



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Document à accès immédiat

# Détection semi-automatique de formes karstiques de surface - Application aux formations carbonatées du nord-est du Bassin aquitain - Projet Eaux-SCARS

Rapport final  
BRGM/RP-72361-FR

11 décembre 2023

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM  
Ayache B., Cabaret O.

Vérificateur :		Approbateur :	
Nom :	Thomas Dewez	Nom :	Cyril Mallet
Fonction :	Ingénieur de recherche	Fonction :	Directeur régional par intérim - BRGM Nouvelle-Aquitaine
Date :	08/11/2023	Date :	05/01/2024
Signature :		Signature :	

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)



## Avertissement

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

## Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



**Mots clés :** Doline, karst, hydrogéologie, eaux souterraines, Projet Eaux-SCARS, Dordogne, Lot, Lot et Garonne, Charentes

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Ayache B., Cabaret O.** (2023) - Détection semi-automatique de formes karstiques de surface - Application aux formations carbonatées du nord-est du Bassin aquitain - Projet Eaux-SCARS. Rapport final. BRGM/RP-72361-FR, 46 p, 19 fig., 4 tab., 1 ann..

© BRGM, 2023, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Les formes géomorphologiques typiques du karst, telles que les dolines ou les poljés, peuvent jouer un rôle important dans les écoulements de surface et notamment dans la recharge des nappes en constituant des points d'infiltration préférentielle de l'eau de pluie directement vers l'aquifère. Leur identification s'avère ainsi nécessaire pour évaluer à la fois les modalités de recharge des nappes, les orientations des axes de drainage actuels et passés au sein des aquifères mais aussi évaluer la vulnérabilité des nappes. À ce titre, des méthodologies multicritères telles que Paprika (Dörfliger et al., 2009) intègrent cet indicateur de présence de formes karstiques de surface dans les cartographies de vulnérabilité d'ouvrages d'eau.

L'identification et la caractérisation des dolines (profondeur, asymétrie, nature du fond...) est toutefois délicate et fastidieuse puisqu'elle s'appuie souvent sur la reconnaissance de terrain qui est longue et dépendante des conditions de sol et des conditions d'accès (présence de végétation ou cultures). La cartographie qui en découle est au final rarement exhaustive. Toutefois, la démocratisation des levés lidar offrant des modèles numériques de terrain en haute résolution (métrique), de manière uniforme sur le territoire, permettant une vision du relief du sol, y compris sous la végétation, ouvre la voie pour une détection de ces formes de manière semi-automatique, rapide et sur une surface bien plus importante.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet de recherche et développement Eaux-SCARS, traitant de l'Hydrogéologie des Systèmes CARbonatés Réservoirs du Secondaire au nord-est du Bassin aquitain, démarré en 2021, pour une durée de 6 ans, et bénéficiant du soutien financier du BRGM, de l'Europe et la Région Nouvelle-Aquitaine via le Fonds Européen De Développement Régional, de l'Agence de l'eau Adour-Garonne et des Conseils départementaux de la Dordogne, du Lot, du Lot-et-Garonne et de la Charente.

Pour cette étude, une méthode géomatique, basée sur le calcul des isolignes vectorielles, est développée à large échelle sur la base du MNT haute résolution, issu de levés lidar agrégeant les données topographiques à la plus haute résolution possible (entre 1 et 5 m/pixel), dénommé RGE Alti V2® et mis à disposition gratuitement par l'Institut Géographique National. Ce sont ainsi près de 15 000 dolines qui ont été détectées, pour l'essentiel sur des formations aquifères du Jurassique de l'est du Bassin aquitain (emprise d'environ 17 000 km<sup>2</sup>). Cette cartographie constitue un préalable nécessaire aux investigations et aux interprétations menées dans le cadre des autres actions du projet Eaux-SCARS et qui visent entre autre à une meilleure caractérisation de la recharge ou de la vulnérabilité de ces aquifères.

La couche SIG est disponible au format WMS : <https://ws.carmencarto.fr/WMS/120/EauxSCARS> et en shapefile sur demande par mail [eaux-scars@brgm.fr](mailto:eaux-scars@brgm.fr). Elle a vocation à être partagée au sein de la communauté et constitue une source de données utile à la compréhension de la recharge et à la vulnérabilité des aquifères du Secondaire du Bassin nord-aquitain.



## Sommaire

1. Introduction .....	7
2. Projet Eaux-SCARS .....	9
3. Données utilisées .....	11
3.1. Données IGN .....	11
3.1.1. RGE Alti V2 ® .....	11
3.1.2. BD Topo .....	13
3.2. Autres sources de données .....	14
3.2.1. Occupation du sol .....	14
3.2.2. BDLISA .....	14
3.2.3. Géologie .....	14
4. Méthodologie .....	17
4.1. Choix méthodologique .....	17
4.2. Logiciel utilisé .....	17
4.3. Traitement sur les isolignes .....	18
4.4. Des creux aux dolines .....	21
5. Résultats .....	25
5.1. Répartition spatiale des dolines .....	25
5.2. Validation croisée .....	28
5.2.1. Validation croisée avec un inventaire terrain du Parc des Causses (Lot) .....	28
5.2.2. Validation croisée avec des inventaires bibliographiques .....	29
5.2.3. Validation croisée de la méthode dans un secteur avec un lidar fin et une étude spécifique (Meuse) .....	30
5.3. Partage et accessibilité .....	33
6. Conclusion .....	35
7. Bibliographie .....	37

## Liste des Figures

Figure 1 - Doline (© BRGM Nathalie Dörfliger) et quelques formes classiques associées (Gilli, 2011) .....	7
Figure 2 - Périmètre d'étude du projet Eaux-SCARS .....	9
Figure 3 - Sources de données du MNT 1 m RGE Alti V2 (2021) .....	12
Figure 4 - Principe de fonctionnement du lidar aéroporté (Fernandez-Diaz et al., 2014) .....	13
Figure 5 - Emprise de détection des dolines (en rouge) .....	15
Figure 6 - Localisation de la fonction « Isoligne » dans l'extension 3D Analyst, sous ArcGis 10.5.1 .....	17
Figure 7 - Du calcul des isolignes à l'identification des creux .....	19
Figure 8 - Distribution des fréquences des 20 370 creux, selon l'indice de circularité .....	21
Figure 9 - Exemple de doline en vue de haut et en vue en coupe .....	22
Figure 10 - Caractérisation des creux selon des marqueurs d'artificialisation .....	23

Figure 11 - Répartition spatiale des dolines potentielles dans l'emprise Eaux-SCARS (est du Bassin aquitain) .....	26
Figure 12 - Densité des dolines potentielles (au km <sup>2</sup> ) dans l'emprise Eaux-SCARS (est du bassin aquitain) .....	27
Figure 13 - Détection semi-automatique des dolines comparée à l'inventaire terrain, réalisé par le Parc des Causses .....	29
Figure 14 - Extrait de la carte géologique 809 avec les dolines cartographiées en bleu et les creux détectés en rouge .....	30
Figure 15 - Résultat des travaux de Cartannaz et Dewez (2015) couplant méthode semi-automatique à partir d'un lidar HD et d'un inventaire terrain .....	31
Figure 16 - Résultat de la détection dans un secteur de la Meuse, à partir du RGE Alti - source lidar au nord de la ligne jaune, - source BD Alti 25 m au sud de la ligne jaune .....	31
Figure 17 - Résultat de la détection dans un secteur de la Meuse, à partir du lidar, avec des isolignes espacées de 1 m .....	32
Figure 18 - Résultat de la détection dans un secteur de la Meuse, à partir du lidar, avec des isolignes espacées de 0,5 m .....	32
Figure 19 - Résultats de l'étude partagés en ligne sur le SIGES Aquitaine .....	33

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Distribution des profondeurs des creux .....	22
Tableau 2 - Nombre de creux par nature de sol artificialisé .....	23
Tableau 3 - Répartition des dolines selon la nature des formations BDLISA V3 .....	28
Tableau 4 - Densité de dolines dans les formations hydrogéologiques aquifères .....	28

## Liste des annexes

Annexe 1 Cartes complémentaires .....	39
---------------------------------------	----

# 1. Introduction

Les formes géomorphologiques typiques du karst, telles que les dolines, peuvent jouer un rôle important dans les écoulements de surface et notamment dans la recharge des nappes. En effet, ces dolines sont des dépressions fermées, généralement de forme circulaire ou elliptique, de dimensions petites ou modérées (quelques mètres à 50 m), et généralement moins profondes que larges, qui constituent des points d'infiltration préférentielle de l'eau de pluie directement vers l'aquifère (Figure 1). Leur identification s'avère ainsi nécessaire pour évaluer à la fois les modalités de recharge des nappes, les orientations des axes de drainage actuels et passés au sein des aquifères, mais aussi pour évaluer la vulnérabilité des nappes. À ce titre, des méthodologies multicritères telles que Paprika (Dörfliger et al., 2009) intègrent cet indicateur de présence de formes karstiques de surface dans les cartographies de vulnérabilité d'ouvrages d'eau.

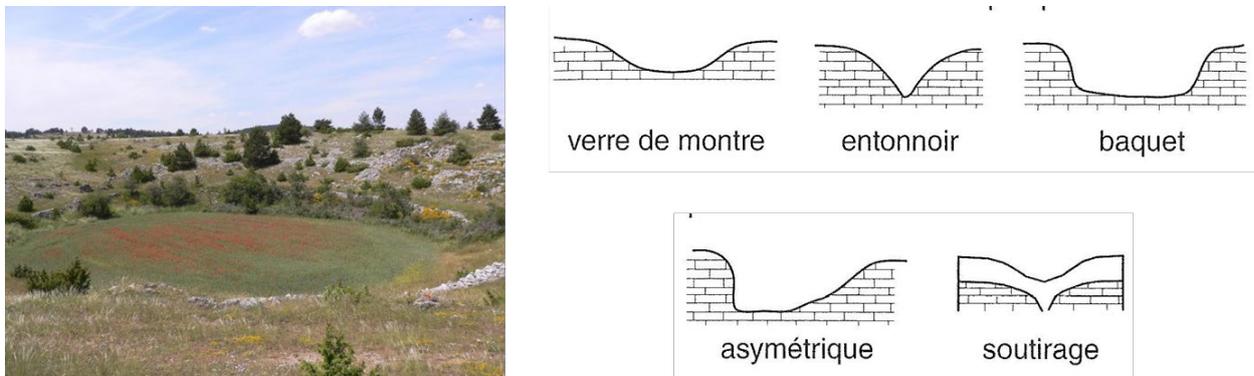


Figure 1 - Doline (© BRGM Nathalie Dörfliger) et quelques formes classiques associées (Gilli, 2011)

L'identification et la caractérisation des dolines (profondeur, asymétrie, nature du fond...) est toutefois délicate et fastidieuse puisqu'elle s'appuie souvent sur la reconnaissance de terrain qui est longue et dépendante des conditions de sol (présence de végétation ou cultures). La cartographie qui en découle est au final rarement exhaustive. Toutefois, la démocratisation des levés lidar offrant des modèles numériques de terrain en haute résolution (métrique), de manière uniforme sur le territoire, et permettant une vision du relief du sol, y compris sous la végétation, ouvre la voie pour une détection de ces formes de manière semi-automatique, rapide et sur une surface bien plus importante.

La présente étude s'inscrit dans le cadre du projet de recherche et développement Eaux-SCARS, traitant de l'Hydrogéologie des Systèmes CARbonatés Réservoirs du Secondaire au nord-est du Bassin aquitain, démarré en 2021, pour une durée de 6 ans, et bénéficiant du soutien financier du BRGM, de l'Europe et la Région Nouvelle-Aquitaine via le Fonds Européen De Développement Régional, de l'Agence de l'eau Adour-Garonne et des Conseils départementaux de la Dordogne, du Lot, du Lot-et-Garonne et de la Charente.

Dans le cadre du projet Eaux-SCARS (chap. 2), une méthode géomatique, basée sur le calcul des isolignes vectorielles, est développée à large échelle sur la base du MNT haute résolution, issu de levés lidar, dénommé RGE Alti V2® et mis à disposition gratuitement par l'Institut Géographique National. Ce rapport détaille la méthodologie mise en place et présente les résultats qui en découlent.

La couche de données produite est accessible en ligne ; elle a vocation à être partagée au sein de la communauté et constitue une source de connaissance utile à la compréhension de la recharge et à la vulnérabilité des aquifères du Secondaire (Cénozoïque) en Nouvelle-Aquitaine.

## 2. Projet Eaux-SCARS

Les ressources en eau souterraine des formations carbonatées du Jurassique et du Crétacé, au nord-est du Bassin aquitain (Périgord - Agenais - Quercy), sont stratégiques car elles permettent de satisfaire l'essentiel des besoins en eau de ces territoires (Figure 2). De par leur étroite relation avec les milieux superficiels, notamment les cours d'eau, elles soutiennent les écosystèmes et les activités associés, en particulier en période d'étiage. Par ailleurs, ces aquifères sont le siège d'une karstification importante qui induit des spécificités de fonctionnement des ressources en eau, tant du point de vue quantitatif que qualitatif : forte variabilité temporelle des débits et signatures chimiques, vulnérabilité accrue aux pollutions. Dès lors, dans un contexte de changement climatique, la question de la disponibilité de l'eau et de la gestion de ces nappes à moyen et long terme se pose. Les enjeux actuels et futurs consistent à assurer la pérennité de la ressource en eau pour concilier autant que possible l'ensemble des usages tout en assurant le maintien des apports vers les milieux superficiels (cours d'eau, lacs, zones humides, etc.).

La complexité de ces systèmes aquifères et le manque de connaissance de leur fonctionnement hydrogéologique a encouragé la mise en place d'un programme de recherche de compréhension générale pour garantir à terme une gestion équilibrée de la ressource. Le projet Eaux-SCARS (<https://sigesaqi.brgm.fr/-Projet-Eaux-SCARS-.html>), démarré en 2021 pour une durée de 6 ans, et bénéficiant du soutien financier du BRGM, de l'Europe et la Région Nouvelle-Aquitaine via le Fonds Européen De Développement Régional, de l'Agence de l'eau Adour-Garonne et des Conseils départementaux de la Dordogne, du Lot, du Lot-et-Garonne et de la Charente, vise à répondre à ce besoin en réalisant des investigations approfondies qui alimenteront des outils destinés à optimiser la gestion des nappes dans ces territoires.

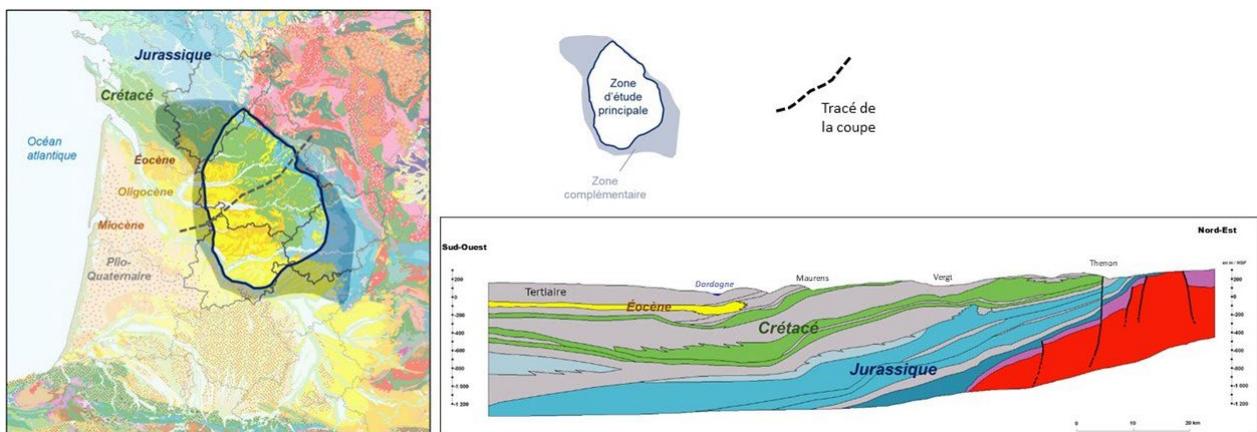


Figure 2 - Périmètre d'étude du projet Eaux-SCARS

Ainsi, une combinaison d'outils géologiques et géophysiques est mise en œuvre pour revisiter l'agencement du modèle multicouche : géométries et variations de faciès des aquifères et épontes, structures majeures. Le projet revient également sur la genèse des karsts, dont la configuration actuelle découle d'une longue évolution polyphasée ; pour comprendre leur fonctionnement actuel, il convient d'identifier les périodes de karstification et leurs modalités de mise en place. En parallèle, de vastes campagnes de mesures et suivis temporels dans les nappes et eaux de surface sont déployés sur l'ensemble du territoire : piézométrie, débits de cours d'eau, hydrochimie et isotopie. Appuyés par la réinterprétation de pompages d'essai, ils visent à mieux cerner le fonctionnement des réservoirs : recharge, écoulement, interactions entre aquifères et échanges nappes/rivières. L'ensemble de ces investigations doit alimenter, entre

autres, les modèles hydrodynamiques régionaux indispensables à la gestion opérationnelle de ces nappes.

## 3. Données utilisées

La détection des formes géomorphologiques typiques du karst, telles que les dolines (dépressions fermées, généralement de forme circulaire ou elliptique), n'a pas nécessité l'acquisition de données dans le cadre du projet Eaux-SCARS, mais s'est appuyée sur des données libres de droits, celles de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Elles sont décrites dans ce chapitre.

### 3.1. DONNEES IGN

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2021<sup>1</sup>, l'IGN rend libres et gratuitement accessibles ses données publiques concernant la topographie, les infrastructures et le relief français. L'ouverture des données IGN sous licence ouverte Etalab 2.0 signifie un accès et un usage gratuits pour tous. Aucun droit de reproduction ni de diffusion n'est à régler. Seules les données incluant des droits de tiers ou protégées par le droit d'auteur (cartes et SCANS) ne sont pas concernées par cette ouverture. Les cartes papier IGN restent également payantes.

Parmi les données importantes qui sont désormais « ouvertes », on peut citer : la BD TOPO (modélisation 3D du territoire et de ses infrastructures), la BD ORTHO (orthophotographie départementale), la BD Forêt et le RGE Alti (modèle numérique de terrain maillé qui décrit le relief français). Cette décision s'inscrit dans une logique d'ouverture des données publiques, de modernisation de l'action de l'Etat et de révolution des usages numériques.

#### 3.1.1. RGE Alti V2 ®

La source de donnée principale, utilisée pour l'approche développée dans cette étude, est le Référentiel Grande Echelle Altimétrique - Version 2 (RGE Alti V2 2021, [https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2021-07/DL\\_RGEALTI\\_2-0.pdf](https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2021-07/DL_RGEALTI_2-0.pdf)). Celui-ci propose un Modèle Numérique de Terrain (MNT) au pas d'un mètre (maille = 1 m de côté). Pour chaque maille, l'IGN met à disposition la valeur la plus précise existante dans leur base de données. Une grille de la même résolution renseigne sur la source de la valeur de la maille.

Pour l'emprise d'étude Eaux-SCARS, 80% du territoire est couvert par une donnée issue d'un levé lidar (Figure 3).

---

<sup>1</sup> <https://www.ign.fr/espace-presse/le-site-de-referance-des-donnees-publiques-libres-et-gratuites-de-lign>

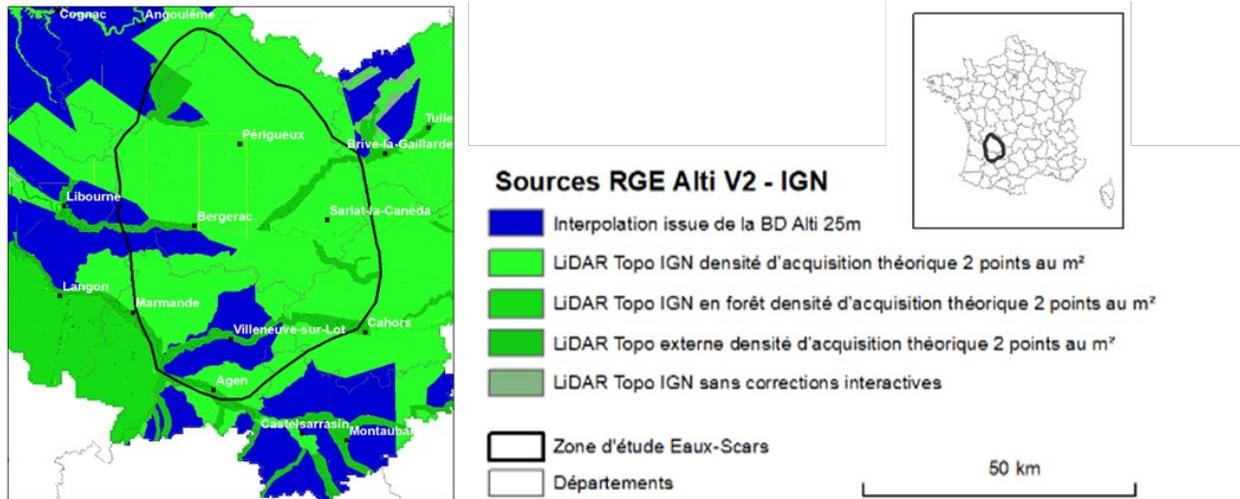


Figure 3 - Sources de données du MNT 1 m RGE Alti V2 (2021)

L'acquisition du MNT par le procédé lidar a été réalisée à raison de 2 points par mètre carré. La précision théorique du lidar indiquée par l'IGN est de 15 à 20 cm en Z (altitude) et de 20 à 50 cm en X, Y (coordonnées horizontale et verticale). Dans la pratique, la précision de la cote Z peut être évaluée en observant les variations d'altitude sur une surface lisse telle une route.

Le lidar est une technique de télédétection active qui permet de mesurer la distance à un objet par émission d'ondes lumineuses, dans les domaines de l'ultraviolet, du visible et/ou de l'infrarouge, au moyen d'un faisceau laser.

La technique repose sur un double système d'émission / réception de lumière. Un télémètre laser émet une faible impulsion lumineuse et reçoit en retour l'impulsion réfléchi par l'objet touché. La mesure du temps écoulé entre l'émission et la réception permet de calculer la distance franchie par le signal.

Le lidar aéroporté est utilisé pour les mesures topographiques (ou bathymétriques) qui associe un à plusieurs télémètres lasers à balayage transversal indépendants, fixés à bord d'un avion, d'un hélicoptère ou d'un drone, et dont le positionnement est estimé par géoréférencement direct (couplage GNSS / centrale inertielle). L'onde lumineuse est ainsi envoyée par émetteur depuis un transporteur aérien (dans le cas présent : un avion) volant à une altitude donnée (Figure 4). Au contact d'un objet et/ou de la surface de la Terre, l'onde est réfléchi puis réceptionnée par un récepteur lui aussi localisé dans l'avion. L'avion réalise, selon un plan de vol défini à l'avance, des lignes parallèles afin de recouvrir la surface à analyser par balayage (Ulvoas, 2017).

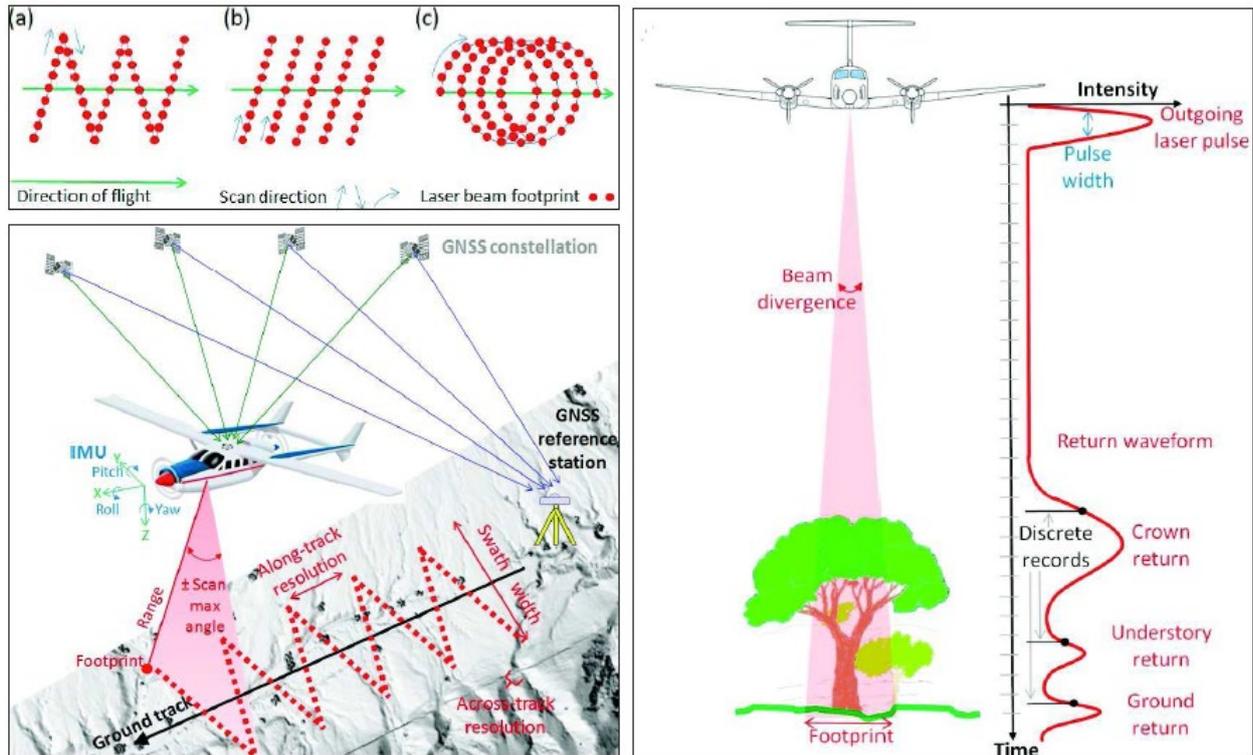


Figure 4 - Principe de fonctionnement du lidar aéroporté (Fernandez-Diaz et al., 2014)

Le rendement de l'équipement est élevé ; on peut couvrir de vastes surfaces en quelques heures. L'altitude de vol peut varier de 200 m à 5 000 m environ, permettant d'obtenir une fauchée variant de quelques dizaines de mètres à 7 000 m, selon le réglage de l'ouverture du lidar. Lors des levés lidar, une acquisition de photographies aériennes verticales est systématique.

Les données mesurées par le lidar se présentent sous la forme de nuages de points en 3 dimensions contenant toutes les coordonnées (latitude, longitude et altitude). Des prétraitements sont nécessaires afin de trier les points appartenant au sol (surface de la Terre), au sursol (anthropique, végétal, hydrologique), ainsi que les retours multiples du faisceau.

Un des intérêts du lidar est de pouvoir retourner des mesures sous un couvert forestier, car le rayon lumineux parvient parfois à trouver un interstice dans la végétation le laissant filtrer jusqu'au sol, ainsi la topographie du terrain naturel peut être connue et un modèle numérique de terrain (MNT) fourni.

### 3.1.2. BD Topo

La BD Topo (version 2.1, utilisée dans le cadre de cette étude), <https://geoservices.ign.fr/bdtopo>, met à disposition un ensemble de couches de données SIG, au format vectoriel, décrivant des éléments du territoire et de ses infrastructures.

Les couches de données des Bâtiments et des Routes seront utilisées en fin de méthodologie afin de qualifier les creux détectés (cf. 4.4 - Des creux aux dolines).

## 3.2. AUTRES SOURCES DE DONNEES

Toujours pour qualifier les creux détectés, d'autres sources de données ont été utilisées.

### 3.2.1. Occupation du sol

La couche vectorielle d'occupation des sols, appelée Corine Land Cover<sup>2</sup>, est une base de données européenne d'occupation biophysique des sols, ayant pour unité minimale cartographiée (MMU), 25 ha. Ce projet, lancé en 1985, est piloté par l'Agence européenne de l'environnement et couvre 39 États. Cette base de données est l'une des composantes du projet européen Copernicus (anciennement GMES, acronyme de Global Monitoring for Environment and Security).

La couche d'occupation du sol régionale 2021, réalisée par le GIP ATGeRi, offrant un niveau de détail plus important<sup>3</sup> (MMU de 10 ha), n'a pas pu être utilisée faute d'équivalent pour le département du Lot. Aussi, afin d'être homogène à l'échelle du territoire, la couche d'occupation du sol utilisée dans le cadre de ce travail est le millésime 2018 de Corine Land Cover.

### 3.2.2. BDLISA

La BDLISA (Limites des Systèmes Aquifères) est le référentiel hydrogéologique national (métropole et outre-mer) (<https://bdlisa.eaufrance.fr>). Il répertorie les entités hydrogéologiques selon trois échelles territoriales (nationale, régionale et locale). Ce référentiel est produit par le BRGM, en application du Schéma national des données sur l'eau (SNDE). Ce projet a bénéficié d'un soutien financier du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES), de l'Agence Française de Biodiversité (AFB), des Agences de l'eau et du BRGM.

La couche d'affleurement de la BDLISA dans sa version 3 a été utilisée pour qualifier la nature des formations géologiques et hydrogéologiques, dans lesquelles se trouvent les dolines. Elle a permis une analyse de la répartition spatiale des dolines dans les formations hydrogéologiques (cf. chap. 5 - Résultats).

### 3.2.3. Géologie

La carte géologique au millionième produite par le BRGM est disponible en libre accès depuis InfoTerre<sup>4</sup>, au format raster et vecteur, pour une bonne intégration dans un SIG. La carte a été utilisée pour concentrer l'emprise de travail autour des affleurements du Secondaire (en vert et bleu) des départements de Charente, de Dordogne, du Lot-et-Garonne et du Lot (Figure 5). C'est une emprise large qui a été considérée, intégrant également des affleurements non carbonatés (alluvions, molasses).

---

<sup>2</sup> <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018>

<sup>3</sup> <https://www.pigma.org/portail/fr/jeux-de-donnees/ocs-de-la-nouvelle-aquitaine-referentiel-regional-d-occupation-du-sol-a-grande-echelle--ocs-nva/info>

<sup>4</sup> <https://www.geocatalogue.fr/Detail.do?id=4162>

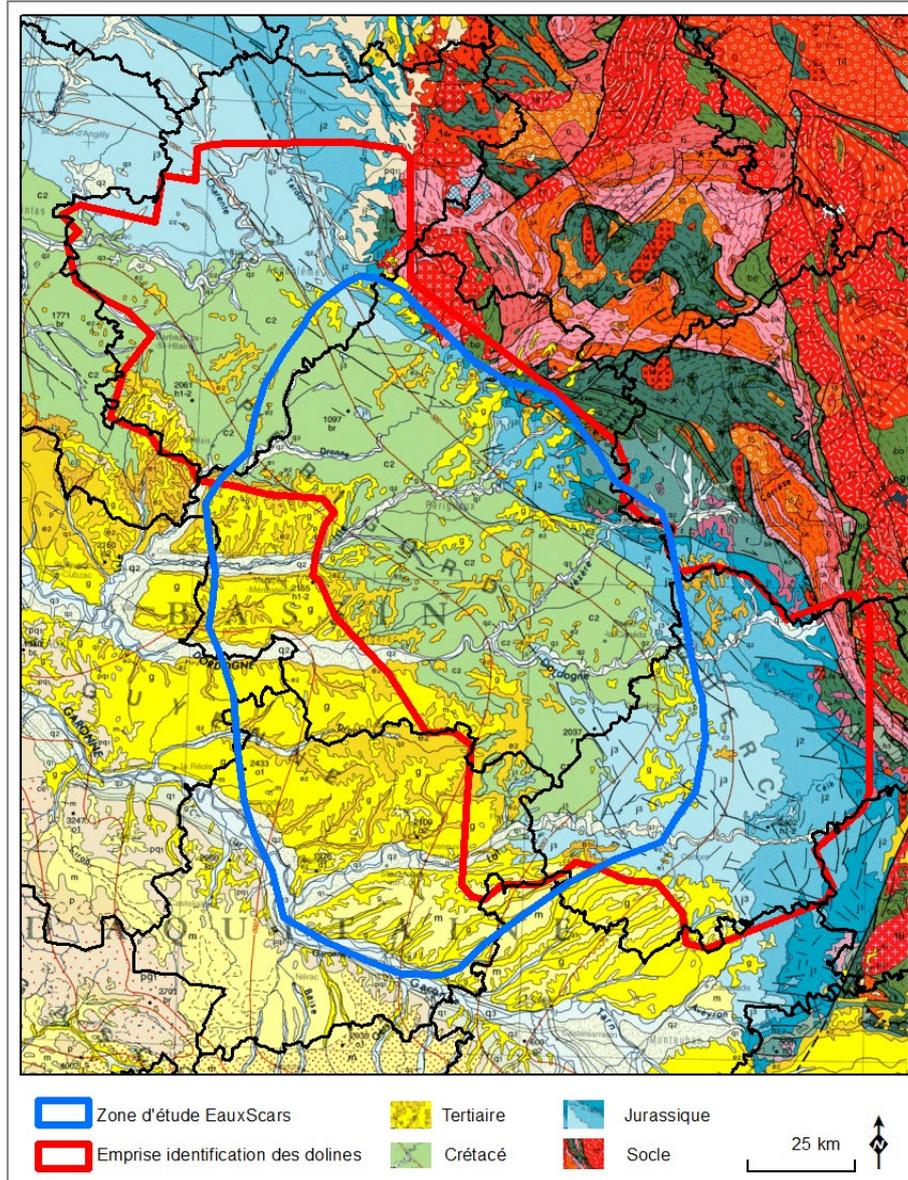


Figure 5 - Emprise de détection des dolines (en rouge)



## 4. Méthodologie

Il est rappelé que la source de données utilisée pour développer la méthodologie géomatique, mise en œuvre pour la détection des dolines, est le référentiel IGN RGE Alti V2 libre de droit. Il est jugé de bonne précision dans l'emprise Eaux-SCARS, puisqu'il est pour l'essentiel issu de levés lidar. C'est ainsi également l'occasion d'évaluer la pertinence de cette donnée pour mettre en évidence les dolines du territoire. Une des plus-values de la méthode présentée ci-dessous est de pouvoir être appliquée sur une grande emprise, ici de 17 000 km<sup>2</sup>, couvrant 4 départements (Dordogne, Lot, Lot-et-Garonne et Charente), à partir de données libres d'accès.

### 4.1. CHOIX METHODOLOGIQUE

Deux principales méthodes existent pour la détection de dolines, à partir d'un MNT (Cartannaz et Dewez, 2015) :

- calcul d'isolignes : en ne retenant que des isolignes fermées, dont les caractéristiques de forme permettent de filtrer les résultats,
- remplissage des trous : cette fonction permet également de mettre en évidence des dolines, mais sert généralement pour corriger des artefacts de MNT en vue d'exploitation hydrographique.

De nombreuses exploitations (Cartannaz et Dewez, 2015 ; Vallat et Braillard, 2016 ; Berthe et al., 2021 ; Noury et al., 2021) montrent que ces méthodes s'ajustent en fonction des besoins et peuvent être combinées à des inventaires bibliographiques ou issus de relevés sur le terrain. Dans notre cas, nous nous sommes orientés vers la seconde méthode, dite des isolignes.

### 4.2. LOGICIEL UTILISE

Les traitements ont été réalisés à l'aide d'ArcGis 10.5.1, de l'éditeur ESRI. En particulier à l'aide de la fonction *Isoligne* présente avec l'extension 3D Analyst et Spatial Analyst (Figure 6).

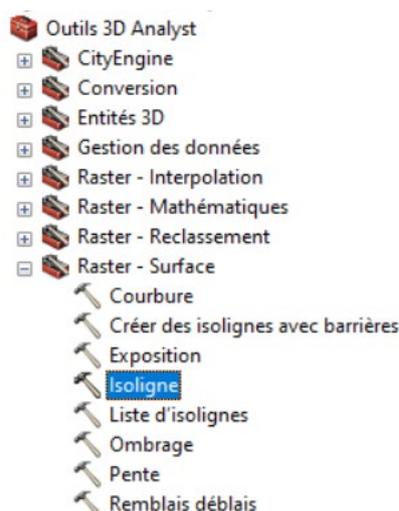


Figure 6 - Localisation de la fonction « Isoligne » dans l'extension 3D Analyst, sous ArcGis 10.5.1

Les calculs d'isolignes ont été réalisés pour les 4 départements, intersectant l'emprise d'étude Eaux-SCARS, correspondante aux affleurements carbonatés (cf. 3.2.3). Les isolignes sont calculées tous les mètres, en cohérence avec la résolution du RGE Alti V2. Leur géométrie est la polyligne. Les résultats ont été enregistrés dans une géodatabase fichier (.gdb) : les isolignes calculées pour les 4 départements représentent plus de 40 Go de données, alors que les shapefiles sont limités à 2 Go.

Les isolignes sont calculées pour chaque département, plutôt qu'un fichier, d'une part en raison des MNT du RGE Alti fournis selon ce découpage, et d'autre part afin de ne pas saturer la mémoire de la station de travail.

### 4.3. TRAITEMENT SUR LES ISOLIGNES

Du calcul des isolignes à la détection des creux, 7 étapes principales sont requises (Figure 7), détaillées pour faciliter une reproductibilité :

1. Filtre des isolignes, pour ne retenir que celles comprises entre 15 et 500 m de longueur (ou périmètre) et qui sont « fermées », c'est-à-dire dont les coordonnées de début de polyligne correspondent à celles de fin de polyligne. Ces critères correspondent à des dolines comprises entre 2,20 m et 80 m de rayon (compromis entre temps de calcul et taille des dolines obtenues dans la littérature (terrain et cartes géologiques et topographiques), mais aussi lors de la confrontation avec les bases de références locales (cf. 5.2 - Validation croisée). Toutefois, ces critères peuvent être revus selon les objectifs du traitement et les caractéristiques des formes de surface que l'on souhaite détecter.

Une fois cette étape réalisée les différentes couches d'isolignes (par département) sont réunies afin de simplifier la suite des traitements.

2. Conversion des polygones en polygones : plusieurs polygones se superposent au droit d'un creux potentiel. La table attributaire initiale est conservée. Nous les appellerons 'Polygones initiaux' dans la suite du rapport. Créer un attribut  $IdContour=ID\&Contour$ .
3. Aplatissement : n'avoir qu'un polygone par creux potentiel : fusion des polygones entre eux, puis éclatement (*multipart to singlepart*). Créer un identifiant  $idagrege=FID+1$ .
4. Récupération des centroïdes des polygones 'aplatis'.
5. Identification des polygones initiaux par centroïde : couche de points doublonnés avec autant de doublons que de polygones intersectés.
6. Identification et caractérisation des creux : fusionner la couche de points doublonnés sur champ  $idagrege$ , en calculant  $Min(contour)$ ,  $Max(Contour)$ ,  $Max(longueur)$  et  $Min(longueur)$ ,  $Max(idagrege)$ ,  $Min(idagrege)$ . Pour chacun des éléments fusionnés, on crée un identifiant unique  $IdMaxContMax=Id\_Max \& Contour\_Max$ .
7. Joindre (jointure attributaire) cette dernière couche à la couche des polygones initiaux avec  $IdContour=IdMaxContMax$ . Sélectionner et exporter les polygones, dont  $Min(contour) < contour$  correspondant aux creux, donc potentielles dolines.

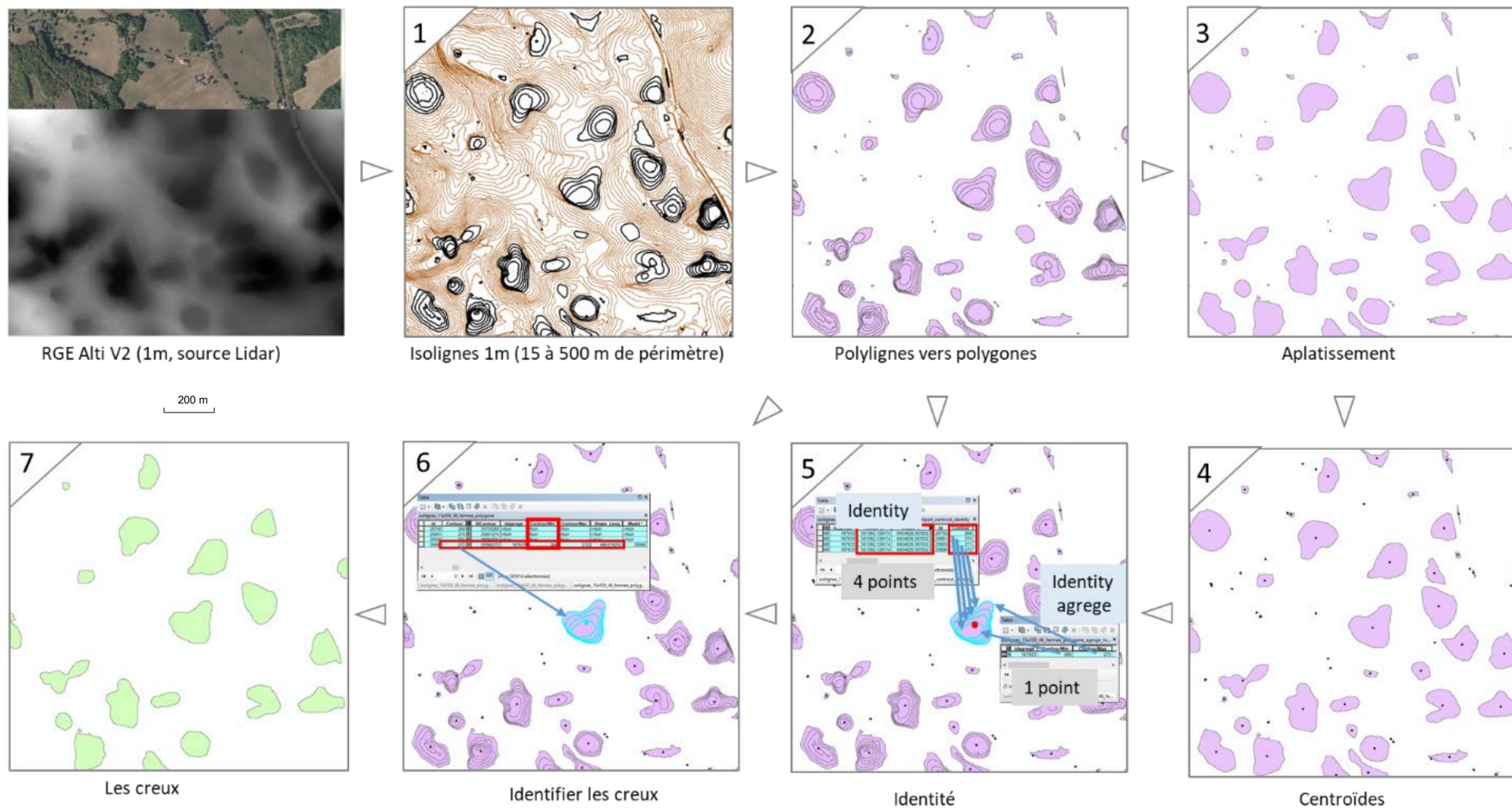


Figure 7 - Du calcul des isolignes à l'identification des creux



#### 4.4. DES CREUX AUX DOLINES

À ce stade, différentes identifications de creux peuvent ne pas correspondre à des dolines, mais par exemple être issues des fossés de route, qui ont une forme non circulaire, ou bien des artefacts du MNT, notamment aux droits des bâtiments.

Afin de les filtrer, nous pouvons calculer les attributs géométriques des polygones (surface et périmètre) ainsi qu'un indice de circularité permettant de détecter si un polygone est circulaire ou non (une doline a généralement une forme circulaire, sauf dans le cas des dolines asymétriques).

$$\text{Indice de circularité de Miller} = \frac{4 * \pi * \text{surface}}{\text{périmètre}^2}$$

Cet indice a une valeur comprise entre 0 (circularité minimale : le périmètre est très grand et l'aire englobée très petite) et 1 (circularité maximale).

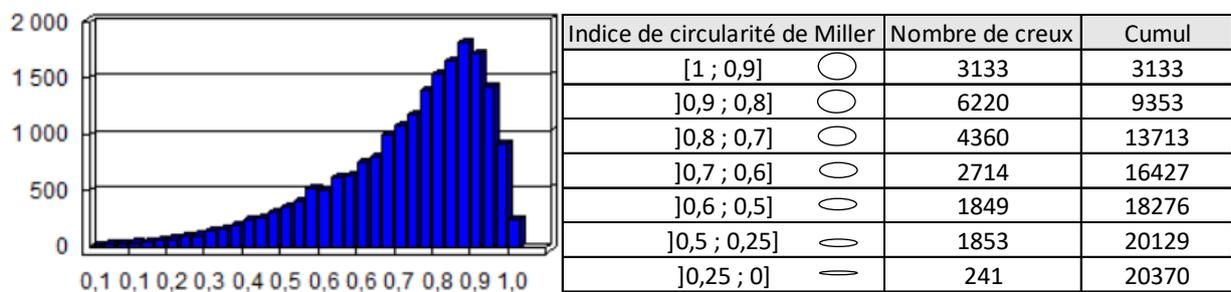


Figure 8 - Distribution des fréquences des 20 370 creux, selon l'indice de circularité

Le tableau de la Figure 8 indique que 18 276 creux détectés ont un indice de circularité supérieur ou égal à 0,5 et 16 427 supérieur ou égal à 0,6.

D'autres attributs géométriques peuvent également être calculés à partir du MNT, notamment la pente, la profondeur ou l'orientation principale (azimut) des dolines (ex. Figure 9).

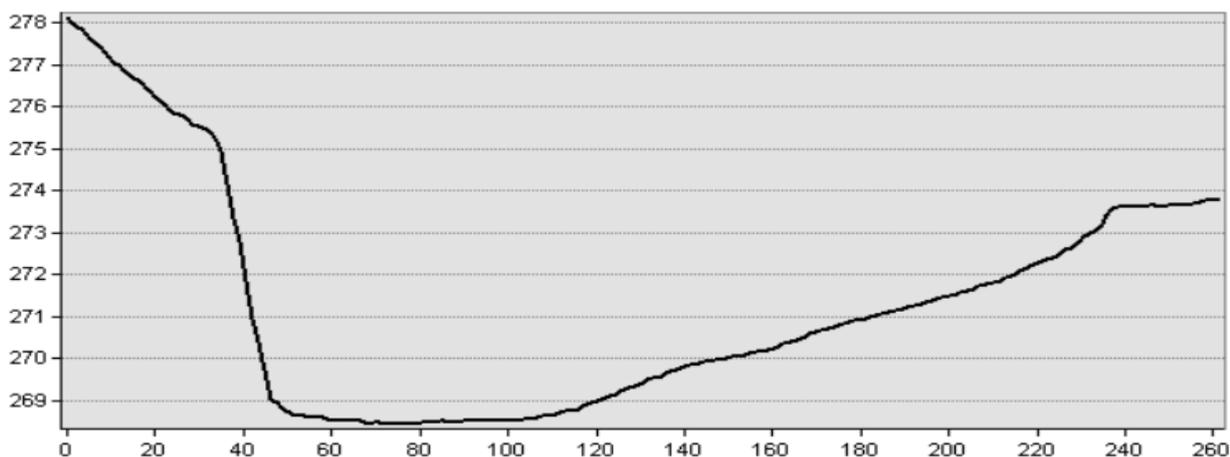


Figure 9 - Exemple de doline en vue de haut et en vue en coupe

À titre d'information, la cartographie générée identifie des creux avec des gammes de profondeurs allant de 1 m à plus de 5 m (Tableau 1). Les creux de l'ordre de 1 m doivent faire l'objet d'une vigilance quant à la réalité de leur présence, puisque les courbes de niveau sont calculées par mètre entier. Les dolines d'un mètre de profondeur ne sont révélées que par un seul polygone.

Profondeur (en m)	Nombre de creux	Nombre de creux (circularité $\geq 0,6$ )
1	9 579	7029
2	4 117	3360
3 à 5	5 113	4566
> 5	1 561	1472
total	20 370	16 427

Tableau 1 - Distribution des profondeurs des creux

Les creux peuvent également être croisés avec des marqueurs d'artificialisation (Figure 10) afin de rejeter les formes correspondant à des marqueurs artificiels (faux positifs) et/ou de mettre en évidence des secteurs à enjeux présentant un risque de mouvements de terrain.

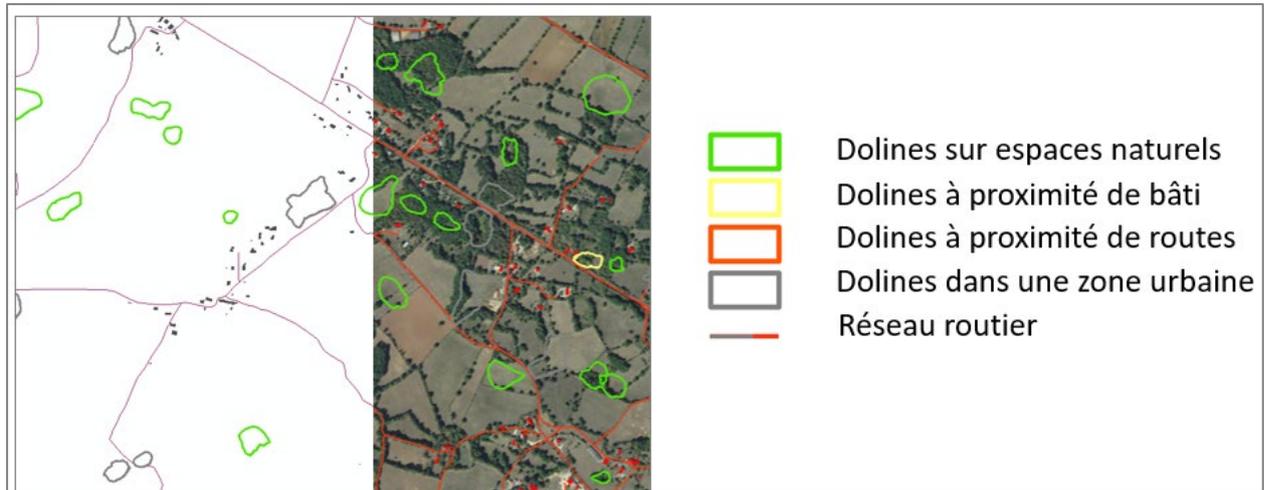


Figure 10 - Caractérisation des creux selon des marqueurs d'artificialisation

Les creux ont ainsi été croisés avec les routes et bâtiments issus de la BD Topo, ainsi que la classe de niveau 1 de la couche d'occupation du sol Corine Land Cover, correspondant aux territoires artificialisés (classes 1xx).

Nature de sol artificialisé	Nombre de creux	Nombre de creux (circularité $\geq 0,6$ )
Bati (buffer 5m)	1 218	907
Route (buffer 10m)	5 699	4 043
Occupation du sol artificialisé	487	327
Terrain non artificialisé	12 966	11 150
Total	20 370	16 427

Tableau 2 - Nombre de creux par nature de sol artificialisé

Le Tableau 2 montre qu'en filtrant sur l'indice de circularité (seuil = 0,6), le nombre de creux diminue d'environ 30% pour les 3 classes artificialisées, alors qu'il ne diminue que de ~15% sur des terrains non artificialisés. Ce qui confirme que les faux positifs se trouvent plutôt dans des secteurs artificialisés.



## 5. Résultats

### 5.1. REPARTITION SPATIALE DES DOLINES

20 370 creux ont été mis en évidence dans les secteurs carbonatés des départements couverts par l'emprise du projet Eaux-SCARS, d'une étendue de 17 000 km<sup>2</sup> (cf. 3.2.3, limite noire dans les cartes ci-dessous). Pour la suite, nous retiendrons le seuil de 0,6 pour déterminer la détection d'une doline, soit 16 427 creux. Bien entendu, en fonction des objectifs d'utilisation de la cartographie qui en résulte, ce seuil peut être modifié. Sont présentées ci-dessous les cartes de répartition spatiale des dolines, toute nature de sol confondue (Figure 11), ainsi qu'une carte de densité pour la nature de sol naturel ou agricole (Figure 12) ; des cartes complémentaires des dolines par nature du sol sont présentées en annexe 1. Une analyse selon la nature des formations hydrogéologiques sous-jacentes est ensuite présentée.

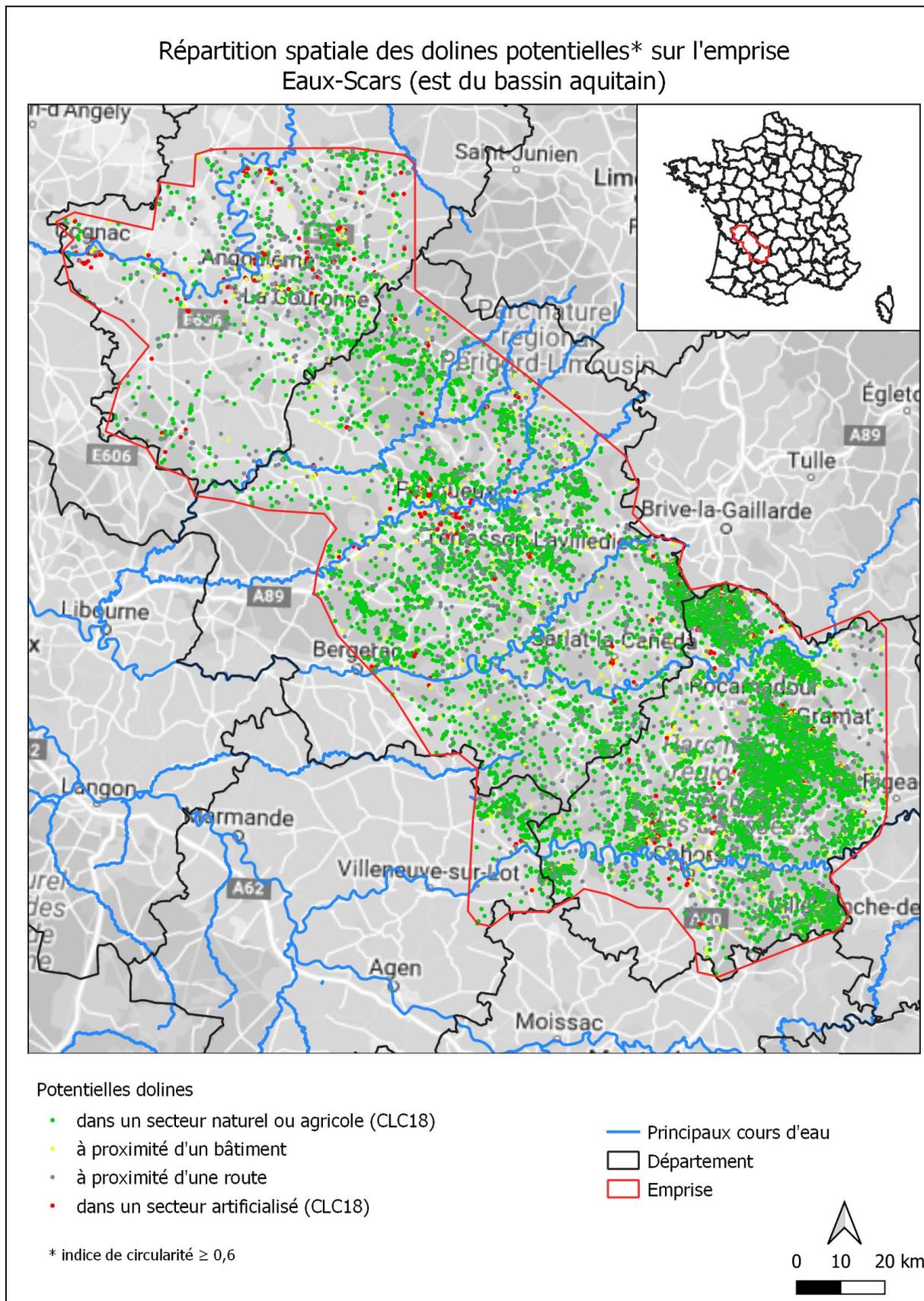


Figure 11 - Répartition spatiale des dolines potentielles dans l'emprise Eaux-SCARS (est du Bassin aquitain)

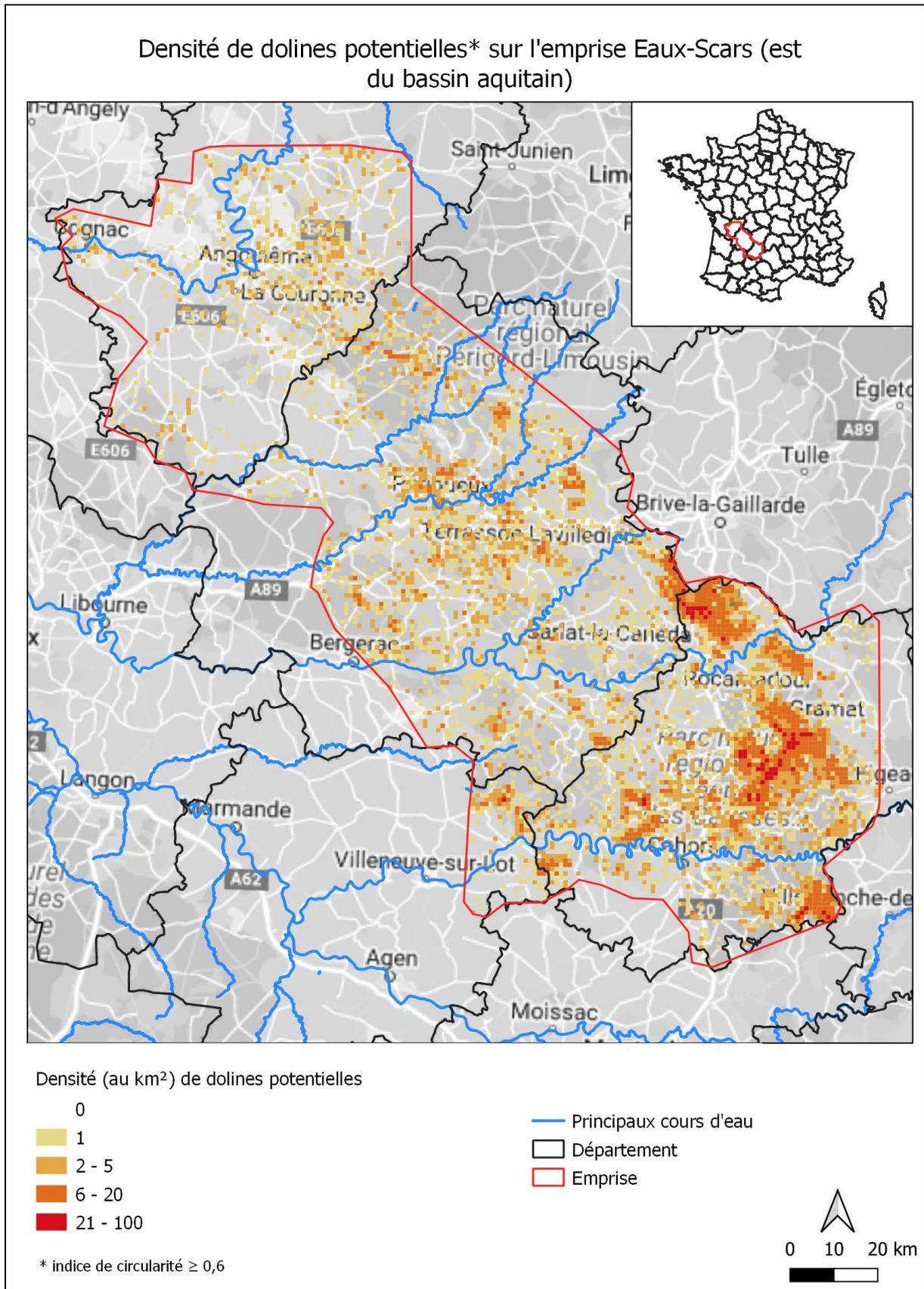


Figure 12 - Densité des dolines potentielles (au km<sup>2</sup>) dans l'emprise Eaux-SCARS (est du bassin aquitain)

Afin de rendre compte de la répartition des formes karstiques de surface (dolines) par formations hydrogéologiques, un croisement des 16 427 dolines détectées est réalisé avec la BDLISA V3 (cf. 3.2.2). Comme attendu, les creux se répartissent essentiellement dans les formations de nature aquifère (Tableau 3). En détail, ce sont dans les formations du Jurassique que les dolines sont plus nombreuses (Tableau 4).

nature	surfkm2	Nb_toutesDolines	densité_toutesdolines	Nb_Dolines Circle >0,6	densité_dolines Circle>06
Aquifere	10431,8	17531	1,68	14528	1,39
Impermeable	4111,7	1998	0,49	1470	0,36
ImpermeableSocle	723,8	276	0,38	137	0,19
AquifereAlluv	675,8	565	0,84	292	0,43

Tableau 3 - Répartition des dolines selon la nature des formations BDLISA V3

niv2	libelle	surfkm2	Nb_toutesDolines	densité_toutesdolines	Nb_Dolines Circle >0,6	densité_dolines Circle>06
940AA	Alluvions de la Charente	145,563256	61	0,42	32	0,22
942AA	Alluvions de la Dordogne	211,001683	222	1,05	100	0,47
942AC	Alluvions de la Vézère	42,7668642	61	1,43	33	0,77
942AE	Alluvions de la vallée de l'Isle	182,366227	152	0,83	95	0,52
946AC	Alluvions du Lot	90,3731511	62	0,69	27	0,30
306AA	Terrasses (Sables, graviers et galets) quaternaires du bassin Adour-Garonne	87,8115965	64	0,73	34	0,39
326AA	Molasses et argiles Oligo-éocènes du Bassin aquitain	122,669822	40	0,33	30	0,24
328AA	Sables, graviers, galets fluviatiles, calcaires et marnes de l'Eocène supérieur à Oligocène du Bassin Aquitain	167,335411	56	0,33	31	0,19
334AG	Calcaires, grès et sables de l'Eocène inférieur à moyen du nord du Bassin aquitain	299,279229	241	0,81	157	0,52
344AA	Calcaires et grès du Campano-Maastrichtien du Bassin aquitain	788,657871	373	0,47	268	0,34
348AA	Multicouche calcaire du Turonien-Coniacien-Santonien du nord du Bassin aquitain	1802,58033	1239	0,69	785	0,44
348AE	Sables et calcaires du Cénomaniens du nord du Bassin aquitain	132,08309	50	0,38	34	0,26
352AA	Calcaires et dolomies du Tithonien du Bassin aquitain	354,768831	913	2,57	816	2,30
352AC	Calcaires argileux fissurés du Jurassique supérieur au nord du Bassin aquitain	860,130955	347	0,40	219	0,25
356AB	Calcaires du Kimméridgien du nord du Bassin aquitain	295,139272	1415	4,79	1254	4,25
358AE	Calcaires du Dogger du nord du Bassin aquitain	2199,40694	8845	4,02	7690	3,50
358AF	Calcaires du Dogger dans le nord du bassin versant de la Charente	60,5031369	23	0,38	19	0,31
359AA	Calcaires fins, récifaux et périrécifaux jurassiques du karst de la Rochefoucault	442,76144	424	0,96	273	0,62
362AA	Calcaires, grès, dolomies et anhydrite de l'Infra-Toarcien du sud du Bassin aquitain	212,820136	169	0,79	137	0,64
362AE	Grès et dolomies de l'Infra-Toarcien dans le bassin versant de la Charente amont et de la Boutonne amont	47,3356372	20	0,42	15	0,32
362AG	Grès et dolomies de l'Infra-Toarcien du nord du Bassin Aquitain	105,316243	96	0,91	62	0,59

Tableau 4 - Densité de dolines dans les formations hydrogéologiques aquifères

## 5.2. VALIDATION CROISEE

Les résultats de cette méthode ont été confrontés à différents inventaires, issus de la bibliographie (les dolines cartographiées sur les cartes géologiques au 50 000<sup>ème</sup>) ou de visites sur le terrain. Cela a permis de montrer que cette méthode est pertinente pour détecter la présence de dolines.

### 5.2.1. Validation croisée avec un inventaire terrain du Parc des Causses (Lot)

Une première confrontation des résultats a pu être réalisée dans le département du Lot, grâce à un inventaire terrain réalisé par le Parc des Causses, situé sur les causses de Saint-Chels, entre les cours d'eau du Lot et du Célé (Figure 13). La couche de données fournie est de type (géométrie) ponctuel, sans information attributaire associée. L'inventaire recense 173 dolines sur une emprise de 150 km<sup>2</sup>.

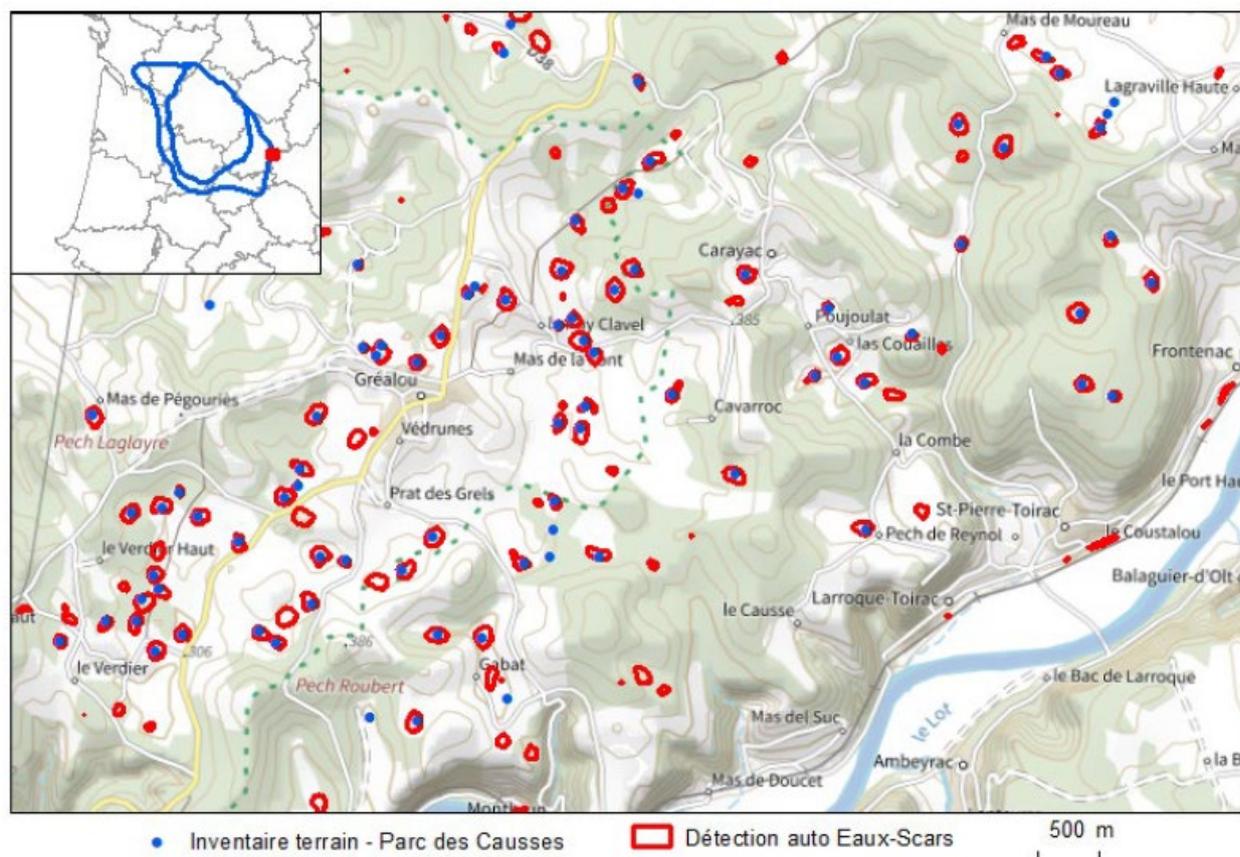


Figure 13 - Détection semi-automatique des dolines comparée à l'inventaire terrain, réalisé par le Parc des Causses

Le croisement des deux couches de données (inventaire du Parc des Causses vs dolines détectées dans le cadre de la présente étude) a été réalisé par jointure spatiale sous SIG, l'objectif étant d'évaluer le nombre de dolines de référence (inventaire du Parc), effectivement présentes dans la couche de doline de la présente étude, et inversement. Les résultats du croisement mettent en évidence que, sur les 173 dolines répertoriées sur le terrain, 140 sont effectivement détectées par l'approche géomatique dans ce secteur. Avec 82% de dolines détectées par la méthode employée dans la présente étude, la méthode est jugée satisfaisante. L'inventaire terrain ne permet pas, au travers des caractéristiques mentionnées pour les dolines, d'identifier les raisons de la non-observation par la méthode semi-automatique.

En revanche, dans le même secteur, ce sont 280 dolines qui ont été détectées par la méthode semi-automatique, soit 140 dolines supplémentaires, qui n'apparaissent pas dans l'inventaire du Parc et constituent une base pour une nouvelle enquête de terrain.

## 5.2.2. Validation croisée avec des inventaires bibliographiques

Un premier inventaire bibliographique dans le département de Dordogne avait été réalisé dans le cadre du projet Karst24 (Cabaret et al., 2014). Cet inventaire bibliographique est issu d'une compilation des dolines cartographiées sur les cartes géologiques et les cartes IGN au 1/25000°, identifiées sur les orthophotographies, mentionnées dans des rapports de bureaux d'études ou de thèses, ou encore bancarisées dans la BD Cavitité. Il recense 1 261 dolines dans le secteur d'étude Eaux-SCARS. Une comparaison entre les résultats obtenus avec la détection semi-

automatique et cet inventaire montre que 899 dolines de l'inventaire bibliographique (71%) sont comptabilisées dans les 6 304 dolines détectées automatiquement.

Il est également possible de croiser les résultats de nos détections avec certaines cartes géologiques, sur lesquelles les dolines ont été largement cartographiées. C'est par exemple le cas de la carte 809 « Souillac », située dans le Lot.

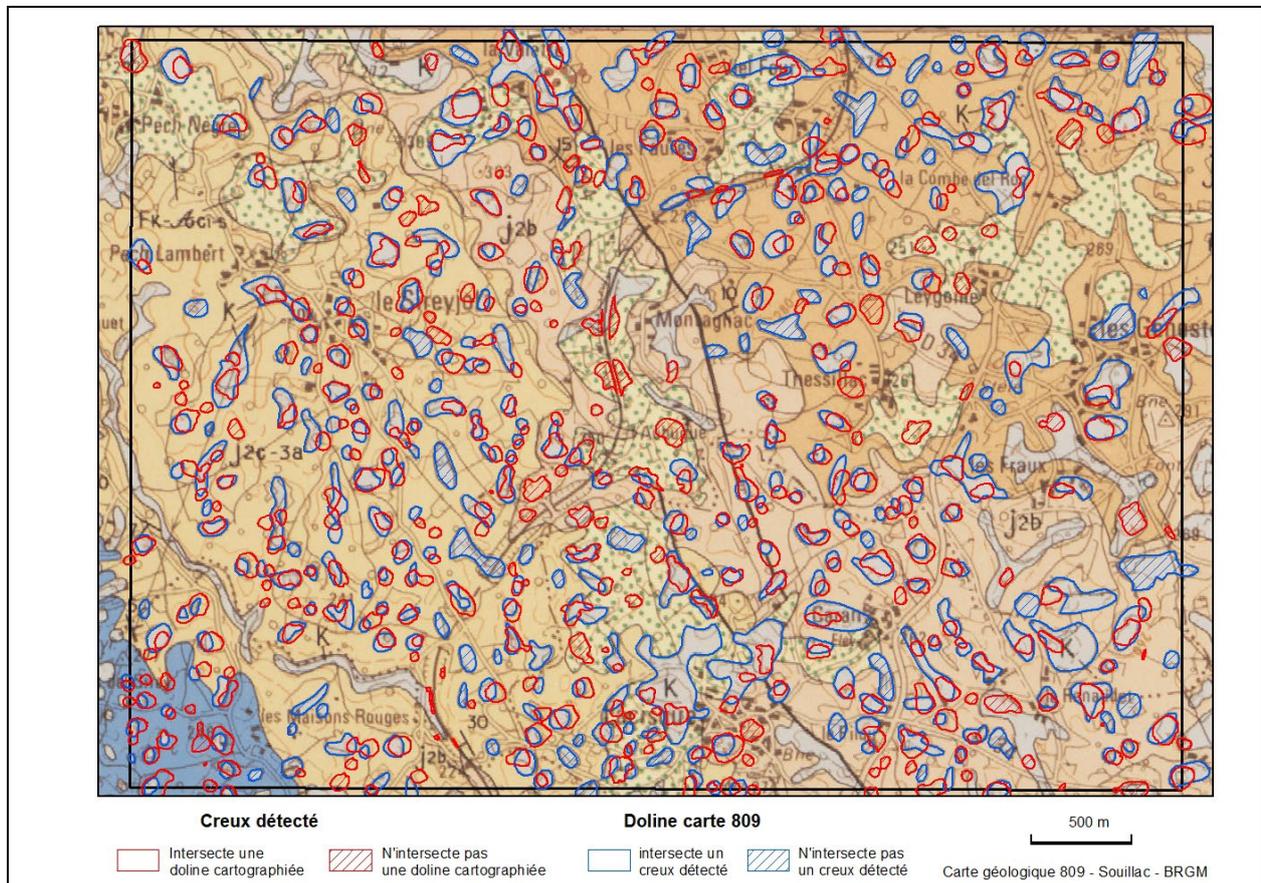


Figure 14 - Extrait de la carte géologique 809 avec les dolines cartographiées en bleu et les creux détectés en rouge

Sur cet extrait au 1/20 000 (Figure 14), on peut observer la bonne correspondance entre les dolines cartographiées sur la carte géologique (en bleu foncé) et les dolines détectées (en rouge) : il y a 336 dolines cartographiées contre 389 creux détectés. 78,5% des dolines cartographiées sont intersectées par des creux détectés ; 72% des creux détectés sont intersectés par des dolines cartographiées, soit près de trois quart en commun. De plus, la détection automatique en fait ressortir 53 supplémentaires. Le ratio est inchangé en filtrant sur les creux ayant un indice de circularité supérieur ou égal à 0,6 (252 sur 347 intersectent des dolines cartographiées).

### 5.2.3. Validation croisée de la méthode dans un secteur avec un lidar fin et une étude spécifique (Meuse)

Disposant des travaux d'une étude BRGM, dans la commune de Fains-les-Sources, dans la Meuse (Cartannaz et Dewez, 2015), ayant conduit à la détection de près de 300 dolines dans un secteur de 9 km<sup>2</sup>, couplant inventaire terrain et détection à partir d'un levé lidar de haute précision (50 pts/m<sup>2</sup>, 1 pixel = 50 cm) à l'aide de la méthode des isolignes, ainsi que celle du remplissage

des trous (Figure 15), nous avons pu reproduire notre méthodologie (isolignes 15 à 500 m via RGE Alti) et la comparer.

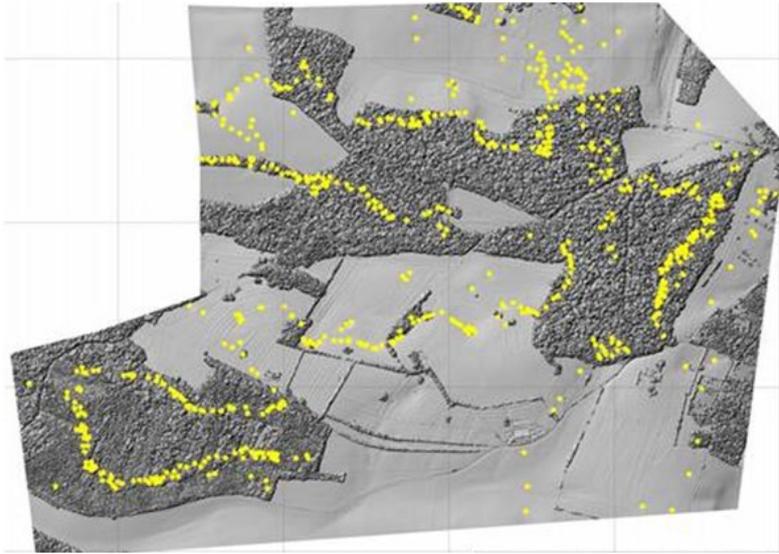


Figure 15 - Résultat des travaux de Cartannaz et Dewez (2015) couplant méthode semi-automatique à partir d'un lidar HD et d'un inventaire terrain

Tout d'abord, il est intéressant de constater que la source du RGE Alti, dans ce secteur du département de la Meuse, est du lidar pour sa partie nord et de la BD Alti 25 m dans sa partie sud. Cela permet de confirmer que les résultats obtenus de la détection semi-automatique sont meilleurs à partir du RGE Alti construit à partir de levé lidar (Figure 16) : aucune doline n'est alors détectée à partir du RGE Alti - source BD Alti 25 m, au sud de la limite jaune, contre 30 dolines détectées au nord.

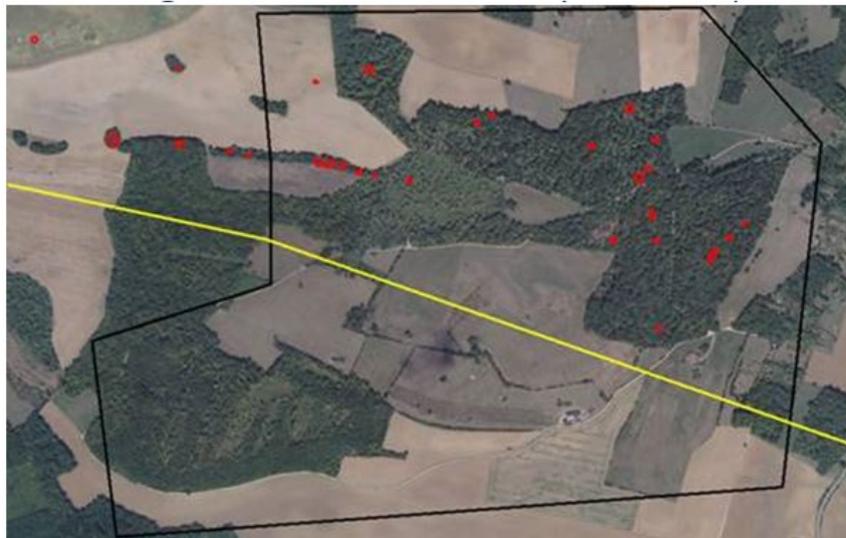


Figure 16 - Résultat de la détection dans un secteur de la Meuse, à partir du RGE Alti - source lidar au nord de la ligne jaune, - source BD Alti 25 m au sud de la ligne jaune

En reproduisant la présente méthode (isolignes espacées de 1 m) avec le lidar, acquis dans le cadre du projet Meuse, 68 dolines sont détectées (Figure 17).



Figure 17 - Résultat de la détection dans un secteur de la Meuse, à partir du lidar, avec des isolignes espacées de 1 m

Enfin, à partir du lidar acquis dans le cadre du projet Meuse, mais avec des isolignes calculées tous les de 0,5 m, comme lors de l'étude Meuse, 86 dolines sont détectées (Figure 18).

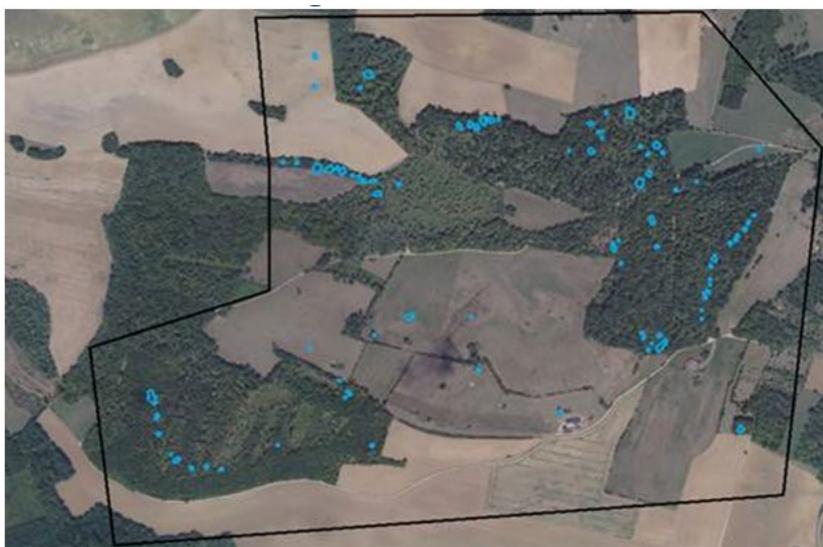


Figure 18 - Résultat de la détection dans un secteur de la Meuse, à partir du lidar, avec des isolignes espacées de 0,5 m

Les 86 dolines détectées dans des conditions équivalentes à l'approche de l'étude Meuse sont encore loin des 300 dolines identifiées lors de cette étude ; cela montre qu'un couplage avec le terrain et d'autres traitements géomatiques non mis en œuvre dans cette approche améliorent les résultats. De plus, l'étude Meuse s'est également appuyée sur la méthode de remplissage des trous faisant ressortir des dolines très peu profondes (inférieures à 50 cm).

Ces 2 approches complémentaires (terrain et remplissage des trous) sont réalisables à une petite échelle et difficilement reproductibles à l'échelle de l'emprise du projet Eaux-SCARS.

### 5.3. PARTAGE ET ACCESSIBILITE

Les données sont diffusées sur le [SIGES Aquitaine](https://sigaqj.brgm.fr), dans la rubrique Eaux-SCARS et dans l'espace cartographique <https://sigaqj.brgm.fr/Donnees-mises-a-disposition-1228.html> via un formulaire de mise à disposition permettant de garder trace des diffusions effectuées (Figure 19).

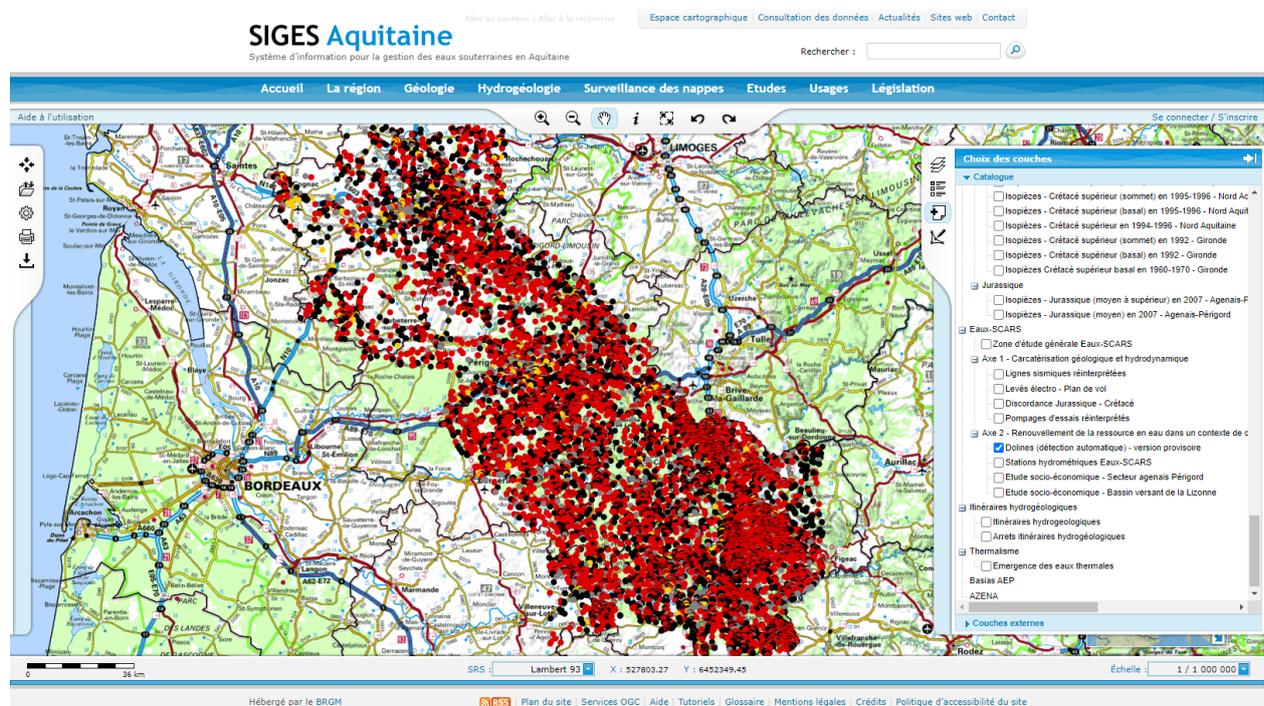


Figure 19 - Résultats de l'étude partagés en ligne sur le SIGES Aquitaine

La couche SIG diffusée correspond aux centroïdes des 20 370 creux. Elle est disponible au format WMS : <https://ws.carmencarto.fr/WMS/120/EauxSCARS>, et en shapefile, sur demande, à l'adresse [eaux-scars@brgm.fr](mailto:eaux-scars@brgm.fr).

La fiche de métadonnée peut être retrouvée à l'adresse suivante : <https://www.mongeosource.fr/geosource/1044/fre/catalog.search#/metadata/7e10f40d-d324-44de-b920-56fbbcbdb82e6>

Cette diffusion permet à la communauté de juger, critiquer et/ou compléter la couche de données afin de consolider la méthodologie et les résultats obtenus.



## 6. Conclusion

L'identification des dolines réalisée dans le cadre du projet Eaux-SCARS s'est appuyée sur une méthodologie géomatique. Celle-ci a pu être appliquée sur une extension importante (10 000 km<sup>2</sup> entre les départements de Dordogne, Charente, Lot et Lot-et-Garonne), par traitement du référentiel RGE Alti V2 de l'IGN ouvert en licence Etalab 2.0, c'est-à-dire accessible en libre téléchargement.

Le modèle numérique de terrain au pas de 1 m provient de données lidar pour 80% de la superficie étudiée dans le cadre du projet Eaux-SCARS. Il est considéré donc comme un MNT de bonne qualité.

Ce sont ainsi près de 15 000 dolines qui ont été détectées, pour l'essentiel dans des formations aquifères carbonatés (7 500 km<sup>2</sup>, cf. Tableau 4 - Densité de dolines dans les formations hydrogéologiques aquifères. Cela constitue une base de connaissances pour caractériser la recharge ou la vulnérabilité de ces aquifères.

La couche SIG des centroïdes des 20 370 creux est disponible au format WMS : <https://ws.carmencarto.fr/WMS/120/EauxSCARS> et en shapefile, sur demande, à l'adresse [eaux-scars@brgm.fr](mailto:eaux-scars@brgm.fr).

La fiche de métadonnée peut être retrouvée à l'adresse suivante : <https://www.mongeosource.fr/geosource/1044/fre/catalog.search#/metadata/7e10f40d-d324-44de-b920-56fbbcdb82e6>

Cette couche de données est encore à parfaire, notamment à l'aide des acteurs du territoire, qui pourront partager leurs connaissances locales afin d'affiner cet inventaire semi-automatique (confirmer la présence des dolines détectées, affiner les contours des polygones et l'occurrence éventuelle des dolines non identifiées).

Dans l'état, cette couche de données peut être utilisée à l'échelle régionale comme cela a pu être le cas pour alimenter l'analyse multi-critère de l'étude *Aléa* du Plan de prévention des risques naturels "mouvement de terrain" dans le département de la Dordogne (Martins et al., 2024), ou à des fins de recherche et de connaissance pour mettre en évidence de possibles jeux de failles non connus à l'aide d'alignement de dolines. À l'échelle locale (bassin versant), cette cartographie doit être filtrée selon les formes karstiques visibles sur le territoire d'étude et validée avec une approche terrain afin de guider les investigations.



## 7. Bibliographie

**Berthe J., Lejeune O., Devos A., Bollot N.** (2021) - Imagerie lidar et cartographie semi-automatique de l'exokarst de la montagne de Reims, Karstologia n°78

**Cabaret O., Gutierrez T., Perrin J.** avec la collaboration de **Goubier J.B., Lorette G., Lastennet R. et Minvielle S.** (2014) - Connaissances des karsts aquitains - Étude des karsts libres et sous couverture du département de la Dordogne - Module 4 - Année 4. Rapport final. BRGM/RP-62902-FR, 131 p., 110 ill., 10 ann. sur 1 CD.

**Cartannaz C. et Dewez T.** (2015) - Outils de traitement des Modèles Numériques de Terrain (MNT) pour la détection de cuvettes. Rapport final. BRGM/RP-65463-FR, 57 p., 44 fig., 2 ann., 1 CD.

**Dörfliger N., Plagnes V.** avec la collaboration de **K. Kavouri et J. Guoin** (2009) - Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. BRGM RP- 57527-FR.

**Fernandez-Diaz J. C., Carter W. E., Shrestha R. L., and Glennie C. L.** (2014) - "Now You See It.. Now You Don't: Understanding Airborne Mapping lidar Collection and Data Product Generation for Archaeological Research in Mesoamerica". Remote Sensing Vol. 6.No. 10, 9951–10001

**Gilli E.** (2011) - Karstologie - Karsts, grottes et sources. Collection: Sciences Sup, Dunod, 256 p.

**Martins L., Garnier C., Noury G., Husson E., Thierry Y.** (2024) - Cartographie de l'aléa mouvement de terrain sur le département de la Dordogne. Rapport BRGM/RP-73116-FR

**Noury G., Gutierrez A., Masson F.** (2021) - Etude hydraulique et hydrogéologique du bassin versant de la Retrève. 1. Inventaire et analyse des indices karstiques. Rapport BRGM/RP-71330-FR.

**Ulvoas B.,** avec la collaboration de **Ayache B.** (2017) - Contrôle qualité du levé lidar 2016 du littoral aquitain et intercomparaison avec les levés 2011 et 2014. Rapport final. BRGM/RP-67188-FR, 100 p., 52 Ill., 23 tab, 5 Ann.

**Vallat R. et Braillard L.** (2016) - Actes de la Société jurassienne d'émulation, Cartographie automatisée des dolines du plateau de Bure (Ajoie, Suisse) et mise en lien avec la fracturation tectonique

BDLISA : <https://bdlisa.eaufrance.fr>

IGN RGE Alti V2 : [https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2021-07/DL\\_RGEALTI\\_2-0.pdf](https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2021-07/DL_RGEALTI_2-0.pdf)

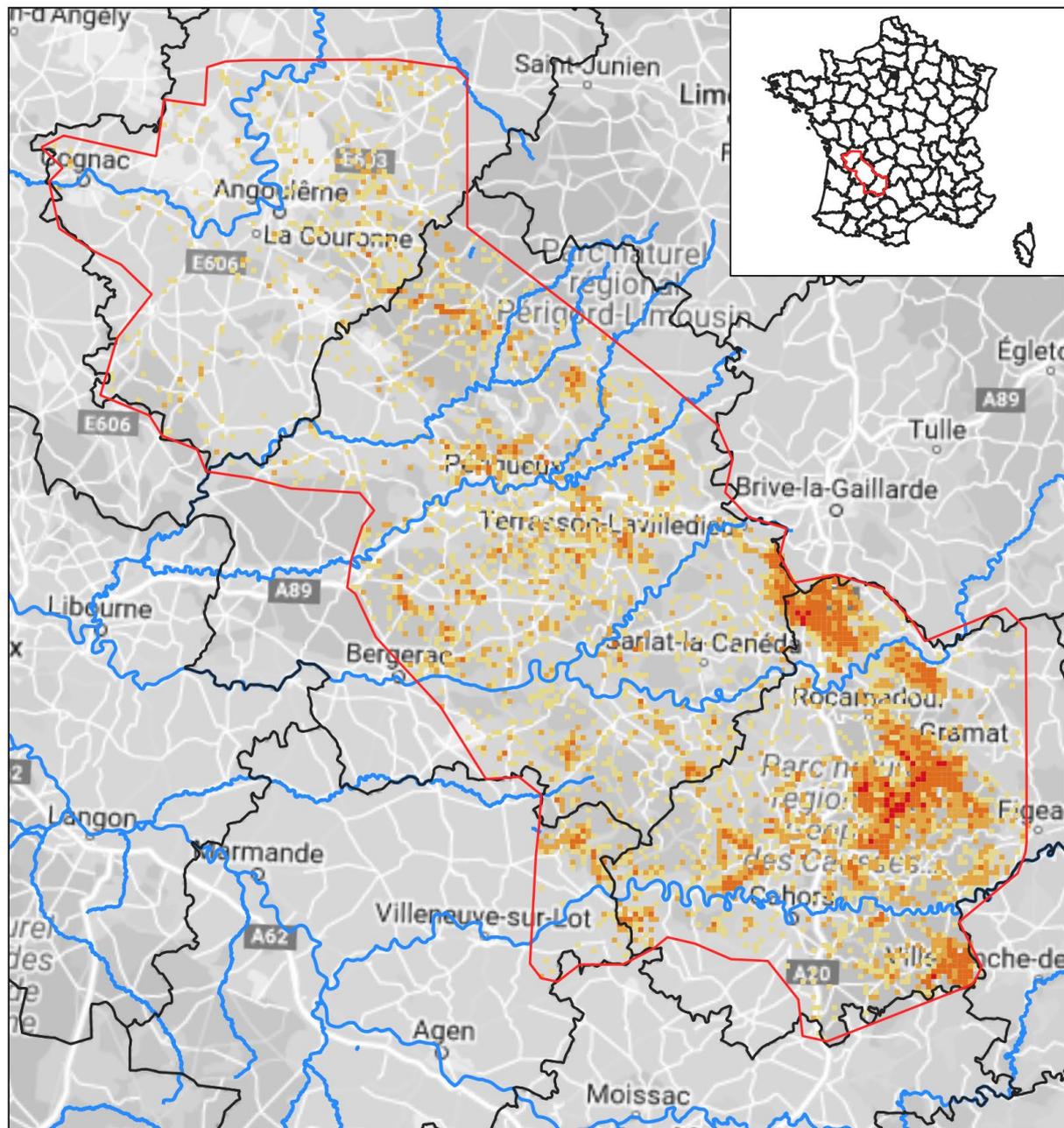
Parc des Causses du Quercy : <https://www.parc-causses-du-quercy.fr>

SIGES Aquitaine : <https://sigesaqi.brgm.fr>



## **Annexe 1 Cartes complémentaires**

Densité de dolines potentielles\* situées sur un secteur naturel ou agricole sur l'emprise Eaux-Scars (est du bassin aquitain)

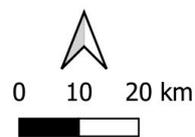


Densité (au km<sup>2</sup>) de dolines potentielles

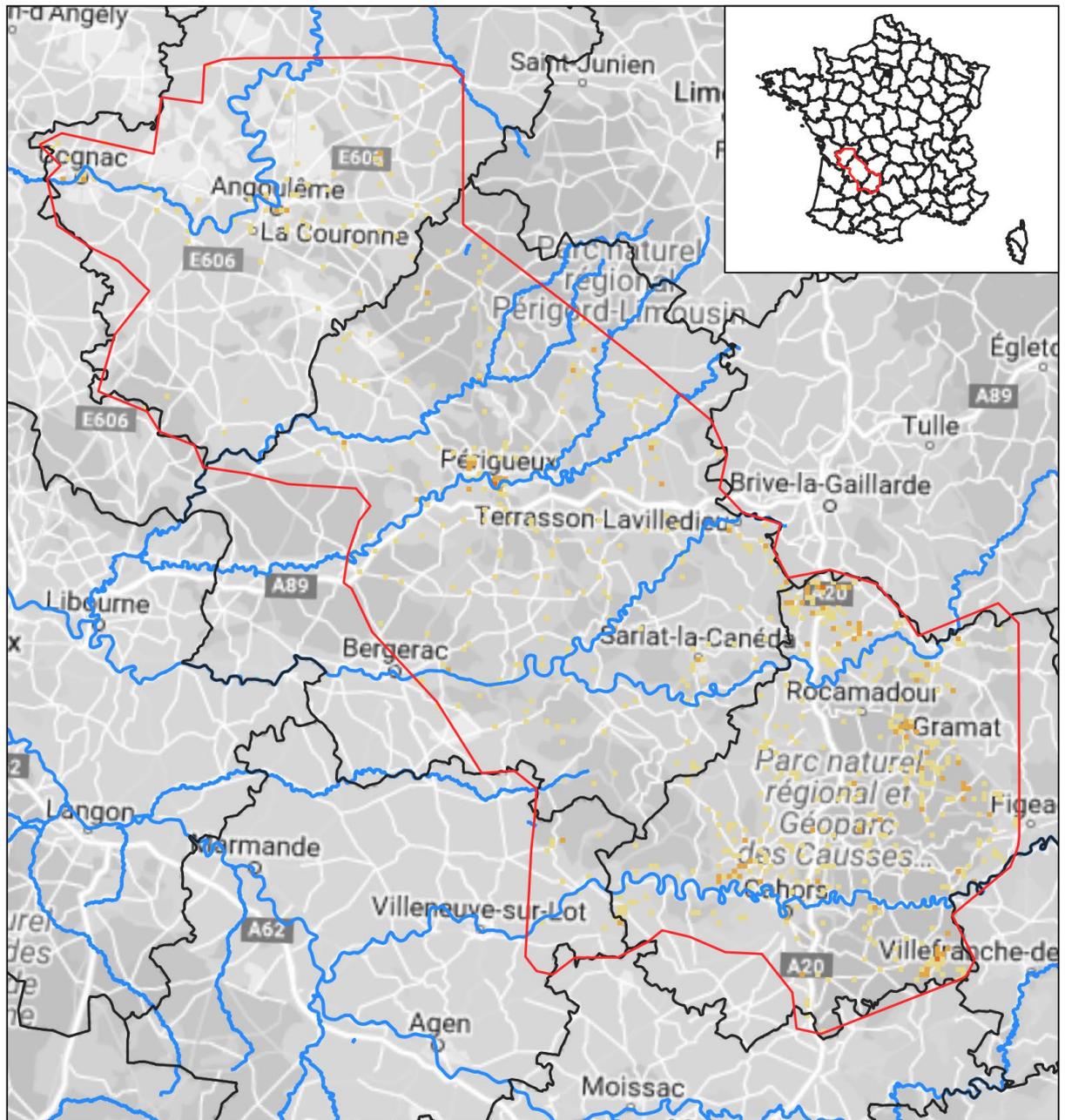
- 0
- 1
- 2 - 5
- 6 - 20
- 21 - 100

- Principaux cours d'eau
- Département
- Emprise

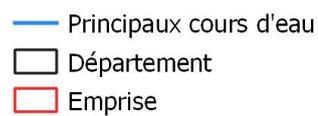
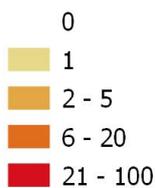
\* indice de circularité  $\geq 0,6$



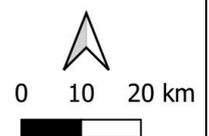
Densité de dolines potentielles\* situées à proximité de bâtiments sur l'emprise Eaux-Scars (est du bassin aquitain)



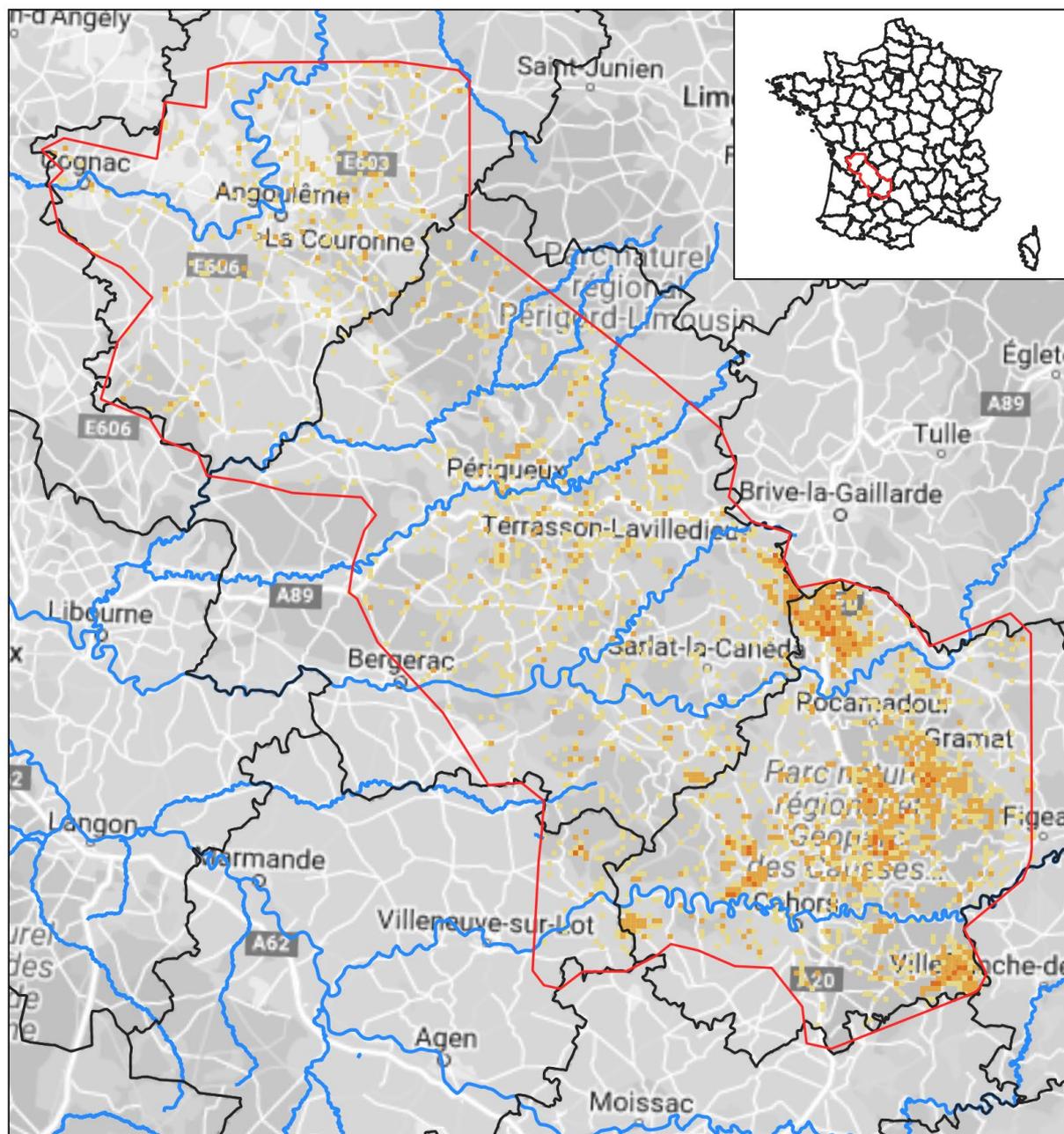
Densité (au km<sup>2</sup>) de dolines potentielles



\* indice de circularité  $\geq 0,6$



### Densité de dolines potentielles\* situées à proximité de routes sur l'emprise Eaux-Scars (est du bassin aquitain)

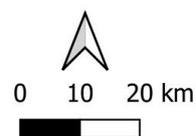


Densité (au km<sup>2</sup>) de dolines potentielles

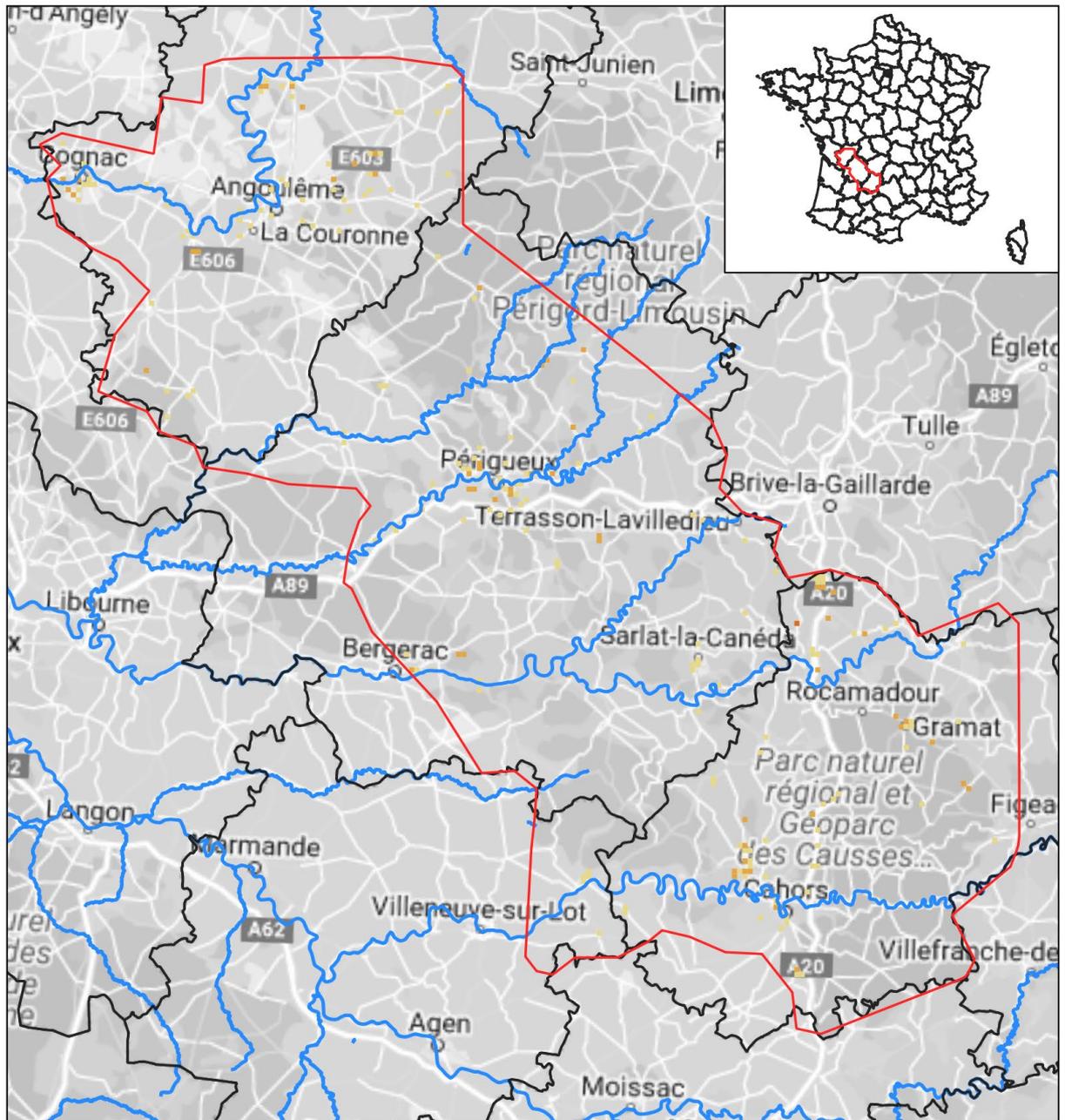
- 0
- 1
- 2 - 5
- 6 - 20
- 21 - 100

- Principaux cours d'eau
- Département
- Emprise

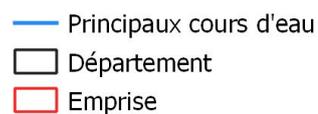
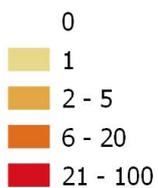
\* indice de circularité  $\geq 0,6$



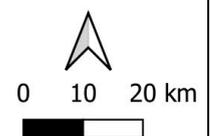
Densité de dolines potentielles\* situées dans un secteur artificialisé (CLC18) sur l'emprise Eaux-Scars (est du bassin aquitain)



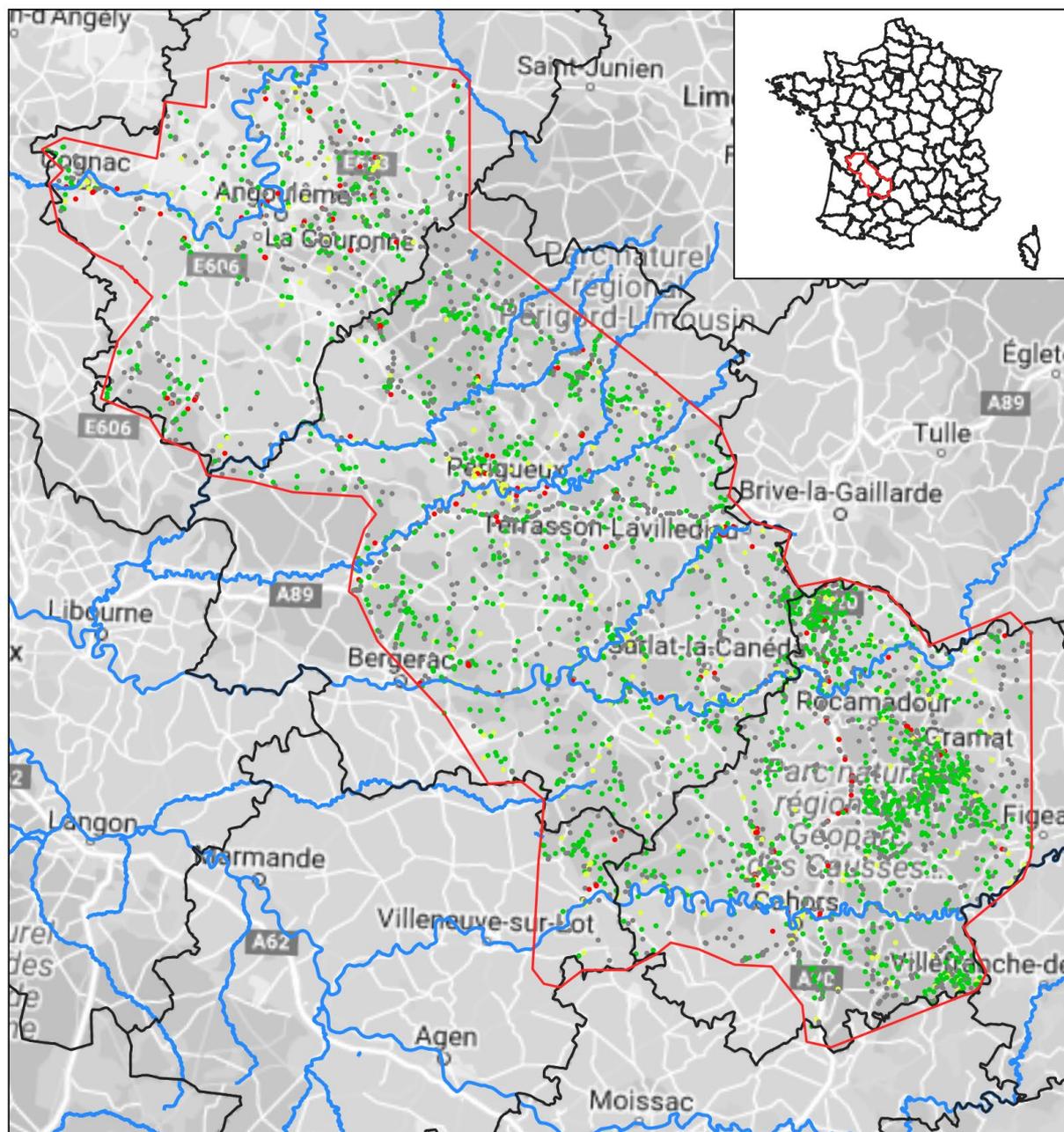
Densité (au km<sup>2</sup>) de dolines potentielles



\* indice de circularité  $\geq 0,6$



### Répartition spatiale des dolines douteuses\* sur l'emprise Eaux-Scars (est du bassin aquitain)

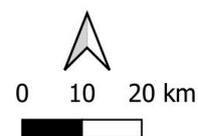


**Dolines douteuses**

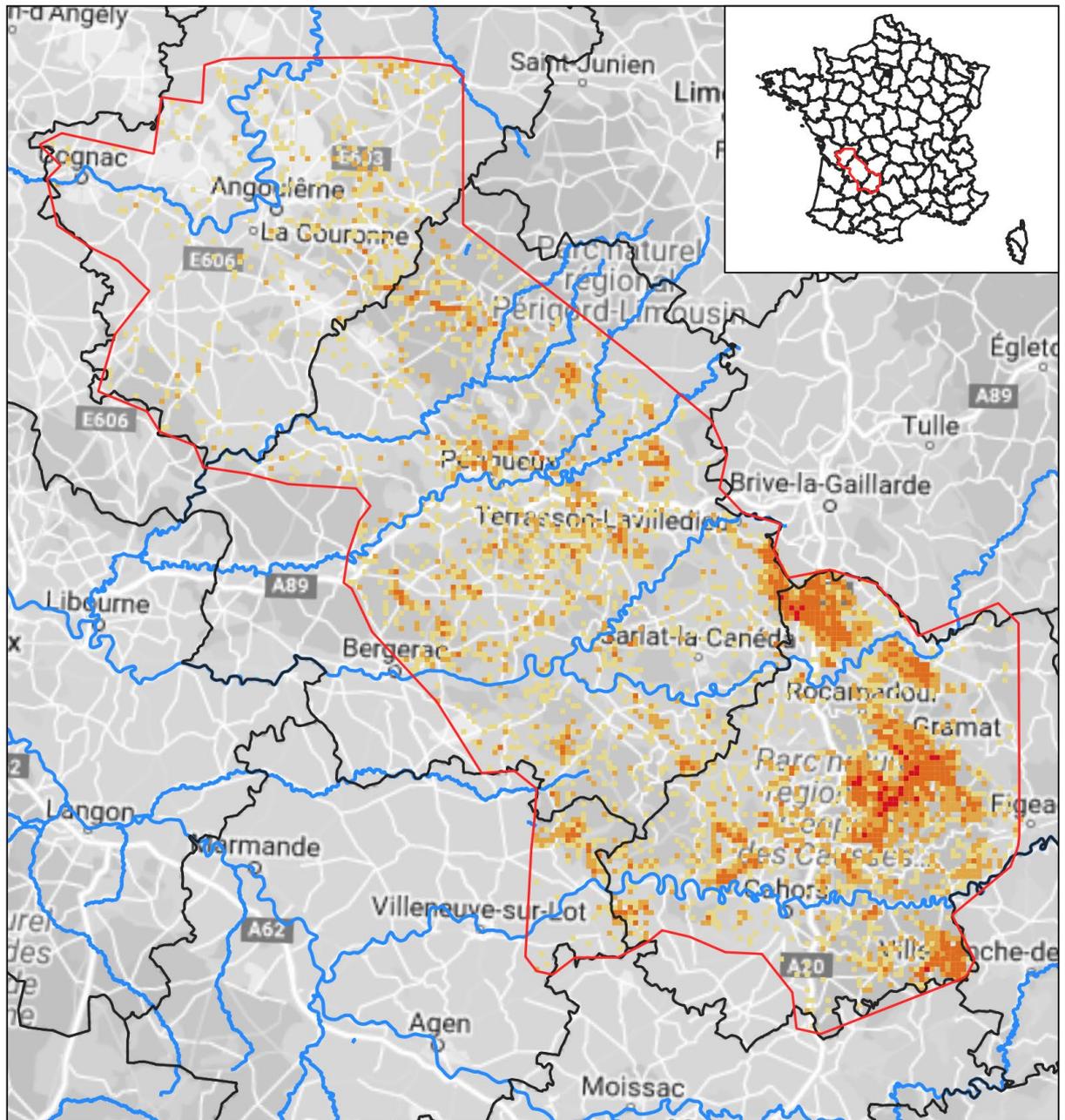
- dans un secteur naturel ou agricole (CLC18)
- à proximité d'un bâtiment
- à proximité d'une route
- dans un secteur artificialisé (CLC18)

- Principaux cours d'eau
- Département
- Emprise

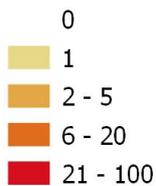
\* indice de circularité < 0,6



### Densité de dolines douteuses\* sur l'emprise Eaux-Scars (est du bassin aquitain)

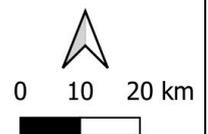


Densité (au km<sup>2</sup>) de dolines douteuses



— Principaux cours d'eau  
□ Département  
□ Emprise

\* indice de circularité < 0,6





**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 - Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction régionale Nouvelle-Aquitaine - Site de Bordeaux**

Parc Technologique Europarc

24 avenue Léonard de Vinci

33600 - Pessac - France

Tél. : 05 57 26 52 70

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**