



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Étude hydraulique et hydrogéologique du bassin versant de la Retrève. 1. Inventaire et analyse des indices karstiques.

Rapport Final

BRGM/RP-71330-FR

21 décembre 2021

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

Gildas N., Gutierrez A., Masson F.

Avec la collaboration de Langlois D. et Brugeron C.

Vérificateur :

Nom : Salquère D.

Fonction : Directeur régional délégué

Date : 21/12/2021

Signature :

Approbateur :

Nom : Saada A.

Fonction : Directeur régional
Centre - Val de Loire

Date : 03/01/2022

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

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 : Hydrogéologie ; Gouffre ; Forêt d'Orléans ; Karst ; SIG ; LiDAR

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

Gildas N., Gutierrez A., Masson F. (2021) – Étude hydraulique et hydrogéologique du bassin versant de la Retrève. 1. Inventaire et analyse des indices karstiques. Rapport Final. **BRGM/RP-71330-FR**, 108 p., 34 fig., 7 tabl., 5 ann. dont 1 sur USB, 1 carte.

Synthèse

Le travail présenté dans ce rapport s'intègre dans l'étude hydraulique et hydrogéologique du bassin versant de la Retrève (convention de recherche et de développement signée avec l'État (DDT), le Département du Loiret, la Métropole d'Orléans, COFIROUTE, la Communauté de communes de la Beauce Loirétaine, la Communauté de communes de la Forêt, notifiée le 12 décembre 2018). Ce rapport rend compte de la **tâche 1 : Inventaire et analyse des indices karstiques dans le bassin versant de la Retrève**.

Le sol de la forêt d'Orléans et de ses environs est parsemé de **dépressions** qui résultent pour la plupart de **phénomènes karstiques** (altération globalement prononcée mais hétérogène des roches calcaires suite à leur dissolution par l'eau). Un **inventaire** et une **caractérisation** de ces formes ont été effectués afin d'identifier leur origine et d'évaluer leur rôle potentiel dans l'engouffrement des eaux de surface vers la nappe de Beauce. Cette configuration leur confère en effet *a minima* un rôle de stockage des eaux arrivant sur le secteur, et, pour certains gouffres absorbant, un rôle supplémentaire d'infiltration.

Une **recherche bibliographique** montre que l'existence de ces dépressions est connue de longue date, en particulier grâce aux premiers inventaires d'Archambault (1964) et de Lorain (1973), et surtout grâce à 70 ans d'observations du Groupe Spéléologique Orléanais (GSO). Les spéléologues, qui ont exploré ces gouffres en détail, apportent une contribution majeure à cette étude (voir en particulier l'annexe 5 qui décrit près de 130 gouffres et dolines, dont 79 concernent le secteur étudié ici du bassin versant amont de la Retrève). De même, la Fédération Française de Course d'Orientation et le syndicat du Nan ont aidé à compléter cet inventaire.

Cette connaissance de terrain a été précisée par l'**analyse de deux images LiDAR**, dont une acquise en 2019 dans le cadre de ce projet. Ces images fournissent un modèle numérique de terrain de haute précision. Plusieurs milliers de dépressions pluri décimétriques et endoréiques (sans exutoire), y ont été identifiées, pour en retenir, après un tri et des contrôles de terrain, un nombre de **820**.

Ces 820 indices karstiques ont ensuite été caractérisés par des indicateurs morphologiques. Leur **contour** est généralement **oblong** (dimensions médianes : 30 m x 20 m) et leur **profondeur majoritairement inférieure à 3 m** (médiane 0,9 m). Cette statistique approximative ne doit cependant pas masquer d'importantes **disparités** :

- leurs **volumes** s'étalent ainsi globalement **entre 15 et 2000 m³** et atteignent **plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes pour les plus grandes formes**. Les quatre « méga-structures » des Ravins des Grands Gouffres, des Fosses Guillaume, des Gouffres des Pas-Ronds et des Orfosses Mouillées cumulent à elles seules un volume de 146 000 m³, soit près du quart du volume total des 820 indices karstiques retenus ;
- leur **densité** moyenne est de **11 indices par km²** mais on remarque qu'elles sont **plus nombreuses à proximité des vallées sèches** qu'à proximité des lignes de partage des eaux (probablement du fait de sollicitations plus fortes à ces endroits) ou que dans les zones anthropisées (peut-être du fait de rebouchages systématiques dans ces secteurs).

L'**analyse des pentes** autour du point le plus bas a enfin été utilisée pour distinguer les **gouffres** (qui absorbent de l'eau par une perte en creux) des **dolines à fond plat** où l'infiltration est lente ou inexistante (formant alors des mares). Ces deux catégories jouent un rôle différent sur l'hydraulicité de la Retrève, ce qui sera décrit dans un rapport ultérieur traitant de l'hydrologie.

Sommaire

1. Préambule.....	9
1.1. OBJECTIFS	9
1.2. TERMES UTILISÉS.....	9
2. Informations préexistantes.....	11
2.1. LE TRAVAIL DES SPÉLÉOLOGUES : 70 ANS D'OBSERVATIONS.....	11
2.2. LES INVENTAIRES ET CARTES DES ANNÉES 1960 ET 1970	13
2.2.1. Inventaire d'Archambault (1964)	13
2.2.2. Inventaire de Lorain (1973)	15
2.3. AUTRES ÉLÉMENTS DISPONIBLES	17
2.4. RÉSUMÉ DES CONNAISSANCES ET PERSPECTIVES (LIDAR)	17
3. Méthodes d'étude et éléments utilisés	19
3.1. PRISE EN COMPTE DES INFORMATIONS PRÉEXISTANTES.....	19
3.2. ÉTAPES DE L'INVENTAIRE	19
3.2.1. Étape 1 : Détection automatique et caractérisations des dépressions	19
3.2.2. Étape 2 : Tri et compléments visuels.....	20
3.2.3. Étape 3 : Visites de terrain	22
3.3. COMPLÉMENTS CONCERNANT LA VALLÉE DU NAN	23
3.3.1. Configuration de la vallée.....	23
3.3.2. Visites de terrain (gouffres et autres observations).....	24
3.4. CARACTÉRISATIONS HYDROGÉOLOGIQUES	27
4. Résultats et analyses	33
4.1. INVENTAIRE DES INDICES KARSTIQUES.....	33
4.2. CARACTÉRISTIQUES DES INDICES KARSTIQUES RETENUS.....	37
4.3. IDENTIFICATION DES FORMES KARSTIQUES ABSORBANTES	42
4.4. GOUFFRES AMÉNAGÉS	45
5. Conclusion.....	47
6. Bibliographie	49
6.1. GÉOLOGIE RÉGIONALE ET FORÊT D'ORLÉANS.....	49
6.2. MÉTHODES DE DÉTECTION.....	50
6.3. ÉVÈNEMENT DU PRINTEMPS 2016.....	51
6.4. AUTRES	51

Liste des figures

Figure 1 : Définition de la zone d'étude	9
Figure 2 : Carte de la Retrève et de 18 cavités étudiées par le GSO (Moreau et Thomas, 1990)	12
Figure 3 : Carte de la Retrève et de onze gouffres étudiés par le GSO (Moreau, 2002).....	13
Figure 4 : Carte des gouffres de la forêt d'Orléans établie par Archambault (1964)	14
Figure 5 : Carte partielle des observations du LR Blois (Lorain, 1973).....	16
Figure 6 : Esquisse topographique de la vallée de la Retrève (Lorain, 1973)	16
Figure 7 : Localisation synthétique des informations préexistantes	18
Figure 8 : Carte des gouffres de la vallée du Nan (amont)	24
Figure 9 : Exemple de traitement des observations de D. Langlois	28
Figure 10 : Coupe du forage BSS001ABDN - Étang de la Retrève	29
Figure 11 : Les Fosses Guillaume (FG1)	30
Figure 12 : Fontis à l'exutoire de l'étang de la Retrève.....	30
Figure 13 : Hydrologie de 15 gouffres de la forêt d'Orléans, actifs lors de l'observation (d'après D. Langlois).....	32
Figure 14 : Cartes des 820 indices karstiques retenus (les centroïdes sont représentés ; leur taille est pondérée par la profondeur de l'indice).....	35
Figure 15 : Principales caractéristiques des 820 indices karstiques retenus	39
Figure 16 : Carte de densité des 820 indices karstiques retenus	40
Figure 17 : Position des 820 indices karstiques sur fond de carte IGN.....	41
Figure 18 : Position des 820 indices karstiques sur fond de carte d'occupation du sol (Carte BRGM n°363)	41
Figure 19 : Position des 820 indices karstiques sur fond de carte géologique (Carte BRGM n°363).....	42
Figure 18 : Exemple de gouffre absorbant : gouffre du champs de Tir 1 (photo D. Langlois) ...	43
Figure 19 : Exemple de doline à fond plat et sec : doline de l'Etang-de la Retrève n°2	43
Figure 20 : Distribution statistique de la pente maximale dans un rayon de 1,5 m autour du minimum altimétrique de la forme.	44
Figure 21 : Aménagement de la tête du gouffre des Diableaux 2 par le CDS45	45
Figure 22 : Grille donnant sur un forage absorbant dans le fossé du Renard	45
Figure 23 : Mise en évidence des dépressions par méthode dite du "Diff_Fill" (Cartannaz et Dewez (2015)	55
Figure 24 : Model Builder ARCGIS pour appliquer la méthode "Diff_Fill" à un MNT	55
Figure 25 : Simplification des formes extraites	56
Figure 26 : Mise en évidence à dire d'expert (courbes rouge) de dolines aux sein d'une autre doline détectée automatiquement (courbes vertes).....	56
Figure 27 : Caractéristiques morphologiques liées à la forme de la dépression	57

Figure 28 : Caractéristiques morphologiques calculées à partir de la forme et du MNT	58
Figure 29 : Cercottes, ancienne carrière à ciel ouvert.....	64
Figure 30 : Cercottes, fossés le long de la RD 2020.....	64
Figure 31 : Gidy, descentes de garages	64
Figure 32 : Limite Fleury-les-Aubrais chateau, thalweg coupé par la RD97	64
Figure 33 : Chevilly, centre d'enfouissement de déchets	64
Figure 34 : Zone bombardée près de Bricy.....	65

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des dépressions d'origine non karstique sur le secteur d'étude.....	21
Tableau 2 : Principales visites de sites.....	22
Tableau 3 : Gouffres et points d'intérêt sur les lits du Nan et du Petit Nan.....	25
Tableau 4 : Principales valeurs statistiques des dimensions des 820 indices karstiques retenus	37
Tableau 5 : Formes karstiques les plus volumineuses dans le bassin de la Retrève en amont de Gidy	38
Tableau 6 : Estimation du nombre de gouffres actifs.....	44
Tableau 7 : Principaux gouffres équipés dans le bassin de la Retrève.....	46

Liste des annexes

Annexe 1 : Identification des formes karstiques.....	53
Annexe 2 : Artefacts présents dans le mnt	61
Annexe 3 : Carte des 820 indices karstiques retenus	66
Annexe 4 : Observations hydrologiques sur 15 gouffres.....	69
Annexe 5 : Fiches d'observations spéléologiques	105

1. Préambule

1.1. OBJECTIFS

Les objectifs de cette tâche sont de recenser les dolines et les gouffres sur la zone d'étude et de les caractériser vis-à-vis de leur rôle dans l'engouffrement des eaux de surface vers la nappe des calcaires de Beauce. La zone d'étude pour cet inventaire est le bassin-versant de la Retrève jusqu'au centre-bourg de la commune de Gidy (Figure 1). Sa surface est de 73 km² environ.

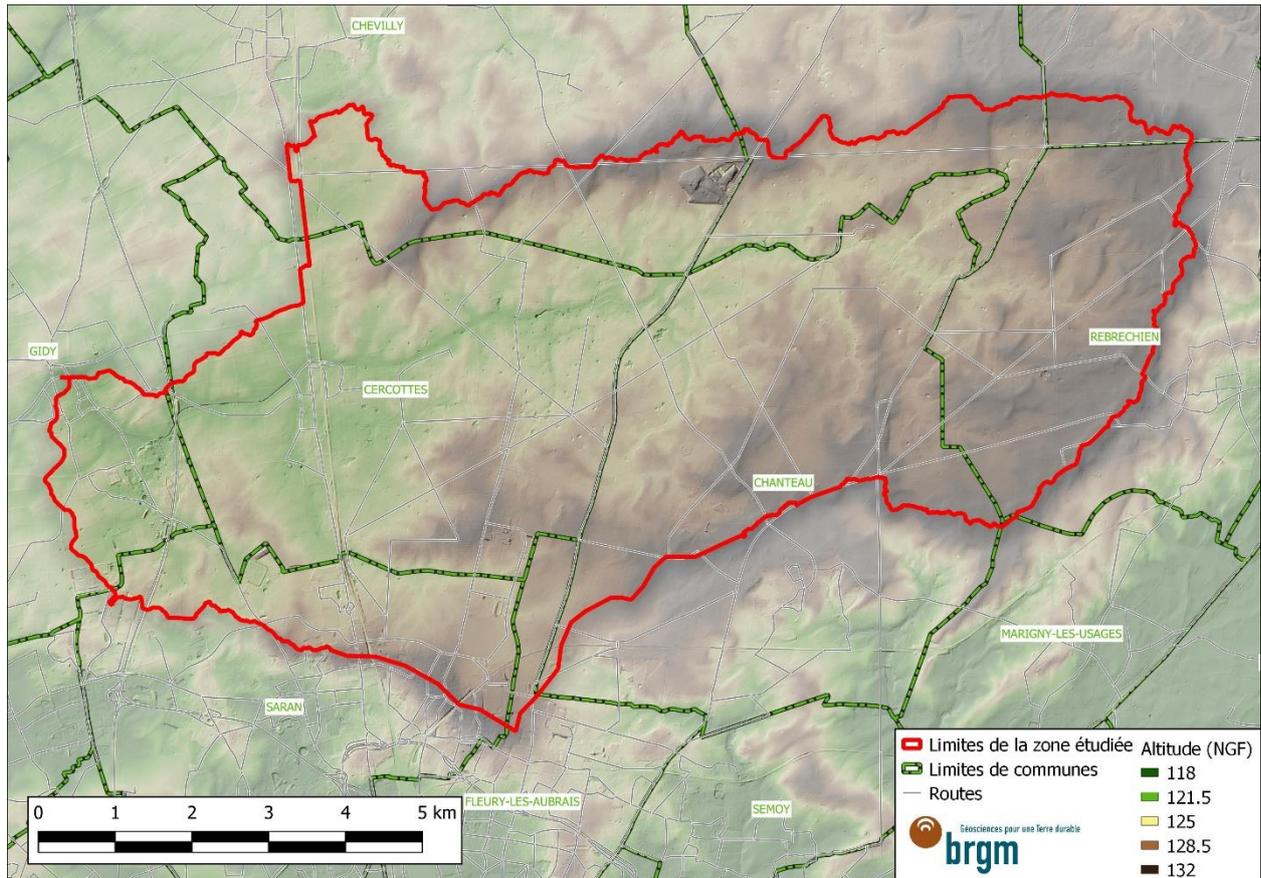


Figure 1 : Définition de la zone d'étude.

1.2. TERMES UTILISÉS

La signification des termes utilisés en domaine karstique peut varier selon l'angle de vue sous lequel ils sont utilisés. Les définitions données ci-dessous, usuellement admises par la communauté scientifique, sont celles employées dans le travail qui suit.

Karst : Paysage comprenant des formes situées à la surface (dolines, gouffres, grottes, pertes, vallées sèches, etc.) et des formes souterraines (galeries, réseaux, etc.). L'ensemble est associé à un régime hydrologique spécifique, résultant de l'altération et de la dissolution des roches carbonatées.

Doline : Dépression de la surface du sol, fermée, de dimensions métriques à hectométriques.

Indice (karstique) : Forme à la surface du sol pouvant a priori être d'origine karstique.

Gouffre : Cavité naturelle de taille relativement grande (suffisante pour une exploration), débutant par un puits vertical dans lequel l'eau peut s'engouffrer pour rejoindre le réseau karstique souterrain. En forêt d'Orléans toutefois, le nom de gouffre est donné par les spéléologues à toute dépression dans laquelle l'eau de ruissellement s'engouffre dans un conduit en connexion avec un réseau karstique, par opposition aux dolines où l'eau percole lentement. La distinction est parfois délicate car des dolines peuvent s'ouvrir et devenir gouffres et des gouffres se colmater et devenir doline.

Grotte : Cavité pénétrable débutant par un conduit relativement horizontal. Il y a peu de grottes à proprement parler en forêt d'Orléans, même si de nombreuses cavités (cf. fiches en Annexe 5) ont pu être pénétrées après désobstruction. Le gouffre des Sans-Ronce, régulièrement entretenu par les spéléologues, peut être considéré comme l'unique grotte visitable dans les conditions actuelles.

Ouvala : Vaste dépression résultant de la coalescence de plusieurs dolines. Certaines des grandes formes de la forêt d'Orléans, sans être spectaculaires, correspondent à cette définition (en particulier : les fosses Guillaume, le Ravin des Grands Gouffres ou le gouffre des Pas Ronds).

Perte (karstique) : Disparition partielle ou totale d'un cours d'eau dans un gouffre.

Vallée sèche : Vallée privée d'écoulement d'eau pérenne.

2. Informations préexistantes

2.1. LE TRAVAIL DES SPÉLÉOLOGUES : 70 ANS D'OBSERVATIONS

Les travaux des spéléologues et en particulier du Groupe Spéléologique Orléanais (GSO) sont très intéressants pour l'objectif recherché ici. Ils concernent avant tout les gouffres à potentiel « spéléologique » (à savoir pouvant donner lieu à une exploration souterraine). Les observations effectuées sont souvent précises (avec localisation, dimensions, descriptions détaillées, etc.). Elles couvrent par ailleurs une période de 70 ans (elles ont démarré pendant les années 1950 et se poursuivent encore un peu aujourd'hui). Les explorations souterraines apportent enfin de précieuses informations sur la configuration du réseau karstique sous-jacent et des modes d'absorption de l'eau par les gouffres.

Les observations et explorations effectuées ont donné lieu à des publications :

- de nombreux articles s'intéressent à certains gouffres et formes (cf. bibliographie), notamment pour ce qui concerne leur configuration (en surface et en profondeur en cas d'exploration), leur comportement hydrogéologique, ainsi que des aspects secondaires à ceux étudiés ici (paléontologie et archéologie) ;
- en 1990, dans l'article « *Le karst de la forêt d'Orléans* », Moreau et Thomas décrivent la configuration et le fonctionnement de la Retrève et présentent les principaux gouffres connus (une vingtaine – cf. carte en Figure 2) ;
- en 2002, dans l'article « *Les gouffres du Nord d'Orléans* », Moreau reprend et développe les éléments fournis dans l'article de 1990, notamment pour ce qui concerne la géologie du secteur, la configuration et le fonctionnement des rivières et vallées sèches (la Conie, la Retrève, le Nant), les aménagements présents, l'histoire, les gouffres et les travaux qui y ont été menés par le GSO (cf. Figure 3 et résumé ci-dessous) ;
- lors des visites de gouffres, les spéléologues du GSO notent par ailleurs leur état hydrique, à savoir s'ils sont secs ou infiltrant. Dans ce dernier cas, le débit d'infiltration est estimé. Ces observations, à ce jour inédites, ont été confiées au BRGM par Daniel Langlois et sont intégrées dans ce rapport et en annexe 5.

De la synthèse de Moreau de 2002, on pourra retenir les éléments suivants :

Sur la morphologie des gouffres : « *Ce sont [...] des dépressions, en forme de cuvette ou d'entonnoir, parfois assez vastes [...] en superficie (des diamètres de 10 à 20 mètres sont fréquents) mais qui atteignent rarement plus de 5 à 6 mètres de profondeur apparente.* »

Sur le fonctionnement hydrogéologique du secteur : « *Lorsque les sombres nuages d'automne ont saturé le sol de leurs averses drues, les perturbations hivernales suivantes emplissent les fossés de drainage de la forêt. Ces derniers coulent alors, comme des ruisseaux, dans les sous-bois [...] ; mais leurs courants vagabonds achèvent, la plupart du temps, leur voyage, d'une manière aussi spectaculaire qu'inattendue : ils dévalent dans les gouffres et s'y perdent, soit rapidement, par un orifice plus ou moins obstrué, soit lentement, à travers un sas épais d'alluvions.*

Ces écoulements régressent et s'interrompent, bien sûr, dès que les pluies se raréfient ou cessent, ou lorsque de fortes gelées surviennent brusquement. [...] Si au contraire, les pluies persistent exceptionnellement [...], l'eau prend véritablement possession de la forêt. [...] Et des événements nouveaux vont alors se produire : les gouffres, incapables d'ingurgiter les flots

continus qui s'y précipitent en abondance, se remplissent, sont peu à peu noyés et, finalement, débordent, parfois en chaîne, dans un même secteur.

Les courants qui s'en évadent, grossis d'autres apports, finissent par converger au creux d'anciennes vallées et forment de véritables et importantes rivières ; celles-ci peuvent même s'aventurer hors de la forêt, vers la Beauce voisine [...].

Ainsi naissent, pour quelques heures, quelques jours, la Retrève et le Nant, cours d'eau intermittents bien connus dans la région, qui s'épuiseront et disparaîtront dans leurs lits incertains, lentement bus par la terre des champs ou rapidement résorbés par les gouffres ayant retrouvé leur capacité d'absorption. »

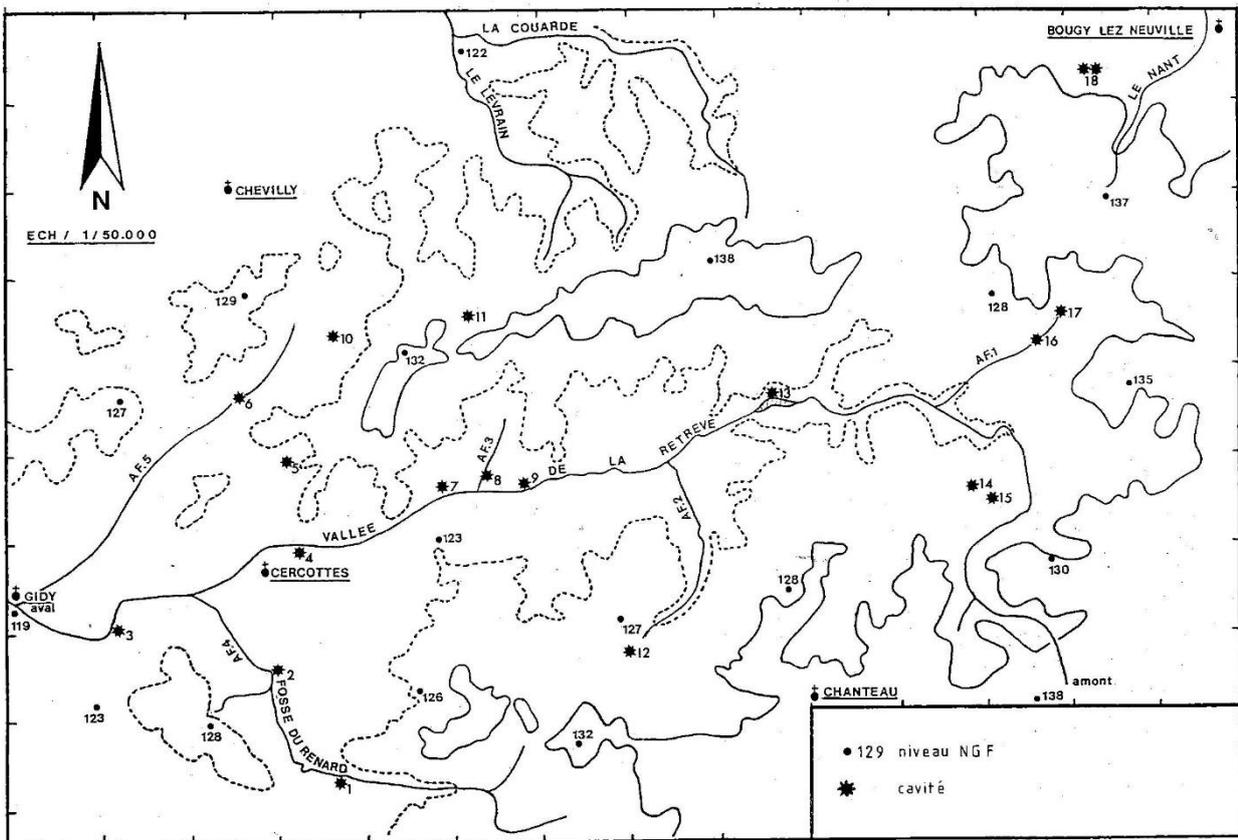


Figure 2 : Carte de la Retrève et de 18 cavités étudiées par le GSO (Moreau et Thomas, 1990).
Les numéros des gouffres renvoient à une liste à consulter dans l'article de 1990.

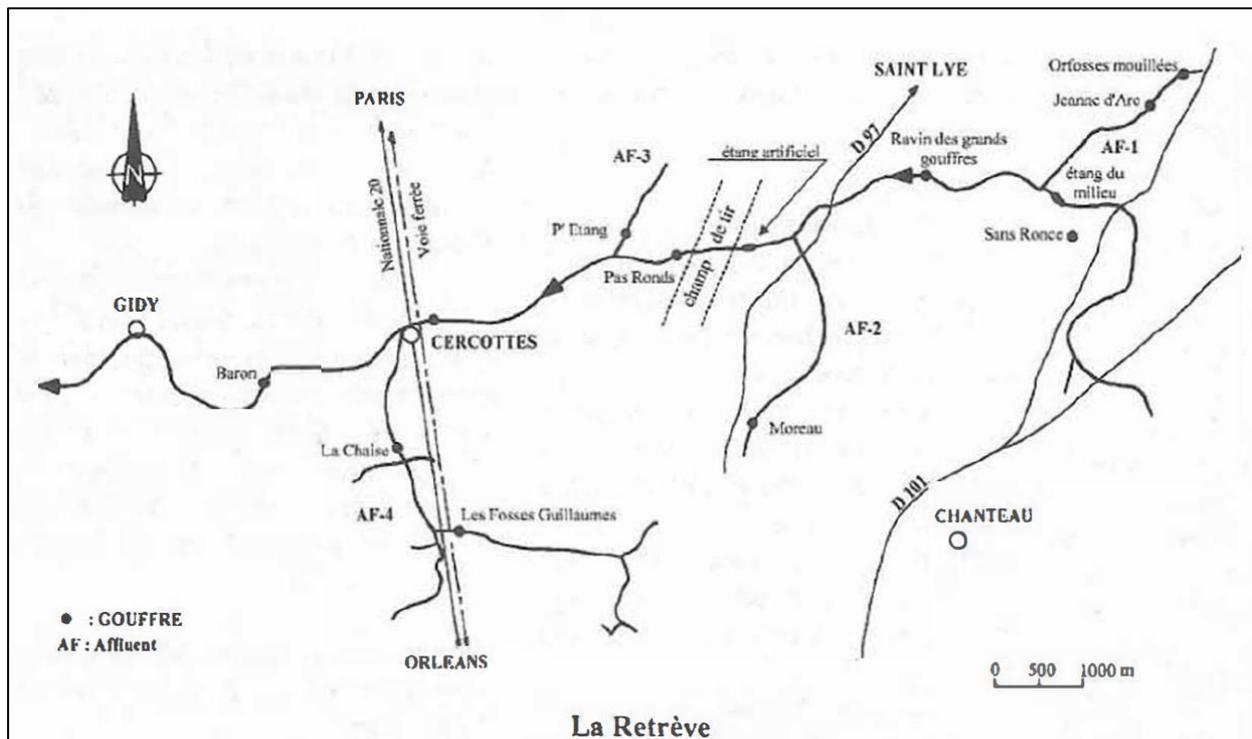


Figure 3 : Carte de la Retrève et de onze gouffres étudiés par le GSO (Moreau, 2002).

2.2. LES INVENTAIRES ET CARTES DES ANNÉES 1960 ET 1970

Deux inventaires des dépressions (avec cartes) ont été réalisés dans les années 1960 et 1970.

2.2.1. Inventaire d'Archambault (1964)

En 1964, dans le cadre d'un mémoire d'étude, Archambault fournit un inventaire, une classification, une carte et une analyse des « *dépressions fermées au Nord-est d'Orléans* » (Figure 4). Le secteur étudié se situe à l'Est de la voie ferrée ; il concerne : au sud, la forêt et au nord, les terrains agricoles situés en lisière (communes de Chevilly, Saint-Lyé-la-Forêt, Villereau, Bougy-lez-Neuville, Neuville-aux-Bois).

L'inventaire se base sur l'examen de la carte au 1/25 000 et sur une exploration de terrain. Cette dernière a entre autres permis de mesurer les principales dimensions des dépressions (longueur, largeur, profondeur). Un tri a été réalisé et les dépressions d'origine manifestement anthropique (« sablières, marnières, cratères pyrotechniques ») ont été écartées. 411 dépressions sont ainsi recensées sur une superficie d'environ 130 km², soit une densité moyenne de 3,2 dépressions par km². Leur localisation est reportée sur la carte (Figure 4). L'incertitude de localisation est estimée à 50 m environ. Les fiches établies pour chaque dépression ne sont malheureusement pas disponibles.

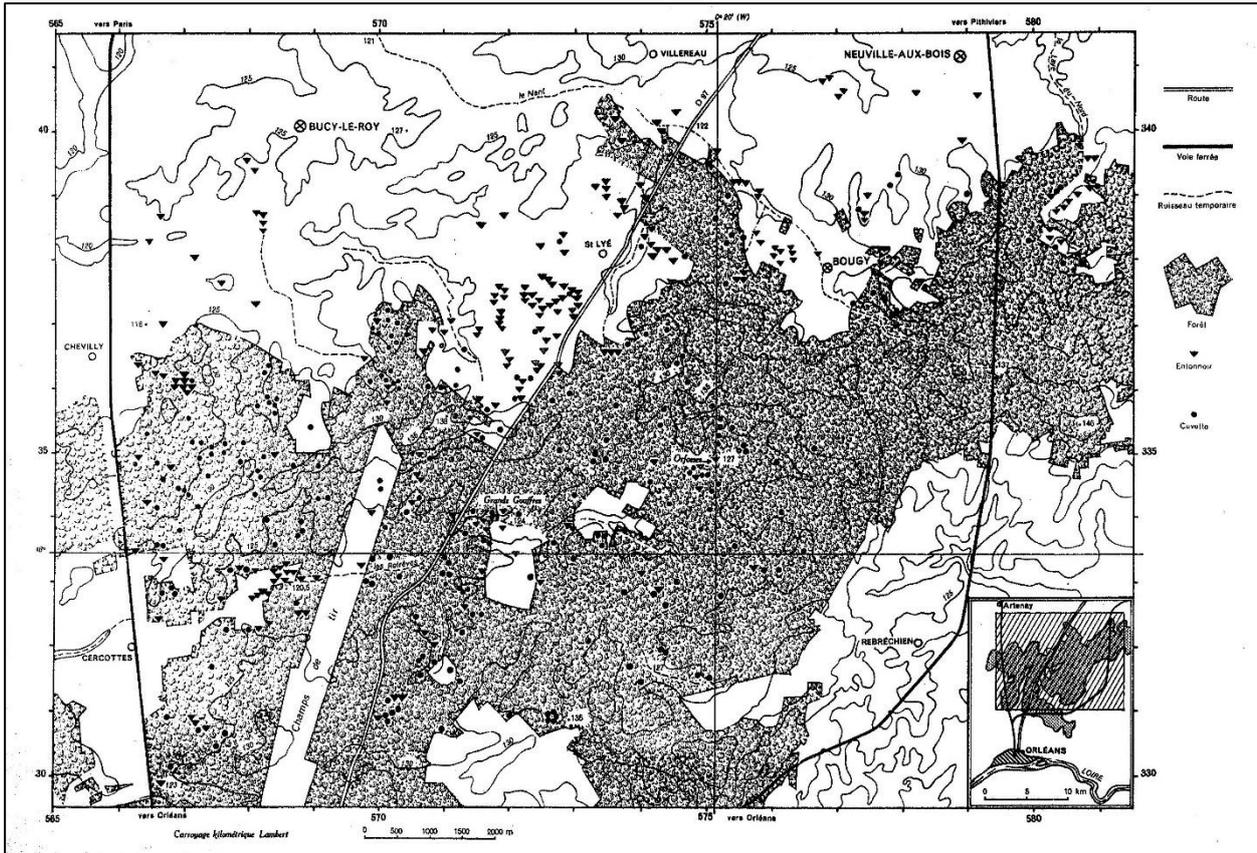


Figure 4 : Carte des gouffres de la forêt d'Orléans établie par Archambault (1964).

La classification des dépressions distingue des « entonnoirs = cône à sommet placé en bas » et des « cuvettes = dépression à fond horizontal et à bords plats ou légèrement concaves ». On retiendra également les éléments suivants :

- « Quelques dépressions se présentent isolément. Quand elles sont groupées, elles forment des alignements ou des essaims, avec parfois coexistence, à faible distance les unes des autres, de formes différentes : cuvettes et entonnoirs. » ;
- « Si beaucoup de dépressions sont réparties apparemment au hasard, un certain nombre semble nettement en rapport avec les ruisseaux temporaires de la région. » ;
- « Les dépressions apparaissent beaucoup plus nombreuses dans la forêt et à sa proximité immédiate que dans les champs. » ;
- chaque dépression est associée à une lithologie mais le critère sur lequel se base ce choix (carte géologique ou observation systématique ?) n'est pas spécifié. Cette analyse n'est par conséquent pas reprise ici.
- les dimensions des dépressions sont globalement les suivantes (après simplification) :

	Minimum	Médiane	Maximum
Longueur (m)	3	25-30	300
Largeur (m)	2	20-25	125
Profondeur (m)	0,3	1,5	9

Les observations de certaines des plus grandes formes sont également détaillées (notamment les Orfosses Mouillées et le Ravin des Grands Gouffres). Elles ne sont pas reprises ici.

2.2.2. Inventaire de Lorain (1973)

Dans les années 1970, pour l'aménagement de l'Autoroute A10, le Laboratoire Régional de Blois (LR Blois - Lorain, 1973) a visiblement repris le travail d'Archambault ou aurait procédé à un travail similaire. Quatre types de dépressions sont distingués :

- les gouffres ;
- les dépressions à fond plat et humide ;
- celles subsphériques à fond sec ;
- celles artificielles.

254 dépressions sont recensées. La surface étudiée n'est pas clairement définie, de sorte que les deux cartes fournies (Figure 5 et Figure 6) ne représentent vraisemblablement pas toutes les observations. Là non plus, le détail de ces observations n'est pas disponible.

De l'analyse effectuée, on retiendra notamment l'information suivante : « [...] *le nombre de dépressions liées à la vallée [de la Retrève], c'est-à-dire au-dessous de la cote 125 est très nettement dominant :*

- *au-dessus de la cote 125 = 35 [dépressions], soit 21,2 % ;*
- *au-dessous de la cote 125 = 130 [dépressions], soit 78,8 %.* ».

On peut ici ajouter que le choix de la cote 125 fait par Lorain pour analyser la répartition des dépressions est pertinent. Après analyse du MNT, il apparaît en effet que cette valeur est la cote médiane du secteur étudié (cote hypsométrique). Ainsi, l'analyse de Lorain traduit une corrélation entre les axes du réseau hydrographique principal (points bas de la topographie) et la densité des dolines (Figure 6).

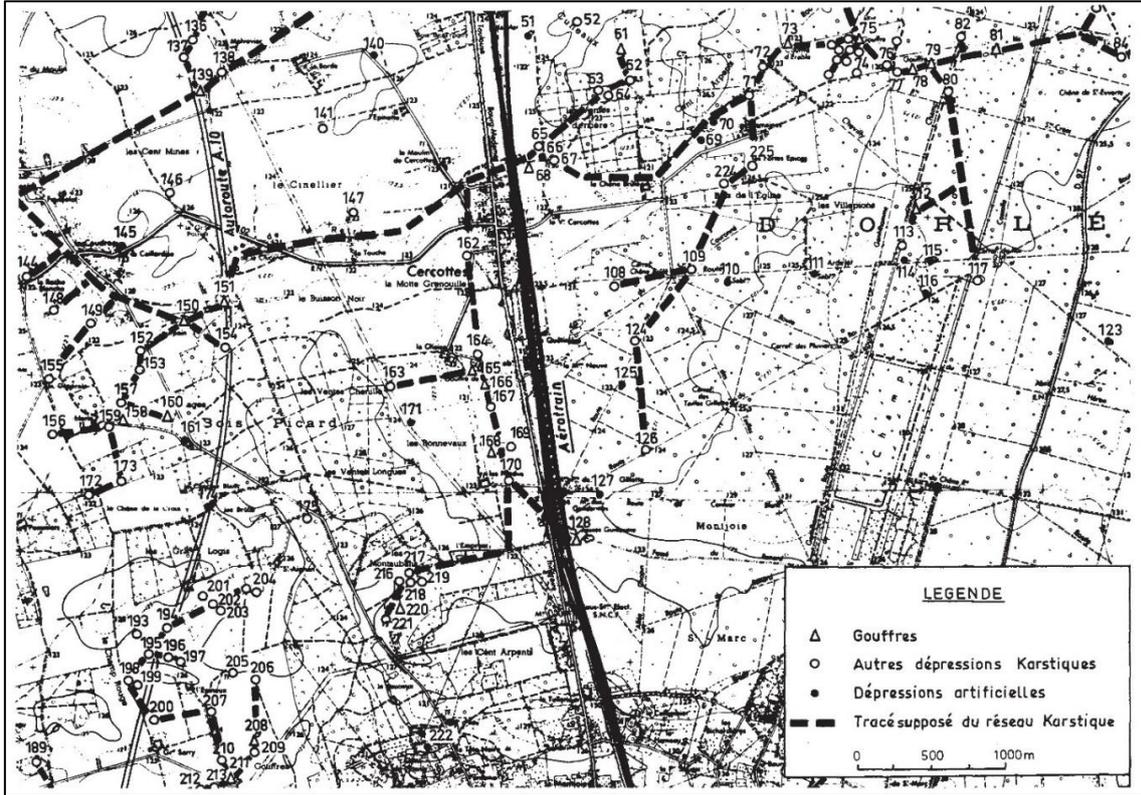


Figure 5 : Carte partielle des observations du LR Blois (Lorain, 1973).

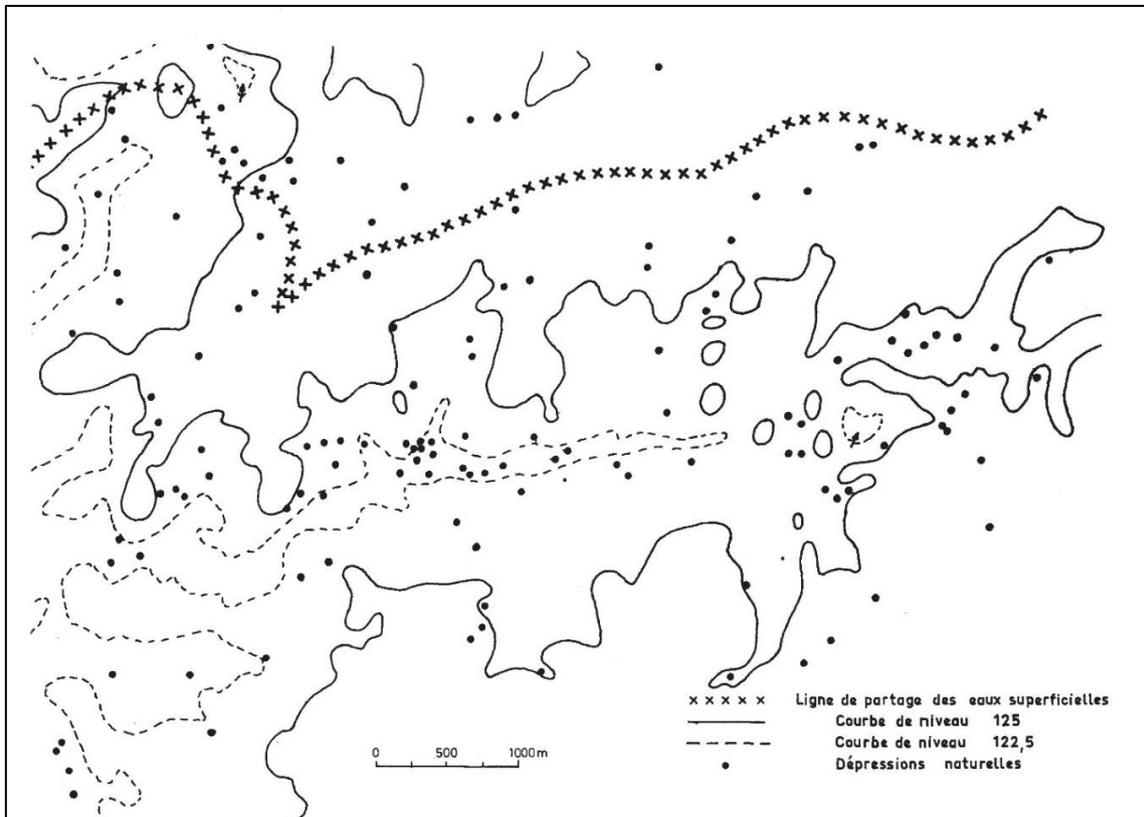


Figure 6 : Esquisse topographique de la vallée de la Retrève (Lorain, 1973)

2.3. AUTRES ÉLÉMENTS DISPONIBLES

D'autres travaux s'intéressent à des petits secteurs et/ou à une thématique différente de celle à traiter ici :

- la Fédération Française de Course d'Orientation (FFCO) a établi (entre 2001 et 2004 + une dernière carte en 2016) sept cartes couvrant une grande partie du bassin versant amont de la Retrève (46 km²). Un peu plus de 600 dépressions et mares y sont dessinées. Ces formes peuvent a priori être considérées comme des dépressions karstiques, les mares en particulier (en supposant qu'elles se soient ensuite remplies d'eau pour diverses raisons possibles : fond imperméable, apports d'eau, *etc.*) ;
- les photographies aériennes effectuées par l'IGN permettent de suivre l'évolution des paysages. Les plus anciennes sont disponibles via le site www.remonterletemps.ign.fr. La série de 2010, géoréférencée, constitue l'orthophotographie habituellement utilisée ;
- les cartes anciennes peuvent également fournir des indications (carte de Cassini fin 18^e début 19^e siècle, carte d'État-major début 19^e siècle, cadastre napoléonien, carte IGN des années 1950, *etc.* – documents visualisables via le site www.geoportail.gouv.fr);
- en complément du travail du LR Blois présenté ci-dessus (§ 2.2 - Lorain, 1973), la construction de l'autoroute A10 a motivé :
 - en 1969, une cartographie précise sur 200 m de part et d'autre de son axe. Plusieurs dépressions y sont dessinées,
 - en 1971, une étude géologique préliminaire (Desprez),
 - des visites spéléologiques ponctuelles au niveau de gouffres qui auraient été découverts lors des terrassements (information orale fournie par le GSO). Aucun détail n'est disponible à ce sujet au moment de la rédaction du présent rapport ;
- des études spécifiques fournissent enfin des éléments ponctuels et parfois redondants avec les autres sources disponibles : Desprez *et al.*, 1975 ; Allard *et al.*, 1983 ; BRGM, 1991 ;
- les premiers écrits concernant les gouffres et le fonctionnement hydrogéologique du secteur de la forêt d'Orléans datent du 19^e et du début du 20^e siècle. Ils sont très fragmentaires. Ils ont par ailleurs été repris par les travaux ultérieurs. Ces informations ne seront donc pas détaillées par la suite.

2.4. RÉSUMÉ DES CONNAISSANCES ET PERSPECTIVES (LIDAR)

Les informations préexistantes apparaissent nécessaires à la problématique étudiée mais elles ne sont pas suffisantes. La zone à étudier n'est ainsi pas entièrement couverte (Figure 7). Les données d'origine ne sont par ailleurs pas toujours disponibles et elles sont fragmentaires (inventaires des années 1960-1970). Ces travaux ayant par ailleurs été réalisés par différentes entités, des doublons et éventuellement des incohérences sont à attendre. Les possibilités technologiques actuelles (lever LiDAR) offrent enfin deux perspectives nouvelles : exhaustivité et précision. Le LiDAR acronyme de « **L**ight **D**etection **A**nd **R**anging », est un dispositif qui émet un faisceau laser et en reçoit l'écho (comme le radar), permettant de déterminer la distance d'un objet. Son utilisation aéroportée permet de couvrir de vastes superficies en réalisant des vols parallèles. Son intérêt majeur est que la couverture végétale peut être artificiellement retirée, ce qui permet d'obtenir une topographie fine du sol ou des bâtiments.

Ces informations préexistantes doivent donc être complétées par le traitement des données obtenues par le lever LiDAR et par l'analyse approfondie de l'ensemble de ces éléments.

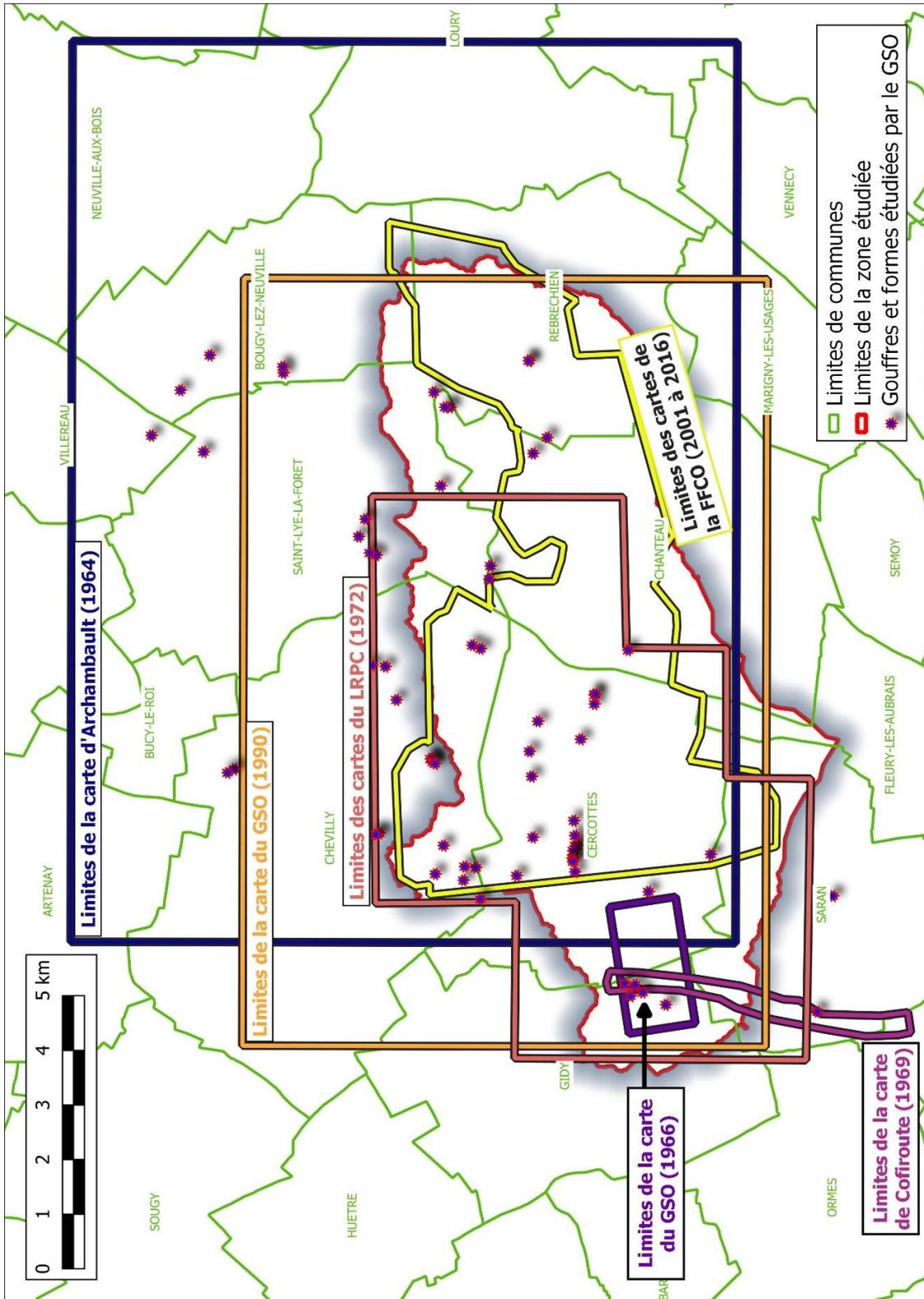


Figure 7 : Localisation synthétique des informations préexistantes.

3. Méthodes d'étude et éléments utilisés

3.1. PRISE EN COMPTE DES INFORMATIONS PRÉEXISTANTES

Les informations préexistantes (résumées au chapitre 2) servent à cadrer l'inventaire effectué ici :

- les travaux du GSO fournissent des données précises sur les gouffres à potentiel « spéléologique » et sur les formes les plus grandes : notamment leur localisation, leur configuration et leur fonctionnement hydrogéologique. Ces informations ont été collectées et saisies sous la forme de fiches (en Annexe 5) grâce au concours du spéléologue Daniel Langlois ;
- les inventaires et cartes des années 1960 et 1970 ainsi que les études réalisées pour la construction de l'autoroute A10 donnent des repères sur la densité, la répartition, la configuration des formes karstiques ;
- les photographies aériennes ainsi que les cartes anciennes (cadastre, état-major, *etc.*) permettent de remonter le temps et ainsi d'identifier les zones anthropisées (non karstiques), tels que des carrières à ciel ouverts, des terrassements, des impacts pyrotechniques (bombardements, tirs d'essais – voir ci-dessous), *etc.*

Ces éléments permettent de supprimer les doublons et d'écartier les artefacts (dépressions non karstiques) des données ne disposant pas d'analyse fine, telles que les cartes de la FFCO (dépressions et mares) et les dépressions détectées sur le MNT.

3.2. ÉTAPES DE L'INVENTAIRE

Pour rappel, l'inventaire concerne essentiellement le bassin-versant de la Retrève jusqu'au centre-bourg de la commune de Gidy. Sa surface est de 73 km² environ. Toutefois, les principaux gouffres de la vallée du Nant ont également été inventoriés et visités.

3.2.1. Étape 1 : Détection automatique et caractérisations des dépressions

Après traitement (incluant le retrait de la végétation et des constructions), un lever aérien LiDAR à grande résolution fournit un « Modèle Numérique de Terrain ». Celui-ci révèle la configuration de la surface du sol de manière homogène. Sa précision est liée à la résolution du lever et de son traitement.

Toute la zone d'étude dispose de cette donnée. Celle-ci a été acquise via deux vols menés par l'IGN :

- le premier a eu lieu en 2014. Il couvre presque toute la zone étudiée, à l'exception d'une petite partie de 2 x 2 km située à l'ouest ;
- le second a eu lieu en 2019 (le 30 octobre ou le 6 novembre suivant les métadonnées transmises par l'IGN (RGE ALTI_2-0 traitement du 2019-11-06). Il a été expressément effectué pour la présente étude. Il couvre la partie manquante à l'ouest et d'autres secteurs, non considérés ici.

L'acquisition du MNT par le procédé Lidar a été réalisée selon des vols de direction Est-Ouest 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 et de 20 à 50 cm en X, Y. Dans la pratique, la précision sur la cote Z peut être évaluée en observant les variations d'altitudes sur une surface lisse telle une route. Les tests réalisés

montrent un bruit numérique de 2 à 18 cm avec une moyenne de 6 cm confirmant la très grande précision du LiDAR.

La qualité des données numériques a été également contrôlée et elle s'avère très bonne : Il n'a pas été observé de linéation (marques liées aux raccords entre les lignes de vols) ni de décalage des objets linéaires (routes, chemins).

L'analyse de cette donnée LiDAR permet, dans un premier temps, de détecter les dépressions fermées (sans exutoire) et d'en délimiter les contours. Sur cette base, les caractéristiques morphologiques de ces dépressions peuvent ensuite être calculées. Un algorithme a été mis au point pour réaliser ces opérations. Des détails sur son fonctionnement sont donnés en Annexe 1. Il se base sur les travaux de Doctor et Young (2013), Cartannaz et Dewez (2015), Wu *et al.* (2016) et de Wall (2018). Il a été amélioré par nos soins (Annexe 1).

Les caractéristiques morphologiques calculées ici sont les suivantes :

- longueur et largeur : elles sont définies en déterminant le plus petit rectangle dans lequel chaque forme peut s'inscrire ;
- surface, périmètre, profondeur, volume : Ces valeurs sont facilement calculées une fois déterminés les contours de la forme ;
- élongation (ELG) : Il s'agit du rapport entre la longueur et la largeur. Cette valeur est, par définition, supérieure ou égale à 1. Plus elle est grande, plus la forme est allongée. Pour un carré et un cercle, $ELG = 1$. Une classification est proposée par Basso *et al.* (2013) :
 - forme circulaire à « sub-circulaire » : $ELG \leq 1,21$,
 - forme elliptique : $1,21 < ELG \leq 1,8$,
 - forme allongée : $ELG > 1,8$;
- indice de compaction, également appelé indice de circularité (CI) : il s'agit du rapport entre l'aire que prendrait la forme considérée si elle était un cercle (calcul basé sur son périmètre p) et son aire réelle A ($CI = 4\pi A/p^2$). Pour un cercle $CI = 1$;
- deux autres valeurs peuvent être calculées : la direction de l'allongement de la forme (azimut) et la variation (écart-type) des altitudes de la forme (STandard Deviation of elevation - STD). Vu l'objectif recherché ici, ces valeurs n'ont pas fait l'objet d'une analyse approfondie.

Les dépressions détectées automatiquement doivent ensuite être triées et complétées.

3.2.2. Étape 2 : Tri et compléments visuels

Certaines dépressions sont probablement d'origine anthropique (c'est-à-dire créées par l'homme) plutôt que karstique (carrières à ciel ouvert, fossés, descentes de garage, cratères de bombardements, *etc.*). L'analyse de leur forme et une analyse visuelle permettent d'écarter ces artefacts probables. Leur identification se fait en deux étapes :

- étape 2-1 : Filtrage des dépressions suivant leurs caractéristiques morphologiques. Il s'agit par exemple d'écarter les formes très allongées correspondant a priori à des fossés, les formes petites et peu profondes situées en ville correspondant a priori à des descentes de garage, *etc.* Dans l'idéal, cette démarche implique de caractériser chaque type de dépression par des critères de formes précis, ce qui nécessite une analyse approfondie. À la place, plusieurs tests ont ici été effectués et analysés « à dire d'expert », c'est-à-dire en fonction de notre expérience et de l'ensemble des informations disponibles. Les règles de filtre retenues sont fournies en Annexe 1 ;

- étape 2-2 : Contrôle et correction du filtrage précédent. Le filtrage précédent n'est pas parfait. Il peut en effet :
 - écarter à tort certaines formes d'origine pourtant karstique a priori (= « faux négatifs », comme par exemple les formes allongées des Fosses Guillaume, du Ravin des Grands Gouffres, etc.),
 - préserver à tort des formes d'origine pourtant anthropique (= « faux positifs », comme par exemple des carrières à ciel ouvert au contour relativement régulier).

Un contrôle visuel de la cohérence entre le MNT et les formes filtrées permet de corriger ces biais en réintégrant les formes mises à tort de côté et en excluant les formes préservées à tort.

Le tableau suivant dresse la liste des artefacts probables, indique les principes et éléments utilisés pour les repérer ainsi que des exemples présentés en Annexe 2.

Type	Critères d'identification	Éléments pris en compte	Exemple
Extraction de matériaux : carrières à ciel ouvert	Contours irréguliers. Fond irrégulier.	MNT	1
Ouvrages hydrauliques : bassins, fossés, etc.	Bassin : contour et fond régulier. Fossé : forme allongée peu profonde.	MNT	2
Accès à des niveaux en sous-sol : garage, stockage, etc.	Mitoyens aux bâtiments. Essentiellement en zone urbaine.	MNT, occupation des sols	3
Thalwegs en partie remblayés : voies de circulation	Au croisement de thalweg et d'ouvrages linéaires	MNT	4
Stockage semi-enterré de matières : décharges	Aménagement organisé en tas. Périmètre régulier.	MNT, localisation des installations	5
Trous d'origine pyrotechnique (liés à des explosifs)	Zone militaire et/ou bombardée.	MNT, occupation des sols, photographies aériennes.	6

Tableau 1 : Liste des dépressions d'origine non karstique sur le secteur d'étude

- étape 2-3 : Les mares sont a priori d'origine karstique, mais celles dont le niveau d'eau approche celui des terrains environnant ne peuvent pas être détectées automatiquement. Elles n'apparaissent donc pas sur le MNT. L'inspection d'autres données (cartes de la FFCO notamment) permet en revanche de les repérer.

Les mares dont le niveau d'eau est proche de la surface des terrains environnant ne peuvent pas être repérées via le MNT. Elles le sont via l'analyse des données suivantes :

- utilisation des cartes de la FFCO. Ces cartes, fournies au format numérique, facilitent le travail sur SIG,
- inspection visuelle des cartes topographiques, des photographies aériennes et du MNT.

Le contour des mares retenu ici est généralement celui présenté par la FFCO sauf dans le cas de divergences marquées : il est alors numérisé sous la forme volontairement simplifiée d'une ellipse.

3.2.3. Étape 3 : Visites de terrain

Les visites de terrain ont pour objectifs : 1) de vérifier la pertinence des informations préexistantes et celle des dépressions détectées grâce au MNT, 2) de compléter si besoin les observations disponibles et 3) d'aider au tri des dépressions détectées grâce au MNT.

Visualiser l'intégralité des formes détectées sur le MNT n'étant pas envisageable dans les délais et le budget impartis, ces visites se sont concentrées sur les secteurs ayant a priori la plus forte influence sur l'infiltration des eaux, à savoir ceux situés au fond et à l'aval des vallées sèches. Ces inspections visuelles ont été faites par des agents du BRGM accompagnés généralement par un spéléologue du GSO. La carte et l'inventaire des Annexes 3 et 5 tiennent compte des mises à jour et nouvelles dépressions identifiées grâce à l'analyse du lever LiDAR.

Les sites suivants (Tableau 2) ont été observés (les noms renvoient aux fiches de l'Annexe 5) :

Dates	Sites observés
Juin 2016	Fosses Guillaume ; Gouffres : Chaise, Saint Georges, Rossignol, Saint-Sulpice
13 octobre 2016	Vallée sèche de la Retrève canalisée à l'arrivée sur Gidy ; Gouffres : Mézières, Chevreuils, Diableaux 1-2,
7 janvier 2018	Étang Retrève, petits écoulements sur Cercottes
20-février-2018	Étang Retrève ; Débordements à la STEP de Gidy
11 mars 2018	Remontée de la Retrève en crue du ravin des Grands gouffre à Ambert
18 Juin 2018	Observations des écoulements à Cercottes suite aux orages
5 Septembre 2019	Nan, Orfosses, Chanteau
25 septembre 2019	Gidy (STEP) – Cercottes
9 Octobre 2019	Implantation des piézomètres avec l'ONF
28 Février 2020	Chanteau : Installation capteur
11 mars 2020	Gouffres : Fosses Guillaume, Ambert, Orfosses mouillées ; Jeanne d'Arc
3 octobre 2020	Gouffre des Sans Ronces
13 octobre 2020	Ancien aérodrome de Saran en cours de fouilles archéologiques préventives (terrain naturel atteint) – Visualisation du substratum carbonaté et de son recouvrement alluvial
27 novembre 2020	Gouffres : Chaise, Ventes Derrière
1 ^{er} décembre 2020	Gouffres : Bois Jupeau, Renard, Gentilhomme, Pas-Rond, route de Chevilly 2-3-4-5, Route Sainte-Croix, Carrefour du Roi 2, Moreau 1-2-3-4, Ardelet ; Autres indices proches de la route
11 décembre 2020	Pas Ronds
23 décembre 2020	Champ de Tir 9 ; Route de Sainte Croix
4 janvier 2021	Fosses Guillaume, Ravin des grands gouffres, gouffre d'Ambert
6 janvier 2021	Gouffres de l'Étang de le Retrève 1 et 2
8 janvier 2021	Route du Billard 2
28 janvier 2021	Cuneaux 3 ; Gouffre des Mézières n° 1, 1A, Diableaux 1 : Mézières 2 ;
28-janvier au 25 février 2021 suivi hebdomadaire (période de forte pluviométrie)	Fosses Guillaume : n° 1-2-3-4 ; Gouffres Moreau 1 et 2 ; Gouffre d'Ambert
13 février 2021	Les Diableaux 1 et 2 ; Le Chevreuil ; Mezières 2
3 Avril 2021	Chêne Vert ; Epineux n°2 ;
12 juin 2021	Puits de l'Enfer ; Gouffre de Mongirault ; Les Arachis ;
3 juillet 2021	Les Orfosses ; Gouffre du Chien, Fosses Blanches ; Migoubert

Tableau 2 : Principales visites de sites.

3.3. COMPLÉMENTS CONCERNANT LA VALLÉE DU NAN

3.3.1. Configuration de la vallée

Le Nan (aussi écrit Nant) naît de ruissellements en forêt d'Orléans collectés par des fossés situés en bordure de la route de Bougy-lès-Neuville à Rebréchien.

Son cours est artificialisé depuis Bougy jusqu'à Trinay. Il s'agit d'un fossé d'un à deux mètres de profondeur qui dispose de son propre découpage parcellaire dès la sortie de la forêt à Bougy, de direction Nord-Ouest, traversant les communes de Saint-Lyé-la-Forêt et Villereau (où il reçoit son affluent, le Petit Nan) jusqu'au lieu-dit Bois Breton, sur la commune de Trinay.

Au-delà, son cours n'est pas canalisé et son lit naturel, constitué d'une légère dépression topographique, change de direction à angle droit et retourne vers le Sud-Ouest, traversant les communes de Ruan, Artenay, Chevilly (où il reçoit comme affluent, le Levrain, également issu de la forêt d'Orléans), et Huêtre avant de rejoindre la Retrève sur la commune de Bricy.

Une carte élaborée par le syndicat du Nan nomme « Vallée humide du Nan » la portion recalibrée d'écoulement Nord-Ouest et « Vallée sèche du Nan » la portion de direction Sud-Ouest.

On compte 22 gouffres naturels et 6 (ou 7) puits absorbants le long de son parcours. Ces trous naturels ou artificiels jouent le rôle de pertes et écrètent les crues. Ils sont plus ou moins entretenus par le syndicat du Nant. Toutefois, leur rôle n'est pas suffisant pour éviter les inondations en particulier du côté de Ruan, Trinay et Artenay. Celles-ci finissent généralement leurs courses entre Artenay et Creusy (Chevilly). Un document élaboré par le syndicat du Nan indique que les crues du Nan ont, depuis les années 1980, eu lieu en 1983, 1988, 1995, 1997, 2001, 2002, 2003, 2013 et 2016. Le document indique : « *Fin mai 2016 [...], le Nan est allé inonder les champs jusqu'à Creusy (Chevilly). Le débit du ruisseau au niveau du pont sur la route de Trinay-Artenay (ferme du Bouchet) a été évalué à 12 000 m³/h [3,3 m³/s] en pleine crue* ».

Cet aménagement du lit du Nan résulte de travaux du Génie Rural dans les années 1965-1975. Il comprend le recalibrage du lit du Nan et du Petit Nan, la mise en place de ponts, de digues constituant des « réserves » et le débouchage de gouffres naturels ainsi que la réalisation de forages absorbants.

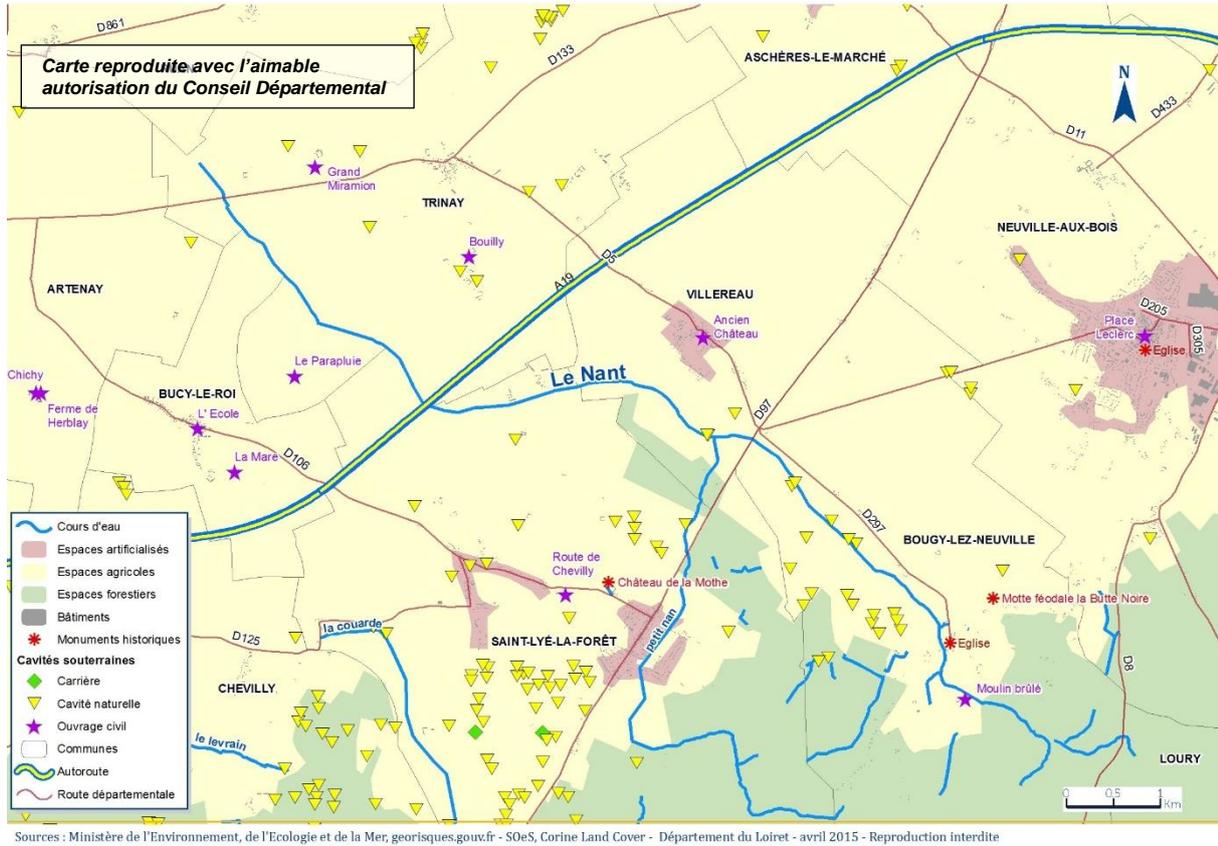


Figure 8 : Carte des gouffres de la vallée du Nan (amont).

3.3.2. Visites de terrain (gouffres et autres observations)

Une première visite au syndicat du Nan en septembre 2019 a permis de collecter quelques informations sur les gouffres de la vallée du Nan, développés sur le Nan et le Petit Nan depuis la forêt d'Orléans. Tous les gouffres connus se situent en amont de l'autoroute A19, excepté « Le Moulin du Nan » entre Bucy le Roi et Trinay. Tous sont aménagés (buses, conduites, drains, digues...). C'est à partir de 1967 que ces travaux d'aménagement et rectification du lit du Nan ont été entrepris. Ils se sont poursuivis dans les années 80 avec la collecte dans le fossé du Nan, de drains agricoles.

Deux sorties de terrain (12 juin et 3 juillet 2021) ont permis de visiter (avec le Syndicat du Nan) la plupart de ces gouffres, susceptibles de jouer un rôle sur les écoulements du Nan, ainsi que des structures (digues ou ouvrages de franchissement) favorisant la rétention de l'eau lors des crues. Les 16 points d'intérêt relevés lors de ces visites sont décrits dans le Tableau 3.

D'après le syndicat, un suivi régulier et des travaux d'entretien sont réalisés chaque année. En 2016, peu de dégâts sont à déplorer au niveau des habitations. La crue est passée rapidement (en 3 jours) mais les champs sont restés longtemps inondés du fait de l'absence de pente.

Station visitée	Coordonnée Est	Coordonnée Nord	Site	Commune	Observations A.Gutierrez le 12/06/2021 et 3/07/2021 + documentation du syndicat pour les noms des gouffres
1	2.03067	48.03425	Départ du Nan	Rebréchien	Pas de source identifiée. Fossés humides provenant du ruissellement dans la forêt et d'une "réserve" munie d'une vanne, créée pour le stockage en amont des eaux de ruissellement. La vanne est manipulée par le syndicat: fermée en cas de fortes pluies pour éviter l'engorgement des eaux en aval, mais l'ONF n'y est pas favorable car cela entraîne des débordements sur les allées. (Parcelles ONF 1229- 1233-1234). A noter la présence à proximité d'un étang (probablement privé car grillagé) assez large et qui semble profond. Il pourrait être alimenté par une nappe perchée.
2	2.02288	48.03994	Réserve de Pont aux lacs	Bougy-lez-Neuville	Deuxième "réserve" manipulée par le syndicat (vanne). L'eau est retenue dans la forêt par une digue d'environ 1m. Il y a un entretien régulier par le syndicat (curage tous les 10 ans confié à des entreprises privées).
3	2.00865	48.03809	Etang de Bougy	Bougy-lez-Neuville	Le fossé du Nan est entièrement artificiel. Il traverse les champs jusqu'à l'étang de Bougy qui appartient à un particulier. Vanne sous le pont-passerelle à l'aval de l'étang. Présence de poissons (donc en eau toute l'année). Le niveau de l'étang est corrélé avec les puits. Il draine une nappe superficielle.
4	2.05105	48.03	Puits de l'Enfer	Bougy-lez-Neuville	Gouffres dans la forêt à l'écart de l'axe du Nan. Ils absorbent une partie des ruissellements en provenance du sud-ouest (Tire-Bras et Bois Morin). Une autre partie (sud) se dirige vers Linière puis disparaît (?). Il semble qu'un fossé ramène les eaux vers l'ouest. A noter que le Bois Morin a été défriché il y a quelques années ce qui a pu modifier les écoulements de surface. Lorsque les gouffres du Puits de l'Enfer sont saturés, l'eau déborde dans les champs au Nord et s'y infiltre. Comme ils sont drainés, l'eau se retrouve un peu plus tard dans le Nan (cf. Point 5).
5	2.01219	48.049	Sortie de drain et dérivation vers Mongirault	Bougy-lez-Neuville	Les drains sont des collecteurs en Ø 250 mm munis de drains plus étroits en épis. Posés dans les années 1979-80 puis 1990. Un drain arrive un peu en amont du point 5 où se trouve une grille et une sorte de seuil permettant d'envoyer de l'eau dans une conduite Ø 800 mm vers le gouffre de Mongirault au Nord (les diamètres sont des indications de Mr Paty.).
6	2.01135	48.0497	Dérivation n°2 vers Mongirault	Bougy-lez-Neuville	En aval du point 5: Zone de dépression dans le lit du Nan. Elle est contournée par une conduite qui rejoint le Nan au point 6. De là, une partie de l'eau part vers le gouffre de Mongirault (100 m au Nord) par une conduite de Ø 600 mm.
7	2.01188	48.05009	Gouffre de Mongirault	Bougy-lez-Neuville	Trou busé en Ø 1000 mm et profond de 10 (?) m, fermé par un cadenas. Trou à visiter avec les spéléos. D'après M. Paty, c'est le gouffre qui absorbe le plus de toute la vallée du Nan
8	2.00885	48.05114	Garenne de Mongirault A, B, C	Bougy-lez-Neuville	Grille dans le Nan avec départ vers le N en direction de petits gouffres dans les champs (Ø 300 mm) et le Sud (Gouffre du Pommier) + F5
9	2.00248	48.05658	Gouffres des Arachis A,B,C	Bougy-lez-Neuville	En rive gauche du Nan, dans un bosquet se trouve la "zone perméable" des Arachis. Les gouffres sont équipés (un seul vu) par des têtes maçonnées en brique. La tête de puits de celui-ci est effondrée et laisse voir le calcaire et un trou d'environ 5 m de profondeur. Les gouffres des Arachis "boivent" dès lors que le Nan déborde. Ils devraient être mieux entretenus et protégés.
10	1.98983	48.05658	Les Orfosses	Saint-Lyé-La-Forêt	Départ du petit Nan. Lorsque la capacité d'absorption du gouffre (carré de forêt dans les champs) est dépassée, le petit Nan s'écoule dans son fossé. Passage de deux buses qui constituent un premier obstacle (a débordé en 2021).
11	1.99035	48.05328	Petit Nan	Villereau	Autre étranglement sur le petit Nan. Deux buses de 550 mm. Provoque des débordements en forêt (« moindre mal »).
12	1.9919	48.0564	Gouffre du Chien	Villereau	À proximité du gouffre du chien. Passage du Petit Nan sous un chemin en sortie de la forêt. Le Petit Nan poursuit alors son cours dans un fossé encaissé à travers champs. L'emplacement supposé du gouffre du chien est au pied d'un grand chêne dans le méandre, mais le gouffre n'a pas été trouvé (herbes hautes).
13	1.99249	48.05785	Gouffre du Migoubert	Villereau	Poursuivant son cours vers le Nord, le petit Nan passe au-dessus du gouffre de Migoubert, équipé en tête d'une buse de 1 m de diamètre, couverte. Plus loin (avant la confluence avec le Nan) il y a un autre passage de chemin par des buses.
14	1.99053	48.05965	Les Fosses Blanches	Villereau	Plusieurs passage du Nan (s'écoulant vers le Nord-Ouest) sous des ouvrages de franchissement permettant le passage entre parcelles agricoles (diamètre 900 mm).
15	1.99119	48.05953	Gouffre des Fosses Blanches	Villereau	Le gouffre est équipé d'une buse, partiellement couverte d'une dalle avec un trou carré. Dans ce secteur il y aurait 7 forages d'absorption des crues du Nan.
16	1.98547	48.06303	Forage absorbant	Villereau	Forage absorbant en bord du Nan. Il est équipé d'un cuvelage et d'un col de cygne le reliant au centre du fossé du Nan, de sorte qu'une crue du Nan amorcera le passage de l'eau du Nan vers la nappe de Beauce. Le captage a été testé et est capable de fournir 300 m³/h mais il n'est pas utilisé pour l'irrigation.

Tableau 3 : Gouffres et points d'intérêt sur les lits du Nan et du Petit Nan.

3.4. CARACTÉRISATIONS HYDROGÉOLOGIQUES

Au début de l'étude, des mesures d'infiltration étaient initialement prévues dans quelques gouffres. Après concertation avec le donneur d'ordre, ces investigations ont finalement été remplacées par la pose de capteurs destinés à suivre le niveau d'eau dans deux gouffres et par l'analyse des données collectées auprès du Groupe Spéléologique Orléanais.

Ce changement de programme s'est fait pour les raisons suivantes :

- après calculs, le volume à injecter pour permettre une mesure représentative de l'infiltration sur un gouffre donné est apparu trop important pour réaliser facilement l'opération ;
- l'hétérogénéité des formes présentes (configuration, fonctionnement estimé) implique par ailleurs une grande série de mesures pour comprendre le fonctionnement de l'ensemble du système ;
- les mesures de remplissage et de vidange naturelle observées lors des phénomènes pluvieux pendant la durée de cette étude sont plus représentatives que ce qu'auraient pu être des opérations artificielles, à l'aide d'une tonne à eau par exemple ;
- les observations sur l'infiltration de 15 gouffres mises à notre disposition (*cf.* Annexe 4) par le GSO contribuent de manière plus efficace à l'objectif recherché ici.

À titre d'exemples, les graphiques suivants (Figure 9) montrent le travail considérable du GSO et de Daniel Langlois en particulier dans l'observation des périodes de sécheresse et d'écoulement sur les gouffres orléanais. La mesure est binaire : le gouffre absorbe (valeur = +1), ou bien il est sec (valeur = -1). Elle n'est cependant pas continue mais effectuée lors des visites plus ou moins régulières. Ces données sont donc difficiles à valoriser. Toutefois, elles nous apprennent que certains gouffres absorbent plus souvent que d'autres. Ainsi, les Orfosses mouillées, les plus en amont, mais pour lesquelles nous manquons d'observations sont parmi les premières. De même, les Fosses Guillaume qui drainent le fossé du Renard se remplissent progressivement en cascades. La fosse Guillaume 4 est la première à réagir après de fortes pluies, suivie de la Fosse Guillaume 2 (que nous avons instrumentée), puis la Fosse Guillaume 3. Elles étaient déjà en eau lors du lever Lidar du 6 novembre 2019. Les gouffres Moreau, sur le ruisseau de l'Ardelet, absorbent fréquemment alors que les autres gouffres sont secs. D'après Jean Moreau (*Bull. Nat. Orl.* n°27, Oct 1964), ce sont ceux qui absorbent annuellement le plus d'eau car ils sont les plus régulièrement alimentés (cela est également visible sur la Figure 9). Tous ces gouffres sont sur des sous-bassins de taille réduite, où les temps de concentration sont plus courts et ce sont les premiers à intercepter les ruissellements. De même, les gouffres associés aux drainages des champs cultivés se mettent à « boire » peu de temps après de fortes précipitations, tel le gouffre de la Chaise à Cercottes, à l'ouest de la RN20.

En revanche, les écoulements apparaissent moins fréquemment dans les gouffres situés dans les parties aval de l'étang de la Retrève (Ventes Derrières, gouffre de l'Étang, les Pas Ronds) car les gouffres amont (le ravin des Grands Gouffres en particulier, et l'étang de la Retrève) jouent un rôle tampon. Ce n'est d'ailleurs pas tant le volume de l'étang (dont la profondeur est faible en raison de la sédimentation) qui joue ce rôle tampon, mais les débits qui se perdent dans les puits absorbants qui y sont associés. En effet, un système de surverse envoie les eaux de l'étang dans 3 puits absorbants, d'une quarantaine de mètres de profondeur. La coupe géologique de l'un d'entre eux est donnée en Figure 10. Le calcaire de Pithiviers apparaît à 16 m sous les marnes de l'Orléanais et le calcaire karstifié se trouve dans la partie inférieure, entre 25 et 38 m. C'est là que s'infiltrent les eaux de surverse de l'étang. Ce forage a été testé en pompage à 170 m³/h

signifiant qu'il peut probablement absorber ce débit, voire davantage. Des débits de 100 à 200 m³/h sont fréquents dans le calcaire de Beauce.

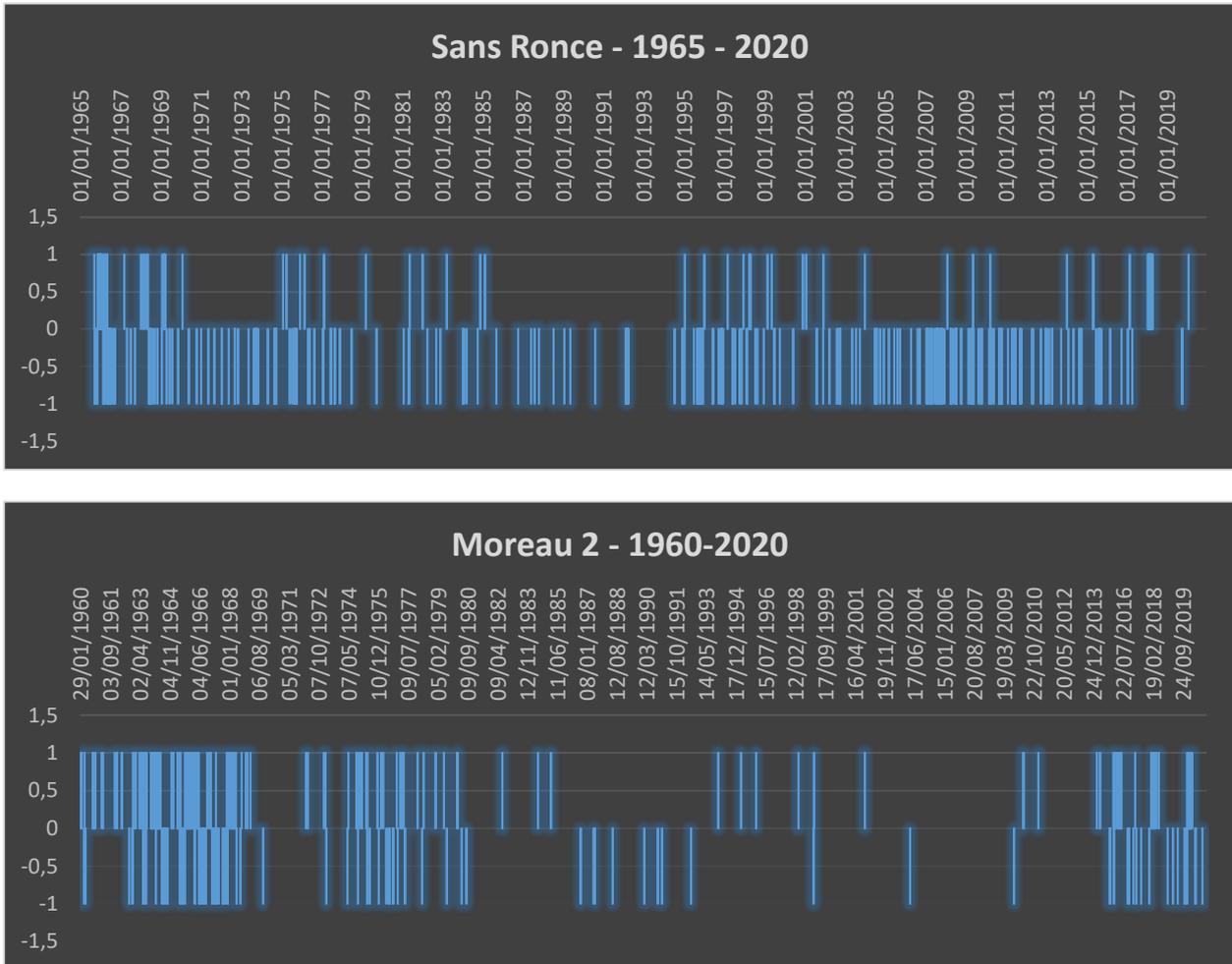


Figure 9 : Exemple de traitement des observations de D. Langlois
(+1 : le gouffre absorbe ; -1 : le gouffre est sec).

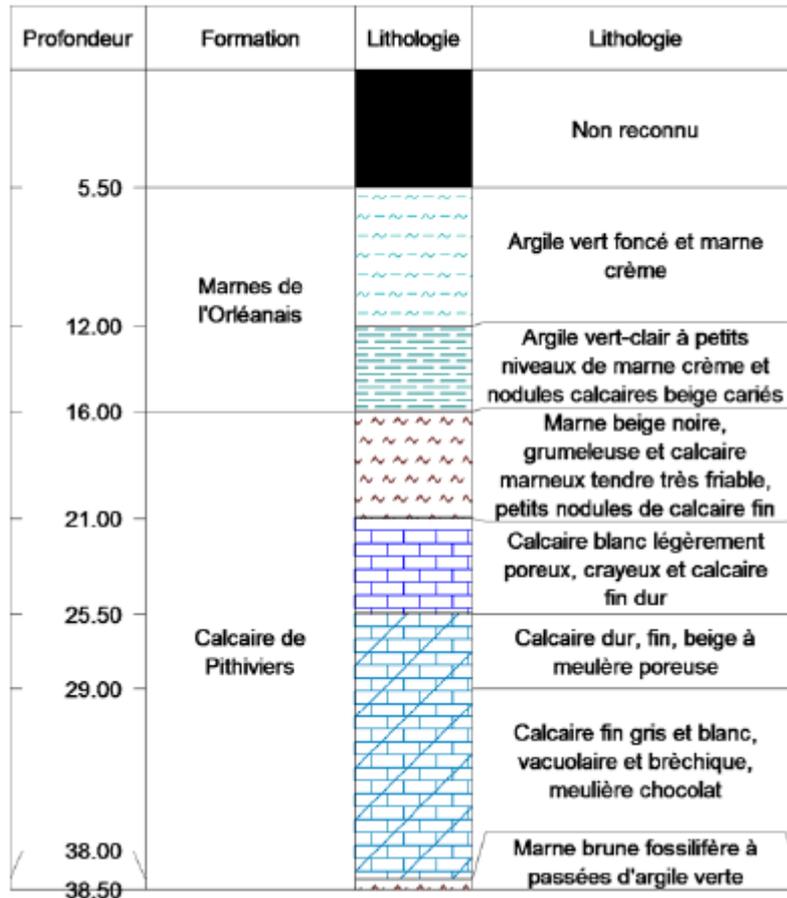


Figure 10 : Coupe du forage BSS001ABDN - Étang de la Retrève.

Le tableau de la Figure 13 synthétise les observations menées par les spéléologues. L'intensité de la couleur est proportionnelle au nombre de gouffres « actifs », c'est-à-dire infiltrants au moment de l'observation. Le tableau montre ainsi globalement les mois durant lesquels se produisent les écoulements. Ceux-ci sont concentrés de décembre à mai. Les écoulements sont rares en été mais peuvent s'observer après des orages, exceptionnellement.

De l'avis des spéléologues, ces 15 gouffres sont les plus actifs (les plus absorbants) parmi les plus accessibles. À cette liste, il faut en effet ajouter des gouffres moins souvent visités car plus difficiles d'accès mais dont le caractère absorbant est avéré : les Orfosses mouillées, les Pas Ronds (dans le champ de Tir), le gouffre de l'Étang à l'est des Longs Domaines, les Ventes Derrières (à Cercottes), le Baron (au-delà de l'A10).

Dans la vallée du Nan, parmi les gouffres mentionnés précédemment (Tableau 3), les gouffres des Puits de l'Enfer, Montgirault et les Arachis sont parmi les plus actifs. Ce sont des gouffres aménagés, c'est-à-dire que leur accès est généralement busé et un ou plusieurs drains facilitent la vidange des eaux dans le gouffre. Ces aménagements sont plus nombreux dans la vallée du Nan que dans celle de la Retrève. Le syndicat du Nan est responsable de leur entretien.

Dans le bassin de la Retrève en revanche, les aménagements sous forme de drains, de buses ou de forages absorbants paraissent à l'abandon. L'entrée du gouffre d'Ambert, le fond des fosses Guillaume (Figure 11) et de la plupart des gouffres se comblent peu à peu. À d'autres endroits, des fontis se créent, comme à proximité de l'exutoire de l'étang de la Retrève (Figure 12), rebouché récemment.

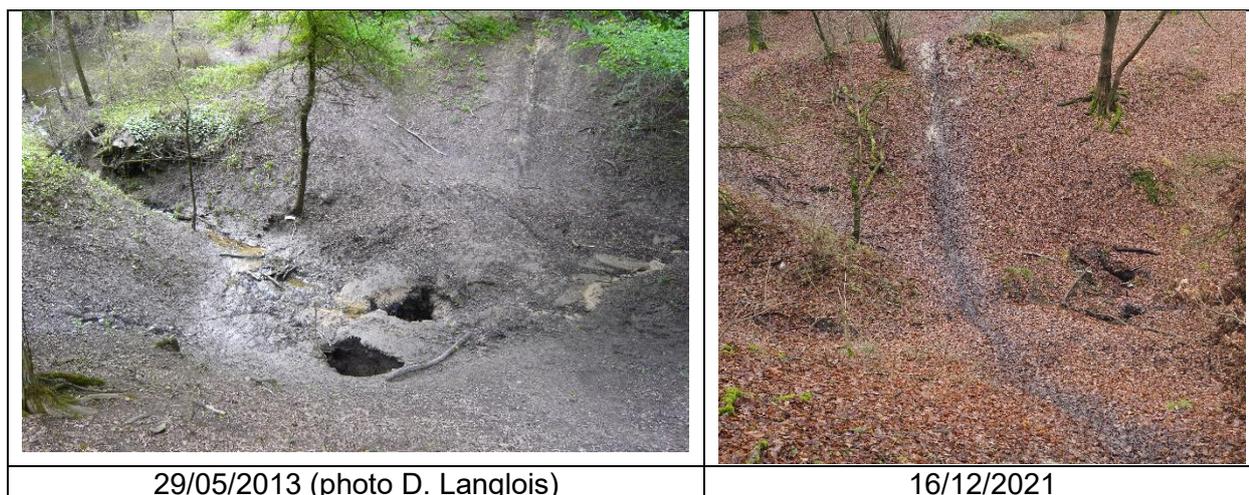


Figure 11 : Les Fosses Guillaume (FG1).



Figure 12 : Fontis à l'exutoire de l'étang de la Retrève.

4. Résultats et analyses

4.1. INVENTAIRE DES INDICES KARSTIQUES

À l'issue du traitement automatique du MNT, 3529 dépressions topographiques sont repérées. À titre d'information le volume total ménagé par ces creux est d'environ $1,36 \times 10^6 \text{ m}^3$.

À l'issue de l'étape 2-1 (filtrage suivant des critères de forme) :

- 2856 dépressions sont exclues de l'inventaire automatique.

À l'issue de l'étape 2-2 (contrôles et corrections visuelles des résultats de l'étape 2-1) :

- 177 dépressions sont exclues ;
- 186 autres sont ajoutées.

À l'issue de l'étape 2-3 (ajout des mares issues des cartes de la FFCO et non comptées jusqu'alors) :

- 132 mares sont ajoutées (soit environ 16 % du total finalement retenu – voir plus bas).

À l'issue de l'étape 3 (contrôle de terrain) :

- 6 dépressions sont ajoutées (4 au niveau des Ventes-Derrières, 2 au niveau des gouffres Moreau).

Ces étapes aboutissent à retenir finalement 820 indices karstiques, soit une densité globale de 11,2 indices par km^2 sur la surface étudiée (73 km^2). Le présent inventaire complète ainsi ceux réalisés dans les années 1960 et 1970 (pour rappel du § 2.2, l'inventaire d'Archambault avait abouti à une densité de 3,2 dépressions par km^2).

La carte fournie en grand format en Annexe 3 représente les contours des 820 indices karstiques retenus. La carte suivante (Figure 14) représente quant à elle leurs centroïdes, par un point et un cercle dont la taille est pondérée par la profondeur calculée par l'algorithme.

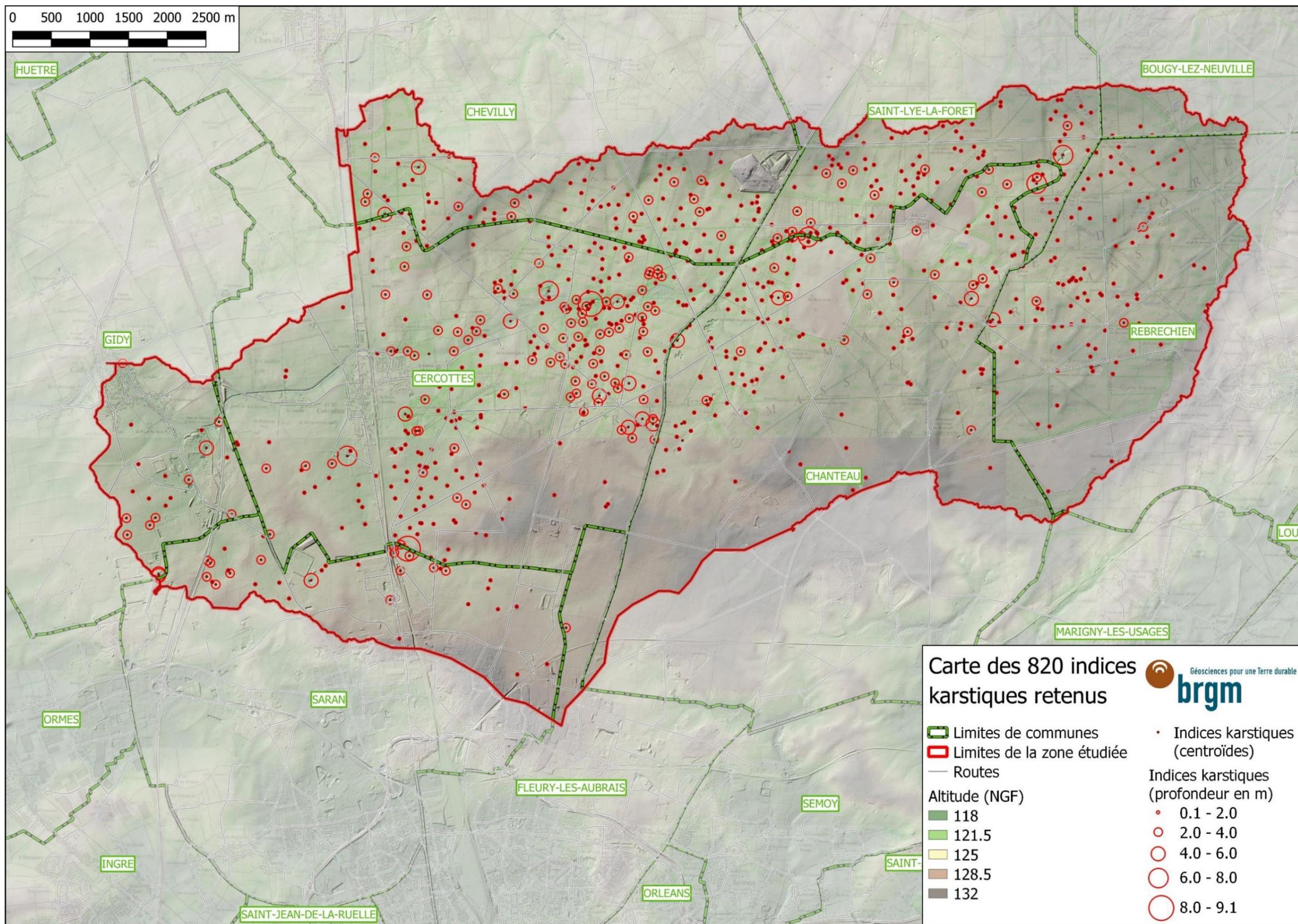


Figure 14 : Cartes des 820 indices karstiques retenus (les centroïdes sont représentés ; leur taille est pondérée par la profondeur de l'indice).

4.2. CARACTÉRISTIQUES DES INDICES KARSTIQUES RETENUS

Le graphique de la Figure 15 présente les courbes de répartitions cumulées des différentes caractéristiques des 820 indices karstiques retenus (courbes noires). Les courbes des gouffres remarquables sont également représentées (en orange). On peut ainsi constater que ces deux populations présentent des répartitions d'allure similaire, mais décalées, cela étant simplement lié au fait que les gouffres remarquables sont plus étendus, plus profonds et souvent plus allongés que les indices karstiques « courants ».

Concernant leurs **altitudes**, ces indices se situent généralement dans les zones basses, avec une altitude des terrains environnant comprise à 90 % entre 122 et 131 NGF, ce qui est cohérent avec l'observation faite en 1973 par le LRPC de Blois sur un secteur plus restreint autour de la Retrève (voir § 2.2).

Concernant la **morphologie** de ces indices, le Tableau 4 résume leurs principales caractéristiques :

- on remarque que les valeurs prises par les longueurs, largeurs et profondeurs sont similaires à celles de l'inventaire d'Archambault en 1964 ;
- un lien est par ailleurs établi entre longueur et largeur : $\text{largeur} = 1,44 \times \text{longueur}^{0,80}$, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,82$.

Quantile	Minimum	5 %	50 % (médiane)	95 %	Maximum	Écart-type
Longueur (m)	3	11	30	81	614	18
Largeur (m)	2	9	22	48	156	10
Profondeur (m)	0.2	0.3	0.9	3.4	9.1	0.8
Surface (m ²)	5	83	498	2462	20560	677
Volume (m ³)	1	15	225	2104	58448	806

Tableau 4 : Principales valeurs statistiques des dimensions des 820 indices karstiques retenus

- les coefficients ELG et CI illustrent l'élongation et la circularité des formes :
 - avec 55 % de la population étudiée avec $1,21 < \text{ELG} < 1,8$, la majorité des formes est elliptique ; les autres sont circulaires à sub-circulaires ($\text{ELG} < 1,21$ pour 30 %), voire allongées ($\text{ELG} > 1,8$ pour 15 %),
 - les valeurs de CI (circularité) s'échelonnent de manière relativement homogène sur l'ensemble de l'intervalle 0-1, on peut ici simplement retenir que les formes détectées ne sont quasiment jamais purement circulaires et que leurs contours sont parfois « tortueux ».

Le **volume** total de ces indices karstiques au moment des levés LiDAR est de 600 000 m³ (soit l'équivalent de 160 piscines olympiques¹). Étant donné la présence de zones en eau (mares) au moment de ces levés, ce volume total est sous-évalué, mais vraisemblablement de manière modérée car, pour rappel, 16 % des 820 formes retenues sont les mares recensées par la FFCO. Pour rappel encore, le volume total de toutes les dépressions détectées automatiquement, avant

¹ Dimensions d'une piscine olympique : longueur 50 m ; largeur 25 m ; profondeur 3 m → Volume 3750 m³

les opérations de tri, était d'environ $1,36 \times 10^6 \text{ m}^3$, soit un peu plus du double du volume total associé aux indices karstiques.

Les quatre formes les plus volumineuses sont celles allongées marquant à certains endroits le fond des vallées sèches. Elles représentent environ $146\,000 \text{ m}^3$, soit 25 % du volume total cité précédemment :

	Volume (m ³)	Nombre équivalent de piscines olympiques
Ravin des Grands Gouffres	58 400	15,5
Fosses Guillaume	45 800	12,2
Gouffres des Pas Ronds	22 600	6,0
Orfosses Mouillées	19 000	5,1

Tableau 5 : Formes karstiques les plus volumineuses dans le bassin de la Retrève en amont de Gidy

Dans le détail et vu la carte de densité de la Figure 16, ces indices se situent souvent à **proximité de l'axe des vallées sèches**. La bordure sud de la zone d'étude (jusqu'à 700 m environ des limites) est ainsi quasiment dépourvue d'indices karstiques. On peut également remarquer les particularités suivantes :

- le secteur à l'ouest de la forêt (ouest de la RN20 - Figure 17) est caractérisé non seulement par une densité plus faible mais aussi par des indices plus éloignés des axes des vallées sèches. On peut remarquer aussi des densités plus faibles dans le sud du bassin (secteurs de Château et Rebréchien) ;
- au sud de Cercottes, le secteur encadré au nord par la Retrève et au sud par le fossé du Renard présente une densité relativement forte, s'approchant de celle observée à proximité de la Retrève ;
- il en est de même pour le secteur situé au nord de la Retrève au niveau des communes de Cercottes et Chevilly.

Les illustrations et explications qui suivent relient ces observations à des caractéristiques géographiques du domaine d'étude.

CORINE Land Cover est une base de polygones cartographiant l'occupation majoritaire du territoire, obtenue à partir du traitement d'images satellites. Le report des 820 formes retenues sur ce fond cartographique (Figure 18) permet de constater que les secteurs anthropisés (tissus urbains terres arables et prairies) possèdent moins de formes identifiées que les zones forestières. Il est logique de supposer un lien de cause à effet : les formes karstiques qui y existaient ont été rebouchées pour permettre une utilisation plus aisée du sol. À titre d'exemple, en 2016 à Gidy, lors des inondations, se sont ouverts plusieurs fontis dans des champs ou dans les zones urbaines. Ces trous ont évidemment tous été comblés. Les secteurs à l'ouest de la forêt et autour de Chanteau sont des zones agricoles dans lesquelles les manifestations karstiques ont probablement été effacées.

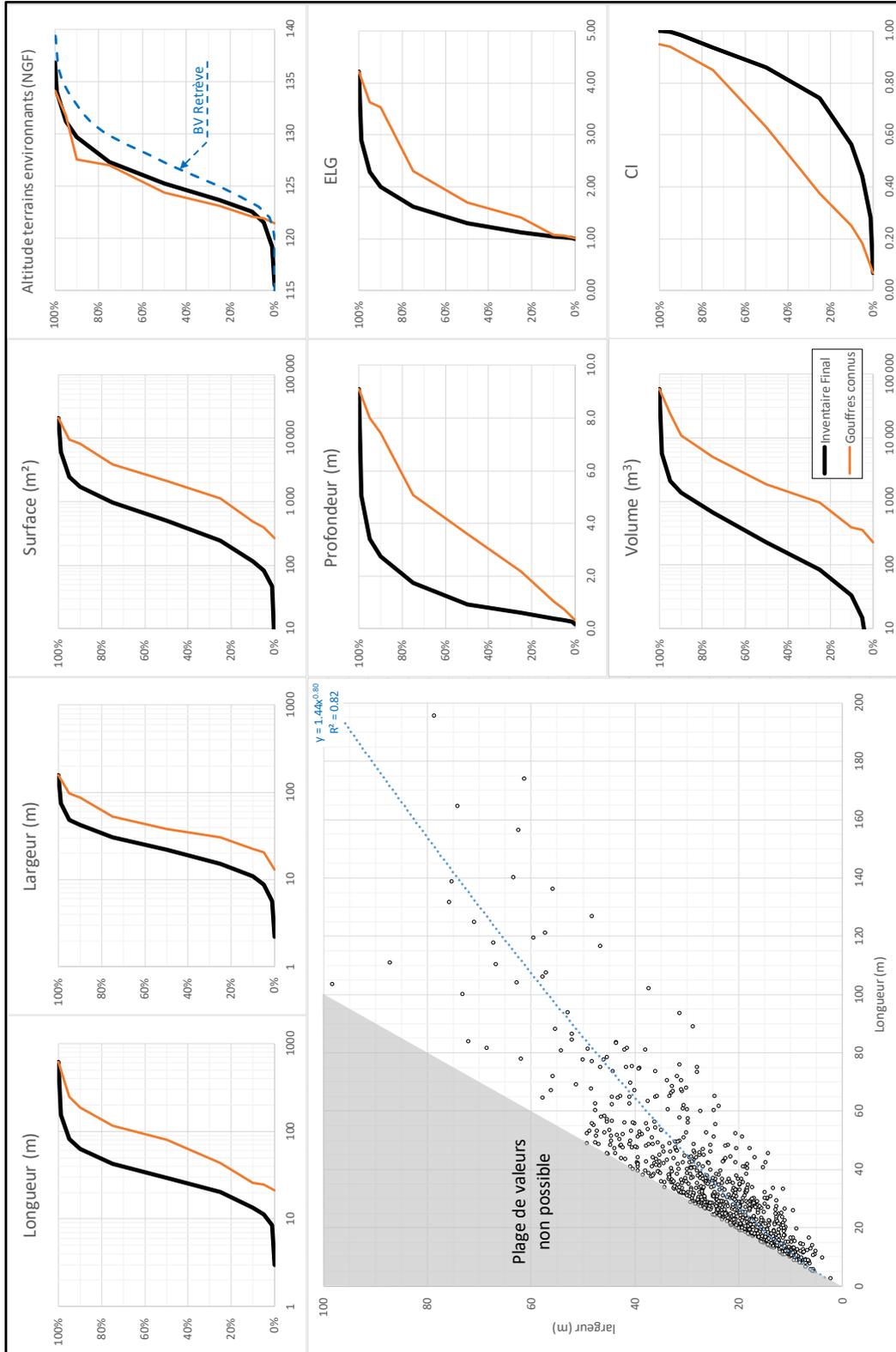
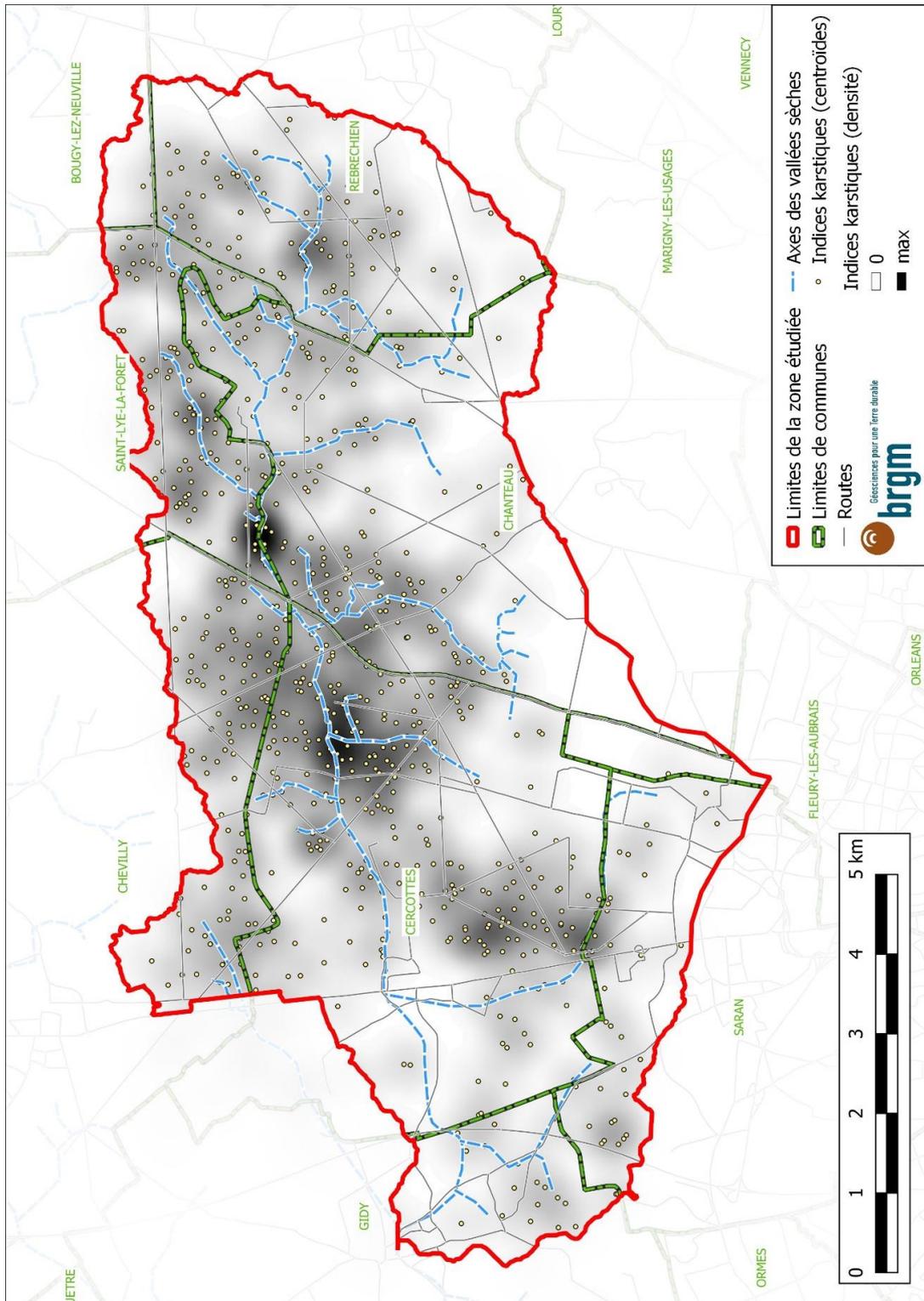


Figure 15 : Principales caractéristiques des 820 indices karstiques retenus.



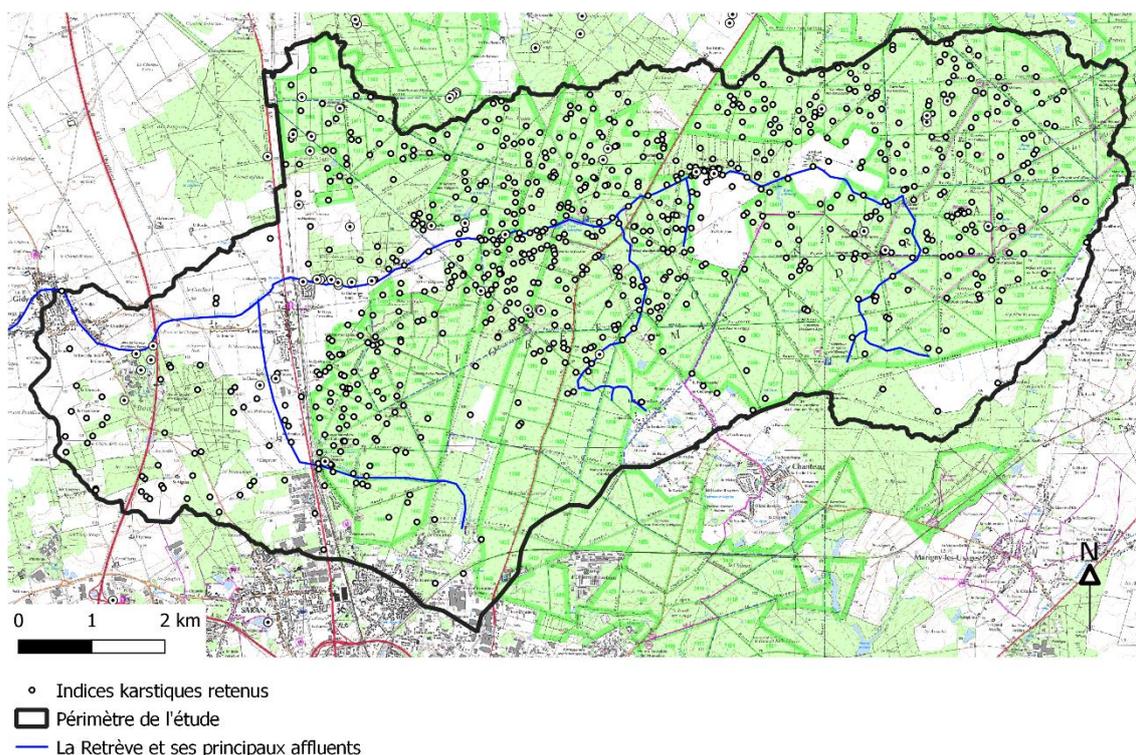


Figure 17 : Position des 820 indices karstiques sur fond de carte IGN.

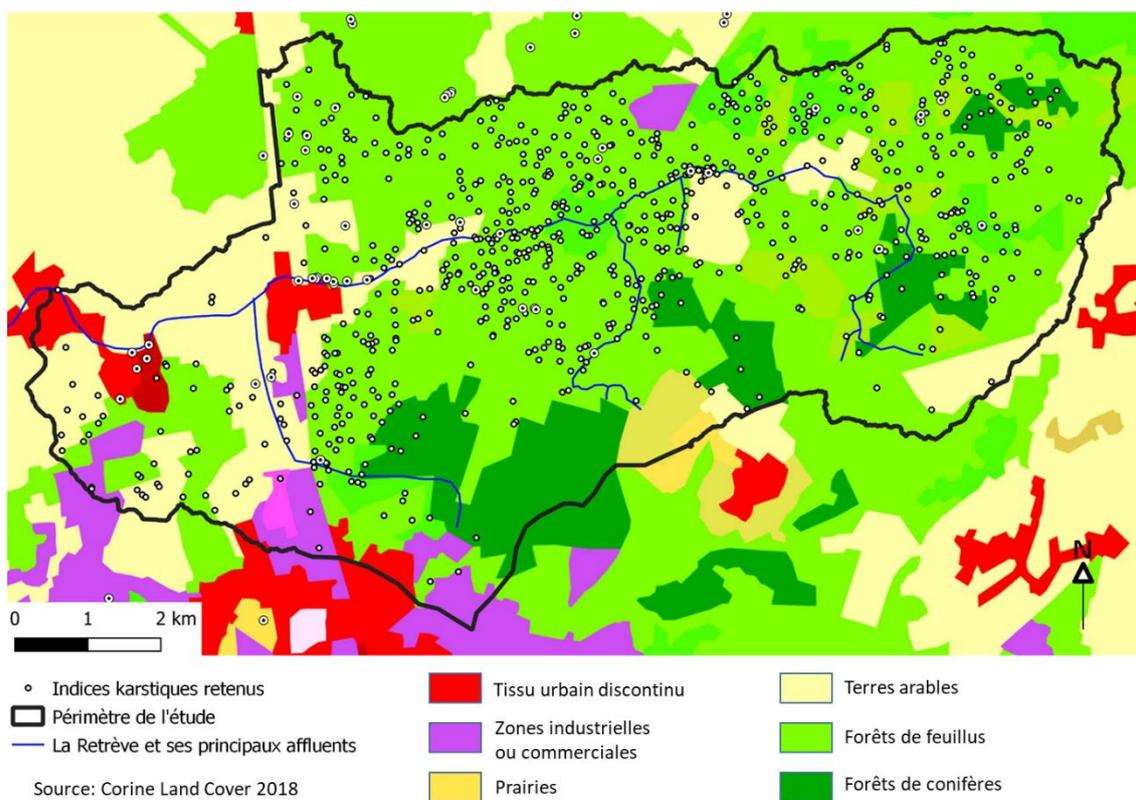


Figure 18 : Position des 820 indices karstiques sur fond de carte d'occupation du sol (Carte BRGM n°363).

En ce qui concerne la densité relativement forte des formes karstiques dans la moitié nord du bassin versant, autour de l'axe principal de la Retrève, un report des points sur la carte géologique montre que ceux-ci sont très majoritairement situés dans la formation m1a (Marnes et sables de l'Orléanais) directement située sur le calcaire de Beauce. L'épaisseur moindre de terrain au-dessus du calcaire karstique et la nature sableuse de ces formations est probablement responsable de cette abondance de formes karstiques dans la formation m1a.

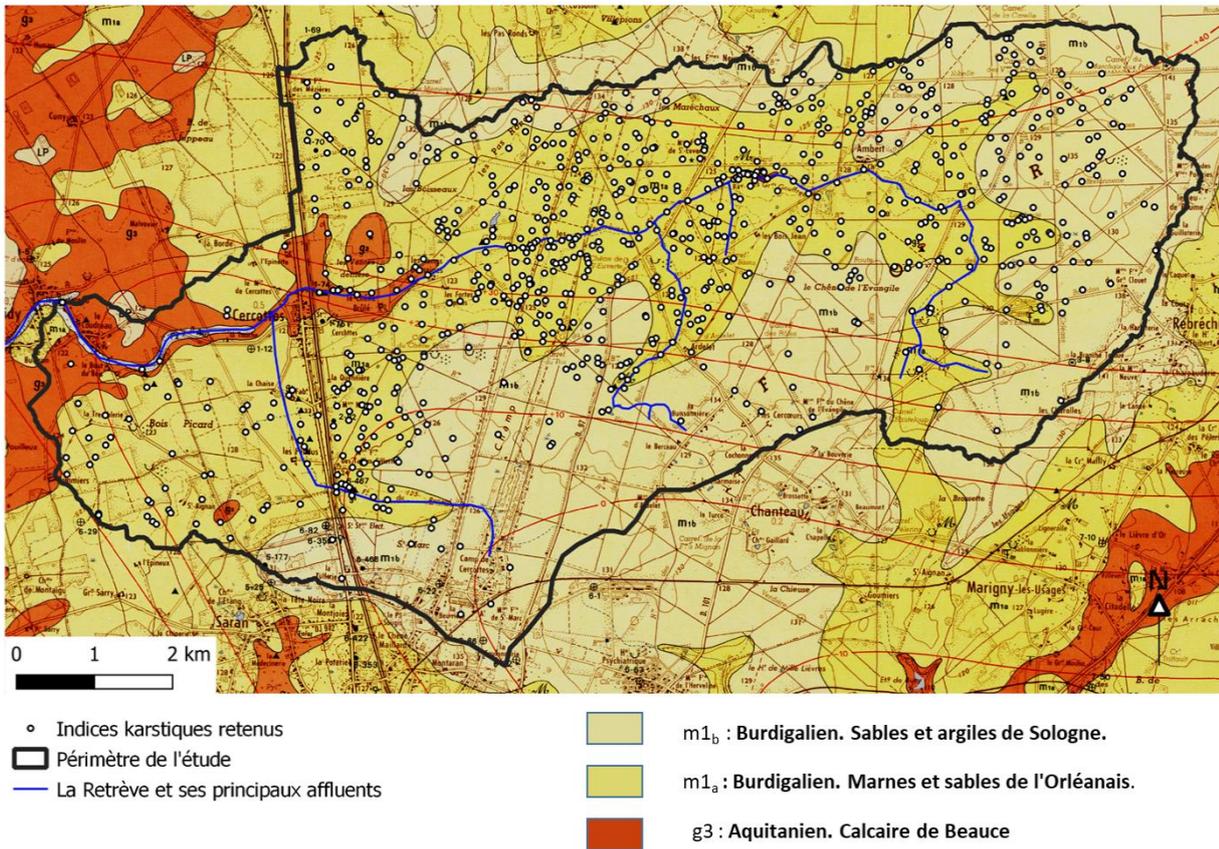


Figure 19 : Position des 820 indices karstiques sur fond de carte géologique (Carte BRGM n°363).

4.3. IDENTIFICATION DES FORMES KARSTIQUES ABSORBANTES

Afin de caractériser le rôle de ces formes dans l'engouffrement de l'eau des ruissellements vers le calcaire de Beauce sous-jacent, il nous faut pouvoir distinguer les formes qui « boivent » de celles qui stockent l'eau. Pour rappel du § 2.2.2, Lorain (1973) proposait un classement pertinent, distinguant :

- 1) les gouffres (à fond conique ou avec un point bas, qui absorbent) ;
- 2) les dépressions à fond plats et humides ;
- 3) les dépressions sub-sphériques à fonds secs (doline classique) et ;
- 4) les dépressions artificielles.

Pour les besoins de l'étude nous avons identifié et écarté les dépressions artificielles (catégorie 4 : voir les explications détaillant cette opération au § 3.2). Elles représentent un volume non négligeable de 760 000 m³ mais n'absorbent pas l'eau recueillie de manière significative.

Parmi les 820 formes finalement retenues, nous avons distingué deux catégories, à savoir :

- les gouffres (catégorie 1) dont les parois ont généralement une pente significative autour de l'orifice exutoire (point bas, minimum altimétrique de la dépression) (cf. Figure 20) ;
- les dolines à fond plat, (cf. Figure 21).



Figure 20 : Exemple de gouffre absorbant :
gouffre du champs de Tir 1 (photo D. Langlois).



Figure 21 : Exemple de doline à fond plat et sec :
doline de l'Étang-de la Retrève n°2.

Pour ce faire, nous avons calculé la pente autour du point le plus bas sur un rayon de 1,5 m. Le choix de ce rayon résulte des observations de terrain où souvent, l'orifice de perte est petit, même à l'intérieur de grandes structures. Pour ce calcul, nous devons retirer les gouffres et dolines qui étaient en eau au moment du passage du Lidar car la présence d'eau fausse le calcul de la pente. Nous travaillons ainsi sur 574 formes dont 54 gouffres remarquables.

Après avoir testé d'autres critères tels que la profondeur de la doline ou le volume, il s'avère que le critère de la pente maximale sur un rayon de 1,5 m autour du point le plus bas distingue bien les deux populations : les gouffres remarquables et les autres formes karstiques.

Partant du postulat que les gouffres remarquables sont connus et ont été décrits par les spéléologues, et parfois fouillés, parce qu'ils possèdent un exutoire, nous les considérons comme typiques de la catégorie 1. La distribution statistique des pentes maximales dans ces structures est donnée par la Figure 22. Ces boîtes à moustache nous montrent que 50 % de l'échantillon (entre les quartiles 25 % et 75 %) ont des pentes comprises entre 6° et 18° dans les structures de catégorie 1 alors qu'elles sont entre 3° et 7° dans les structures de catégorie 2.

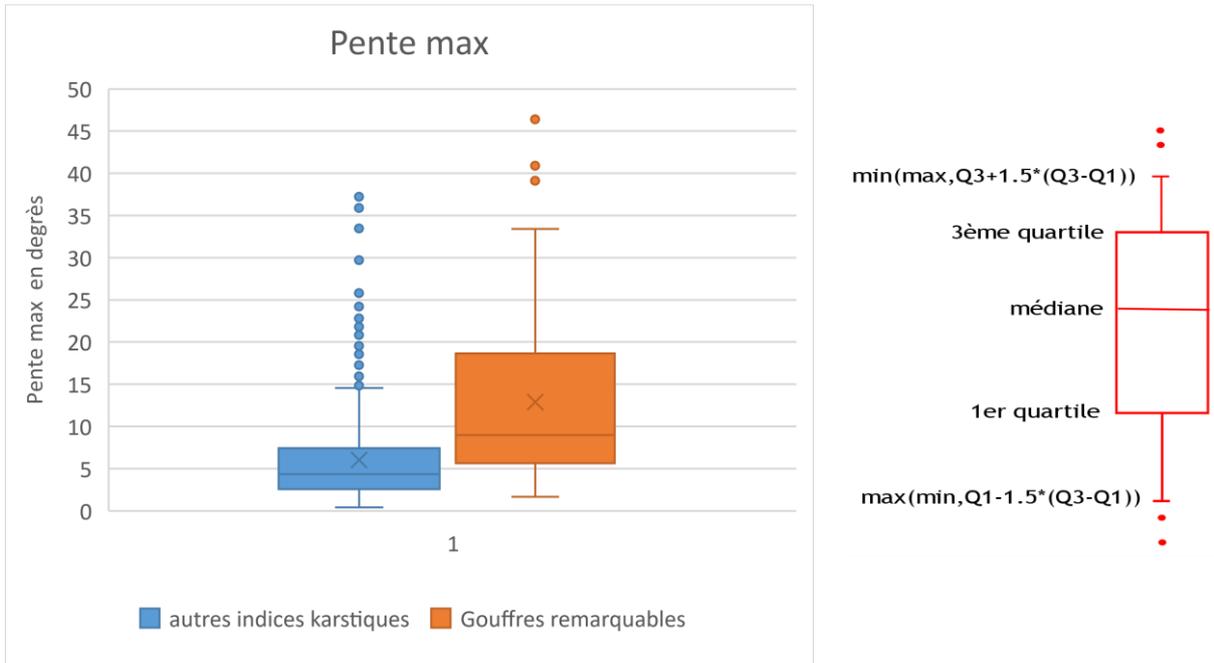


Figure 22 : Distribution statistique de la pente maximale dans un rayon de 1,5 m autour du minimum altimétrique de la forme.

Nous pouvons également observer que 75 % des gouffres ont des pentes supérieures à 6° autour du point bas. Ainsi, en prenant arbitrairement la limite de 6°, nous pouvons attribuer à la catégorie « Gouffres », 157 formes supplémentaires.

Le Tableau 6 donne le détail des chiffres pour diverses valeurs seuils. Il y a globalement moins de gouffres que de dolines mais le volume des gouffres est approximativement le même que celui des dolines.

Valeur seuil (pente autour du point bas)	Nombre de formes attribuées à la catégorie 1	Volume total (m ³)	Pourcentage de gouffres (en nombre)	Pourcentage de dolines (en nombre)	Pourcentage de gouffres (en volume)	Pourcentage de dolines (en volume)
5°	261	291 207	45 %	55 %	56 %	44 %
6°	211	252 854	37 %	63 %	49 %	51 %
7°	181	238 670	31 %	69 %	46 %	54 %

Tableau 6 : Estimation du nombre de gouffres actifs.

Ce calcul permet une estimation indirecte du nombre de gouffres et du volume concerné, que nous utiliserons pour quantifier les débits de perte dans le rapport hydrologie (à venir).

Nous avons laissé 246 formes qui étaient en eau, sur lesquelles nous ne pouvons calculer ni les pentes ni le volume. Il est permis de penser que ces formes sont pour l'essentiel des mares, dont l'infiltration est nulle ou très lente. Malheureusement les vols LiDAR ont eu lieu en période pluvieuse (34 mm de pluie dans la semaine qui précédait le levé, 128 mm dans le mois précédant le levé) : sachant que certains gouffres étaient en eau (Moreau, Fosses Guillaume) à ce moment, les formes pleines d'eau n'étaient donc pas uniquement des dolines à infiltration lente ou des mares. Il faudra tenir compte de cette incertitude.

4.4. GOUFFRES AMÉNAGÉS

Cela a été évoqué plus haut : certains gouffres ont été aménagés afin de stabiliser leur structure et assurer la connexion avec le réseau karstique. La plupart de ces aménagements ont probablement été réalisés (ou repris) lors des travaux d'aménagement de la vallée de la Retrève tels les forages absorbants du fossé du Renard (Figure 24) ou des fosses Guillaumes. Certains ont été faits par les spéléologues, bénévolement, avec l'accord du propriétaire (gouffre d'Ambert par exemple). Encore récemment (décembre 2018), le Comité Départemental de Spéléologie du Loiret (CDS45) a sécurisé l'entrée du gouffre des Diableaux 2 (Figure 23).



Figure 23 : Aménagement de la tête du gouffre des Diableaux 2 par le CDS45.



Figure 24 : Grille donnant sur un forage absorbant dans le fossé du Renard.

Les principaux gouffres équipés sont les suivants (Tableau 7) :

Gouffre	Aménagement
Baron	Deux buses horizontales. Puits Ø 1,50 m maçonné partiellement rempli d'alluvions et de remblais divers.
Chevreuils	En 2010, mise en place d'un tuyau PVC Ø 350 mm par les spéléologues pour canaliser l'arrivée d'eau dans le puits.
Cunneaux 1	Puits busé, profondeur 4 m.
Cunneaux 2	Puits busé, Profondeur 6 m ; draine les champs.
Cunneaux 3	Puits 10 m, aménagé en 1970 pour le drainage des champs (profondeur mesurée en 2021 : 8 m).
Diableaux 2	Buse PVC Ø 800 mm fermée par une grille cadénassée, posée par les spéléologues.
Fermes Neuves 1	Puits busé drainant les champs.
Fosses Guillaume 1	Un effondrement laisse voir la margelle d'un vieux puits en pierres de 1,50 m de diamètre. Forage absorbant (40 m) creusé pour écreter la surverse.
La Chaise	Puits maçonné, profondeur 6 m, protégé par une grille métallique. Une buse, drainant les champs, arrive du nord-est et une buse venant de la zone industrielle arrive du sud-ouest.
Long Domaines	Puits busé connecté à un tuyau évacuant l'eau des champs.
Rossignol	En 1968, le puits a été busé et aménagé en puisard par les laboratoires Servier.
Saint-Georges	Puisard busé (Ø 1 m). Évacuation des eaux de ruissellement du laboratoire Servier.
Saint Sulpice	Forage absorbant de 46 m de profondeur.
Ventes Derrière 1	Ouverture coffrée sur 1,70 m (protégée par une grille métallique).

Tableau 7 : Principaux gouffres équipés dans le bassin de la Retrève.

Lorsque ces structures artificielles existent, elles maintiennent ouverte la connexion entre la surface et le calcaire de Beauce. En périphérie de la forêt d'Orléans, elles sont généralement connectées à des drains agricoles qui évacuent l'eau en surplus.

Lorsque ces structures n'existent pas, ou sont dégradées, les cycles successifs d'érosion et de comblement modèlent le fond de la dépression et la perte peut se déplacer, s'ouvrir à un autre endroit ou se combler.

5. Conclusion

Alors que les études précédentes, relativement nombreuses depuis le début des années soixante en raison des aménagements réalisés sur le cours de la Retrève et la construction de l'autoroute A10, avaient identifié jusqu'à 254 dépressions (toutes origines confondues), l'utilisation de la technologie LiDAR, permettant de réaliser un modèle numérique de terrain de très haute précision (inférieure à la vingtaine de cm en cote altimétrique Z), a abouti dans cette étude à l'identification de 820 indices karstiques. Ces indices karstiques sont des dépressions dont l'analyse automatique des critères morphologiques (décrite en détail en Annexe 1), contrôlée par des observations de terrain conduisent à penser qu'elles sont d'origine karstique et peuvent jouer un rôle dans l'hydraulicité de la Retrève.

En complément, l'inventaire des gouffres remarquables a bénéficié du concours des travaux spéléologiques du Groupe Spéléologique Orléanais (GSO) menés depuis 1948 (premières tentatives de désobstruction du gouffre d'Ambert par Jean Moreau) dans la forêt d'Orléans. Près de 130 gouffres sont ainsi décrits dans des fiches (Annexe 5), dont 79 se situent dans le bassin versant amont de la Retrève (secteur d'étude). Ces structures ne sont pas toujours spectaculaires (la plus profonde - Fosse Guillaume 1 - atteint tout de même 9 m de profondeur), mais leur rôle, qui sera précisé dans l'étude hydrologique, semble primordial sur l'écoulement de la Retrève et de ses affluents. Les observations historiques montrent que les gouffres se remplissent progressivement depuis la tête des bassins de la Retrève ou de ses affluents puis se saturent en cascade. Leur caractère actif (absorbant) est observé principalement de Décembre à Mai, les écoulements étant très rarement observés en été.

Cependant, toutes ces dépressions ne jouent pas le même rôle hydrogéologique. Elles ne sont pas toutes en contact direct avec le calcaire de Beauce sous-jacent et sa nappe. Seuls les gouffres actifs peuvent créer un réel « court-circuit » des écoulements de surface vers les eaux souterraines. À partir du calcul de la pente autour du point bas de chaque forme karstique, il a été possible de distinguer les dépressions susceptibles de jouer le rôle de perte (les gouffres) de celles à fond plat, sièges d'une infiltration lente, ayant peu d'impact sur l'absorption rapide des écoulements en période de crue. Sur la base des hypothèses retenues, le volume total des gouffres actifs et celui des dolines est équivalent mais il y a près de deux fois plus de dolines que de gouffres.

Enfin, il ne faut pas oublier le rôle des aménagements de ces gouffres, dont une quinzaine sont équipés de buses et de drains dans le bassin de la Retrève, ainsi que la présence de forages absorbants (Étang de la Retrève, Fosses Guillaume, Gouffres des établissements Servier). De tels aménagements ont été davantage développés dans la vallée du Nan voisine, dans le but d'évacuer, dès l'amont, les excès d'eau provenant de la forêt. Ces structures fonctionnent encore pour la plupart mais beaucoup nécessitent un entretien ou une réhabilitation. Sans entretien, les gouffres se remplissent de débris végétaux et de sédiments, qui limitent progressivement leur capacité d'absorption.

6. Bibliographie

6.1. GÉOLOGIE RÉGIONALE ET FORÊT D'ORLÉANS

Bulletin du groupe spéléologique orléanais (GSO) :

N°2, 1975-76	Le ravin des grands gouffres (auteur : Munerot J.)
N°3, 1978	Le gouffre des Mézières (auteur : Moreau J.)
N°4, 1980	Découverte au gouffre de l'Étang Le gouffre des Ventes Derrière
Non identifié	Ultimes recherches au gouffre d'Ambert (auteur : Habert J.)
N°5, 1983	Le gouffre de Montgirault (Langlois D.)
N°6, 1990	Le karst de la forêt d'Orléans (auteurs : Moreau J., Thomas O.)
N°7, 2002	Les gouffres du nord d'Orléans (auteurs : Moreau J., Langlois D.)

Bulletins des Naturalistes Orléanais :

N°XIV, juillet 1961	La vallée du Nant
N°XVII, avril 1962	Les gouffres du Val et du Nord de la Sologne (auteur : du Ranquet)
N°XXVI, juillet 1964	Région de Saint-Lyé-La-Forêt et Villereau (auteur : Garnier A.)
N°XXVII, octobre 1964	Quelques observations sur trois gouffres de la Forêt d'Orléans (auteur : Moreau J.)
N°XXII, janvier 1966	Travaux du Groupe Spéléologique (auteurs : GSNO)
N°XXXIV, juillet 1966	Recherche spéléologiques sur la propriété des laboratoires Servier à Gidy (auteurs : Moreau, Munerot, Surget) Essai pour une solution au problème de la Retrêve (auteurs : Moreau J. et Munerot J.)
N°XXXVI, janvier 1967	Etude hydrologique de la forêt d'Orléans
N°7, janvier 1973	Spéléologie en Orléanais (auteurs : GSO)
N°29, 1 ^{er} trim. 1980	La Beauce

Autres écrits :

Archambault G., 1964. Les dépressions fermées au nord-est d'Orléans, Faculté des Sciences, Université de Paris, Mémoire d'études supérieures, 29 p.

Allard J.F., Galle-Cavalloni H., 1983. Nappe du calcaire de Beauce – Inventaire des points d'absorption en région Centre – 21 communes (Loiret, Eure-et-Loir). 27 p. Rapport BRGM 83-SGN-048-CEN.

Berger G. et Desprez N., 1969. Carte géologique au 1/50 000 d'Orléans et sa notice géologique.

Brethes A., 1993. Les types de station forestière de l'Orléanais. 419 p.

Combes P., 1907. L'hydrologie du Val d'Orléans. Cosmos n°1164, pp. 543-546.

Collectif, 1973. Le calcaire de Beauce – Géologie, hydrogéologie, applications en construction routière et génie civil. 222 p.

Desprez N., 1967. Étude hydrogéologique du calcaire de Beauce – Inventaire du bassin versant de la Loire en amont d'Orléans (Loiret), 74 p.

Desprez N., Evrard E., Peter A., Trautmann F., 1971. Autoroute A10 – Etude géologique du tronçon sud B2 de la section Ponthevrard – Orléans (78-45). 41 p. Rapport BGM 71-SGN-103-BDP.

Desprez N., Megnien Cl., 1973. Hydrogéologie de la Beauce. 21 p.

Desprez N., 1975. Protection, conservation et amélioration des eaux de surface et souterraines dans la zone péri-urbaine nord-ouest d'Orléans (Loiret). 70 p. Rapport BRGM 75-SGN-267-BDP.

Lorain J.-M., 1971. Esquisse géologique et géotechnique de la région Centre. 12 p. Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées – 55.

Lorain J.-M., 1973. Principe d'étude du réseau karstique de la forêt d'Orléans,

Maget Ph., 1991. Projet de zone industrielle de Gidy (Loiret) – Assainissement des eaux pluviales et usées – Impact sur l'environnement. 45 p. Rapport BRGM R-37970.

Milleret C., 1963. La forêt d'Orléans. In : Annales de Géographie, t. 72, n°392, pp. 426-458;

6.2. MÉTHODES DE DÉTECTION

Beranger N., 2015, Photo-interprétation appliquée à la recherche d'indices de cavités souterraines, CEREMA, rapport, 50 p.

Cartannaz C., Dewez T., 2015, Outils de traitement des Modèles Numériques de Terrains (MNT) pour la détection de cuvettes, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), rapport, 83 p.

Doctor D.H. & Young J.A., 2013, An evaluation of automated GIS tools for delineating karst sinkholes and closed depressions from 1-meter LiDAR-derived digital elevation data, 13th sinkholes conference NCKRI symposium, 449-458 p.

Wall J., 2018, Short course for identification of sinkholes from LiDAR imagery, North Carolina State University, conférence, 17 p - 25 p.

Weiss, A. (2001). Topographic position and landforms analysis. In Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA (Vol. 200).

Wu, Q., Deng, C., & Chen, Z. (2016). Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models. *Geomorphology*, 266, 1-10.

6.3. ÉVÈNEMENT DU PRINTEMPS 2016

Caisse Centrale de Réassurance, (2016). Inondations de mai-juin 2016 en France. Modélisation de l'aléa et des dommages. 21pp. - <https://www.ccr.fr/-/inondations-mai-juin-2016>

Noury G., Perrin Je, Gourdier S., Raucoules D., avec la collaboration de : Dewez T., Masson F., Greffié C., Negulescu C., Peter M., Langlois D., Munerot J., Cantaloube O., Mathon D., Ksibi I., Dejardin S., Eugène S., (2017). Retour d'expérience sur les mouvements de terrains liés à des cavités survenus dans le Loiret suite à la crise météo du printemps 2016. Rapport BRGM/RP-66462-FR, 317 pp.

6.4. AUTRES

Sur le camp militaire de Cercottes : <https://www.anciens-aerodromes.com/?p=24583> site consulté le 11 mai 2021.

Annexe 1

Identification des formes karstiques

1) Détail concernant la détection des dépressions topographiques (étape 1)

Étape 1a : Algorithme de détection

La mise en évidence des dépressions dans les MNT s'est appuyée sur la méthode « Diff_Fill » décrite par Cartannaz et Dewez (2015) et dont le principe de base est d'utiliser un outil dit de « remplissage » (comme celui de la boîte à outil « Hydrologie » du logiciel ARCGIS) sur le MNT brut, puis de ce même MNT brut avec le MNT aux dépressions remplies (Figure 25). Dans notre cas, l'outil utilisé pour détecter les dépressions fut le même Model Builder conçu sous ARCGIS que celui employé en 2015 par Cartannaz et Dewez (Figure 26).



Figure 25 : Mise en évidence des dépressions par méthode dite du "Diff_Fill" (Cartannaz et Dewez (2015))

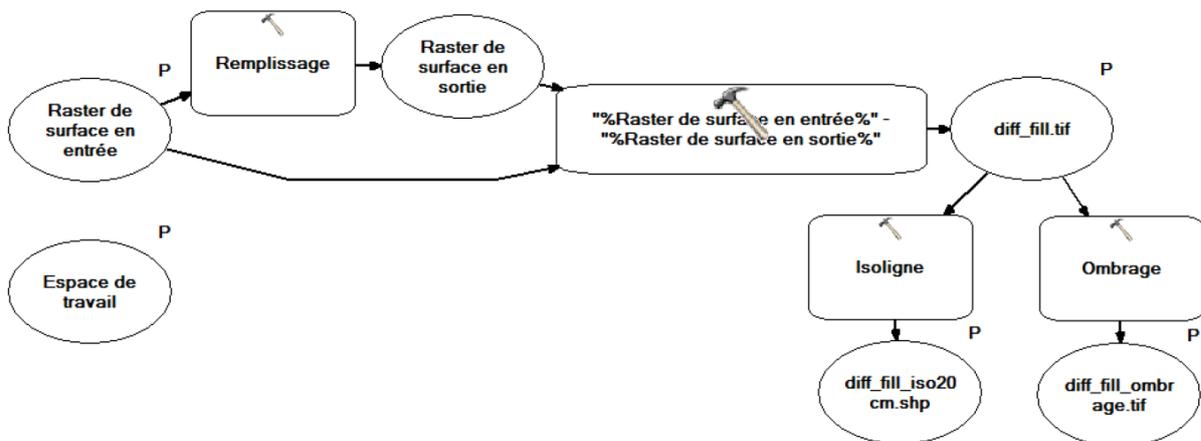


Figure 26 : Model Builder ARCGIS pour appliquer la méthode "Diff_Fill" à un MNT.

Cette opération appliquée sur un MNT a tendance à mettre en évidence un nombre très important de dépressions et notamment de faux-positifs (cuvettes de moins de 10 cm de profondeur, cuvettes de moins de 2 m de diamètre, etc.). L'une des méthodes proposées par Cartannaz et Dewez pour réduire le nombre de faux positifs et de ne pas effectuer le remplissage des dépressions directement sur le MNT brut mais d'utiliser un dérivé de ce dernier issu du calcul de l'indice topographique de position (TPI).

Cette opération de calcul du TPI consiste à calculer, toujours sous ARCGIS, la différence entre l'altitude de chaque pixel du MNT et l'altitude moyenne des voisins de ce même pixel (Weis, 2001) permettant ainsi de ramener les versants à l'horizontal et d'améliorer le remplissage du MNT et par conséquent la détection des dépressions.

Après calcul du TPI et utilisation de la méthode « Diff_Fill » sur ce dernier, 17087 dépressions ont pu être mises en évidence sur le secteur étudié.

Pour améliorer le rendu cartographique et le calcul de certains paramètres morphologiques des dépressions, une simplification des polygones extraits du MNT est effectuée pour atténuer l'effet « crénelé » dû à la forme carrée des cellules du MNT en entrée (Figure 27).

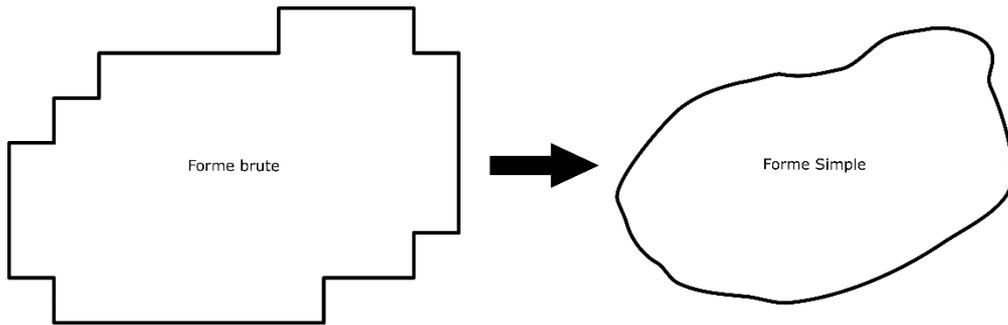


Figure 27 : Simplification des formes extraites.

Aux 17 087 dépressions extraites automatiquement sont venues s'ajouter 3093 dépressions supplémentaires identifiées à dire d'expert à partir des isolignes d'altitudes du MNT dans les secteurs où ces cuvettes supplémentaires étaient dissimulées par des dépressions de plus grande dimension (Figure 28).

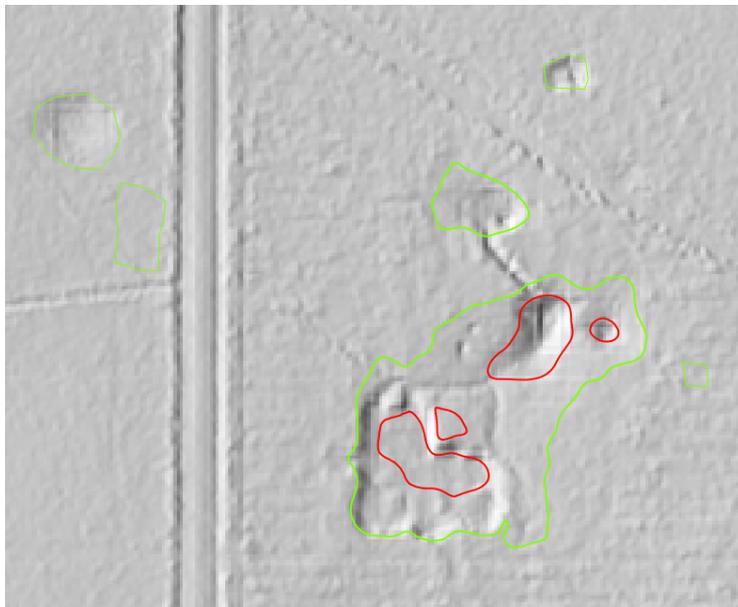


Figure 28 : Mise en évidence à dire d'expert (courbes rouge) de dolines aux sein d'une autre doline détectée automatiquement (courbes vertes).

Étape 1b : Caractérisation des dépressions

Suite à l'étape 1a, les dépressions mises en évidence sont ensuite caractérisées.

La caractérisation des dépressions s'est faite à l'aide d'un script Python basé sur les travaux de Wu *et al.* (2016). Les caractéristiques morphologiques suivantes ont été déterminées :

- longueur et largeur : Elles sont définies en déterminant le plus petit rectangle dans lequel chaque forme peut s'inscrire (Figure 29) ;
- surface, périmètre et volume : Ces valeurs sont facilement calculées à partir de la géométrie des formes simplifiées ;
- azimut : Il correspond à l'angle formé entre le plus grand côté du rectangle englobant la dépression et le Nord géographique.

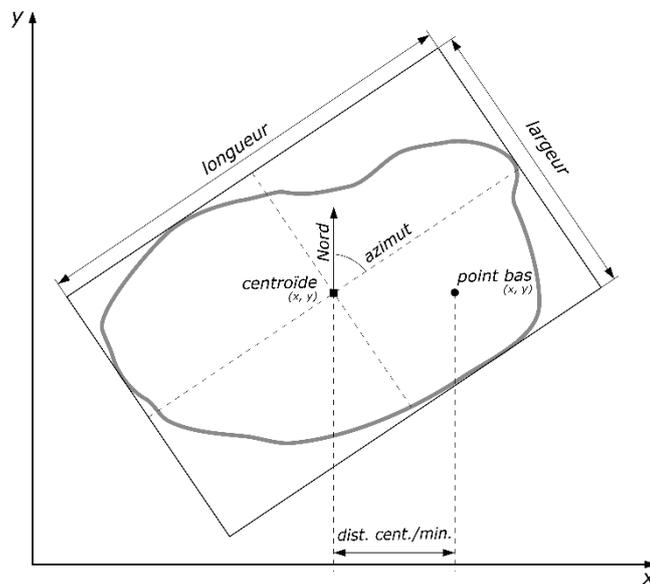


Figure 29 : Caractéristiques morphologiques liées à la forme de la dépression.

- élongation (ELG) : Il s'agit du rapport entre la longueur et la largeur. Cette valeur est, par définition, supérieure ou égale à 1. Plus elle est grande, plus la forme est allongée. Pour un carré et un cercle, $ELG = 1$. Une classification est proposée par Basso *et al.* (2013) :
 - forme circulaire à « sub-circulaire » : $ELG \leq 1,21$,
 - forme elliptique : $1,21 < ELG \leq 1,8$,
 - forme allongée : $ELG > 1,8$,
- indice de compaction (CI) : Il correspond au rapport entre l'aire que prendrait la forme considérée si elle était un cercle (calcul basé sur son périmètre p) et son aire réelle A ($CI = 4\pi A/p^2$). Pour un cercle $CI = 1$;
- altitude minimale et maximale de la dépression : Ce sont les valeurs en Z des cellules du MNT correspondant aux points ayant l'altitude la plus basse et la plus haute de la forme ;
- altitude moyenne du voisinage : Cette valeur correspond à la moyenne des valeurs en Z des cellules du MNT dans les 10 m entourant la dépression (Figure 30).

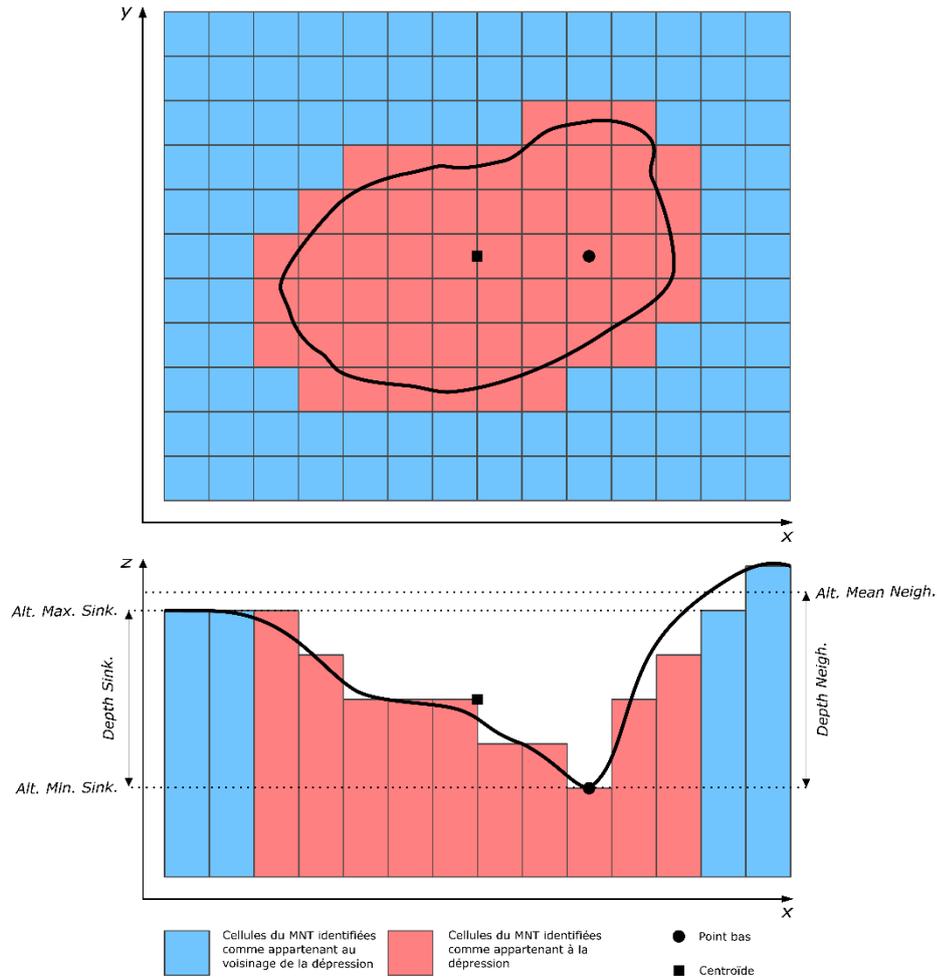


Figure 30 : Caractéristiques morphologiques calculées à partir de la forme et du MNT.

- profondeur de la dépression : Elle correspond à la différence entre l'altitude maximale et l'altitude minimale de la dépression ;
- profondeur par rapport au voisinage : Il s'agit de la différence entre l'altitude moyenne du voisinage de la dépression et l'altitude minimale de la dépression ;
- variation (écart-type) des altitudes de la forme (STandard Deviation – STD) : C'est l'écart-type calculé des valeurs d'altitude des cellules du MNT comprises dans la forme détectée ;
- coordonnées du centroïde : Ce sont les coordonnées géographiques du centre du plus petit rectangle englobant la forme ;
- coordonnées du point bas : Il s'agit des coordonnées géographiques du point le plus bas de la dépression ;
- distance entre le centroïde et le point bas : La distance linéaire entre le point le plus bas et le centroïde de la dépression.

2) Détail concernant le tri des dépressions détectées (étape 2)

Le filtre utilisé se base d'une part sur des critères de formes et d'autre part sur des critères géographiques. Les choix se sont faits à dire d'expert, après une série de tests paramétriques.

- critères de forme :
 - une profondeur négative correspond à une forme « perchée » dans son environnement. Cette configuration n'est pas naturelle : il s'agit par exemple de remblais. Les dépressions avec une profondeur négative sont exclues de l'inventaire,
 - la majorité des formes très allongées paraissent ici non karstiques : il s'agit typiquement de fossés, de routes en déblai et de bassins. Après une phase de test, les dépressions avec une élongation (ELG) supérieure à 3 sont exclues de l'inventaire,
 - les formes karstiques isolées sont globalement circulaires. Après une phase de test, les dépressions avec un indice de circularité (CI) inférieur à 3 sont exclues de l'inventaire,
 - les formes les plus petites jouent un rôle a priori très faible dans la problématique ici traitée (l'infiltration des eaux). De plus, une grande partie est vraisemblablement d'origine non karstique. Après une phase de test, les dépressions avec une profondeur inférieure à 0,5 m et un volume inférieur à 50 m³ ont été exclues de l'inventaire ;

- critères géographiques : les dépressions situées à proximité des aménagements peuvent leur être liées : pour les ouvrages linéaires, il peut s'agir de fossés ou de zones basses artificiellement fermées suite à la construction ; pour les bâtiments, il s'agit typiquement des accès en sous-sol, telles des descentes de garage. Après une phase de test, un filtrage sur les profondeurs et sur les élongations, plus sévère que celui indiqué ci-dessus, a été effectué. Différents critères ont été retenus en fonction du type d'ouvrage et de l'occupation des sols considérée :
 - routes et voies ferrées : les dépressions profondes de moins de 1 m sont exclues,
 - zones bâties : les dépressions profondes de moins de 2.5 m sont exclues,
 - intégralité des zones urbanisées (détermination via l'occupation des sols) : les dépressions avec une élongation (ELG) supérieure à 2 sont exclues.

Annexe 2

Artefacts présents dans le MNT

Cas 1 : Carrières à ciel ouvert

Dans la forêt d'Orléans, d'assez nombreuses dépressions sont considérées comme des carrières à ciel ouvert du fait notamment de leurs formes irrégulières et de l'absence d'infiltration des eaux (exemple en Figure 31).

Cas 2 : Ouvrages hydrauliques (bassins, fossés, etc.)

Les innombrables fossés bordant les routes, les voies ferrées, les chemins et servant de drains dans la forêt constituent des dépressions artificielles (exemple en Figure 32).

Cas 3 : Accès à des sous-sols (garages, stockages, etc.)

Les descentes de garage forment des petites dépressions fermées artificielles (exemple en Figure 33).

Cas 4 : Thalwegs en partie remblayés (voies de circulation)

Lorsqu'une route traverse un thalweg, elle peut créer un barrage qui crée artificiellement une dépression « fermée » (exemple en Figure 34).

Cas 5 : Stockage semi-enterré de matières (décharges)

L'aménagement de zones de stockages semi-enterrées génère des dépressions à la surface du sol. Un exemple typique de la zone étudiée est le centre d'enfouissement de déchets de Chevilly (exemple en Figure 35).

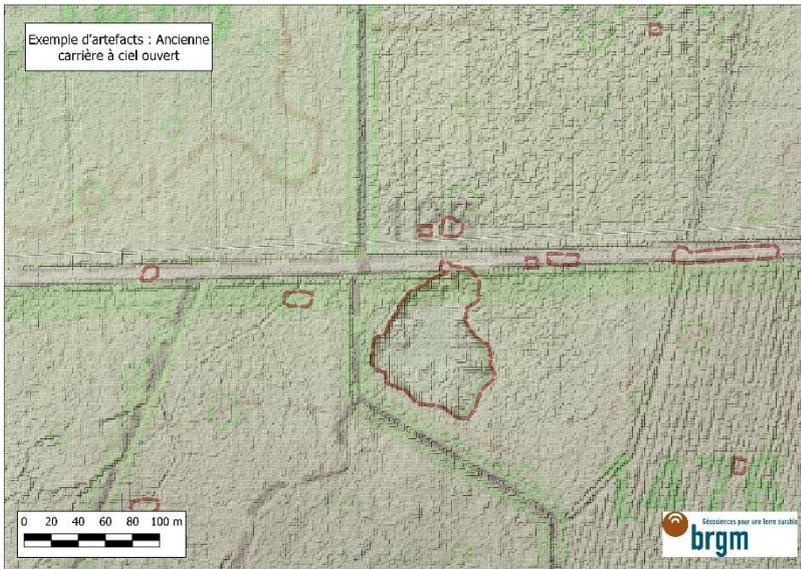


Figure 31 : Cercottes, ancienne carrière à ciel ouvert



Figure 32 : Cercottes, fossés le long de la RD 2020



Figure 33 : Gidy, descentes de garages.



Figure 34 : Limite Fleury-les-Aubrais chateau, thalweg coupé par la RD97.



Figure 35 : Chevilly, centre d'enfouissement de déchets.

Cas 6 : Trous d'origine pyrotechnique

Suite à l'analyse des photographies aériennes d'archives et des éléments historiques disponibles, ces trous concernent la base aérienne de Bricy et l'ancien camp militaire de Cercottes. La zone militaire de Chanteau n'est pas, à notre connaissance, concernée par de telles dépressions.

La base aérienne de Bricy a été bombardée au cours de la seconde guerre mondiale. Les impacts faits par les bombes sont encore présents dans les forêts : leurs dimensions sont d'environ 10-12 m de diamètre et 1,5-2,5 m de profondeur. La série de photographies aériennes d'archive de 1949 indique que la zone touchée ne s'étendrait pas à plus de 1,5 km de distance de la base : le secteur étudié ici ne paraît donc pas concerné par ces trous.

L'ancien camp militaire de Cercottes (qui concerne également la commune de Saran au sud) a été créé en 1874. Il aurait fait l'objet de tirs d'essais et d'entraînement à partir de la Première Guerre Mondiale et jusqu'à une date inconnue. Quelques impacts au sol, souvent concentrés sont bien visibles sur les photographies aériennes d'archives (1949, 1954, 1961 et suivantes), ainsi que sur le MNT, notamment au niveau de la route forestière de l'Ardelet et plus au sud.

La Figure 36 montre l'exemple d'une zone bombardée pendant la seconde guerre mondiale près de Bricy : les trous de bombes sont visibles dans une forêt en 1949 mais ne sont déjà plus visibles dans les champs à cette époque. Ils sont toujours visibles sur le MNT de 2019.

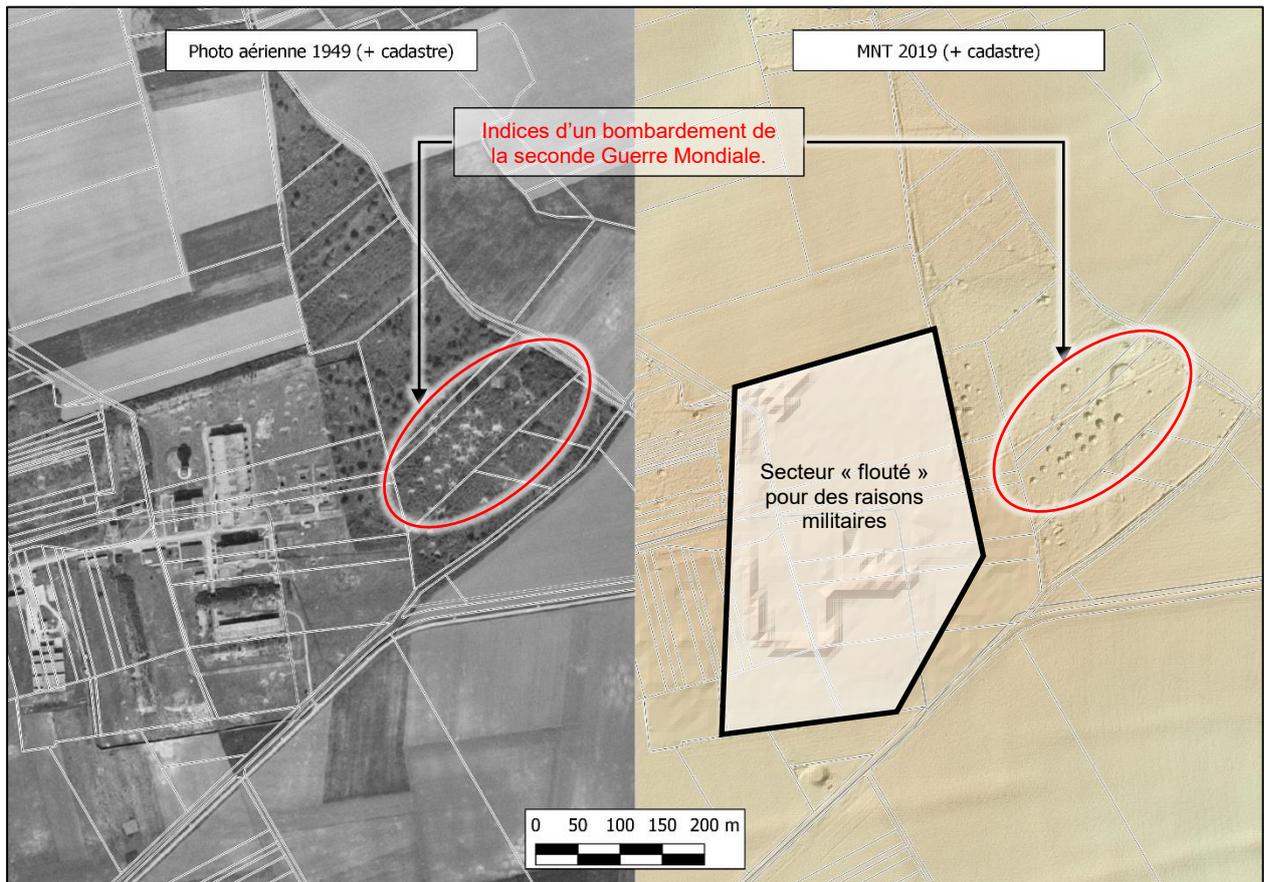
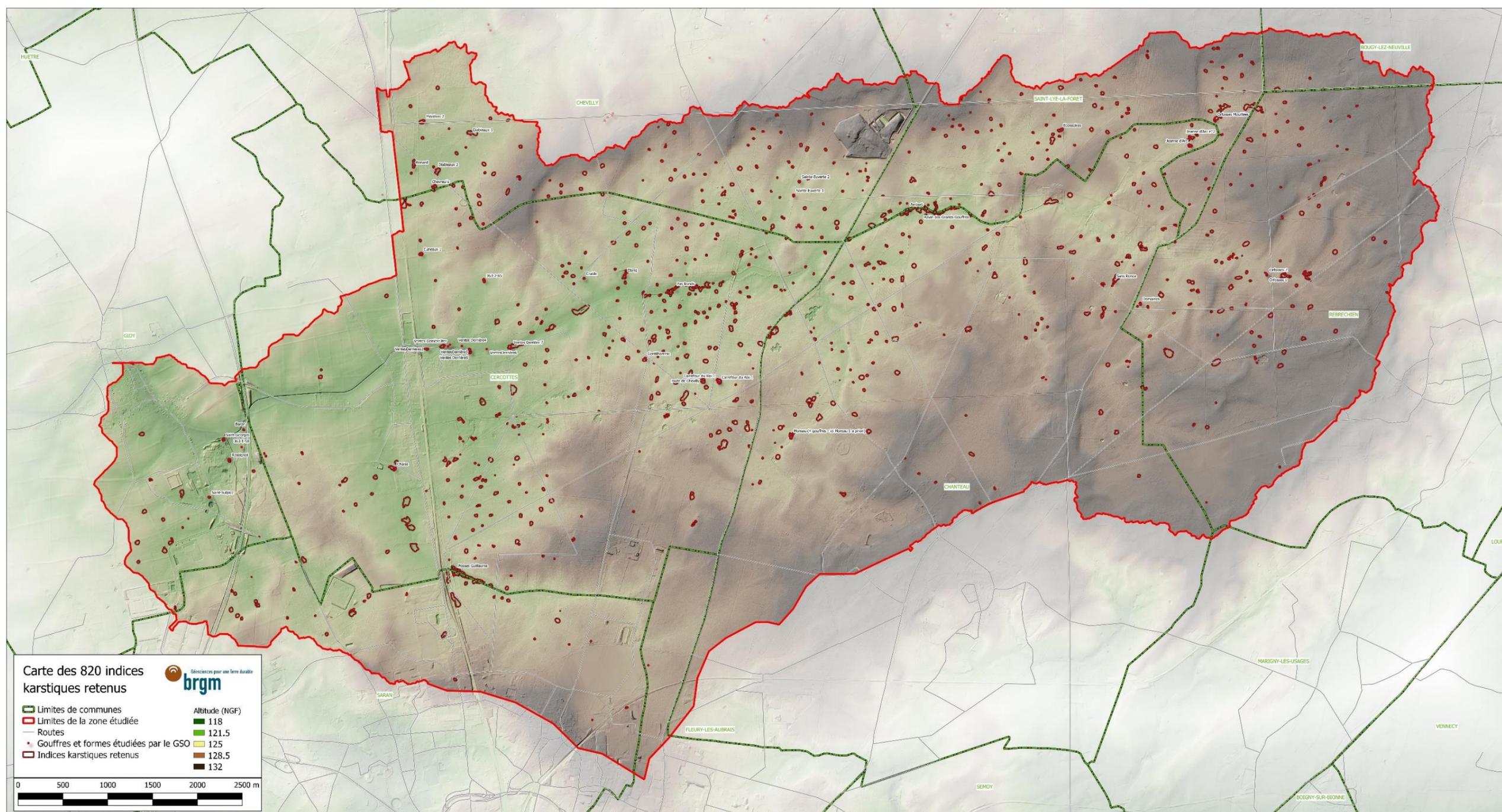


Figure 36 : Zone bombardée près de Bricy.

Annexe 3

Carte des 820 indices karstiques retenus



Annexe 4

Observations hydrologiques sur 15 gouffres

Hydrologie gouffre d'Ambert (1960-2020)

Années	Juillet							Août							Septembre							Octobre							Novembre							Décembre						
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53															
1960																	0																									
1962												X																														
1963																										X																
1964	X																																									
1965											0										0		0																			
1966		X																0																								
1969					X			X		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																
1970	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X															
1971																																										
1972	X											X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																
1973										X								X	X	X	X																					
1974																X	X	X	X	X	X	0					0															
1975				X					X		X						X	X	X	0	X	0	0	X	X	X	X															
1977												X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																
1978	X										X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0															
1979																		X																								
1980	X		X																																							
1982																					X	X	X	X	0																	
2005																																										
2009									X																	X	X															
2017																																										
2018																																										
2019																																										
2020																																										

0 : Absorbe X : A sec

Hydrologie gouffre des Chevreuils (1964-2020)

Années	Janvier			Février			Mars			Avril			Mai			Juin											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
1964								0	0																		
1967												X	X						X		X				X		
1968	0	0						0				0														X	
1971															X												
1974															X												
1975																						X					
1976													0														
1978	X							0	X	0								X		X							
1979			X					X	X			0															
1980								X																			
1982					X																						
1984																								X			
1985																					X						
1986	X		X					X	X			X			0						X				X		
1987	X		X					X	X			X			0						X				X		X
1988	0	0	0					0	X												0				X		X
1989	X		X					X	X			X			X					X	X				X		X
1990	X		X					X	X			X			X					X	X				X		X
1991	X		X					X	X			X			X					X	X				X		X
1992									X			X			X						X						
1993	X		X					X	X			X			X					X	X				X		X
1994	X		X					X	X			X			X					X	X				X		X
1995								0	0			0									X				X		X
1996	X		X					X	X			X			X						X				X		X
1997			X					0	X						X						X				X		X
1998	0	0	X					X	0			X			0					X							
1999	X							0	0			X			0					0							
2000	0		X					0	X			X			0					0							X
2001	0	0	0					0	0			0			0					0							X
2002	0	0	0					0	0			0			0					0							X
2003	0	0	0					0	0			X			0					0							X
2004								X	X			X								X							
2005								X							X												
2006												X															
2008																	0										
2009																											
2010		0							X																		
2012																											

Hydrologie gouffre des Diablaux n° 1 (1959-2020)

Années	Juin					Janvier					Février					Mars					Avril					Mai				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26				
1959																				X										
1960									0					X																
1962		0																												
1967									0																					
1968		0																												
1974																					X									
1975													0	0									X	X	X					
1976							0	0										0												
1978				0			0	0																						
1979						0	0				0	0																		
1988			0			0	X	X																						
1995											0																			
1999			0			0	0	0	0					0	0															
2000								0							0	0		0	X											
2001		0				0			0		0	0		0			0		0											
2002						0	0	0					0																	
2003		0				0			0									0												
2004						0	X				X																			
2006																	X													
2009																			0											
2010		0	0	0	0	0	X		X			0	0			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
2011		0	0	0	0	0	0	0	X		X	0	X		X				X	X	X	X	X	X	X					
2012		0							X							0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
2013								0		0	0			0			0	0	0											
2014		0						0	0	0	0									0					X					
2015								0	0	0	X	0	0	0	0	0	X	0	0	X										
2016		X		X		0	0		0			0	0			0		X					0		X					
2017							X																X							
2018		0	0	0		0	0	0	0	0			0	0				0				0	0	0	X					
2019			X			X	X		0				X					X	X	X	X	X	X	X	X					
2020		0				0	0	0	0	0									0			X								

0 : Absorbe X : A sec

Hydrologie gouffre des Diablaux n° 1 (1959-2020)

Années	Juillet					Août					Septembre					Octobre					Novembre					Décembre				
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53			
1959					X	X	X																							
1960					0													0												
1962																X														
1963						X	X			X	X																			
1964		X																												
1965									0				X								0	0			0					
1966									X	X																0	0			
1967						X				X	X																			
1975										X	X		0	X	X															
2000	X													0					0		0	0	0				0			
2002																											0			
2005										X																	0			
2009																X	X	X					X	X			0			
2010						X				X					X	X	X				X	X	0				0			
2011						X														X	X						X			
2012		0	0							X	X				X												0			
2013	X					X								X		X			X								0			
2014					X	X	0	X	X						X								X				0			
2015							X																							
2016						X								X																
2017				X							0	X								X							X			
2018	X					X											X				X	X	X				X			
2019										X	X	X	X	X	X		X		X	0							0			
2020	X			X	X				X	X	X	X	X	X	X															

0 : Absorbe X : A sec

Hydrologie + gaz au gouffre des Diablaux n° 2 (1964-2020)

Années	Janvier							Février							Mars							Avril							Mai						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26									
1964	X	X																																	
1967												X									X														
1968	0	0	X				0					X													X										
1971															X																				
1974															X																				
1976							X																												
1980								X	X																										
1988	0	0	0	0	0	0	X	X	X						X					X															
1989																																			
1995					X				0	X	0	X									X				X										
1996	X	X	X	X			X		X	X	X	X			X					X					X										
1997								0		X									X						X										
1998	0	0	X			X		0	X		X				0	0	0	X	X						X	X									
1999	X	0	X		X	0	X	X	0	0					0	0	X	X	0				X	X	X	G									
2000	0							0		X		X				0	0	0							X										
2001	0	0		0	X	0		0	0	0	0	0			X	X	0		X	X					X										
2002				0	0	0	0	0	0	X			X																						
2003	0	0	X		0	0	0	X				X	X						X	X	X	X				X									
2004	X	X	0	X	0	0	X	X	X	X	X	X			X	X			X	X	X	X	X	X	X	X									
2005	X	X	X	0	X	X		X	X	0	X	X		X	0		X	X	0		X	X	X	X	X	X									
2006					X			X	X	X		0	X		X			0							X	X									
2007	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X				X	X									
2008	X	X	X	X	0			X	X	X							0	0									G								
2009					X			X					X		X				0																
2010	X				0			0				0																							
2012																		X																	
2013							0			0																									
2014	0						0	0																											
2015				X	X	0					XX						0	0							X										
2016									0																	0									
2017			X	X			X																												
2018							0	XX	0	0																X	0								
2019			XX				XX		X				XX																						
2020									0A					XX				XX								X	X								

0 : Alimentation extérieure A : Alimenté par la perte X : A sec, bougie allumée XX : A sec, pas de contrôle bougie G : extinction bougie

Hydrologie + gaz au gouffre des Diablaux n° 2 (1963-2020)

Années	Juillet							Août							Septembre							Octobre							Novembre							Décembre						
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53															
1963							X										X										X	X														
1965																												0	0													
1966																												0	0													
1967														X																												
1995								X						X																												
1996	X													X																												
1997		X										X																														
1998		X	X									G																														
1999	G										X			X																												
2000												X																														
2001																																										
2002																																										
2003	G	G						X			X			X																												
2004								X						G																												
2005	X	X	G											G																												
2006											X																															
2007	G													X																												
2008	X																																									
2009																																										
2010																																										
2011																																										
2012																																										
2014																																										
2015																																										
2016																																										
2017																																										
2018																																										
2019	G																																									
2020		X																																								

0 : Alimentation extérieure A : Alimentation par la perte X : A sec, bougie allumée XX : A sec, pas de contrôle bougie G : extinction
bougie

Hydrologie gouffre des Fosses Guillaume n° 2 (1970-2020)

Années	Janvier							Février							Mars							Avril							Mai						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26									
1970						0	0																												
2006											0																								
2011							0	0								X																			
2012									X		0						0	0						0											
2013										0																									
2014							0	0		0																									
2015							0	0			X	0				0	0	0																	
2016		0				0	0	0				0										0	0	0	0										
2017							X									X																			
2018				0			0	0	0	0						X								0											
2019							X	X	0		0						X	X																	
2020				X			0	0	0	0	0									0															

Années	Juillet							Août							Septembre							Octobre							Novembre							Décembre						
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53															
2011																																										
2012		0																							0																	
2013										X															0																	
2014		0					0											0				0				0	0															
2015																																										
2016																					X																					
2017																																										
2018																																										
2019																	0																									
2020														X																												

0 : Absorbe X : A sec

Hydrologie gouffre des Fosses Guillaume n° 4 (2011-2020)

Années	Janvier							Février							Mars							Avril							Mai						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26									
2011								0	X								X																		
2012	0	0								0	0						0	0							0										
2013												0							0																
2014							0	0				X																							
2015											0	0	0	0			X	0	0	0															
2016							0	0															0												
2017							X			0							X																		
2018				0			0	0	0	0	0					0							X												
2019								0	X	0	X						X	X																	
2020						0	0	0	0	0	0								0																

Années	Juillet							Août							Septembre							Octobre							Novembre							Décembre						
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53															
2011																																										
2012		0																						0																		
2013					X														0																							
2014			0				0															0																				
2015																																										
2016																																										
2017																						X																				
2018																																										
2019																	0																									
2020														X																												

0 : Absorbe X : A sec

Hydrologie gouffres Moreau n° 1 (1960-2020)

Années	Janvier							Février							Mars							Avril							Mai						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26									
1960					0	0	0	0							0																				
1961											0				0																				
1962		0													0																				
1963	0	0									0				0			0	0	0	0					0									
1964				0	0	0	0	0							0								X		X										
1965	X	0										X	0	0	0	0				X		0		X											
1966	0	X	0		0			X	X	0	0	X	X	X	X		X		X	X					X										
1967	0	0			0			0		X	X	0	0	X	0		0		0																
1968			0	0	0	0			0	X	0	0	0	0	X			0			X														
1969									0																										
1972					X				0																										
1973						0																													
1974								0										X																	
1975				0										0	0	X	X	0							X										
1976				0	0				X									X																	
1977					0				0	0				X				X																	
1978	X																	0				X													
1980								X											X																
1984																																			
1985															0																				
1987																																			
1988																																			
1990																																			
1991	0																																		
1994	0																																		
1995																																			
1996																																			
1998															0																				
1999																																			
2004																																			
2010													0	0																					
2011																																			
2015																																			
2016																																			
2017																																			
2018																																			
2019																																			

Hydrologie gouffres Moreau n° 2 (1960-2025)

Années	Janvier							Février							Mars							Avril							Mai						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26									
1960																																			
1961																																			
1962																																			
1963	0	0																																	
1964				0		X	0	0																											
1965	0	0																																	
1966	0	0	0					X	X																										
1967	0	0	0	0	X	0		X	0	X	X	X	X	X	0																				
1968																																			
1969																																			
1972																																			
1973								X																											
1974																																			
1975				0																															
1976				0	0				0																										
1977																																			
1978	0																																		
1979																																			
1980																																			
1984																																			
1985																																			
1987																																			
1988																																			
1990																																			
1991	X																																		
1994	0																																		
1995																																			
1996																																			
1998																																			
1999																																			
2004																																			
2010																																			
2011																																			
2015																																			
2016	0	X																																	
2017																																			
2018																																			

Hydrologie + gaz gouffre des Sans Ronce (1966-2020)

Années	Années																														
	Janvier					Février					Mars					Avril					Mai					Juin					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26					
1966	0	0			0			X	0	X	X		0		0		X		0	X		X	X	X	X						
1967	0										0						X	X			0										
1968							0											0				X				X					
1969				X	0			0							X						0		X								
1970					0																	X									
1971	X																														
1972		X	X																		X										
1973																				X											
1974																		X													
1975					0								0									X									
1976							0							X								X									
1977				X	X		0																X			X					
1978																										X					
1979											0															X					
1981					X												X		X	0											
1982														X																	
1983												0																			
1984		X	X								X																				
1985							0																								
1987																															
1989				X															X												
1992					X			X	X			X	X																		
1995		X	0																												
1996		0																								X					
1997									0													X	X			X					
1998							X		X					0												X					
1999								0												0											
2000																							X								
2001					0																										
2002													X																		
2003																				X											
2004	0																									X					
2005											X															X					
2006																X															
2007				X	X	X	X					X					X		X						X	X					
2008					0									X	X			X							X	X					
2009								X					X	X	X	X			X	0					X	X					
2010									X				0	X	X	X															

Hydrologie + gaz gouffre des Sans Ronce (1965-2020)

Années	Juillet							Août							Septembre							Octobre							Novembre							Décembre				
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53													
1965	X										0	X		X				X		0	0						0													
1966	X				X						X	X																												
1967	X										X	X	X																											
1968	X					X						X							X																					
1969																				X																				
1970				X												X																								
1971									X																															
1972									X		X							X																						
1973							X			X	X	X	X	X																										
1974								X		X	X	X	X	X				X																						
1975			X					X		X	X	X	X	X									0																	
1976							X																																	
1977							X															X																		
1979													X																											
1982										X												X																		
1984														X																										
1985																						0																		
1986										X																														
1987										X							X																							
1988										X																														
1990											X																													
1994																																								
1995	X								X		X	X	X	X	X	X	X	X	G	X	X	X	X	X	X	X	X													
1996													X																											
1997																																								
1998																																								
1999																																								
2000																																								
2001																																								
2002																																								
2003																																								
2004																																								
2005																																								
2006																																								
2007																																								
2008																																								
2009																																								
2010																																								

Annexe 5

Fiches d'observations spéléologiques

Ces fiches ont été bâties par Daniel Langlois sur la base des observations effectuées par le GSO. Elles ont ensuite été complétées et mises en forme par le BRGM. Elles sont ici classées par ordre alphabétique.

Les tableaux suivants reprennent les noms et coordonnées des 129 gouffres concernés.

Nom	Coordonnées (RGF 93 / Lambert 93)		Nom	Coordonnées (RGF 93 / Lambert 93)	
	X	Y		X	Y
Ambert	622 245	6 767 605	Cuneaux 1	616 827	6 767 152
Arrachis 1	625 666	6 773 367	Cuneaux 2	616 807	6 767 306
Arrachis 2	625 731	6 773 325	Cuneaux 3	617 514	6 766 852
Arrachis 3	625 696	6 773 319	Diableaux 1	617 379	6 768 473
Baron	614 827	6 765 207	Diableaux 2	617 000	6 768 086
Bois Bourré	611 936	6 765 615	Diableaux 2 perte	616 990	6 768 054
Bois de Jupeau	616 390	6 767 813	Domaines	624 828	6 766 528
Bois Vallet 1a	618 737	6 772 396	Ecossoires	623 874	6 768 370
Bois Vallet 1b	618 744	6 772 385	Entonnoir	624 121	6 770 267
Bois Vallet 2	618 810	6 772 278	Epineux 1	614 832	6 761 984
Carrefour du Roi 1a	620 110	6 765 710	Epineux 2	615 005	6 762 252
Carrefour du Roi 1b	620 107	6 765 721	Erable 1	618 632	6 766 862
Carrefour du Roi 2a	620 126	6 765 694	Erable 2	618 432	6 766 927
Carrefour du Roi 2b	620 133	6 765 709	Etang	619 090	6 766 908
Carrefour du Roi 2c	620 135	6 765 691	Etang Retrève 1	620 401	6 767 147
Champ de tir 1	620 138	6 766 811	Etang Retrève 2	620 392	6 767 108
Champ de tir 2	620 002	6 766 756	Fermes neuves 1	623 021	6 769 965
Champ de tir 3	620 023	6 766 753	Fermes neuves 2	622 756	6 769 759
Champ de tir 4	619 926	6 766 728	Fermes neuves 3	622 715	6 769 647
Champ de tir 5	619 836	6 766 732	Fosses Guillaume 1	617 173	6 763 619
Champ de tir 7	619 813	6 765 768	Fosses Guillaume 2	617 383	6 763 493
Champ de tir 8	619 808	6 765 806	Fosses Guillaume 3	617 406	6 763 486
Champ de tir 9	619 994	6 766 415	Fosses Guillaume 4	617 439	6 763 484
Chemin des Bois Jean	622 050	6 767 590	Garenne Montgirault 1	626 206	6 772 787
Chêne Brûlé 1	617 221	6 765 308	Garenne Montgirault 2	626 225	6 772 747
Chêne Brûlé 2	617 361	6 765 101	Garenne Montgirault 3	626 266	6 772 797
Chêne Brûlé 3	617 410	6 765 095	Gentilhomme 1a	619 302	6 765 963
Chêne Brûlé 4	617 490	6 765 491	Gentilhomme 1b	619 291	6 765 954
Chêne du bénitier	619 670	6 769 134	Gentilhomme 2	619 234	6 766 045
Chêne vert	615 110	6 760 964	Gourdes 1	624 098	6 770 219
Chevreuils	616 970	6 767 885	Gourdes 2	624 116	6 770 180
Chien	624 933	6 773 587	Jeanne d'Arc 1	625 385	6 768 287
Cossolle	619 865	6 770 307	Jeanne d'Arc 2	625 394	6 768 380

Nom	Coordonnées (RGF 93 / Lambert 93)	
	X	Y
Jeu de Canne	618 828	6 769 234
La Chaise	616 503	6 764 759
Longs Domaines	618 612	6 766 507
Marchais aux cannes	623 374	6 769 733
Marmites	633 391	6 771 876
Mauchêne 1	617 614	6 769 632
Mauchêne 2	617 590	6 769 577
Mauchêne 3	617 629	6 769 746
Médecinerie	616 386	6 761 380
Mézières 1	618 907	6 768 654
Mézières 1A	618 873	6 768 620
Mézières 2	616 851	6 768 621
Mézières 3	618 979	6 768 701
Mézières 3A	618 959	6 768 670
Mézières 4	618 669	6 768 585
Migoubert	624 924	6 773 647
Montgirault	626 382	6 772 642
Moreau 1	620 764	6 764 878
Moreau 2	620 816	6 764 944
Moreau 3	620 790	6 765 173
Moreau 4	620 454	6 764 979
Orfosses 1	626 238	6 766 837
Orfosses 2	626 233	6 766 853
Orfosses mouillées-pertes1	625 674	6 768 577
Orfosses mouillées-pertes2	625 738	6 768 610
Pas Ronds 1	619 577	6 766 696
Pas Ronds 2	619 470	6 766 668
Pas Ronds 3	619 361	6 766 666
Pas Ronds 4	619 302	6 766 652
Pas Ronds 5	619 310	6 766 670
Périmètre	624 007	6 770 313
Pommier	626 493	6 772 429

Nom	Coordonnées (RGF 93 / Lambert 93)	
	X	Y
Puits de l'Enfer 1	626 159	6 771 296
Puits de l'Enfer 2	626 050	6 771 310
Renard	616 739	6 768 117
Renard perte	616 746	6 768 137
Rosignol	614 661	6 764 876
Route Anatole	634 462	6 769 466
Route d'Ardelet	618 788	6 765 345
Route de Chevilly 1	619 747	6 765 577
Route de Chevilly 1A	619 945	6 765 711
Route de Saint Euverte 1	621 038	6 767 921
Route de Saint Euverte 2	621 131	6 768 272
Route de Sainte Croix	620 365	6 766 110
Route du billard 1	622 476	6 767 777
Route du Billard 2	621 317	6 767 613
Sablrière	623 268	6 769 870
Saint Georges	614 556	6 765 089
Saint Sulpice	614 433	6 764 460
Sans Ronce	624 536	6 766 785
Table aux Loups	620 050	6 769 307
Taragon	624 138	6 770 368
Traînou	634 271	6 765 824
Ventes derrière 1	616 875	6 766 090
Ventes derrière 3	617 066	6 766 123
Ventes derrière 4	617 262	6 766 120
Ventes derrière 5	617 355	6 766 049
Ventes derrière 6	617 539	6 766 085
Ventes derrière 7	617 813	6 766 102
Villepions 1	620 659	6 769 494
Villepions 2	620 714	6 769 759
Villepions 3	620 361	6 770 146
Villepions 4	620 676	6 769 840

Les fiches sont dans un fascicule séparé.



**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 Centre Val de Loire

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm