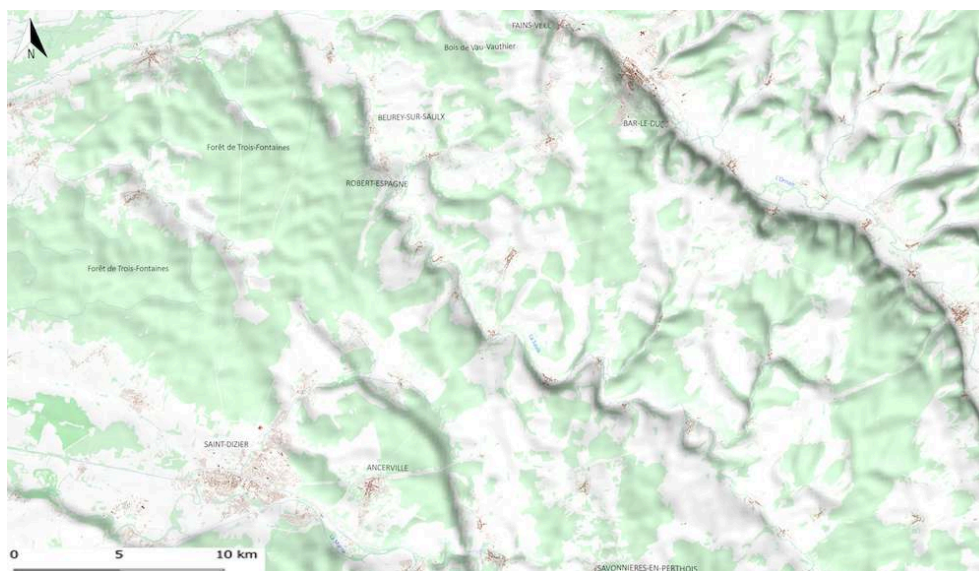
Un nouvel outil au service de la connaissance

- 13 Peu visibles, notamment sous couvert végétal, et desservies par l'ingratitude des terrains les accueillant, les formes du karst aérien ordinaires ont longtemps été ignorées. Leur étude impliquait en effet de lourdes campagnes de terrain, complexes et

rarement exhaustives du fait des difficultés liées au contexte naturel. Cette exploration complétait les études morphométriques appuyées sur l'analyse de cartes topographiques et de photographies aériennes (Gutiérrez-Santolalla *et al.*, 2005). L'apport d'un nouvel outil, le LiDAR, est venu changer la donne (Weishampel *et al.*, 2011).

- 14 Cette numérisation du modelé de terrain est fondée sur le principe de la télémétrie. Une impulsion laser est émise vers la surface du sol ; l'onde réfléchi par le sol est ensuite mesurée et traitée afin d'en déduire une distance. Cette méthode permet une acquisition fiable, rapide et précise de nuages de points 3D géoréférencés de forte densité (en général de quelques points par mètre carré à plusieurs centaines de points par mètre carré), dont le traitement permet de reconstituer l'image de la surface de sol étudiée. Même à travers une couverture végétale importante, le moindre élément de relief est ainsi perçu avec une précision qui dépend des techniques mobilisées. En effet, ces mesures peuvent être mises en œuvre de deux manières complémentaires.
- 15 Le LiDAR aéroporté (par satellite, avion, drone...) présente l'avantage de couvrir une grande surface en une seule acquisition. En revanche, la densité des nuages de points ainsi fournis demeure modérée. Si elle se révèle largement suffisante pour de nombreuses recherches, il peut être ponctuellement nécessaire d'en accroître la précision par le biais d'une technique complémentaire – le LiDAR terrestre. Monté sur une plateforme fixe au sol ou sur un véhicule, l'outil pivote horizontalement sur 360 degrés et effectue des balayages verticaux plus ou moins étendus. Il fournit des nuages de points très denses à très haute résolution. Le document qui résulte de leur traitement présente donc une précision bien plus grande, de l'ordre de quelques millimètres. Toutefois, ces numérisations demeurent à courte portée, de l'ordre de quelques mètres à quelques kilomètres. L'aspect encore onéreux de ces techniques décide souvent de la précision de l'acquisition mise en œuvre.
- 16 Cette technologie optimise aujourd'hui grandement l'acquisition des données sur les formes de surface. En effet, les méthodes traditionnelles demeurent dépendantes de la résolution et de la précision des documents à disposition (cartes, photographies aériennes) qui peuvent s'avérer insuffisantes. Ces dernières se révèlent particulièrement adaptées aux grands phénomènes karstiques, aisément reconnaissables à l'œil nu, ainsi qu'aux zones sans couvert végétal. Ces limites restreignent leur utilisation, particulièrement sous un couvert végétal dense, et rendaient, jusqu'à il y a peu, le travail de terrain indispensable.

Figure 6. Le Barrois



Localisation des lieux cités dans le texte.

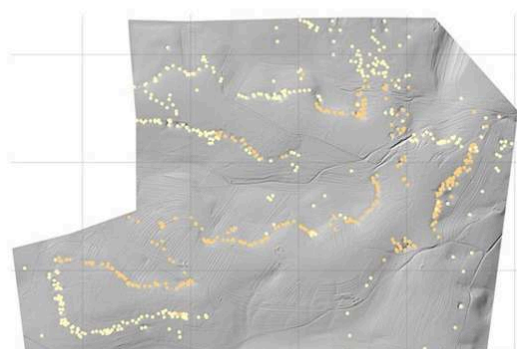
© Anne Hecker et Kamila Bensaadi.

- 17 Les exemples développés ci-après s'appuient sur plusieurs campagnes de terrain, réalisées dans le cadre d'une thèse de doctorat portant sur l'étude des formations karstiques du Barrois¹, ainsi que sur une étude menée conjointement avec le BRGM dans le cadre d'un programme « Plan national cavités » (2014). Le karst du Barrois (figure 6) constituait l'une des zones de test choisie pour évaluer l'efficacité et l'intérêt d'une campagne d'acquisition LiDAR dans le cadre d'un couvert agricole et forestier dense. Cette campagne visait également à accroître la compréhension des mécanismes de formation du karst de contact lithostratigraphique et l'évolution des paysages associés.
- 18 Il en est ressorti que cet outil représente un réel atout dans la reconnaissance des formes paysagères de surface, atout de trois ordres. Le premier est un gain de temps. À titre d'exemple, dans le cas du bois de Vau-Vauthier (commune de Fains-Véel, 55), trois journées de terrain ont été consacrées à l'étude d'environ 300 dolines. À titre comparatif et afin de quantifier les bénéfices de l'utilisation de cette technologie, l'étude a été doublée par une acquisition de données LiDAR. Une fois les images prétraitées acquises², le même travail répété sur ce territoire n'a nécessité qu'une demi-journée de traitement et d'analyse.

Figures 7. Le LiDAR, un précieux gain d'exhaustivité



7a.



7b.

7a. Fains-Véel (55). Doline détectée par LiDAR sous un amas de ronces. Le contour du phénomène est à peine visible, et impossible d'en déterminer la pente et la profondeur.

7b. Carte de la répartition des dolines relevées sur le terrain (orange) et détectées grâce à l'imagerie LiDAR (jaune). 100 % des dolines relevées sur le terrain ont été détectées par LiDAR, et un nombre important de nouvelles dolines, invisibles sur le terrain, a pu être identifié.

7a © Kamila Bensaadi ; 7b © BRGM modifié par Charles Cartannaz.

- 19 Le LiDAR favorise également un important gain en matière d'exhaustivité. Potentiellement complété et affiné par une opération de reconstitution 3D, il met à nu les formes aériennes, et fait ressortir avec précision le modelé de surface. Dégagées de leur couverture végétale, des morphologies de toutes tailles apparaissent alors, et notamment des dolines peu profondes, quasi invisibles sur le terrain.
- 20 Ainsi, dans l'exemple du bois de Vau-Vauthier, l'étude reconduite à l'aide du LiDAR a permis de mettre en lumière un niveau de détails plus important, et notamment la découverte de nouvelles dolines, qui n'avaient pas été identifiées lors de l'étude de terrain (figure 7b) : trop larges et/ou trop peu profondes, ou physiquement inaccessibles en raison notamment de la densité du couvert végétal (figure 7a), elles étaient passées inaperçues.
- 21 Les trois planches suivantes illustrent ce gain de précision et d'exhaustivité des formes recensées. Les trois images de gauche (figures 8a, 9a, 10a) sont des exemples de photographies aériennes, traditionnellement utilisées pour identifier les formes de surface en appui des cartes topographiques. Les trois images de droite (figures 8b, 9b, 10b/10c) montrent le même territoire acquis grâce au LiDAR, après traitement des données. Ces trois exemples sont extraits de la campagne d'identification dans le bois précité de Vau-Vauthier.
- 22 Le premier exemple (figure 8) présente un espace forestier encadré de terres cultivées quasiment à nu au moment de la prise de la photographie aérienne verticale. De ce fait,

on distingue relativement aisément un ensemble de petites irrégularités dans le paysage de champs cultivés, donnant à penser qu'il peut s'agir de formes karstiques de surface (dolines). L'analyse de l'image LiDAR confirme qu'il s'agit bien de petites dépressions dans le paysage. Si l'image ne peut formellement certifier à elle seule l'origine karstique de ce mouvement de terrain, elle en atteste bien la présence, et souligne l'alignement d'une partie des implantations.

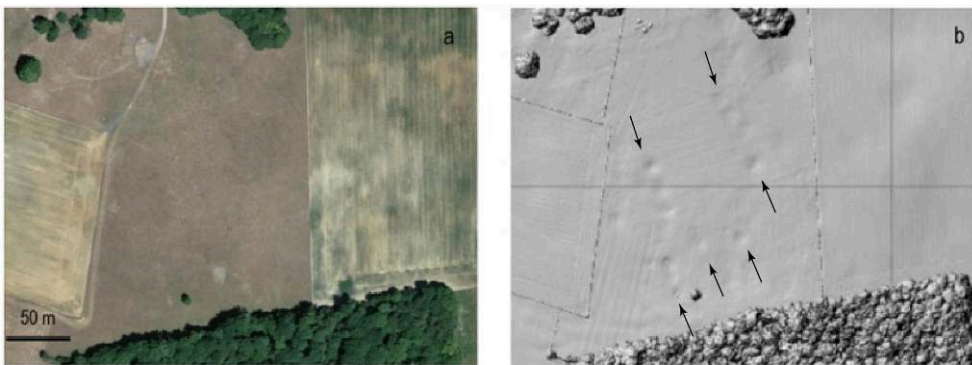
Figures 8. Des phénomènes aisés à repérer



Sources : 8a – Géoportail ; 8b – BRGM, modifié par Kamila Bensaadi et Charles Cartannaz.

- 23 Sur le deuxième exemple (figure 9), la nature de l'occupation du sol se prête moins aisément à discerner les formes présentes dans le champ au centre de l'image. À l'œil nu, tout ou partie des dolines peuvent passer inaperçues, très clairement visibles en revanche sur l'imagerie LiDAR, qui souligne là aussi deux alignements presque parallèles.

Figures 9. Des phénomènes moins visibles

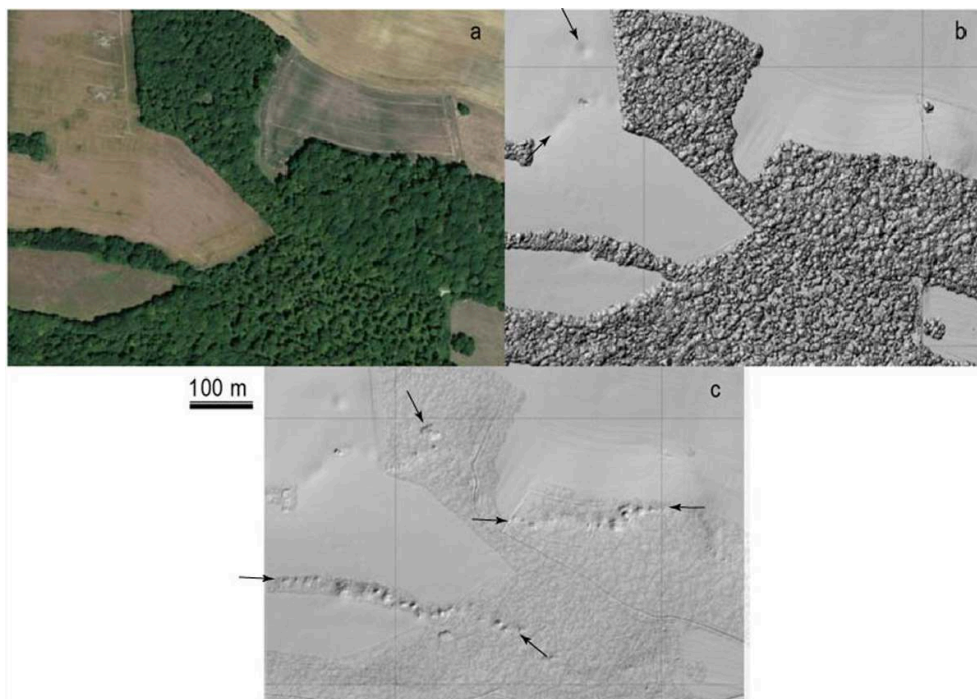


Sources : 9a – Géoportail ; 9b – BRGM, modifié par Kamila Bensaadi et Charles Cartannaz.

- 24 Enfin, le troisième exemple (figure 10) illustre la complexité qu'il y a à identifier ces formes de surface sous un couvert végétal forestier. La photographie aérienne y est totalement inopérante, seule une doline plus vaste induisant une modification de la végétation est repérable dans la partie nord de la forêt. L'image LiDAR peine également à percer le couvert végétal, et ce n'est qu'à l'aide d'un traitement supplémentaire, « effaçant » partiellement la végétation, que le modelé de sol apparaît enfin. Un ensemble de dolines, alignées notamment sur les bords de l'espace forestier, se

distingue alors très clairement, dessinant un liseré karstique. Sa présence est symptomatique d'un phénomène sous la surface – contact géologique, faille, ou phénomène karstique souterrain.

Figures 10. Des phénomènes impossibles à repérer sur les seules photographies aériennes



Sources : Géoportail (10a) ; BRGM (10b et 10c) modifié par Kamila Bensaadi et Charles Cartannaz.

- 25 Enfin, un important gain de précision a pu être apporté aux recherches de terrain. En effet, notamment sous couvert forestier et nuageux, la fiabilité du GPS manuel se révèle parfois aléatoire, n'offrant souvent qu'une précision de mesure de l'ordre de cinq à six mètres. Par ailleurs, l'indisponibilité des satellites au moment de l'étude peut également compromettre les prises de mesure et la localisation précise des dolines sur le terrain. L'acquisition LiDAR permet alors de compenser ces soucis techniques, et de fournir des informations d'une grande précision.
- 26 Toutefois, en dépit des qualités de cette technique, un travail de terrain complémentaire demeure indispensable : la vérification de certaines formes identifiées s'impose toujours, afin de distinguer notamment celles qui pourraient être d'origine anthropique (trous d'obus, ornières dues à des engins mécanisés...) des phénomènes karstiques.

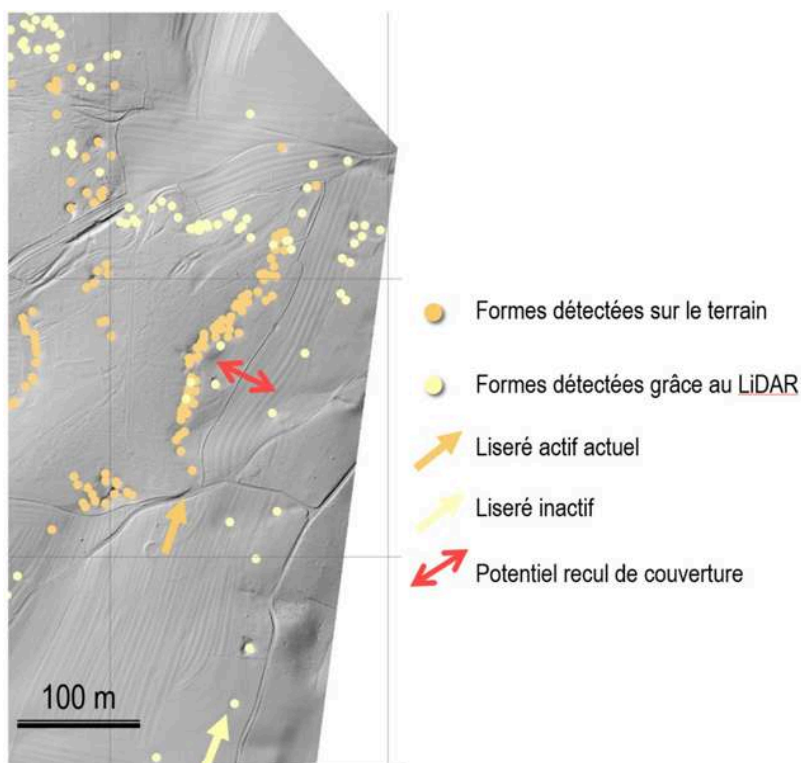
Vers la reconstitution des paysages

- 27 L'utilité du LiDAR induit depuis quelques années la multiplication des campagnes d'acquisition. Elles sont ainsi mises au service de disciplines visant à reconstruire des paléoreliefs et des paysages aujourd'hui effacés (Nuninger *et al.*, 2008). L'archéologie (Matos Machado *et al.*, 2016 ; Georges-Leroy *et al.*, 2011 ; Nuninger, 2010) les emploie ainsi pour mettre en évidence des traces d'occupation ancienne des paysages (Crozet, A. *et al.*, 2017), mais elles servent également à la mise en évidence de vestiges de conflits

(Taborelli *et al.*, 2017) pour la foresterie (Vaglio-Laurin *et al.*, 2004) ou l'hydrologie. Ces études appuyées sur des acquisitions LiDAR présentent deux principales orientations : la prévention des risques, d'une part, et la reconstitution de paysages anthropiques aujourd'hui disparus, d'autre part. Une troisième orientation, ici évoquée, les complète : la connaissance et la compréhension de l'évolution des paysages dits « naturels ».

- 28 Au-delà de la lecture directe des images LiDAR, riche en enseignements, l'approfondissement de l'analyse permet notamment de reconstituer l'évolution de paysages en identifiant des traces aujourd'hui invisibles à l'œil nu, mais dont le terrain conserve des traces ténues. Dans le domaine des paysages de l'eau, l'évolution des méandres des fleuves et rivières peut ainsi être évaluée au plus près et cartographiée précisément (Payraudeau *et al.*, 2010).
- 29 Notre étude s'est, quant à elle, penchée sur la mise en valeur des traces révélant l'existence de crypto-karsts, cachés sous une couverture végétale qui les rend imperceptibles à l'œil nu, ou de formes aériennes anciennes qui, n'étant plus actives, apparaissent de manière très « émoussée » dans le paysage, passant souvent inaperçues.
- 30 Ainsi, lors de l'étude LiDAR dédiée au karst du Barrois, une hypothèse concernant l'évolution de ce paysage a pu être posée. Situé sous couvert forestier, le paysage karstique y est par endroits peu lisible. L'acquisition programmée devait permettre de redessiner fidèlement et de manière exhaustive le liseré karstique supposé. Cet alignement de dolines, spécifique de ce paysage, résulte en effet du contact de la couche sus-jacente, qui concentre l'humidité à l'origine de la dégradation des roches, et des couches calcaires karstifiées par ce contact prolongé avec le milieu aqueux. La présence de ce contact géologique et les dolines repérées sur le terrain laissaient supposer la présence de ce liseré, hypothèse vérifiée par le LiDAR.

Figure 11. Fains-Véel (55)

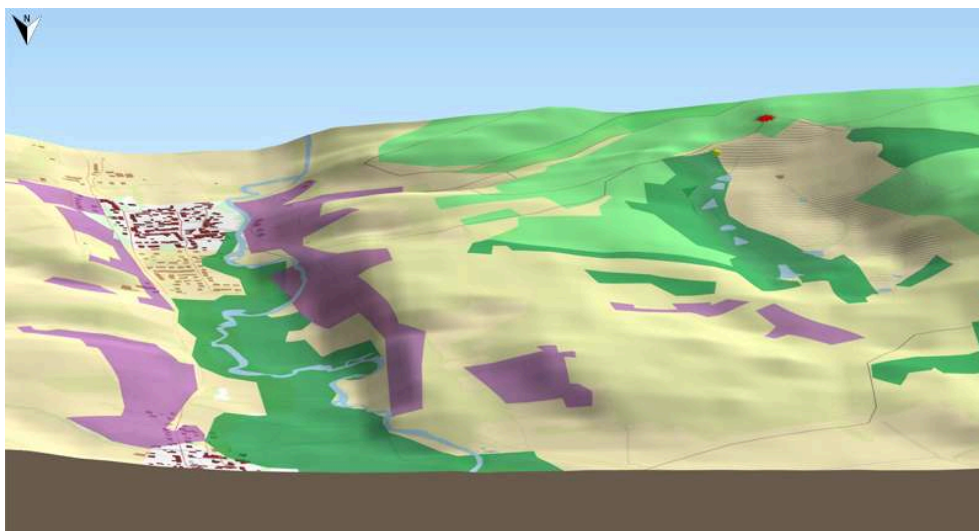


Reconstitution hypothétique du recul de la couverture argileuse.

Source : BRGM, modification par Kamila Bensaadi et Charles Cartannaz.

- 31 Mais cette acquisition a également mis en évidence la présence d'un ancien liseré (figure 11), quasi invisible à l'œil nu et désormais inactif. Sa présence, révélée par le LiDAR, souligne une évolution non seulement du paysage de surface, mais très certainement une évolution souterraine longue. En effet, son implantation pourrait correspondre à l'ancien contact des couches, et notamment à l'ancienne extension de la couche sus-jacente, aujourd'hui reculée. Ces informations pourraient ainsi permettre d'évaluer l'importance de l'érosion dans ce secteur et de contribuer à reconstituer les paysages antérieurs.
- 32 Par ailleurs, le LiDAR permet également de confirmer ou d'infirmer des hypothèses concernant des formes paysagères. Ainsi, dans la forêt de Beurey-sur-Saulx (55), la présence d'un gouffre particulièrement important s'explique difficilement du fait des seules conditions naturelles : ni chemin ni pente visible ne semblent y conduire l'eau, pourtant nécessaire à son développement. L'hypothèse peut être posée d'un ancien chemin, abandonné suite aux remaniements forestiers et désormais caché sous le couvert végétal, qui orienterait l'eau de ruissellement dans sa direction, et qui aurait pu l'alimenter de manière plus importante encore par le passé.

Figure 12. Forêt de Beurey-sur-Saulx



Reconstitution de l'occupation du sol au début du XIX^e siècle (1818-1835) à proximité du gouffre (l'échelle des altitudes a été volontairement exagérée – attention, le croquis est orienté vers le sud).

© Anne Hecker, d'après la carte d'état-major.

- 33 Cette hypothèse repose sur des cas similaires, où la présence d'une pente ou de rigoles le long d'un sentier forestier explique l'expression de formes particulièrement développées au regard des conditions naturelles. L'hypothèse est également renforcée par un regard géohistorique sur le secteur. Le géoréférencement de la carte d'état-major (1818-1835) permet la superposition des données actuelles avec l'utilisation antérieure du sol (figure 12). Ce gouffre (étoile rouge en haut de l'image) est localisé à proximité d'une importante clairière de culture (située dans une cuvette topographique). Par le passé, cette clairière appartenait à un vaste espace cultivé (en jaune), couvrant l'essentiel du plateau. Mais la limite sud de la clairière, à proximité du gouffre, marquait déjà la fin de l'espace cultivé et le début de la forêt (vert moyen). La carte ancienne met également en évidence des sentiers à vocation agricole, aujourd'hui inexploités car rendus inutiles, ainsi que des tracés de cours d'eau intermittents, dont l'un, allié au sentier et à une zone humide (vert foncé), pourrait être à l'origine de l'alimentation du gouffre en eau.
- 34 La recherche sur le terrain s'est révélée infructueuse en raison de l'aspect ténu des phénomènes, invisibles à l'œil nu sous la couverture végétale. Le recours au LiDAR, en précisant la topographie fine du lieu, pourrait ainsi mettre en évidence le tracé d'un tel sentier oublié et mettre fin aux suppositions en apportant une réponse fiable.
- 35 Grâce à la mise en œuvre de ce nouvel outil, le recensement des données s'est enfin accéléré, faisant progresser rapidement la connaissance et la compréhension des formes karstiques.
- 36 Dans le cadre des formes de surface nouvellement identifiées, la connaissance acquise permet notamment d'apporter des corrections aux documents établis – les liserés karstiques affinent la connaissance de l'emplacement précis des contacts entre les couches de natures différentes – ou encore soulève la présence potentielle de failles, que le travail de terrain permet de confirmer ou d'infirmer. Elle permet également d'envisager la reconstitution de paléopaysages, pouvant donner naissance à de nouveaux témoignages sur l'histoire des paysages.

- 37 Une connaissance plus exhaustive du karst aérien permet de mieux appréhender les formes souterraines, d'identifier des phénomènes encore insoupçonnés à l'origine d'explorations et de belles découvertes. Mais au-delà de ces paysages souterrains porteurs d'imaginaire, le recensement des formes de surface doit favoriser l'appropriation de ces paysages plus anodins. De nouvelles formes de patrimonialisation des paysages karstiques peuvent en découler et donner naissance à des initiatives telles que la création du sentier karstique de la forêt de Trois-Fontaines³, dans la Meuse, à même de familiariser la population à ces paysages particuliers.
-

BIBLIOGRAPHIE

BRGM, « Cavités souterraines, prévenir les risques d'effondrement », *Les Enjeux des Géosciences*, fiche de synthèse scientifique n° 4, octobre 2004.

Crozet, A., Laplaige, C. et Rodier, X., « Une approche multidisciplinaire de la fabrique des paysages dans la longue durée dans les forêts de Blois, Russy, Boulogne et Chambord (Loir-et-Cher) », *Projets de paysage*, n° 16, juillet 2017, URL : https://www.projetsdepaysage.fr/fr/une_approche_multidisciplinaire_de_la_fabrique_des_paysages_dans_la_longue_dur_e_dans_les_for_ts_de_blois_russy_boulogne_et_c

Duval, M., « Patrimonialisation et mise en tourisme des espaces naturels », *Géographie et cultures*, n° 66, 2008, p. 61-78, mis en ligne en janvier 2016, URL : <http://journals.openedition.org/gc/3688>, DOI : 10.4000/gc.3688.

Duval, M., « Dynamiques spatiales et enjeux territoriaux des processus de patrimonialisation et de développement touristique. Étude comparée des gorges de l'Ardèche et du karst slovène », thèse de géographie, université de Savoie, 2007, 517 p.

Gilli, E., *Karstologie : Karsts, grottes et sources*, Paris, Dunod, 2011, 256 p.

Gutiérrez-Santolalla, F. *et al.*, « Subsidence hazard avoidance based on geomorphological mapping in the Ebro River valley mantled evaporite karst terrain (NE Spain) », *Environmental Geology*, vol. 48(3), 2005, p. 370-383.

Georges-Leroy, M., Bock, J., Dambrine, É et Dupouey, J.-L., « Apport du LiDAR à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye », *ArcheoSciences*, n° 35, 2011, p. 117-129, mis en ligne en avril 2013, URL : <http://journals.openedition.org/archeosciences/3015>, DOI : 10.4000/archeosciences.3015.

Matos Machado, R. de Amat, J.-P., Arnaud-Fessetta, G. et Bétard, F., « Potentialités de l'outil LiDAR pour cartographier les vestiges de la Grande Guerre en milieu intra-forestier (bois des Caures, forêt domaniale de Verdun, Meuse) », *ÉchoGéo*, n° 38, décembre 2016, URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/14791>, DOI : 10.4000/echogeo.14791.

Nicod, J., *Pays et Paysages calcaires*, Paris, PUF, 1972, 244 p.

Nuningger, L., Fruchart, C., Opitz, R., « LiDdar : quel apport pour l'analyse des paysages ? », *Bulletin de liaison Ager*, n° 20, 2010, p. 34-43.

Nuninger, L., *et al.*, « Lidar. Acquisition, traitement et analyse d'images LiDAR pour la modélisation des paléoreliefs de la plaine littorale du Languedoc oriental », rapport d'ATIP Jeune Chercheur (CNRS), 2008, p. 95.

Payraudeau, S., Galliot, N., Liébault, F., Auzet, A.-V., « Incertitudes associées aux données géographiques pour la quantification des vitesses de migration des méandres. Application à la vallée de la Bruche ? », *Revue internationale de géomatique*, vol. 20, n° 2, 2010, p. 221-243.

Taborelli, P., Devos, A., Laratte, S., Brenot, J., Bollot, N., Cancès, B. et Desfossés, Y., « Apport des plans directeurs et de l'outil LiDAR aéroporté pour la caractérisation des impacts morphologiques de la Grande Guerre : exemple de la cote 108 (Berry-au-Bac, France) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 23, n° 2, juin 2017, URL : <http://journals.openedition.org/geomorphologie/11711>, DOI : 10.4000/geomorphologie.11711.

Vaglio Laurin, G. *et al.*, « Above ground biomass estimation in an African tropical forest with LiDAR and hyperspectral data », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 89, 2004, p. 49-58.

Weishampel, J. *et al.*, « Detection and Morphologic Analysis of Potential Below-Canopy Cave Openings in the Karst Landscape around the Maya Polity of Caracol using Airborne LiDAR », *Journal of Cave Karst Studies. The National Speleological Society Bulletin*, vol. 73(3), 2011, p. 187-196.

NOTES

1. Thème de la thèse en cours : « Contribution à l'étude des affaissements et effondrements karstiques : le cas du karst de contact lithostratigraphique dans l'Est du Bassin parisien » (Kamila Bensaadi).
2. Les images LiDAR brutes sont inutilisables. Un premier traitement des nuages de points est effectué en amont, et l'étude est ensuite réalisée à partir de ce prétraitement.
3. Cette réalisation partenariale multiplie les acteurs institutionnels impliqués dans sa mise en œuvre, parmi lesquels différents organismes de spéléologie - et particulièrement le Groupe d'études et de recherches spéléologiques meusien.

RÉSUMÉS

Lorsqu'on parle de paysages de l'eau, les fleuves et rivières, les littoraux ou les zones humides s'imposent à l'esprit. Pourtant, au-delà de ces paysages « ouverts », on oublie souvent le karst, modelé par l'action érosive de l'eau. Ce dernier est peu connu et peu visible, car souvent souterrain ou sous le couvert forestier. Dès lors, sa méconnaissance, et particulièrement celle du karst aérien ordinaire, conduit à sa négligence, y compris par les élus et les aménageurs. Pendant longtemps, sa connaissance impliquait en effet de lourdes campagnes de terrain, rendues complexes et non exhaustives par les difficultés liées au contexte naturel. L'apport des nouveaux outils, comme le Light Detection And Ranging (LiDAR), change la donne. Il permet de mettre à nu le karst et de visualiser avec précision le modelé de surface, et d'en accroître ainsi la compréhension. Les modelés karstiques, porteurs d'enjeux importants, se révèlent des éléments fondamentaux pour la compréhension de la formation des paysages.

When talking about water landscapes, rivers, coastlines or wetlands come to mind. However, apart from these “open” landscapes, there is a landscape that is often forgotten, that of the karst landscape shaped by the erosive action of water. This landscape is little known and not very visible since it is often underground or covered by forest vegetation. This lack of knowledge, and particularly the lack of knowledge of the ordinary open-air karst, leads to it being neglected by elected representatives and urban planners. For a long time, knowledge of this landscape involved major field studies which were complex and lacked exhaustivity because of natural obstacles. The advent of new tools, such as Light Detection and Ranging (Lidar) equipment, has changed the situation. It makes it possible to expose the karst and accurately visualise the contours of the surface, thus making it easier to understand this landscape. Karst surface contours, which present major challenges, are fundamental in understanding landscape formation.

INDEX

Mots-clés : karst, paysage de l'eau, LiDAR, formes de surface, cavités souterraines

Keywords : karst, water landscape, LiDAR, surface forms, underground cavities

AUTEURS

KAMILA BENSAADI

Kamila Bensaadi est doctorante en géographie et chargée de la valorisation de la recherche, université de Lorraine, LOTERR. Ses domaines de recherche : karst, risque, vulnérabilité, aléa, effondrements, inondation, aménagement du territoire, Barrois.

Kamila.bensaadi[at]univ-lorraine[dot]fr

<https://geonancy.wordpress.com/enseignants-chercheurs/kamila-bensaadi/>

ANNE HECKER

Anne Hecker est maître de conférences en géographie, université de Lorraine, LOTERR. Ses domaines de recherche : mobilités, géohistoire, évolution des paysages, transport et forme urbaine, SIG historique.

anne.hecker[at]univ-lorraine[dot]fr

<https://loterr.univ-lorraine.fr/content/hecker-anne>