



Document à accès immédiat

# Projet CENARI-O Morphologie karstique en rivière des pertes dans la Loire à Jargeau aux résurgences du Loiret (45)

Rapport final

BRGM/RP-72898-FR

Version 1 du 3 juillet 2023

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche et développement

### **Thomas DEWEZ**

avec la collaboration de Chrystelle AUTERIVES, Frédéric TOUCHARD, Marie SERVIERE, Bastien DUBEGNY, Damien CHARDARD, Alex ANDRÉAULT, Claire RAULT, Florent GUIOTTE

Vérificateur :

h3a-b

Nom: GUTIERREZ Alexis

haa-b

Fonction: Correspondant Scientifique

Date: 25/09/2023

Signature:

Approbateur :

Nom: Alain Saada

Fonction: Directeur Régional

Date: 23/11/2023

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













### **Avertissement**

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

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

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

## 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 <a href="https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq">https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq</a> ou par ce code :



#### Mots clés :

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

Thomas DEWEZ (2023) – Projet CENARI-O

Morphologie karstique en rivière des pertes dans la Loire à Jargeau aux résurgences du Loiret (45). Rapport final V1. BRGM/RP-72898-FR, 8 p.

© BRGM, 2023, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM. IM003-MT008-P2-22/09/2022

# **Synthèse**

Le projet de recherche collaboratif CENARI-O, financé par la Région Centre Val de Loire de 2021 à 2023, vise à améliorer les méthodes de caractérisation des zones d'échange entre nappe et rivière en région karstique. Dans ce cadre, la description morphologique du lit des rivières est un indicateur de zones d'échange.

Ce rapport présente les techniques topographiques et bathymétriques mises en œuvre dans le Val de Loire pour mesurer et identifier d'abord, la morphologie du lit de la Loire dans le secteur des pertes vers Jargeau, ensuite, celle du Loiret, dans le bassin des Tacreniers à Olivet, où des zones d'échanges et des sources subaquatiques sont connues. Ces morphologies n'indiquant pas s'il y a un flux d'eau, une technique d'imagerie thermique a été mise en œuvre pour identifier les venues d'eau connues dans le Loiret, au pont Saint Nicolas, à Saint Hilaire-Saint Mesmin.

Dans le secteur des pertes de la Loire à Jargeau, un levé lidar topographique et bathymétrique aéroporté a été utilisé comme test de concept pour repérer des dolines et des pertes dans le lit de la Loire. Ces données lidar ont été mises à disposition du BRGM par l'Université de Tours, laboratoire Citeres dans le cadre de la convention I-Pat 2021-09-07. Les données lidar bifréquences, Teledyne Optech ont été acquises dans le cadre de leur projet régional Intelligence des Patrimoines levant 400 km du lit majeur de la Loire. L'équipement lidar, monté sur un avion, opère en lumière infra-rouge à 1064 nm et en lumière verte à 532 nm pour mesurer de manière continue la topographie à l'air libre et la bathymétrie des secteurs en eau. Les nuages de points classifiés ont une densité nominale en sommet de canopée de l'ordre de 16 pts/m² par canal, soit 32 pts/m² en cumulant les canaux pour les parties émergées, par ligne de vol. Grâce à cela, un modèle numérique de terrain (MNT) et de surface opaque (MNO, incluant les bâtiments) à 25 cm/pixel et précis en altitude de ±1 cm a été créé par le BRGM. Le signal lidar vert a pénétré jusqu'à 1.50 à 1.80 m dans la colonne d'eau, offrant une vue quasiment complète du lit en eau de la Loire. Sur les zones de végétation, la canopée forestière des rives de Loire laisse passer environ 1 tir lidar sur 5.

Etalonnée dans l'étang Mauger à Darvoy où 37 pertes sont bien connues, la méthode de détection des dépressions par filtrage passe-haut à 5m de diamètre du MNT à 25 cm/pixels s'est révélée efficace pour identifier les dépressions. Appliquée au 10 km du lit mineur de la Loire entre Jargeau et Sandillon, 642 dépressions fermées d'un diamètre médian de 8.25 m ont été reconnues. D'après la morphologie circulaire et l'absence de bloc au centre des dépressions cartographiées, 44 de ces 642 dépressions sont des dolines possibles (34) ou probables (10). 90% des dépressions morphologiques repérées se situent en amont de Darvoy. 23 des 34 dolines possibles et 7 des 10 dolines probables se situent à l'aval de Darvoy.

Nous concluons que la vision continue apportée par le lidar topo/bathymétrique, sous la canopée et sous l'eau est extrêmement précieuse examiner la morphologie du lit mineur d'un cours d'eau d'une profondeur inférieure à approximativement 1.50 m. Les dépressions reconnues sont pertinentes avec les connaissances antérieures et peuvent se prêter à une analyse semi-quantitative des pertes dans le cours d'eau. Les pertes identifiées n'ont pas pu être encore validée sur le terrain, sauf pour l'Etang Mauger où des données de terrain acquises à une date proche permettent de les valider.

Pour ce qui concerne les zones de résurgence dans le Loiret, la forêt riparienne débordant audessus de la rivière et la végétation aquatique très sombres rendent très hasardeux le succès d'un levé lidar bathymétrique. Au lieu de cela, un levé bathymétrique avec un échosondeur multifaisceaux porté par un catamaran radiocommandé a été préféré. Cette prestation a été réalisée par la société Subsea Tech, de Marseille les 22 et 23 mars 2022. Une zone de 600 m de longueur et 80 m de largeur (4.3 ha) a été levée en amont de l'autoroute A71, sur le bassin des Tacreniers, à Olivet. La densité de points dépasse 400 points de sonde par m² sur 95 % de la superficie, soit 1pt/5cm. La présence de végétation aquatique rend cependant l'interprétation du modèle numérique de surface (MNS) inutilisable pour identifier les zones de dépressions karstiques au fond de la rivière. Le re-traitement 3D des points de sonde acoustique par le BRGM révèlent avec succès la morphologie du fond (MNT à 20 cm/pixel), et par corolaire l'emprise des herbiers aquatiques, qui occupent 34% de la zone (1.4ha). Sous la végétation, le fond exhibe de larges zones couvertes de dépressions. Une nouvelle technique de traitement automatique jamais encore utilisée pour cartographier des dolines, la méthode MinTree (Guiotte et al., 2020), reconnait 535 dépressions fermées, qui occupent 1439 m² (3% de la surface totale). La technique des contours imbriqués reconnait 159 dépressions couvrant 4371 m². Avant cette campagne bathymétrique, seule la source de Viveret était connue sur ce tronçon. Le levé bathymétrique par drone flottant apporte une vision globale de la morphologie du lit et de ses formes, y compris sous la végétation.

La morphologie du lit ne dit rien des échanges hydrologiques effectifs entre la nappe karstique et la rivière. C'est pourquoi, nous avons testé l'imagerie infra-rouge thermique orientée à la recherche d'émergence d'eau karstique plus chaude que l'eau du Loiret. Le sens de ce contraste est critique. Rechercher un contraste d'eau plus fraiche dans une rivière plus chaude s'est révélé infructueux par ailleurs. Des images thermiques prises depuis le pont Saint Nicolas, à Saint-Hilaire-Saint-Mesmin, le 1 mars 2022 montrent des venues chaudes dans l'eau du Loiret relativement plus frais. Cette perspective ouvre la possibilité de réaliser des levés d'imagerie thermique par drone sur le cours du Loiret pour cartographier les émergences.

# **Sommaire**

1.	e projet CENARI-O1	0
2.	troduction	1
3.	evé lidar topo/bathymétrique aéroporté sur la Loire	3 15 15 19 19 22 5
4.	evés bathymétriques dans le Loiret par drone flottant	32 34 36 36 38 40
5.	nagerie thermique: chercher une plume chaude dans de l'eau froide4 1. Conditions de l'expérience4	
6.	iscussion méthodologique4	8
7.	onclusions4	19
8.	éférences5	51

# Liste des figures

Figure 3 : Vue de détail du nuage de points lidar bruts en bande C3 (lidar vert) sur le secteur de Darvoy/étang Mauger. On repère la Loire avec ses îles boisées au nord, la forêt riparienne entre la Loire et la levée, l'étang Mauger au centre ouest et le village de Darvoy. La précision

altimétrique du lidar a été validée sur la bande bitumée couvrant le sommet de la levée. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)
Figure 4 : Nuage de points 3D lidar C3 sur le secteur de l'étang Mauger à l'ouest et la bordure nord du village de Darvoy. Les couleurs traduisent les classes d'occupation des sols. En bleu, les points sol (2), vert foncé – végétation (5), vert clair – bâtiments (6), orange - surface en eau (15), bathymétrie (16). De la même manière que la végétation masque le sol sous-jacent, les surfaces en eau masquent la bathymétrie. On obtient un modèle numérique continu des surfaces opaques topo-bathymétrique en excluant les points de classe 5 et 15. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)
Figure 5: Densité de points lidar vert (C3 à 532 nm) réunissant les points classés sol (2), végétation (5), bâtiments (6), surface en eau (15) et bathymétrie (16). Les bandes sombres correspondent à la densité nominale de tirs lidar, environ 16 pts/m². Les bandes claires correspondent aux zones de recouvrement où la densité de points double, ca. 32 pts/m² (Figure 6). La largeur d'une bande couvre environ 200 m de largeur, pour une ouverture angulaire du lidar de 15°. Ceci implique une hauteur de vol d'environ 375 m. Le recouvrement latéral entre bande est manifestement réglé sur 30%. Quadrillage 100x100m. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)
Figure 6 : Distribution de la densité de points lidar (bande C3) incluant tous les points sauf ceux classés 1 (non classés). Le premier mode correspond à 16 pts/m² sous la trace du lidar (voir Figure 5), sans recouvrement latéral. Le second mode vers 32 pts/m², correspond au recouvrement latéral entre bandes (voir Figure 5). Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)
Figure 7: Distribution de la rugosité dans un rayon de 1 m sur la bande de bitume route de la levée. La distribution est centrée avec un écart-type de 13 mm. Les épaules du pic central traduisent un léger biais provenant d'un léger défaut d'ajustement des bandes de vol. Les quantiles à 17% et 83% (contenant 2/3 des observations) se situent à -11mm et +10mm ce qui démontre que les biais d'ajustement de bande n'ajoutent que 2 mm de biais résiduel. C'est négligeable. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)
Figure 8 : Carte des classes de points lidar mélangeant le lidar rouge (C2) et le lidar vert (C3). On notera que les identifiants de classification permettent de distinguer l'origine de l'information : 9 pour la surface en eau identifiée par le lidar rouge, 15 pour la surface en eau sur le lidar vert et 16 pour la bathymétrie en lidar vert. Les autres classes, 1-jamais classé, 2-sol et 5-végétation sont quant à elles identiques car provenant sans ambiguïté des mêmes réflecteurs. Lidar topobathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)
Figure 9 : Carte des dolines dans l'étang Mauger à Darvoy. A. Carte du raster (25cm/pixel) d'altitude minimale des points lidar topo/bathymétrique classés sol-2 ou bathymétrie-16. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021) acquis les 2 et 3 septembre 2020 et contour des dolines reconnues par photo-interprétation. B. Cartographie des dolines sur une orthophoto par drone (donnée Conseil Général du Loiret) acquise en août 2019. La trace des dépressions a été relevée sur l'orthophoto et sur le terrain par G. Noury - BRGM. Les deux cartes montrent une bonne cohérence spatiale même si le relief du fond de l'étang a évolué entre les deux mesures. On notera que le relief lidar ajusté sur l'attitude minimale des points est très sensible à d'éventuelles erreurs de classification
Figure 10 : Morphologie du lit de la Loire et de ses berges entre le pont de Jargeau et l'étang Mauger. La numérotation identifie quatre types de formes de paysage détaillées à la Figure 11.  1. Chenal principal sableux bordé de plantes aériennes et aquatiques en bouquets. 2. Chenal inter-banc avec figures d'érosion et d'accrétion montrant la vigueur du flux. 3. Morphologies de fond de chenal en forme de gouge à l'extrémité raide et arroundie à l'aval. 4. Dolines sous la forêt riparienne. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)

Figure 11 : Faciès morphologique dans le cours de la Loire et sur ses rives. 1. Chenal bordé de végétation aquatique au nord et au sud. Le milieu du chenal est nu. La douceur du relief indique un fond de chenal sableux. 2. Passe entre deux bancs de sable émergés. Les différents corps sédimentaires traduisent la vitesse et la direction du flux d'eau et de sable. 3. Faciès de fond de chenal sableux creusé en longues gouges terminée par un abrupt de 10% environ, courbe en plan et d'une hauteur d'une cinquantaine de centimètres. 4. Dépressions circulaires sous la forêt riparienne du sud de la Loire. Ces dolines à l'ouest du camping de Jargeau sont connues et bien révélées par le lidar, malgré la couverture forestière. Les courbes de niveaux sont espacées de 25 cm et de 2 m pour les courbes maîtresses. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)
Figure 12 : Carte des types de dépressions et de fond alluvial au droit de ces dépressions dans la Loire au voisinage de Jargeau. Deux tiers des dépressions sont probablement des dépressions d'origine hydrodynamique où le courant crée un creux local dans la couverture sableuse. 34 dépressions sont des dolines possibles et 10 sont des dolines probables. Pour ce qui concerne la nature du fond, le lit rocheux (calcaire de Beauce) affleure vers Jargeau et en amont. Des bancs de sables recouvrent cependant 580 des 642 dépressions (90%) et sont localisés en amont de Darvoy. Des cartes à plus grande échelle sont présentées en Figure 14 et Figure 15. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021).
Figure 13 : Carte des circulations karstiques du val d'Orléans (Lepiller, 2006). 8 pertes sont connues en bord de Loire, 4 en rive gauche autour de Jargeau, et 4 en rive droite à Bou. Vu l'échelle de cette carte, nous ne pouvons malheureusement pas utiliser cette connaissance pour valider nos indices.
Figure 14 : Carte des types de dépression identifiées au fond de la Loire entre Jargeau et Sandillon. Sur un total de 642 dépressions, 431 dépressions sont probablement d'origine hydrodynamique (formes creuses dans la couverture sableuse), 34 sont des dolines possibles, 10 sont des dolines probables et 167 sont des dépressions de nature indéterminée. Lidar topobathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)
Figure 15 : Carte de la nature du fond alluvial au droit des dépressions morphologiques. 136 dépressions se situent sur substrat probablement rocheux, 484 sont marquées sur un fond probablement sableux, 22 se situent dans la végétation. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)
Figure 16 : Localisation du bassin des Tacreniers sur le Loiret à Olivet. Le secteur relevé se situe en amont de l'autoroute A71 (axe N-S en rouge), à hauteur du moulin du Bac. Il couvre une superficie de XXX
Figure 17 : Système de drone flottant radio-commandé Catarob de la société SubSea Tech. Le drone est équipé d'un dispositif échosondeur multifaisceaux, d'un imageur acoustique, d'un lidar aérien et d'un système de mesure d'attitude et de positionnement. Il est piloté depuis un poste de travail situé dans un camion. La communication fonctionne en wifi sur une portée maximale de 1 km. (photo T. Dewez - BRGM)
Figure 18 : Nuage de points 3D topographique et bathymétrique. Les points verts figurent les arbres de la forêt riparienne bordant le Loiret. Ils ont été relevés par le lidar aérien. La bathymétrie a été relevée par échosondeur multifaisceau. Dans la rivière, de larges herbiers de plantes aquatiques couvrent le fond de la rivière. Seule une bande de sédiments nus est présente dans le tiers amont du bassin des Tacreniers.
Figure 19 : Modèle numérique de surface ombré de la bathymétrie du Bassin des Tacreniers mesurée par le drone flottant Catarob le 22 mars 2022. Les zones sombres traduisent la position des herbiers aquatiques. Ceux-ci couvrent une large proportion du fond du Loiret34

Figure 20 : Carte de densité de points de sonde 3D dans le bassin des Tacreniers. La distribution statistique est reprise en Figure 21. Les lignes de plus grande densité montrent signalent les endroits où le catarob a insisté pour obtenir des points de sonde. Il s'agit des secteurs à faible profondeur et à herbiers aquatiques
Figure 21 : Distribution de la densité de points de sonde 3D dans le bassin des Tacreniers sous le Loiret
Figure 22 : Cibles 3D en aluminium texturé conçues pour fournir un relief connu et une position centrable dans les données de l'échosondeur multifaisceaux. Les plaques mesurent 50 x 50 cm. La cornière la plus basse a une base de 36 mm et une hauteur de 16 mm, pour une longueur de 50 cm. La cornière la plus haute a une base de 58 mm et une hauteur de 26 mm. L'intersection des deux cornières est prévue pour figurer un relief centrable. Design T. Dewez – BRGM, 22 mars 2022
Figure 23 : Signal acoustique des points de sonde au droit des deux cibles ennoyées. L'interaction entre le signal acoustique et les cibles conduit à n'obtenir que peu de point en retour.
Figure 24 : Carte des lignes de sonde permettant la validation de la précision bathymétrique de l'échosondeur. Zone 1 : secteur où le fond est uniquement composé de sédiments, d'après la texture du MNS ombré. Zone 2 : secteur traversant un herbier aquatique
Figure 25 : Nuages de points de sonde bathymétrique retraités pour identifier le sol, la végétation aquatique et les dépressions fermées pouvant s'apparenter à des dolines ou des sources. Un filtrage des points les plus bas de la colonne d'identifier les points sol. Les points de végétation se situent au-dessus du sol (panneau du haut), la superficie en végétation occupe 14 878 m² (34% du total). Les courbes de niveau du MNT font ressortir la présence de dépressions fermées (panneau du milieu). Traitées par un algorithme de MinTree (Guiotte et al., 2019a), les dépressions fermées en rouge correspondent possiblement à des conduits de zones d'échange avec la nappe karstique (sources ou pertes)
Figure 26 : Carte du relief local (MNT filtré passe-haut à 5m). L'échelle de couleur met en lumière les dépressions de plus de 0.25 m de profondeur. Les courbes de niveau sont tracées tous les 10 cm et étiquetées tous les 50 cm de profondeur. 41
Figure 27 : Carte des dépressions fermées sous le Loiret dans le bassin des Tacreniers. Panneau haut : dépressions segmentées par méthode morphologique de MinTree (10 < aire < 1000 ET compacité > 0.5). Panneau bas : polygone entourant les zones plus déprimées que -0.05m et comprenant l'isoligne -0.25m. Les emprises d'iso-contours sont plus étendues et plus étirées que les emprises issues du MinTree car aucun filtre n'est appliqué à la forme de l'emprise
Figure 28 : Images infra-rouge thermique et visible de la source située sous la pile nord, à l'aval du Pont Saint Nicolas sur le Loiret à Saint Hilaire-Saint-Mesmin, le 1 mars 2023 à 7h25 du matin. La plume blanche traduit une zone plus chaude que les couleurs rouges situées autour 46
Figure 29 : Images infra-rouge thermique et visible de la source située en amont du Pont Saint Nicolas sur le Loiret à Saint Hilaire-Saint-Mesmin, le 1 mars 2023 à 7h25 du matin. La plume blanche traduit une venue d'eau relativement plus chaude dans le flux du Loiret (rouge) 46

### Liste des tableaux

Tableau 1 : Statistiques des dolines cartographiées sur orthophoto par drone et confirm le terrain par G. Noury en octobre 2019 et des dolines photo-interprétées par T. Dewez des données lidar topo/bathymétriques (MNT d'altitude minimale à 25cm/pixel des poir 16). L'interprétation lidar conduit à identifier des plus grandes surfaces en dépression nombre plus restreint	à partie nts 2 et et d'un
Tableau 2 : Distribution des diamètres des dépressions alluviales	26
Tableau 3 : Distribution du diamètre des dépressions interprétées comme des dolines pou probables. Les dolines probables ont un diamètre plus grand que les dolines possibles	
Tableau 4 : Caractéristiques des dépressions fermées identifiées dans la bathymétrie de dans le bassin des Tacreniers	
Liste des annexes	
Annexe 1 SUBSEA TECH – Rannort d'intervention	53

# 1. Le projet CENARI-O

Ce paragraphe est commun aux trois rapports du projet CENARI-O.

Les relations d'échange entre eaux souterraines et eaux de surface sont encore mal contraintes dans l'espace et dans le temps. Ces échanges sont cependant primordiaux dans le contexte de changement climatique qui prédit l'augmentation des évènements extrêmes, étiages plus sévères et crues majeures.

Pour des longs fleuves (milliers de kilomètres), le flux d'échange net avec le milieu souterrain est approximativement égal au débit. A l'échelle plus détaillée du tronçon de rivière, l'importance des échanges hyporhéiques augmente fortement (Cardenas, 2008), et leur rôle est fondamental, que ce soit pour l'écologie des rivières ou pour la compréhension des flux biogéochimiques (Boulton et al., 1998). Or, les méthodes existantes sont essentiellement basées sur des approches à grande échelle et ne permettent pas une gestion des petits cours d'eau sensibles, par tronçon.

Le projet CENARI-O a pour ambition de développer une méthode multicritère de caractérisation fine des échanges nappe-rivière. Pour caractériser ces échanges, à chaque échelle spatiale correspond une méthodologie adaptée : télé-détection, piézométrie et débitmétrie, traçage artificiel, traçage naturel de l'eau (température, isotopie de l'eau, ions majeurs ou carbone organique dissous, gaz dissous). Coupler ces différentes méthodes scientifiques de caractérisation des échanges entre nappes et rivières, sur le système Loire-nappe-Loiret, permettra de développer une approche innovante, dans la description multi-échelle des échanges nappe-rivière. Les verrous scientifiques identifiés portent sur les variations spatiales et temporelles des flux d'eau, ainsi que sur leur quantification.

Ce projet vise à confronter les différentes méthodes citées précédemment, sur les mêmes tronçons de rivières, entre Loire et Loiret où les échanges nappe/rivière sont très importants (Binet *et al.*, 2017; Lalot *et al.*, 2015). Notre hypothèse est que la diversité des résultats, liés aux différentes méthodologies, doit nous permettre d'appréhender les échanges (et les mélanges) dans toute leur complexité spatio-temporelle.

Les résultats et interprétations des méthodes de caractérisation des échanges nappe-rivière font l'objet de trois rapports :

Projet CENARI-O. Variabilité spatio-temporelle de la chimie des eaux dans la caractérisation des échanges nappe-rivière du Loiret. Rapport final. BRGM/RP-72897-FR.

Projet CENARI-O. Morphologie karstique en rivière des pertes dans la Loire à Jargeau aux résurgences du Loiret (45). Rapport final. BRGM/RP-72898-FR

Projet CENARI-O. Estimation des caractéristiques hydrodynamiques et hydrodispersives de la nappe des alluvions dans le Loiret. Rapport final. BRGM/RP-72899-FR

## 2. Introduction

#### 2.1. CONTEXTE

Le relief d'une région karstique peut traduire des formes caractéristiques : les dolines. Il s'agit de dépressions fermées. Elles résultent d'un affaissement du niveau du terrain soit par soutirage des couches superficielles meubles vers le réseau karstique soit par effondrement de cavités situées dans la roche sous-jacente (fontis). Dans les deux cas, le relief manifeste des dépressions fermées qu'il est possible de cartographier grâce à des données topographiques pour autant qu'elles traduisent fidèlement le relief du sol (p.ex. Cartannaz et al., 2016; Grabenstaetter et al., 2022; Perrin et al., 2014).

Le lidar aéroporté est l'outil de prédilection pour cartographier les dolines. Il offre une description fidèle du relief du sol et souvent une densité de points adéquate, plusieurs points à dizaines de points par mètre carré, pour identifier des dépressions métriques de quelques décimètres de profondeur. Les rayons lumineux tirés depuis un avion (Perrin *et al.*, 2014) ou un hélicoptère (Cartannaz *et al.*, 2016; Grabenstaetter *et al.*, 2022) se réfléchissent sur tous les objets présents dans la scène : les arbres, les toitures des bâtiments ou le sol nu, entre autres. Ces rayons lumineux sont transformés en point 3D traduisant la position du réflecteur. L'intérêt du lidar est que si les rayons lumineux sont tirés en nombre suffisant, certains rayons parviendront à trouver un passage dans les interstices de la végétation pour y mesurer l'altitude du sol sous-jacent. L'image du relief est donc quasiment continue, sauf sous les bâtiments et au niveau des zones en eau.

Des algorithmes de classification, basés sur la forme du voisinage de chaque point 3D, attribuent la nature probable du réflecteur sur lequel le rayon lumineux s'est réfléchi (p.ex. Brodu et al., 2012; Letard et al., 2023). La norme de classification LAS 1.4, actuellement en vigueur, propose des règles standardisées de numérotation des classes. Le sol est numéroté 2, la végétation, 3, 4 ou 5 selon sa hauteur, les bâtiments, 6 et la surface de l'eau, 9. Ces numéros résultent de convention d'usage. Dans le cas discuté plus bas, deux classes additionnelles ont été ajoutées : 15 pour la surface de l'eau et 16 pour la bathymétrie. Grâce à cette labellisation de classe, les points réfléchis par la végétation ou la surface de l'eau pourront être ignorés pour construire une image continue du relief « non-pénétrable » au sens de Billen et al. (2012). Avec les points sol, bâtiments et bathymétrie, on peut construire des grilles d'altitude qui ne traduisent que le relief du sol et des surfaces opaques, à l'exclusion des autres types d'occupation du sol.

Les dolines du val de Loire ont des diamètres décimétriques à pluri-décamétriques (Perrin *et al.*, 2014). La BD Cavité (accès via https://www.georisques.gouv.fr) recense 62 indices sur le secteur investigué entre Jargeau et Sandillon. Leur profondeur est conditionnée par l'âge de leur mise en place et les processus de colmatage naturels ou anthropiques à l'œuvre. Des dépressions peu profondes peuvent de manière ambigüe traduire soit un processus en train de s'initier, soit un processus en phase terminale. Immédiatement après la survenance d'un fontis, la dépression peut mesurer plusieurs mètres de profondeur, avec un rapport profondeur/diamètre pouvant excéder 1/1. En cas d'évolution naturelle, plusieurs années après effondrement, les bordures de la doline s'éboulent vers l'intérieur et comblent progressivement la dépression. Tous comme le cas d'initiation d'un soutirage, la profondeur d'une doline peut donc n'être que centimétrique. C'est essentiellement la forme circulaire, en plan, qui sert d'élément diagnostic.

Sur ce constat de forme, on cherche à reconnaître des objets circulaires métriques de plusieurs dizaines de centimètres de profondeur. Ce sont ces propriétés de diamètre et de profondeur minimale qui déterminent si une donnée topographique peut résoudre les objets d'intérêt.

Le premier MNT lidar du val de Loire acquis par la DREAL Centre-Val de Loire en 2003 a un pas de 1 m. Il a permis d'inventorier des dépressions dont l'origine est potentiellement karstique (Perrin *et al.*, 2014). Nous notions à l'époque cependant les difficultés de dénombrement des dolines car de très nombreuses dépressions morphologiques se trouvaient sous les traces des bâtiments, là où l'altitude était inférée par interpolation linéaire. Mais bien que les creux présents dans les zones interpolées n'aient aucune signification géomorphologique, ils se signalent faussement comme des dolines potentielles. Pour éviter la création de ces dépressions artificielles, nous proposons de construire des modèles numériques de surface opaque (MNO) (Grabenstaetter *et al.*, 2022), plutôt que des modèles numériques de terrain (MNT). La différence entre MNT et MNO réside dans la préservation du relief des points classés « bâtiment » (classe 6) au lieu d'interpoler à travers l'emprise du bâtiment. Pour l'interprétation visuelle du relief, l'œil ne butte pas sur des triangles interpolés au travers des emprises de bâtiment, et numériquement, les altitudes montrent qu'il s'agit bien de bâtiments en relief positif au-dessus du sol. La détection automatique de dépressions évite donc ces zones.

# 2.2. LOCALISATION DES PERTES/SOURCES DANS LE VAL D'ORLEANS : LOIRE ET LOIRET

Le contexte géologique, hydrographique et hydrogéologique du Val d'Orléans fait l'objet d'une description plus détaillée dans le rapport **BRGM/RP-72897-FR** Variabilité spatio-temporelle de la chimie des eaux dans la caractérisation des échanges nappe-rivière du Loiret.

Pour rappel, l'objectif du projet CENARI-O vise à améliorer les méthodes de caractérisation des zones d'échanges hydriques entre nappe karstique et la rivière. Dans le val de Loire, on sait que des pertes karstiques situées dans la Loire aux environs de Jargeau, absorbent de l'ordre de 10 à 20 m³/s en période d'étiage (Desprez, 1976 ; Le Borgne *et al.*, 2006). Les pertes sont présumées diffuses dans le calcaire de Beauce, même si des dolines sont connues dans le val et à proximité de la Loire. En aval d'Orléans, la Loire récupère ensuite son débit initial, légèrement majoré par les petits bassins versants affluents, à la Pointe de Courpain, là où le Loiret rejoint la Loire. Ceci signifie que les pertes de Jargeau nourrissent la Loire à l'aval ainsi que le Loiret.

Pour cartographier les pertes en Loire, au sens de trous béants situés sous le cours de la Loire et avalant de l'eau, deux options techniques sont possibles : un sondeur bathymétrique monté sur une embarcation flottante ou un lidar topo/bathymétrique aéroporté. Sous une faible tranche d'eau, la solution d'un sondeur bathymétrique est très coûteuse car son rendement surfacique est faible. En revanche, un lidar topo/bathymétrique, qui a une fauchée plurihectométrique, typiquement 200 m dans notre cas, a un rendement surfacique beaucoup plus élevé. Ce rendement favorable est éventuellement compensé par une résolution spatiale potentiellement plus faible.

Dans le cadre de CENARI-O, nous avons exploré le potentiel des données lidar topo/bathymétrique aéroportées sur la zone des pertes en Loire, entre Jargeau et le méandre de Sandillon sur une dizaine de kilomètres (Figure 2), et des données bathymétriques d'un échosondeur multi-faisceaux monté sur une drone flottant pour explorer le fond d'un bief de 600 m du Loiret, le bassin des Tacreniers.

Pour le lidar topo/bathymétrique, nous avons bénéficié d'une acquisition lidar aéroportée topo/bathymétriques prévue sur 400 km de Loire dans le cadre d'un projet de recherche régional. Le financement de cette campagne vient de la Région Centre-Val-de-Loire pour le projet ARD-Intelligence des Patrimoines au profit du laboratoire CITERES de l'Université de Tours. L'équipement lidar a été mis à disposition par l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR) et opéré par la société GEOFIT basée à Nantes.

# 3. Levé lidar topo/bathymétrique aéroporté sur la Loire

#### 3.1. CADRE ADMINISTRATIF DES DONNEES MISES A DISPOSITION

Les nuages de points 3D lidar topo/bathymétriques du secteur de Jargeau ont été mis à disposition du BRGM par l'Université de Tours, laboratoire CITERES, dans le cadre de la convention I-Pat 2021-09-07. La donnée est référencée comme suit : « Lidar topobathymétrique de la Loire, Université de Tours - ARD Intelligence des Patrimoines (Phase 2) – UMR CNRS 7324 CITERES (S. Rodrigues – A. Boigné) © tous droits réservés ». A ce titre, nous remercions chaleureusement Stéphane Rodrigues pour la mise à disposition de ces données.

#### 3.2. CARACTERISTIQUES DU LEVE

La zone d'étude couvre une emprise de 9.5 x 2.7 km, soient 22.6 km², pour une longueur de Loire de 10 km. L'acquisition comprenait un levé lidar à deux longueurs d'onde, un lidar infrarouge (dit C2 dans les données reçues) opérant à 1064 nm pour identifier la topographie et la surface de l'eau et lidar vert (dit C3) à 532 nm, pénétrant la colonne d'eau, pour mesurer la topographie et la bathymétrie (Lague *et al.*, 2020). Les nuages de points 3D et le MNT topo/bathymétrique continu à 50 cm/pixel transmis par l'université de Tours est complété par une orthophoto en vraies couleurs naturelles à 8 cm/pixel (Figure 2). Le vol lidar a eu lieu en deux sessions les 02 et 03 septembre 2020. L'orthophoto a été acquise une année plus tard en 2021. Il n'y a donc pas de correspondance stricte entre les deux données, puisque le paysage peut avoir évolué entre les deux dates.

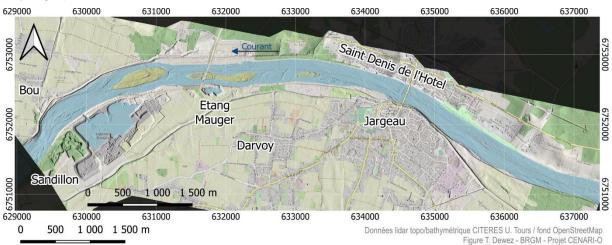


Figure 1 : Carte des données lidar topo/bathymétrique de la Loire dans le secteur de Jargeau (Rodrigues et Boigné, 2021). Relief lidar ombré, fond OpenStreetMap. Noter le pont entre Jargeau et Saint Denis de l'Hôtel comme point de repère mentionné dans le texte.

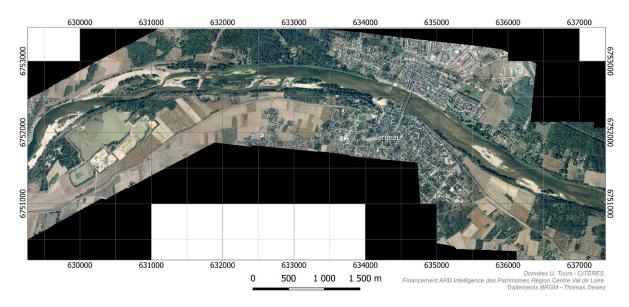


Figure 2 : Carte de la zone d'étude de la Loire entre l'amont de Jargeau (à l'est) et le méandre de Sandillon (à l'ouest). Noter le pont entre Jargeau et Saint Denis de l'Hôtel comme point de repère mentionné dans le texte. Orthophoto 2021 (Rodrigues et Boigné, 2021)

Les nuages de points lidar ont été livrés en deux fichiers au format LAZ nommés : jargeau\_pc\_C2.laz et jargeau\_pc\_C3.laz. Ils contiennent respectivement 788 et 794 millions de points (Mpts).

L'instrument est un lidar Teledyne-Optech Titan bi-fréquence datant de 2014 opéré par le Consortium GEOFIT-Géosciences Rennes. Le lidar émet à 1064 nm (Infra-Rouge) et 532 nm (vert) et enregistre un retour d'onde complet pour chaque tir.

D'après Lague *et al.*, (2020), les caractéristiques génériques d'acquisition en vol avec l'équipement mis en oeuvre sont les suivantes, les données de Jargeau déduites des attributs des nuages de points, indiqués entre parenthèses s'y conforment :

- Hauteur de vol typique de 300-400 m au-dessus du niveau de l'eau (Jargeau ca. 450m)
- Vitesse de l'avion de l'ordre de 200 km/h (Jargeau ca. 180 km/h)
- Fréquence d'émission : 200 kHz (Jargeau ?)
- Angle d'émission laser : 7° (Jargeau de +15° à -15°)
- Superposition des lignes de vol : 20-50 % (Jargeau 30%)
- Densité généralement obtenue : 36 pts/m² en topo et 18 pts/m² en bathy (avec possibilité de doubler voire tripler la densité avec plusieurs passages successifs) (Jargeau 14 pts/m² sans recouvrement, 32 pts/m² dans les zones de recouvrement)
- Capteur FWF : fréquence : 100-200 kHz

D'après les acquisitions réalisées dans le cadre du projet R-Temus (Universités Nantes-Rennes) sur la Loire en Anjou, les données collectées atteignent les caractéristiques suivantes :

- Densités points canal IR : médiane = 34 pts/m²
- Densité points canal Vert : médiane = 42 pts/m²
- Densité points Bathy : médiane = 35 pts/m²
- Densité points MNT : médiane = 40 pts/m²
- Profondeur limite = 2.6 m
- Variation position points entre 2 lignes de vol : moyenne-IR = 0,1 cm ; moyenne-vert = 0,2 cm ; moyenne comparaison IR/vert = -0,4 cm.

La classification employée pour la séparation ne s'appuie pas sur les très récents travaux de Letard *et al.* (2023). Les nuages de points C2 et C3 sont classifiés séparément.

Le premier est classifié avec LASTool pour séparer les points de sol (sol + surface de l'eau) des points de sursol (végétation et bâtiments). Une deuxième étape de traitement est faite par apprentissage supervisé pour séparer les points de sol des points de surface de l'eau et des points aberrant résiduels.

Pour ce qui concerne le canal C3, les points sont d'abord séparés en zones émergées et ennoyées à l'aide des points de surface en eau du canal C2. Puis un algorithme développé en interne est mobilisé pour la séparation des points de colonne d'eau (classe 15) des points de bathymétrie (classe 16). Enfin une classification automatique faite par LASTools pour les zones émergées est réalisée.

Ci-dessous, nous établissons un bilan des caractéristiques de vol sur le secteur de Jargeau à partir les nuages de points 3D. Nous traiterons d'abord de la densité de points 3D et de la pénétration du lidar dans le couvert végétal pour évaluer la densité de points au sol. Les éventuelles erreurs de classification ne sont pas évaluées.

#### 3.2.1. Acquisitions lidar topographiques (bande C2 à 1064 nm)

Le nuage de points complet dénommé C2 contient 788 Mpts classifiés en 5 classes d'objets identifiés par : 1-non classés, 2-sol, 5-végétation, 6-bâtiments et 9-surface en eau. Vu qu'aucun point ne pénètre sous la surface de l'eau, il doit nécessairement s'agir du nuage de points 3D issu du lidar infra-rouge.

La densité médiane des points lidar, toutes classes confondues, est de 25 pts/m² mais la distribution de densité de points est bimodale. Le premier pic de densité est inférieur à la médiane, à 18 pts/m², au droit des bandes lidar sans recouvrement. Le second est à 42 pts/m², dans les zones de recouvrements entre bandes. Le recouvrement latéral est de l'ordre de 30% de la fauchée du lidar (Figure 5).

Les bords de Loire sont couverts de forêt riparienne. Pour les zones classées en végétation (5), la pénétration médiane des points au sol au droit de la végétation est de 21 % des points tirés, soit 1 point sur 5. Ce taux de pénétration se traduit par une densité *médiane* de points au sol de 12 points/m² et une densité de 3.8 pts/m² pour 80% du territoire sous la végétation. Statistiquement, on peut donc s'attendre à extraire un MNT à 50 cm/pixel, équivalent de 4 points bien répartis dans 1m² à partir de la seule bande C2 où la plupart des pixels seraient contraints par un point de mesure au sol.

#### 3.2.2. Acquisition bathymétrique (bande C3 à 532 nm)

Le nuage de points acquis en bande C3 (lidar vert) a été classé en 6 classes d'objets : 1-non classés, 2-sol, 5-végétation, 6-bâtiments, 15-surface en eau et 16-bathymétrie (Figure 4). Le nuage de points C3 est géographiquement plus riche en informations que le nuage C2 puisqu'il couvre à la fois la topographie et la bathymétrie de manière continue.

Nous avons utilisé le secteur de l'Etang Mauger à Darvoy (Figure 1 et Figure 3) pour valider la capacité du lidar à révéler les dépressions subaquatiques. Plusieurs gouffres y sont connus.

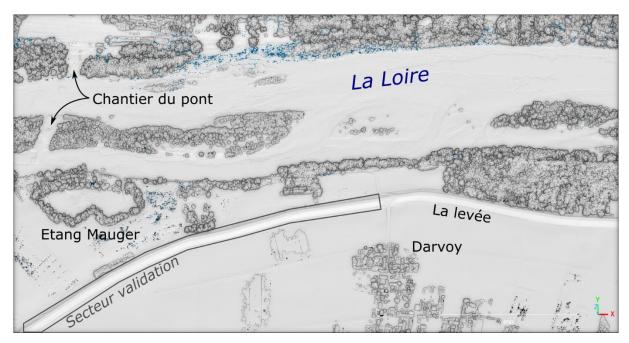


Figure 3 : Vue de détail du nuage de points lidar bruts en bande C3 (lidar vert) sur le secteur de Darvoy/étang Mauger. On repère la Loire avec ses îles boisées au nord, la forêt riparienne entre la Loire et la levée, l'étang Mauger au centre ouest et le village de Darvoy. La précision altimétrique du lidar a été validée sur la bande bitumée couvrant le sommet de la levée. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)

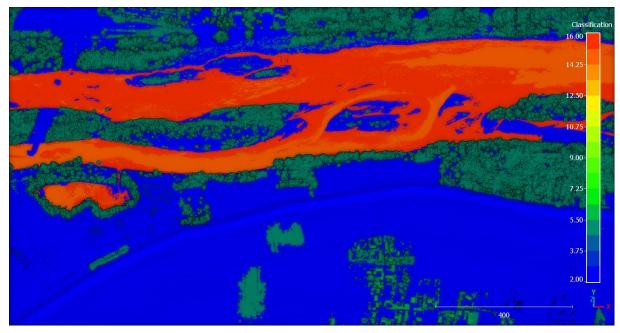


Figure 4: Nuage de points 3D lidar C3 sur le secteur de l'étang Mauger à l'ouest et la bordure nord du village de Darvoy. Les couleurs traduisent les classes d'occupation des sols. En bleu, les points sol (2), vert foncé – végétation (5), vert clair – bâtiments (6), orange - surface en eau (15), bathymétrie (16). De la même manière que la végétation masque le sol sous-jacent, les surfaces en eau masquent la bathymétrie. On obtient un modèle numérique continu des surfaces opaques topo-bathymétrique en excluant les points de classe 5 et 15. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)

La classe de points 1 (non classés) contient à la fois des points parasites, au-dessus et audessous du niveau du sol, et des points morphologiques vrais que l'opérateur a choisi de laisser sans label. Ces points ont tous été ignorés dans l'évaluation de densité de points qui suit. La distribution de densité de points est soit de 16 pts/m² sous la fauchée d'une bande unique, soit de 32 pts/m² dans les zones de recouvrement (Figure 5).

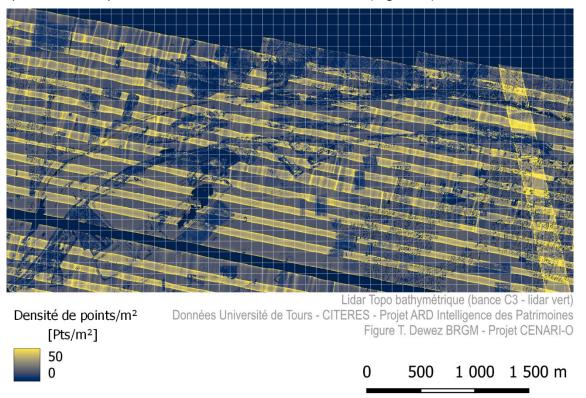


Figure 5 : Densité de points lidar vert (C3 à 532 nm) réunissant les points classés sol (2), végétation (5), bâtiments (6), surface en eau (15) et bathymétrie (16). Les bandes sombres correspondent à la densité nominale de tirs lidar, environ 16 pts/m². Les bandes claires correspondent aux zones de recouvrement où la densité de points double, ca. 32 pts/m² (Figure 6). La largeur d'une bande couvre environ 200 m de largeur, pour une ouverture angulaire du lidar de 15°. Ceci implique une hauteur de vol d'environ 375 m. Le recouvrement latéral entre bande est manifestement réglé sur 30%. Quadrillage 100x100m. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)

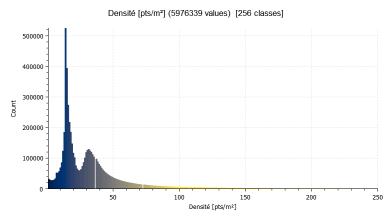


Figure 6 : Distribution de la densité de points lidar (bande C3) incluant tous les points sauf ceux classés 1 (non classés). Le premier mode correspond à 16 pts/m² sous la trace du lidar (voir Figure 5), sans recouvrement latéral. Le second mode vers 32 pts/m², correspond au recouvrement latéral entre bandes (voir Figure 5). Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)

La carte de densité de points permet de visualiser les axes de vol. La fauchée du lidar est d'environ 200 m pour une ouverture angulaire de 30° (d'après l'information scalaire Scan Angle Rank du fichier lidar). Ceci suggère une hauteur de vol de l'avion à 375 m au-dessus du sol. Le recouvrement latéral entre bande est de l'ordre de 30 %.

D'après l'horodatage des points (valeurs du champ GPSTime), l'avion volait à une vitesse de l'ordre de 50 m/s. Les 18 lignes de vols sur le secteur de 9 km de longueur ont probablement été parcourues en un temps total de 54 minutes.

En plus d'évaluer la densité de points, qui sert à valider la résolution optimale du MNT, il est utile de vérifier la précision du nuage de points. Ici, ne disposant pas de levés de points de référence, on se contentera de valider la cohérence altimétrique. Il s'agit de vérifier que chaque point possède une altitude cohérente avec celle de ses voisins. Pour ce faire, on s'appuie sur des surfaces connues pour être lisses et occuper de grandes emprises. La route de la levée satisfait ce critère de régularité locale du relief. Découpée sur une surface de 5200 m² (1.2 km de longueur), on a estimé la précision de 105 000 points contigus situés sur la bande de roulement (Figure 3).

Le critère de précision choisi est la rugosité (roughness dans le logiciel Cloud Compare). Il s'agit de la distance d'un point au plan ajusté sur tous ses voisins dans un rayon donné. C'est l'équivalent de la validation croisée des analyses géostatistiques, ou encore d'un calcul de relief passe-haut dont il sera question plus loin pour l'identification du relief local.

En l'occurrence, l'écart-type de la distribution de rugosité vaut 13 mm. Cela signifie que l'altitude évaluée point par point par le lidar sur la surface de la route est estimée à +/-13 mm près. On notera que la distribution (Figure 7) révèle un léger biais résiduel qui aggrave l'estimation de la précision. Les quantiles à 17% et 83% bornant deux tiers des points, se situent respectivement à -11 mm et +10 mm. C'est une précision centimétrique qui satisfait amplement notre besoin. Ce n'est pas ce critère de précision qui entravera la reconnaissance des dolines.

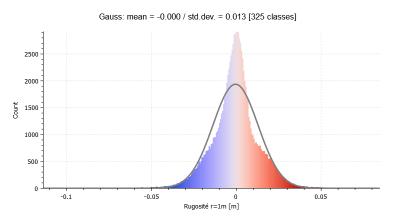


Figure 7 : Distribution de la rugosité dans un rayon de 1 m sur la bande de bitume route de la levée. La distribution est centrée avec un écart-type de 13 mm. Les épaules du pic central traduisent un léger biais provenant d'un léger défaut d'ajustement des bandes de vol. Les quantiles à 17% et 83% (contenant 2/3 des observations) se situent à -11mm et +10mm ce qui démontre que les biais d'ajustement de bande n'ajoutent que 2 mm de biais résiduel. C'est négligeable. Lidar topobathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)

Nous en concluons que la donnée est de qualité et ne souffre pas de biais manifeste d'altitude susceptible d'altérer notre interprétation.

#### 3.2.3. Carte des dolines au fond de l'étang Mauger

Outre l'estimation de l'altitude, ces données lidar sont-elles adaptées pour cartographier les dolines subaquatiques? Nous avons investigué cette question sur le secteur de l'étang Mauger (Figure 8) où des dolines sont connues au fond de l'eau dans cette ancienne gravière. Ces dolines ont été cartographiées indépendamment par Gildas Noury grâce une orthophoto prise par drone en aout 2019 à l'étiage de l'étang, et complétée par une visite de terrain (Figure 9B).

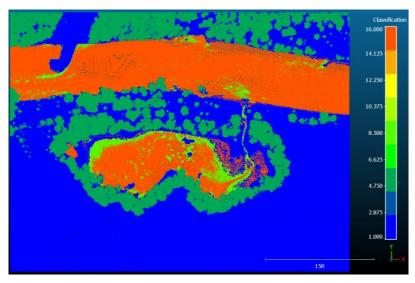


Figure 8 : Carte des classes de points lidar mélangeant le lidar rouge (C2) et le lidar vert (C3). On notera que les identifiants de classification permettent de distinguer l'origine de l'information : 9 pour la surface en eau identifiée par le lidar rouge, 15 pour la surface en eau sur le lidar vert et 16 pour la bathymétrie en lidar vert. Les autres classes, 1-jamais classé, 2-sol et 5-végétation sont quant à elles identiques car provenant sans ambiguïté des mêmes réflecteurs. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021)

La zone d'investigation mesure 16.8 ha. Le nuage de points complet, fusionnant le lidar rouge (C2) et le lidar vert (C3), pour densifier les points sol comprend 11.4 Mpts. Sans surprise, la densité de points en sommet de canopée présente deux pics, à 32 et 64 pts/m², puisque les nuages de points des deux longueurs d'onde lidar ont été captés à la même cadence. La proportion de points au sol sous la végétation reste de 21 % avec au minimum 4 pts/m² sous 90% des zones boisées.

La production d'un raster topo/bathymétrique continu demande de mailler en une seule couche les points sol (2), qu'ils viennent du lidar vert ou infra-rouge, et les points bathymétriques (16) du lidar vert (Figure 9A). Pour révéler le relief local de la topographie, un filtrage passe-haut a été appliqué. Il s'agit de retenir la topographie qui s'écarte du relief lissé dans une fenêtre donnée. La Figure 9 représente l'écart altimétrique du MNT topo/bathymétrique vis-à-vis de la topographie lissée à 5 m, le rayon possible des dolines.

#### 3.2.4. Validation de la reconnaissance des dolines

La validation de la cartographie lidar repose sur plusieurs métriques. Le set de données cartographiées par Gildas Noury combine plusieurs sources d'informations : la délimitation des contours de dolines vues sur une orthophoto d'août 2019 acquise par drone, sur l'imagerie Google Earth et qualifiées par une visite de terrain en octobre 2019. Cette visite de terrain valide l'existence effective et la nature des contours tracés sur image. C'est cet ensemble de 37 polygones recouvrant un total de 555 m² qui sert de référence.

Le relief passe-haut du MNT topo/bathymétrique lidar d'altitude minimal des points classés 2 et 16 (2-sol, 16-bathymétrie) à 25 cm/pixel permet de reconnaitre visuellement 22 polygones recouvrant 855 m² en tout.

D'après la Figure 9 comparant les emprises cartographiques, on s'aperçoit qu'il y a généralement un accord correct entre les emprises globales des polygones. Quelques dolines sont détectées en lidar mais sont absentes des données de terrain, et réciproquement, des dolines visibles sur orthophoto n'ont pas d'expression morphologiques dans le relief lidar.

Tableau 1 : Statistiques des dolines cartographiées sur orthophoto par drone et confirmées sur le terrain par G. Noury en octobre 2019 et des dolines photo-interprétées par T. Dewez à partie des données lidar topo/bathymétriques (MNT d'altitude minimale à 25cm/pixel des points 2 et 16). L'interprétation lidar conduit à identifier des plus grandes surfaces en dépression et d'un nombre plus restreint.

Statistiques	Noury	Dewez lidar TB
Nombre	37 dolines	22 dolines
Superficie totale	555.2 m²	855.9 m <sup>2</sup>
Superficie moyenne	15.0 m²/doline	38.9 m²/doline
Min	0.44 m²	2.8 m²
Q1	3.2 m²	7.6 m²
Médiane	7.0 m²	14.8 m²
Q3	10.46 m²	36 m²
Max	115.0 m²	215.0 m <sup>2</sup>

Les propriété statistiques des polygones sont résumées au Tableau 1. On y constate que l'interprétation des dolines sur les données lidar conduit à délimiter moins de dolines mais qu'elles sont de deux à trois fois plus grandes. Du fait de la connaissance du relief plus fine, la délimitation va chercher les rebords manifestes, alors que ceux-ci sont plus difficiles à reconnaitre dans l'orthophoto. L'expression photographique des dépressions visibles en août 2019 est donc plus petite que sur les données de relief capturées quelques mois plus tard par lidar.

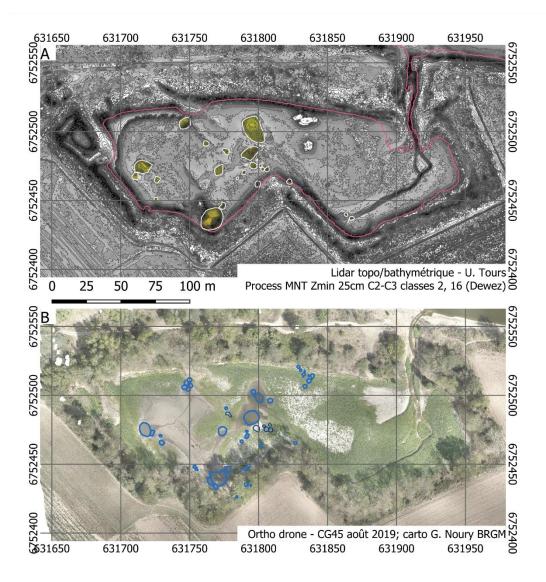


Figure 9 : Carte des dolines dans l'étang Mauger à Darvoy. A. Carte du raster (25cm/pixel) d'altitude minimale des points lidar topo/bathymétrique classés sol-2 ou bathymétrie-16. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021) acquis les 2 et 3 septembre 2020 et contour des dolines reconnues par photo-interprétation. B. Cartographie des dolines sur une orthophoto par drone (donnée Conseil Général du Loiret) acquise en août 2019. La trace des dépressions a été relevée sur l'orthophoto et sur le terrain par G. Noury - BRGM. Les deux cartes montrent une bonne cohérence spatiale même si le relief du fond de l'étang a évolué entre les deux mesures. On notera que le relief lidar ajusté sur l'attitude minimale des points est très sensible à d'éventuelles erreurs de classification.

Le lidar semble donc fournir une vue globalement correcte de la situation mais pour une analyse de détail, la photographie reste préférable. On modulera néanmoins ce propos au regard des ombres portées lors des prises de vue photo et de la profondeur d'eau qui limitent la perception des gouffres sous une lame d'eau excédant une cinquantaine de centimètres.

L'absence d'information bathymétrique au centre de la plus grande doline de l'étang (au SW) laisse supposer que sa profondeur excède la profondeur de pénétration du lidar. La lame d'eau la plus épaisse mesurée entre les points lidar de surface de l'eau (15) et de bathymétrie (16) bordant la zone sans information atteint 1.53 m. Ceci laisse supposer que la doline excède cette profondeur et que le lidar est réellement efficace à mesurer la bathymétrie dans une lame d'eau plus mince.

#### 3.3. MORPHOLOGIE TOPO/BATHYMETRIQUE DU LIT DE LA LOIRE

Au fond de la Loire, plusieurs faciès morphologiques se juxtaposent. L'interprétation des formes du relief demande de combiner à la fois la topographie et l'orthophoto couleur. Les Figure 10 et Figure 11 reprennent des morphologies distinctes du lit et des rives de Loire.

Au centre du chenal sableux, le fond peut être soit complètement lisse et plat (cas 1, Figure 11), soit creusé de formes allongées d'une vingtaine de mètres de largeur et terminées par un abrupt de 50 cm à 1 m de hauteur remontant à l'aval (cas 3, Figure 11). Lorsque le flux d'eau franchit une passe entre deux bancs de sable, le rétrécissement du chenal en largeur accélère le flux d'eau, qui conduit à un approfondissement (cas 2, Figure 11) pour conserver une section hydraulique constante. Latéralement, des formes de dépôt en langues divergentes vers l'aval se déposent dès que la section hydraulique s'élargit et que le flux ralentit (cas 2, Figure 11).

A proximité de la rive, là où le flux est plus lent, des plantes aquatiques ou ripariennes (cas 1, Figure 11) poussent en forme de bouquets coalescents de dimension métrique.

Enfin, sur la berge, sous la forêt, on peut retrouver des dépressions circulaires fermées (dolines) éventuellement alignées, comme sur l'exemple 4 (Figure 11). La doline la plus profonde à l'ouest mesure 13 m de diamètre et 2 m de profondeur. Les autres dolines sont plus modestes avec une trentaine de centimètres de profondeur et 3 à 6 m de diamètre. Ces dolines sont absentes de la BD Cavités, il serait bon de les qualifier par une visite de terrain et de les y verser. On confirme avec cette figure que la détection de ces objets ressort clairement grâce à leur relief négatif d'amplitude pluri-décimétrique et leur forme circulaire typique. Ce sont ces formes en dépression, éventuellement étirées du fait du courant, que nous chercherons à identifier dans le cours de la Loire. Une validation de terrain est complexe car les sédiments drapant le lit sont très mobiles et peuvent cacher certaines dolines et en révéler d'autres, invisible lors du survol lidar du 2-3 septembre 2020.

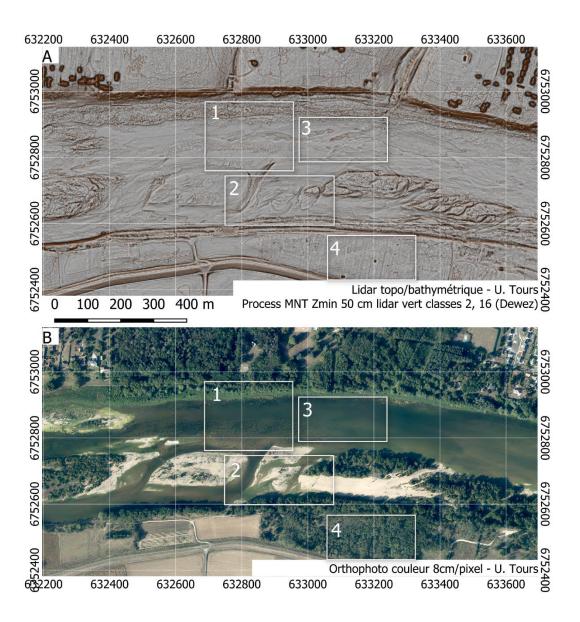


Figure 10 : Morphologie du lit de la Loire et de ses berges entre le pont de Jargeau et l'étang Mauger les 2-3 septembre 2020. La numérotation identifie quatre types de formes de paysage détaillées à la Figure 11. 1. Chenal principal sableux bordé de plantes aériennes et aquatiques en bouquets. 2. Chenal inter-banc avec figures d'érosion et d'accrétion montrant la vigueur du flux. 3. Morphologies de fond de chenal en forme de gouge à l'extrémité raide et arrondie à l'aval. 4. Dolines sous la forêt riparienne. Lidar topo-bathymétrique du 2-3 et orthophoto du 15 septembre 2020 (Rodrigues et Boigné, 2021)

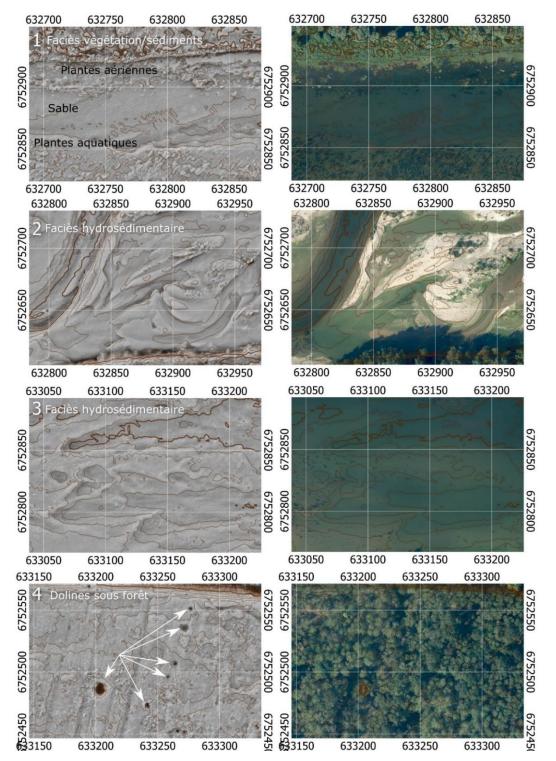


Figure 11: Faciès morphologique du fond de la Loire et de ses rives. 1. Chenal bordé de végétation aquatique au nord et au sud. Le milieu du chenal est nu. La douceur du relief indique un fond de chenal sableux. 2. Passe entre deux bancs de sable émergés. Les différents corps sédimentaires traduisent la vitesse et la direction du flux d'eau et de sable. 3. Faciès de fond de chenal sableux creusé en longues gouges terminée par un abrupt de 10% environ, courbe en plan et d'une hauteur d'une cinquantaine de centimètres. 4. Dépressions circulaires sous la forêt riparienne du sud de la Loire. Ces dolines à l'ouest du camping de Jargeau sont connues et bien révélées par le lidar, malgré la couverture forestière. Les courbes de niveaux sont espacées de 25 cm et de 2 m pour les courbes maîtresses. Lidar topo-bathymétrique du 2-3 et orthophoto du 15 septembre 2020 (Rodrigues et Boigné, 2021).

# 3.4. DETECTION DES DEPRESSIONS MORPHOLOGIQUES DANS LA TOPO/BATHYMETRIE

La zone d'étude couvre un secteur s'étendant 3.1 km en amont et 6.6 km en aval du pont de Jargeau (Figure 12). Le lit mineur, en bleu sur la Figure 12, couvre 294 ha.

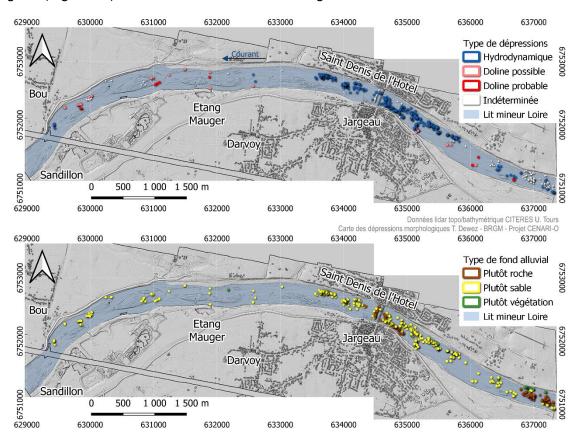


Figure 12 : Carte des types de dépressions et de fond alluvial au droit de ces dépressions dans la Loire au voisinage de Jargeau. Deux tiers des dépressions sont probablement des dépressions d'origine hydrodynamique où le courant crée un creux local dans la couverture sableuse. 34 dépressions sont des dolines possibles et 10 sont des dolines probables. Pour ce qui concerne la nature du fond, le lit rocheux (calcaire de Beauce) affleure vers Jargeau et en amont. Des bancs de sables recouvrent cependant 580 des 642 dépressions (90%) et sont localisés en amont de Darvoy. Des cartes à plus grande échelle sont présentées en Figure 14 et Figure 15. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021).

Les dépressions (Figure 12) ont été interprétées visuellement à partir du relief local à 25 cm/pix (MNT filtré passe haut à 5 m) et des détails visibles sur l'orthophoto couleur à 9 cm/pix. Les dépressions sont numérisées comme des disques en traçant le rayon depuis le centre approximatif de la dépression vers le bord. Cette méthode de cartographie est rapide et permet non seulement de positionner les dépressions mais également d'en estimer un diamètre approximatif. La carte produite a surtout une valeur qualitative car il est difficile d'objectiver si toutes les dépressions ont été cartographiées, et qu'aucune dépression ne soit un autre objet géomorphologique. Néanmoins, cette carte offre une position et un critère de hiérarchisation numérique. Les dépressions sont également qualifiées à dire d'expert en fonction de l'environnement où elles se manifestent et de leur processus plausible de formation.

Sous les 294 ha de lit mineur de la Loire examinés, 642 dépressions ont été identifiées visuellement. Le fond des dépressions apparait, sur le relief passe-haut représenté en niveaux de gris du sombre au clair, comme un îlot sombre au sein d'une tache plus claire puisqu'il est situé à une altitude plus faible que la topographie moyenne environnante. La forme

approximativement circulaire est utilisée comme guide pour positionner le centroïde approximatif de la dépression.

La superficie totale des dépressions couvre 2267 m <sup>2</sup> (0.2 ha) (Figure 12). Le diamètre des dépressions est compris entre 0.85 m et 9.66 m, avec une médiane de 3.24 m (Tableau 2).

Tableau 2 : Distribution des diamètres des dépressions alluviales

Statistique	Toutes les dépressions	Amont Darvoy	Aval Darvoy
Nombre [-]	642	580	62
Diamètre maximum [m]	9.63	9.63	7.71
Diamètre 75% [m]	4.29	4.26	4.42
Diamètre moyen [m]	3.50	3.53	3.53
Diamètre médiane [m]	3.24	3.28	2.85
Diamètre 25% [m]	2.42	2.41	2.41
Diamètre minimum [m]	0.85	0.85	1.35

La distribution spatiale dans le cours d'eau est très anisotrope (Figure 12). 90% des dépressions (580 sur 641) sont localisées dans les 4 kilomètres amont de la zone d'étude, en amont de Darvoy. En aval, seuls 10% des dolines persistent. La distribution de leur diamètre ne se distingue pas des dépressions de l'amont (Tableau 2).

La nature de l'environnement où ces dépressions surviennent se range en trois catégories : sur fond plutôt sableux (484), sur fond plutôt rocheux (136) ou au sein de la végétation aquatique et riparienne (22). La nature du fond a été déduite à la fois de la texture du relief local, lisse sur fond sableux, rugueuse sur fond rocheux et de la texture colorée de l'orthophoto.

Le processus à l'origine des dépressions observées a été supputé grâce au contexte du lit alluvial et à la forme des dépressions. Nous proposons la présence de trois types de dépressions, par ordre d'abondance: les dépressions d'origine hydrodynamique probables (431), les dépressions de nature indéterminée (167) et les dolines (possibles: 34 ; probables: 10). Seuls les objets identifiés comme doline seraient de nature karstique.

Les dépressions d'origine hydrodynamique se forment au voisinage d'obstacles, comme des blocs rocheux émergeant dans les bancs de sable. Le flux d'eau accélère autour de l'obstacle et érode une couronne de quelques mètres autour et à l'aval de l'obstacle. Pour les cas indéterminés, des blocs émergeant des bancs de sable ne sont pas observés.

Le diamètre des dolines possibles ou probables ne diffère pas de la population des diamètres des autres dépressions (voir Tableau 2 et Tableau 3). Elles ne représentent que 44 entités sur 642 dépressions (6.8%). Entre les dolines possibles et les dolines probables néanmoins, les diamètres sont systématiquement plus larges pour les dolines probables (Tableau 3). Ils sont compris entre 2.08 m et 9.37 m.

Tableau 3 : Distribution du diamètre des dépressions interprétées comme des dolines possibles ou probables. Les dolines probables ont un diamètre plus grand que les dolines possibles.

Statistique	Dolines (tous types)	Dolines possibles	Dolines probables
Nombre [-]	44	34	10
Diamètre maximum [m]	9.37	9.12	9.37
Diamètre 75% [m]	6.02	5.04	7.57
Diamètre moyen [m]	4.24	3.83	5.63
Diamètre médiane [m]	3.67	3.06	6.13
Diamètre 25% [m]	2.51	2.49	2.58
Diamètre minimum [m]	1.82	1.19	2.08

Les 10 dépressions interprétées comme des dolines probables ont été repérées sur substrat sableux. Seules 2 dolines possibles sur 34 (6%) ont été repérées sur substrat rocheux. Enfin, la distribution géographique montre que 30 des 44 dolines se situent en aval de Darvoy, avec 7 dolines probables sur 10 et 23 des 34 dolines possibles.

Ces valeurs descriptives ne doivent pas oblitérer le fait qu'environ un quart des dépressions (167 sur 642) n'ont pas d'origine attribuée.

#### 3.5. UTILITE DE LA DONNEE TOPO/BATHYMETRIQUE LIDAR

Les données topo/bathymétriques offrent une vue continue de la morphologie du lit majeur, du lit mineur et du lit en eau de la rivière, y compris sous les arbres. Dans le cas de la Loire, la surface en eau couvre 206.6 ha.

La pénétration maximale a été caractérisée en utilisant la profondeur maximale à laquelle des points classés « bathymétrie » (classe 16 pour le lidar vert à 532 nm) circonscrivent une fosse sans donnée. Ces zones sont très rares dans le lit de la Loire, signifiant à l'inverse que la profondeur maximale de pénétration du lidar n'a que rarement et localement été rencontrée. Deux zones à pénétration limitée ont été repérées.

La première zone sans donnée excède 1.83 m de profondeur dans le secteur ouest, dans une zone jouxtant les carrières de granulat de Sandillon. La fosse sans information bathymétrique couvre une superficie de 4810 m² (130 m x 37 m). La seconde zone se situe au sud-ouest de l'étang Mauger. La bordure de points lidar la plus profonde circonscrivant une doline sans donnée atteint 1.53 m sur une superficie de 170 m² (10 m x 17 m). Donc sur la totalité du lit immergé, seul 0.2% du lit n'a pu être mesuré car trop profond pour le lidar.

La continuité de la bathymétrie de la Loire laisse penser que la lame d'eau était optimalement distribuée pour les capacités de pénétration du vol lidar. La profondeur d'eau moyenne est de 0.60 ±0.36 m pour une profondeur médiane de -0.62 m. 95% de la superficie en eau n'excède pas 1.2 m de profondeur ce qui est optimal pour la pénétration. Nous n'avons pas d'information quant à la quantité de matière en suspension le jour du vol lidar pour moduler notre compréhension des limites de pénétration du lidar dans la colonne d'eau de la rivière.

Nous en concluons que l'équipement est un moyen très performant pour collecter des données bathymétriques petit-fond sur de très grandes superficies.

Concernant la performance à reconnaître les dolines et les pertes dans la rivière, 10 dépressions morphologiques dans le lit de la Loire sont des pertes probables. C'est déjà deux pertes de plus que celles, avérées, rapportées par Lepiller *et al.* (2006) (Figure 13). Du fait de l'échelle de cette figure, il est cependant impossible d'assigner nos indices morphologiques à des pertes connues. Enfin, les hydrogéologues ont pu constater que la présence des pertes en bord de Loire était très évolutive. En l'espace de quelques semaines, des pertes peuvent apparaître et disparaître. Notre carte de dolines possibles ou probables, établie sur le levé lidar de 2019-2020, est un état des lieux pour cette date. Nous ne saurons sans doute jamais si toutes les dolines identifiées sont véritablement des pertes.

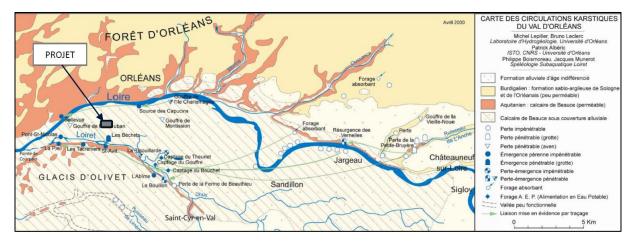


Figure 13 : Carte des circulations karstiques du val d'Orléans (Lepiller, 2006). 8 pertes sont connues en bord de Loire, 4 en rive gauche autour de Jargeau, et 4 en rive droite à Bou. Vu l'échelle de cette carte, nous ne pouvons malheureusement pas utiliser cette connaissance pour valider nos indices.

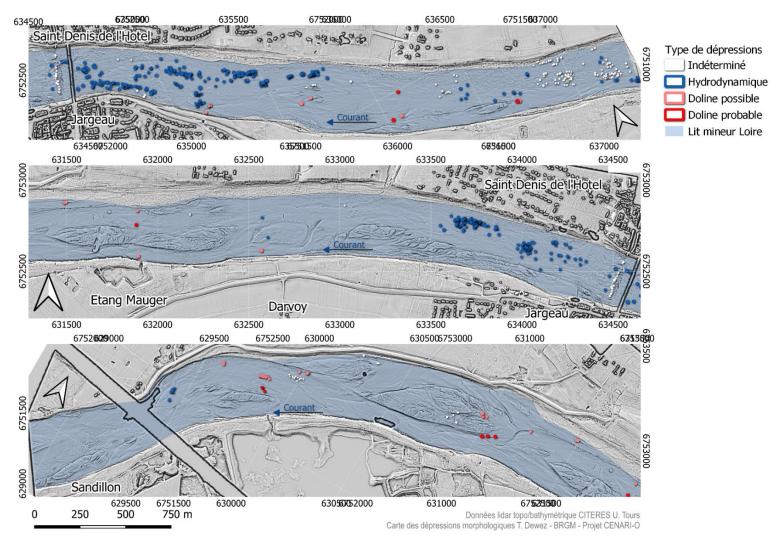


Figure 14 : Carte des types de dépression identifiées au fond de la Loire entre Jargeau et Sandillon. Sur un total de 642 dépressions, 431 dépressions sont probablement d'origine hydrodynamique (formes creuses dans la couverture sableuse), 34 sont des dolines possibles, 10 sont des dolines probables et 167 sont des dépressions de nature indéterminée. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021).

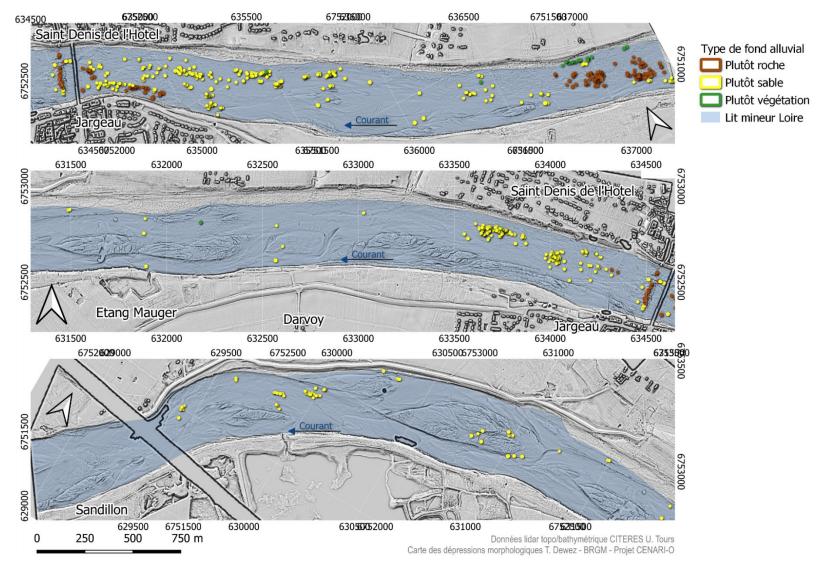


Figure 15 : Carte de la nature du fond alluvial au droit des dépressions morphologiques. 136 dépressions se situent sur substrat probablement rocheux, 484 sont marquées sur un fond probablement sableux, 22 se situent dans la végétation. Lidar topo-bathymétrique (Rodrigues et Boigné, 2021).

# 4. Levés bathymétriques dans le Loiret par drone flottant

Alors que les levés lidar bathymétriques en rivière sont encore très rares aujourd'hui, la technique de mesure bathymétrique par sondeur multi-faisceau est, elle, bien établie. Cette assertion ne rend pas pour autant simple leur réalisation sur une rivière à faible tirant d'eau encombrée de végétation aquatique, comme c'est le cas du Loiret.

En complément des travaux présentés précédemment pour identifier les pertes dans la Loire à Jargeau, le projet CENARI-O a permis de cartographier le fond du lit du Loiret à la recherche d'indices morphologiques de résurgences subaquatiques. Certaines résurgences sont bien connues, telle le Bouillon, dans le Parc Floral de la Source. D'autres le sont moins. Identifier leur position dans le lit de la rivière permet à la fois d'évaluer l'abondance des zones d'échange et disposer d'une vue de leur distribution spatiale. Il est connu, dans le lit du Loiret, que certaines sources peuvent se comporter en « inversac » (Albéric, 2001, 2004, 2008), c'est-à-dire en zone d'absorption d'eau plutôt que d'émission. Le comportement provient de l'équilibre hydraulique entre la nappe karstique influencée par la Loire et le niveau du Loiret. Pour cette raison, nous ne qualifierons pas les dépressions de source ou de perte mais seulement de zone d'échange. Technologiquement, nous aurions souhaité réaliser la cartographie bathymétrique du Loiret avec la même technique de lidar aéroporté que pour la Loire à Jargeau, mais les échanges avec Dimitri Laque, de Géosciences Rennes, responsable académique de l'équipement lidar aéroporté déployé sur Jargeau nous en a dissuadé. La forêt riparienne s'étendant au-dessus du Loiret, le biofilm sombre couvrant le fond et l'abondance de végétation aquatique limitaient drastiquement les chances de succès d'une telle mission.

C'est pour ces raisons qu'une campagne de bathymétrie par sondeur multi-faisceau et de mesure physico-chimique a été réalisée à partir d'un catamaran radio-commandé, appelé Catarob, sur le Bassin des Tacreniers à Olivet en mars 2022. Ce bassin a été choisi du fait d'un accès de mise à l'eau raisonnablement aisée du catarob et du tour d'horizon dégagé nécessaire au positionnement GNSS du drone. La zone couverte mesure 600 m de longueur et 80 m de largeur maximale, pour 43000 m² effectifs.



Figure 16: Localisation du bassin des Tacreniers sur le Loiret à Olivet (polygone rouge d'extension E-W au centre de la carte. Le secteur relevé se situe en amont de l'autoroute A71 (axe N-S en rouge), à hauteur du moulin du Bac. Il couvre une superficie de 4.3 ha. Fond cartographique Openstreetmap.

#### 4.1. CAMPAGNE DE MESURE PAR DRONE FLOTTANT

La société SubseaTech, basée à Marseille, a réalisé d'abord un levé bathymétrique puis un levé physico-chimique à l'aide d'un catamaran radio-commandé de leur fabrication : le catarob (https://www.subsea-tech.com/fr/catarob/, visité le 27 juin 2023). L'intérêt d'un tel équipement consiste en son agilité et en sa relative légèreté de mise en œuvre pour les campagnes de mesure par très petit fond. Le tirant d'eau minimal est de 17 cm.

Le drone (Figure 17) est radio-commandé en temps réel et télétransmet par wifi sur une portée d'un kilomètre maximum ses variables de positionnement ainsi que le flux de données bathymétriques et acoustiques.

L'acquisition bathymétrique a eu lieu le 22 mars (Figure 18), et l'acquisition physico-chimique le 23 mars 2022.

L'acquisition bathymétrique a été réalisée par un écho-sondeur mutli-faisceaux Norbit WBMS. Un imageur acoustique BluePrint Oculus 750d donne une image du faciès acoustique du fond de l'eau. Ces deux systèmes sont associés à une centrale d'attitude et un système de positionnement GNSS différentiel temps réel recevant les corrections de géolocalisation TERIA. Enfin, la morphologie des rives à l'air libre a été relevée grâce à un lidar Velodyn VLP-16 « Puck ».

Le rapport d'acquisition de Subsea Tech est joint en annexe 1.



Figure 17 : Système de drone flottant radio-commandé Catarob de la société SubSea Tech. Le drone est équipé d'un dispositif échosondeur multifaisceaux, d'un imageur acoustique, d'un lidar aérien et d'un système de mesure d'attitude et de positionnement. Il est piloté depuis un poste de travail situé dans un camion. La communication fonctionne en wifi sur une portée maximale de 1 km. (photo T. Dewez - BRGM)

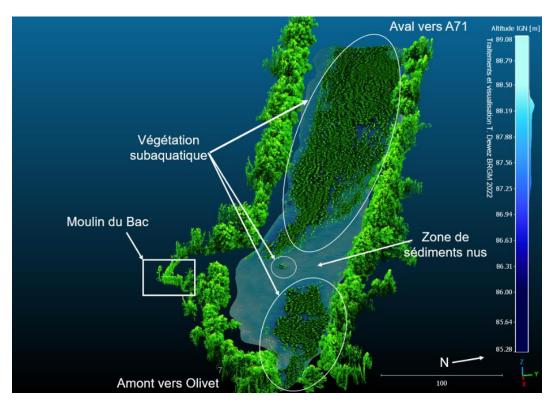


Figure 18 : Vue oblique du nuage de points 3D topographique et bathymétrique. Les points verts à la périphérie figurent les arbres de la forêt riparienne bordant le Loiret. Ils ont été relevés par le lidar aérien.

La bathymétrie a été relevée par échosondeur multifaisceau. Dans la rivière, de larges herbiers de plantes aquatiques, aussi colorisées en vert, couvrent le fond de la rivière. Seule une bande de sédiments nus est présente dans le tiers amont (vers le bas de l'image) du bassin des Tacreniers.

#### 4.2. RECEPTION DES DONNEES

Les produits livrés sont une image acoustique du fond du Loiret et un modèle numérique de surface (MNS) à 10 cm de la bathymétrie (Figure 19). En complément du raster, un nuage de 91.4 millions de points de sonde 3D rapporte la position des échos rencontrés sous l'eau, qu'il s'agisse du fond ou de la végétation aquatique. On notera que le nuage de points de sonde 3D n'a pas été classifié pour distinguer la bathymétrie des herbiers. Nous avons réalisé nous-mêmes une classification des points sol et végétation.

Chaque point de sonde 3D contient comme attribut la position et l'intensité du signal réfléchi par les échos. La magnitude du signal acoustique décroit simultanément en distance et en fonction des propriétés acoustiques du matériau réfléchissant l'onde. Cette double influence rend l'interprétation difficile. Comme nous ne disposions pas d'informations additionnelles pour déconvoluer les deux influences, cette information n'a pas été davantage utilisée.

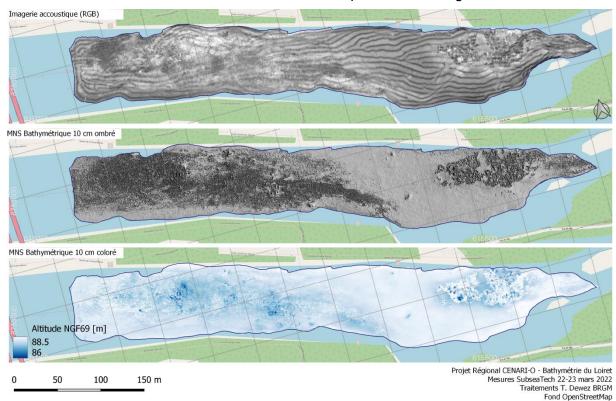


Figure 19 : Modèle numérique de surface ombré de la bathymétrie du Bassin des Tacreniers mesurée par le drone flottant Catarob le 22 mars 2022. Les zones sombres traduisent la position des herbiers aquatiques. Ceux-ci couvrent une large proportion du fond du Loiret.

Pour ce qui concerne la densité d'informations bathymétriques, le cahier des charges prévoyait une couverture de 400 pts/m², soit 1pt/5cm, « en sortie d'instrument ». On estime cette densité en comptant tous les points de sonde par unité de surface, qu'ils atteignent le fond ou la végétation aquatique.

La zone effectivement parcourue recouvre une superficie de 43008 m² soit 4.3 ha. Il a fallu une journée de levé bathymétrique pour atteindre une vue complète et avec le minimum de manque de données dans le périmètre.

La carte de densité de points de sonde est rapportée en Figure 20. La distribution statistique correspondante est en Figure 21. La moyenne de la densité est de 2098±1316 pts/m² (Figure 21). Cette métrique à la fois élevée mais très variable n'est guère compréhensible. On préférera exprimer l'espacement entre points (espacement [pt/cm] = 1/racine(densité[pts/m²])) et les percentiles de la distribution, qui sont plus intuitifs. Un espacement de 1 pt/5cm est rencontré sur presque 95% du domaine mesuré (Figure 21). L'histogramme interactif de Cloud Compare, grâce auquel le nuage de sondes 3D a été traité, permet d'identifier les autres quantiles utiles. 75% de la surface contenait plus de 1 pt/2.9cm. La médiane de l'espacement est à 1pt/2.3 cm. La densité de points excède même 1pt/1.9 cm pour 25% de la superficie. L'objectif de densité spécifié est donc atteint. La demande de densité de points de sonde élevée visait à obtenir une image du fond malgré la présence de végétation. Comme avec les systèmes lidar, plus les tentatives de mesure sont nombreuses et denses, plus il y a de chances de voir l'onde passer dans les interstices de la végétation et rapporter une information bathymétrique sous la végétation.

D'après la carte de densité de points (Figure 20), on voit que la fauchée effective de l'échosondeur est de l'ordre de 8 m de largeur. Etant donné l'angle de balayage connu de l'échosondeur, 150°, on en déduit la lame d'eau effective. Elle était de l'ordre de 1 m le 22 mars 2022.

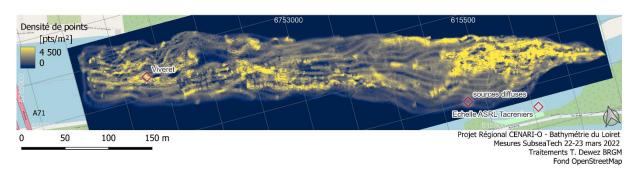
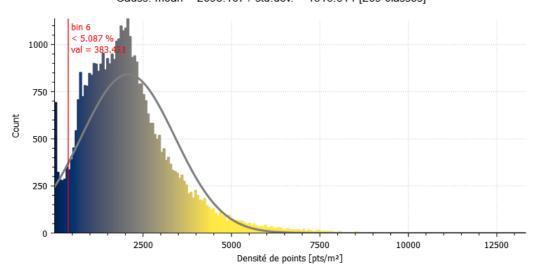


Figure 20 : Carte de densité de points de sonde 3D dans le bassin des Tacreniers. La distribution statistique est reprise en Figure 21. Les lignes de plus grande densité montrent signalent les endroits où

le catarob a insisté pour obtenir des points de sonde. Il s'agit des secteurs à faible profondeur et à herbiers aquatiques.



Gauss: mean = 2098.107 / std.dev. = 1316.314 [209 classes]

Figure 21 : Distribution de la densité de points de sonde 3D dans le bassin des Tacreniers sous le Loiret.

#### 4.3. VALIDATION DE LA QUALITE DES DONNEES

La qualité altimétrique des données bathymétriques a été évaluée de deux manières. La première méthode utilise des cibles métalliques pourvues d'un relief caractéristique en croix. Cette méthode a été conçue pour valider la capacité de discrimination d'un relief connu dans les points de sonde. La seconde méthode évalue la répétabilité des mesures d'altitude sur des positions de terrain lisse, comme les tests réalisés avec les données lidar à Darvoy.

#### 4.3.1. Discrimination d'un relief connu avec des cibles 3D

Pour évaluer la capacité de l'échosondeur à discerner un relief centimétrique, des cibles dédiées ont été créées pour l'expérimentation (design et réalisation par T. Dewez, BRGM, 22 mars 2022 - Figure 22).

Il s'agit de plaques carrées en aluminium texturé de 50 x 50 cm de côté où deux cornières se croisent au centre de la plaque. La cornière la plus petite mesure 3.6 cm de largeur et 1.6 cm de hauteur. La plus grande cornière mesure 5.8 cm de largeur et de 2.6 cm de hauteur. Dans les deux cas, les cornières mesurent 50 cm de longueur et se croisent au centre de la cible.

Le design des cibles repose sur un choix minutieux d'une série de critères. L'aluminium ne s'oxyde pas à l'eau et ne risque pas de rouiller au fil du temps. Le métal est assez rigide pour la dimension de la plaque pour pouvoir être assimilée à un plan et évaluer la dispersion des mesures bathymétriques sur un objet plan a priori.

L'aluminium est acoustiquement très contrasté par rapport au fond calcaire, aux sédiments où à la végétation. On cherchait à ce que l'intensité du signal acoustique permette de singulariser les cibles dans l'environnement par simple seuillage de valeur acoustique.



Figure 22: Cibles 3D en aluminium texturé conçues pour fournir un relief connu et une position centrable dans les données de l'échosondeur multifaisceaux. Les plaques mesurent 50 x 50 cm. La cornière la plus basse a une base de 36 mm et une hauteur de 16 mm, pour une longueur de 50 cm. La cornière la plus haute a une base de 58 mm et une hauteur de 26 mm. L'intersection des deux cornières est prévue pour figurer un relief centrable. Design T. Dewez – BRGM, 22 mars 2022.

La texture de la plaque avec ses micro-reliefs millimétriques devait favoriser la rétro-diffusion des ondes acoustiques incidentes vers le capteur et atténuer les réflexions spéculaires. Nous nous attendions à ce qu'une plaque rigide et sans relief se comporte comme un miroir.

Enfin, les cornières à angle droit avec leurs pentes à 45° visent à offrir un relief texturé réfléchissant les ondes acoustiques en direction de l'échosondeur.

Ce prototype de cible, créé pour l'expérience, s'est révélé moins performant que prévu (Figure 25). L'échosondeur n'a renvoyé que très peu de points de sonde sur les plaques et aucun point de sonde permettant de reconnaître la croix matérialisée par les cornières. D'autre part, l'intensité du signal acoustique ne permet pas de déduire sa présence sur l'arrière-plan sédimentaire comme espéré.

Nous y voyons plusieurs explications. La plaque a pu jouer comme un miroir, malgré les précautions de texturage et de relief apporté par les cornières. Ces éléments de relief millimétrique et centimétrique ne sont peut-être pas adaptés aux dimensions physiques des ondes acoustiques.

La vitesse de propagation acoustique de l'aluminium par rapport à l'environnement est beaucoup plus élevée que les sédiments alentours. Le capteur étant calibré pour enregistrer des signaux réfléchis sur le fond rocheux, sédimentaire ou organique, il a peut-être été aveuglé par les retours énergétiques réfléchis par la plaque.

Enfin, une troisième cause est possible également. Deux plaques ont été immergées et analysées différemment. Avec un seul passage de l'échosondeur, peu de points ont été retournés vers le capteur. Avec des passages multiples, on pouvait espérer gagner davantage de couverture. Mais les passages multiples étant dépendant de la qualité de positionnement absolu du catamaran, l'écart altimétrique entre bande est trop grand pour bénéficier de l'effet d'empilement des lignes de mesure.

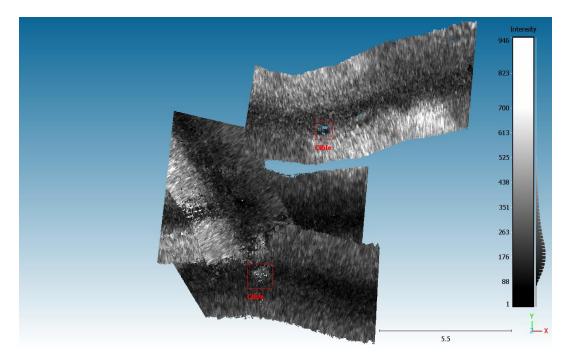


Figure 23 : Signal acoustique des points de sonde au droit des deux cibles ennoyées. L'interaction entre le signal acoustique et les cibles conduit à n'obtenir que peu de point en retour.

Par ailleurs, le nuage de points de sonde ne comportant aucune information permettant de séparer les lignes de passage, que ce soit un identifiant de bande ou un attribut d'horodatage, un recalage relatif des bandes de mesure n'est pas possible a postériori.

Ceci ouvre la nécessité d'une deuxième technique de qualification des données bathymétrique : l'évaluation de la cohérence relative des mesures.

#### 4.3.2. Cohérence des mesures bathymétriques

L'esprit de cette validation consiste à comparer l'altitude des points de sonde mesurée vis-à-vis d'une altitude pressentie. Pour que l'évaluation ait du sens, il faut évidemment que le secteur sur lequel on évalue la dispersion altimétrique présente bien un caractère prévisible.

Le MNS bathymétrique (Figure 19) montre qu'il existe un domaine où le fond de l'eau est très lisse. Nous en déduisons que la texture lisse de l'ombrage traduit un fond recouvert de sédiments. Ce secteur, se situe à la confluence du bassin des Tacreniers et de l'exutoire du moulin du Bac. Dans ce contexte, on peut supposer que le relief du sol est plan au moins localement à l'échelle de quelques centimètres à décimètres.

SubseaTech a fourni deux extraits de ligne de mesure sans recouvrement (Figure 24), la première sur un secteur à sédiments, la seconde recoupant un herbier. Les fauchées recoupent une bande d'environ 8 m de largeur. Ceci permet de vérifier la cohérence verticale des données en un seul passage pour une lame d'eau d'environ 1m de profondeur.

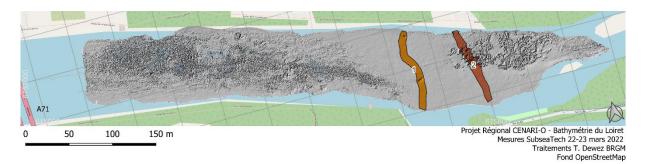


Figure 24 : Carte des lignes de sonde permettant la validation de la précision bathymétrique de l'échosondeur. Zone 1 : secteur où le fond est uniquement composé de sédiments, d'après la texture du MNS ombré. Zone 2 : secteur traversant un herbier aquatique.

Vu la densité de points à 1 m de profondeur, on peut évaluer la dispersion verticale des sondes dans des pixels de grille de 10 x 10 cm. On utilise l'écart-type comme métrique de dispersion car c'est une mesure unique dont la dispersion doit être gaussienne. Pour la zone 1, la valeur d'écart-type la plus fréquente est de 5 mm. Deux-tiers des pixels présentent un écart-type altimétrique plus faible que 5 mm. L'écart-type moyen est de 7±5 mm.

La distribution d'amplitude verticale des points au sein de chaque pixel de 10 x 10cm (heightrange) indique que l'amplitude la plus fréquente est de 2.5 cm et 63% des pixels ont même une valeur plus faible que 2.5 cm.

Pour la zone 2, la dispersion altimétrique est évidemment plus grande dans la végétation au niveau des pixels d'une grille à pixels de 10 cm. Sur la partie sud, sans sédiments, l'écart-type le plus fréquent est de 5 mm. La moitié des pixels ont un écart-type plus faible que 5 mm. L'écart-type moyen est de 6±4 mm.

Cette évaluation montre que l'estimation de la bathymétrie, en un seul passage, est cohérente à un niveau meilleur que le centimètre. En relatif, une profondeur d'eau d'environ 1 m est estimée à 5 mm près soit 1/200. Pour les besoins de l'exploration karstique du fond, l'estimation d'altitude est largement assez précise.

Se pose ensuite la question de la capacité du catamaran à mesurer plusieurs fois la même profondeur à chaque passage. Ce qui est implicite ici c'est l'exactitude de la centrale d'altitude et du système de positionnement temps réel. On teste la qualité de l'ajustement en examinant les croisements de bandes de mesure. On évalue ce critère avec l'amplitude verticale, c'est-à-dire l'écart entre l'altitude minimale et maximale rencontrée dans chaque pixel de 10 x 10 cm.

La dispersion verticale moyenne au droit de la zone 1 passe de 2.5±3.0 cm pour une bande seule à 5.8±4.8 cm pour plusieurs passages exactement sur la même emprise. Les valeurs extrêmes montrent qu'il y a des biais altimétriques importants qui sont particulièrement visibles en bout de distribution. Le quantile à 95% de l'amplitude verticale passe de 6.0 cm pour un seul passage, à 14.4 cm pour des passages multiples.

Ceci montre que la donnée bathymétrique compilant plusieurs passages, qui est désirable pour densifier la bathymétrie sous la végétation, n'est fiable qu'à 5 centimètres près. Cette inexactitude de niveau de base provient très probablement de l'incertitude altimétrique liée à la position GNSS du catamaran. L'échosondeur mesure précisément la distance au fond, mais le GNSS ne sait pas à 5 cm près à quelle altitude l'échosondeur se trouve lors de sa mesure. Le GNSS induit une erreur relative de l'ordre de 1/20 de la profondeur d'eau, ce qui est dommageable pour mesurer des topographies fines, mais toujours pertinent pour repérer des structures subaquatiques de profondeur pluri-décimétrique et d'extension métrique.

#### 4.4. CARTOGRAPHIE DES ZONES D'ECHANGE HYDRAULIQUES

Forts de l'évaluation de précision altimétrique, les données ont été analysées en deux temps.

Une classification des points de sonde entre les points de végétation et les points de fond a été réalisée de manière incrémentale. Nous cherchons à séparer les points de végétation qui flottent dans la colonne d'eau au-dessus des sondes réfléchies par le sol. Les points au sol sont les plus bas. On repère les points d'altitude minimale par approche raster.

On réalise ce traitement en deux étapes dans CloudCompare avec l'outil Rasterize, d'abord avec une première grille grossière à 1m/pix puis avec une grille plus fine. Lors de la première itération, les points situés à plus de 50 cm au-dessus de la surface d'altitude minimale à 1 m sont exclus. Ensuite une seconde grille d'altitude minimale à 20 cm/pixel est calculée à partir des points restant. Ceux-ci décrivent plus fidèlement le sol. Les points à moins de 50cm de cette surface sont préservés pour calculer un MNT à 20cm.

La superficie des herbiers couvre 14 878 m² soit 34% du bassin des Tacreniers investigué (Figure 25, haut).

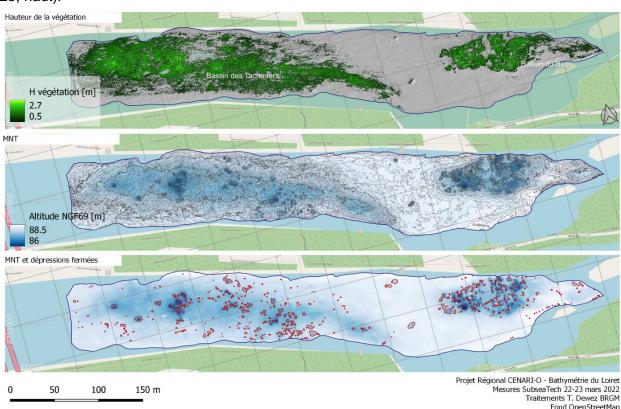


Figure 25 : Nuages de points de sonde bathymétrique retraités pour identifier le sol, la végétation aquatique et les dépressions fermées pouvant s'apparenter à des dolines ou des sources. Un filtrage des points les plus bas de la colonne d'identifier les points sol. Les points de végétation se situent au-dessus du sol (panneau du haut), la superficie en végétation occupe 14 878 m² (34% du total). Les courbes de niveau du MNT font ressortir la présence de dépressions fermées (panneau du milieu). Traitées par un algorithme de MinTree (Guiotte et al., 2019a), les dépressions fermées en rouge correspondent possiblement à des conduits de zones d'échange avec la nappe karstique (sources ou pertes).

La morphologie du MNT à 20 cm ainsi produit montre un relief à deux faciès : un faciès très lisse où un banc de sédiments occupe toute la largeur du Loiret à l'embouchure de l'exutoire du moulin

du Bac et un faciès rugueux parsemé de dépressions fermées typiques du calcaire de Beauce carié et karstifié.

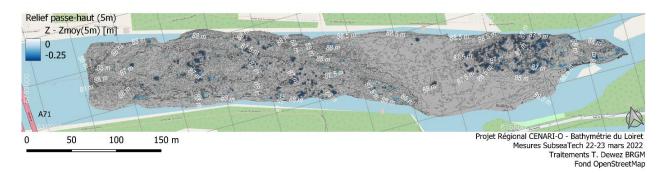


Figure 26 : Carte du relief local (MNT filtré passe-haut à 5m). L'échelle de couleur met en lumière les dépressions de plus de 0.25 m de profondeur. Les courbes de niveau sont tracées tous les 10 cm et étiquetées tous les 50 cm de profondeur.

Le faciès de sédiment est affecté de trois dépressions remarquables occupées par de la végétation.

Le MNT a ensuite été analysé à la recherche de dépressions fermées pouvant agir comme zone d'échange. Comme pour la Loire à Jargeau, le MNT passe-haut filtré à 5m met en évidence le relief local. Les dépressions ont une altitude plus faible que la moyenne.

### 4.4.1. Segmentation des dépressions par morphologie mathématique (MinTree)

Des développements récents en segmentation d'image ont montré la performance des techniques de graphe pour explorer un domaine de paramètres spatiaux multi-échelle (Guiotte et al., 2020, 2019b). Il s'agit de seuiller itérativement une grille scalaire en partant de la valeur maximale, ou minimale, et de regrouper les pixels adjacents en entités. Au fur et à mesure de l'abaissement du seuil, les entités de pixels croissent et changent de forme. La relation d'imbrication des entités successives est encodée dans un arbre ainsi que les paramètres de forme des polygones délimités.

Sur une grille d'altitude, ceci ressemble à évaluer les relations de filiations des courbes de niveau d'une carte topographique. En partant du point culminant, on descend progressivement les isovaleurs pour trouver les courbes de niveau suivante. L'arbre de relation enregistre les notions de : « cette courbe contient le maximum », « le niveau d'altitude seuillé vaut X », « la courbe de niveau délimite ce polygone ». Avec ces informations de base, chaque polygone est ensuite décrit par une série de métriques : longueur du périmètre, aire, compacité, etc... que l'on peut explorer interactivement pour sélectionner les polygones désirés (Guiotte *et al.*, 2020).

La librairie Python open-source *SAP* de Florent Guiotte (Simple Attribute Profile, <a href="https://gitlab.inria.fr/fguiotte/sap">https://gitlab.inria.fr/fguiotte/sap</a> dernière visite le 28 juin 2023) implémente ces opérations sur une grille scalaire ou un raster de relief quelconque. Elle autorise l'évaluation d'arbres minimum, maximum et de bassins versants (mintree, maxtree et watershedtree). Les attributs de forme sont issus de la librairie open-source *higra* (<a href="https://higra.readthedocs.io/en/stable/python/tree">https://higra.readthedocs.io/en/stable/python/tree</a> attributes.html)

Les dépressions du MNT ont été identifiées en partant du minimum absolu et en reconstruisant les entités polygonales imbriquées en remontant la topographie. Les dépressions qualifiées de dolines sont les polygones dont l'aire est comprise entre 10 et 1000 m² et dont l'indice de compacité est supérieur à 0.5. La compacité est définie comme le rapport entre l'aire du polygone divisée par le carré du périmètre.

Avec ces deux paramètres, sur le MNT d'altitude minimale à 20 cm/pixel, 535 polygones en dépression ont été segmentés. Ils couvrent une superficie totale de 1 439.6 m² pour une emprise de 43 006 m², soit 3.3% de la bathymétrie mesurée. Les caractéristiques des superficies sont reprises au Tableau 4.

Tableau 4 : Caractéristiques des dépressions fermées identifiées dans la bathymétrie du Loiret dans le bassin des Tacreniers.

Statistique	Dépressions (Mintree)	Dépressions (contours)
Nombre [-]	535	159
Superficie totale [m²]	1439.6	4371.5
Superficie maximum [m]	35.81	458.32
Superficie 75% [m]	2.60	28.75
Superficie moyenne [m]	4.24	27.49
Superficie médiane [m]	3.67	7.82
Superficie 25% [m]	0.72	1.60
Superficie minimum [m]	0.41	0.23

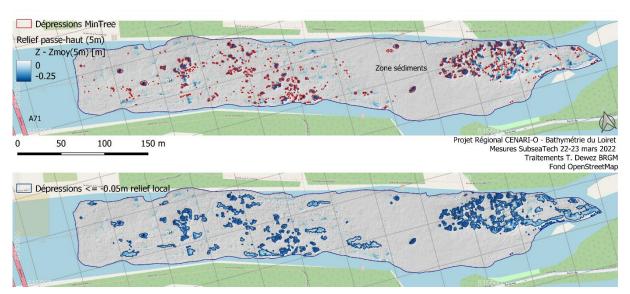


Figure 27 : Carte des dépressions fermées sous le Loiret dans le bassin des Tacreniers. Panneau haut : dépressions segmentées par méthode morphologique de MinTree (10 < aire < 1000 ET compacité > 0.5). Panneau bas : polygone entourant les zones plus déprimées que -0.05m et comprenant l'isoligne -0.25m. Les emprises d'iso-contours sont plus étendues et plus étirées que les emprises issues du MinTree car aucun filtre n'est appliqué à la forme de l'emprise.

#### 4.4.2. Segmentation par contours imbriqués du relief local

On a vu pour l'exploration des données lidar bathymétrique à Jargeau que le relief local évalué comme un filtrage passe-haut du MNT était un bon révélateur visuel des dépressions. En suivant le même esprit que la segmentation par Mintree, on peut tracer les iso-contours du relief local. Les dépressions d'intérêt sous le bassin des Tacreniers semblent être les dépressions de plus de 25 cm de profondeur (Figure 26). L'extension de la zone affectée par la dépression, en revanche, rejoint le contour du polygone délimité par l'isoligne de -5 cm.

Les dépressions candidates ne correspondent pas à tous les polygones entourés par l'isoligne de -5 cm, mais uniquement à ceux qui contiennent en leur sein une isoligne au moins égale à - 25 cm.

Cette technique a été appliquée au MNT 20 cm/pixel filtré passe-haut à 5m (Figure 27). Elle débouche sur l'identification de 159 dépressions d'emprise plus larges que celles du MinTree. Les zones en dépression couvrent une emprise de 4371 m², c'est-à-dire quasiment 10% de la zone d'investigation et 3 fois plus que la superficie des dépressions MinTree.

La superficie de la plus grande dépression est presque 13 fois plus grande que la plus grande dépression du MinTree. La médiane est 6.5 fois plus grande, mais la superficie minimale est moitié plus petite.

La différence essentielle entre les deux types de segmentation est qu'il n'y a pas de critère de sélection sur la forme des iso-contours de relief négatif, contrairement au MinTree. Ce faisant, des polygones de forme plus allongée persistent dans le set d'emprises de dépression par iso-contour.

Une seconde différence réside dans le fait que la méthode MinTree a été appliquée au MNT alors que la segmentation par iso-contours a été appliquée au relief local (MNT filtré passe-haut). Un relief local, ou une pente de longueur d'onde plus longue que le noyau de filtrage de 5 m de diamètre peut affecter les polygones du MinTree.

A l'heure actuelle, on notera que c'est la première fois que l'approche MinTree est appliquée à la détection de dépressions karstiques. Les résultats sont plausibles bien qu'éventuellement un peu minimaliste pour identifier le bord des dépressions. L'approche d'iso-contours imbriqués est, elle, sans doute un peu maximisante. Elle étend les dépressions sur des emprises dont la forme ne ressemble plus guère aux dolines circulaires ou elliptiques.

Dans les deux cas, l'analyse de la bathymétrie ne révèle que des formes possiblement en lien la karstification. Ces formes ne sont pas des preuves qu'il y a échange hydrique entre le réseau karstique et le Loiret, ni n'indiquent qu'elles jouent bel et bien en source subaquatique, plutôt qu'en perte.

On notera enfin que toutes ces dépressions sont recouvertes de végétation aquatique. On peut émettre l'hypothèse que les plantes tirent un bénéfice de se situer au droit des dépressions identifiées. Soit, le lien est simplement fortuit, par exemple parce que nous identifions les dépressions dans la roche et que ces plantes ne peuvent s'ancrer que sur la roche en place et pas les sédiments. Soit, l'apport d'eau souterraine chargée en nutriments favorise le développement des plantes au droit des dépressions émissives.

Pour la notion de flux hydrique, nous avons investigué une troisième solution technologique : l'imagerie thermique.

## 5. Imagerie thermique: chercher une plume chaude dans de l'eau froide

Quand bien même nous sommes arrivés à identifier des dépressions morphologiques dans le lit de la Loire et du Loiret, ces formes ne nous disent rien sur leur fonctionnement hydrologique ni leur relation au karst. Pour identifier les flux d'eau, nous avons eu recours à la technique de l'imagerie infra-rouge thermique, qui a déjà fait ses preuves de longue date (p.ex. Campbell et al. 1996, Davis, 2007). Les situations présentées par Campbell et al. (1996) et Davis (2007) correspondent à des situations de venues d'eau karstique plus chaude que la rivière encaissante.

De notre propre expérience, suite à des travaux sur l'identification de circulation d'eau hypodermique sur l'ancien site minier de Salsigne par thermographie aéroportée par ULM (Guérin et al., rapport ADEME en cours de publication), nous avions constaté que des venues d'eau fraîche dans un sol chauffé au soleil ressortait nettement. La température de l'eau souterraine, à 12-14°C, se manifestait nettement dans le sol chauffé à plus de 30°C, le 21 juin 2018. Nous en avions retenu que pour identifier les venues d'eau, il était préférable de rechercher les situations où la température de l'encaissant se distinguerait de la température des eaux souterraines.

Des tests exploratoire de mesures thermographiques par drone sur l'Eure, réalisés dans le cadre de l'étude de la nappe de la craie entre Perche et Beauce, les 2 et 3 septembre 2021 à la recherche de source subaquatiques (Luc Arnaud, BRGM, comm. pers., 2021) se sont montrés non concluants. (Arnaud et al. Rapport à diffusion différée). La configuration anticipait de trouver des venues d'eau fraîche dans une rivière chaude. Or une rivière joue comme un miroir et reflète localement des portions de ciel ou de soleil. Comme la température apparente du ciel est très froide, de l'ordre de -60°C), les reflets auront une température apparente très fraiche. Rechercher des venues d'eau souterraine fraîche dans une rivière chaude, nécessite de trier des signatures thermiques fraiches dues aux reflets du ciel, des taches fraiches réellement d'origine karstique.

Sur le Loiret, nous avons préféré tester la situation inverse. Par un matin bien frais, la société Drone Expertise Centre est allée imager deux sources bien connues et émissives le jour du levé, au pied du pont Saint Nicolas à Saint-Hilaire-Saint-Mesmin. S'agissant d'un test putatif, nous avons choisi de cibler deux sources avérées plutôt que de tenter un survol par drone du bassin des Tacreniers, sans certitude que l'équilibre hydraulique activerait les zones d'échange en résurgence. Une absence de signal thermique aurait eu deux explications possibles : les sources ne produisent pas de flux thermique suffisant pour être détecté, ou, les conditions hydrauliques au moment du survol font jouer les zones d'échange en perte.

#### 5.1. CONDITIONS DE L'EXPERIENCE

Le 1 mars 2023 à 7h25 du matin, des images thermiques des sources en aval et en amont du pont Saint Nicolas (sur la RD 951, commune de Saint-Hilaire-Saint-Mesmin) ont été captées. Pendant les 48 heures qui ont précédé le relevé, la température de l'air à la station météo MADIS-G0446 d'Olivet, située à quelques kilomètres du site, n'a pas excédé 6°C.

La température effective du Loiret n'est pas connue. Néanmoins, on voit sur les images thermiques FLIR qu'un contraste thermique chaud se produit à l'aval de la pile nord du pont Saint Nicolas, à l'endroit où une source karstique est bien connue. L'amplitude du contraste thermique n'a qu'une valeur indicative. La thermographie indique un contraste de de 3 à 5°C (Figure 28).

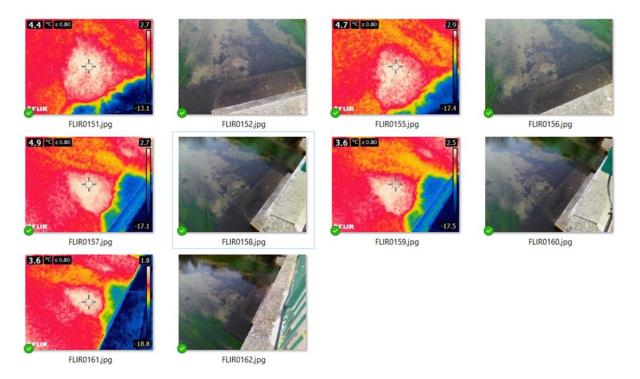


Figure 28 : Images infra-rouge thermique et visible de la source située sous la pile nord, à l'aval du Pont Saint Nicolas sur le Loiret à Saint Hilaire-Saint-Mesmin, le 1 mars 2023 à 7h25 du matin. La plume blanche traduit une zone plus chaude que les couleurs rouges situées autour.

A l'amont du pont Saint Nicolas, sous les piles du milieu du pont, une seconde source, difficile à identifier à l'œil nu se manifeste très clairement dans l'image thermique. Elle forme une étroite trainée plus chaude d'environ 2°C dans le flux du Loiret (Figure 29).

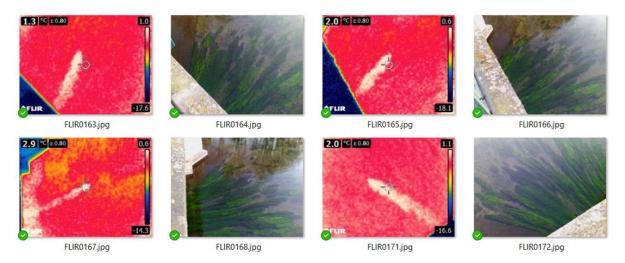


Figure 29 : Images infra-rouge thermique et visible de la source située en amont du Pont Saint Nicolas sur le Loiret à Saint Hilaire-Saint-Mesmin, le 1 mars 2023 à 7h25 du matin. La plume blanche traduit une venue d'eau relativement plus chaude dans le flux du Loiret (rouge).

Cette expérience montre que l'imagerie thermique, éventuellement prise depuis un drone, permet de valider la position de sources karstiques sous une rivière, dans une configuration de plume chaude dans une encaissant froid. Pour qu'on puisse l'appliquer de manière utile sur le Loiret il

faut encore que ces conditions se produisent en situation où la nappe karstique relâche son eau dans le Loiret. L'hiver est la saison la plus favorable pour ces levés thermiques car des conditions anticycloniques peuvent favoriser un temps froid et stable pendant longtemps pour refroidir la rivière au maximum. Mais cette situation n'est pas forcément propice à un contexte à forte pluviométrie antérieure et à une hauteur d'écoulement importante dans la Loire, qui favorise l'expulsion d'eau karstique dans le Loiret.

## 6. Discussion méthodologique

Les trois technologies testées dans le cadre de ce rapport ont été appliquées à trois endroits différents. On peut se demander s'il n'aurait pas été pertinent de les combiner sur le même environnement.

Initialement, ayant eu connaissance du levé lidar topo-bathymétrique sur la Loire dès 2019 de Rodrigues et Boigné (2021), nous prévoyions de commander une acquisition lidar topo-bathymétrique complémentaire sur le Loiret. Ceci visait à interpréter un set de données monométhode à la fois sur la zone des pertes karstiques à Jargeau et sur celle des résurgences à Olivet. Les travaux de Lague et Feldmann (2020) discutant des conditions d'application du lidar topo-bathymétrique, et les discussions directes avec Dimitri Lague, nous ont cependant convaincu qu'une acquisition lidar ne fonctionnerait très probablement pas. La ripisylve est très présente aux abords du Loiret, piégeant une partie des tirs lidar dans la canopée. Ensuite, un biofilm sombre abaisse drastiquement l'albedo du fond du Loiret. Et enfin les grandes superficies d'herbiers aquatiques n'auraient pas permis au signal lidar de pénétrer jusqu'au fond, laissant de larges pans de rivière inexploré.

Dès lors, pourquoi ne pas avoir employé la thermographie et la bathymétrie sur drone radiocommandé sur le secteur de Jargeau ? Il s'agit certes de la zone d'alimentation du karst, mais la thermographie n'aurait pas apporté d'information puisqu'une source n'a pas de signature thermique distincte. Outre les difficultés de mise en œuvre sur la Loire du fait du courant et de la faible lame d'eau, l'information était moins pertinente que de lever la bathymétrie du Loiret où les échanges entre la nappe et la rivière se produisent. De plus la bathymétrie du Loiret est largement inconnue précisément à cause des herbiers qui prolifèrent.

Reste donc à débattre du site pour réaliser la bathymétrie et la thermographie. La bathymétrie par drone flottant fonctionne de manière optimale là où le tirant d'eau est plus important et le courant limité. Donc nous visions d'abord un secteur du Loiret régulé entre les barrages des moulins. Deuxièmement, il existait un doute sur la performance de l'imagerie thermique. L'exercice de recherche d'une anomalie thermique froide dans l'Eure n'ayant rien donné de probant, la recherche d'une anomalie thermique chaude était notre objectif, mais avec une forte incertitude quant à sa réalisation. En effet, les dépressions identifiées dans le bassin des Tacreniers pouvaient jouer en source ou en pertes selon l'équilibre hydraulique entre Loire et nappe karstique au moment du survol. De plus, les herbiers pouvaient diminuer l'anomalie thermique éventuelle en diffusant en favorisant le mélange entre les eaux du Loiret et celle des sources. Enfin, les survols de drone sont réglementés et demandent une mise en œuvre administrative avant de pouvoir décoller.

Devant toutes ces incertitudes, nous avons préféré vérifier d'abord qu'il était possible de détecter une signature thermique de sources relativement chaudes dans un Loiret froid. Nous avons donc ciblé deux sources bien connues, pérennes et observables depuis le pont Saint Nicolas à Saint-Hilaire-Saint-Mesmin. Fort de la démonstration positive de la thermographie sur ces deux sources témoins, nous pouvons maintenant sereinement imaginer de planifier un survol thermographique sur le bassin des Tacreniers.

Pour déployer ce levé thermographique le plus efficacement possible, il serait pertinent d'étalonner, avant l'opération, le sens des flux d'eau au niveau des zones d'échange en fonction du niveau de la Loire. Ainsi le vol se déroulerait dans des conditions de flux sortant de la nappe.

### 7. Conclusions

Le projet CENARI-O a fourni l'environnement utile pour tester trois méthodes de cartographie en rivière : le lidar topo/bathymétrique, la bathymétrie multifaisceaux par drone flottant radiocommandé, et l'imagerie infra-rouge thermique. Ces trois techniques sont complémentaires. Elles apportent une vision de la morphologie du lit de la rivière où les échanges hydriques se produisent entre la nappe et la rivière. Ces zones d'échange se manifestent par des dépressions fermées de dimensions métriques et de profondeur décimétrique à métrique. La couverture spatiale totale du lit de la rivière assure que la connaissance des conditions est complète à un moment donné.

Au niveau des pertes de la Loire entre Jargeau et Sandillon, une quarantaine de dolines possibles ou probables ont été identifiées dans le MNT topo-bathymétrique à 25 cm/pixel produit sur base des points lidar, en un seul passage. C'est quatre fois plus que les pertes connues dans le secteur, compilées au fil des années. La donnée bathymétrique lidar n'est cependant efficace que sous une lame d'eau n'excédant pas 1.80 m et avec un minimum de végétation sur le lit de la rivière.

Dans le Loiret, le levé bathymétrique par drone flottant radiocommandé, a permis de quantifier de manière exhaustive le relief du fond à une résolution 20 cm/pixel. La superficie couverte par la végétation aquatique sus-jacente est de 34% de la superficie levée. Le fond du Loiret qui n'est pas couvert de sédiments présente une morphologie cariée sur une large proportion de l'emprise d'étude (3 à 10% selon la méthode d'estimation). Pour une seule source connue dans la zone explorée, d'une emprise de 33 m², il pourrait en réalité y avoir de l'ordre 1440 à 4370 m² de zones d'échange. A nouveau, la connaissance topographique continue modifie radicalement la vision des zones d'échange entre le Loiret et la nappe karstique.

Enfin, pour ce qui concerne la caractérisation des sources subaquatiques, la stratégie de recherche de zones « chaudes » dans une rivière « froide » s'est révélé payante. Moyennant que les sources soient émissives au moment du levé, l'imagerie thermique par drone offre un moyen rapide de repérer les sources subaquatiques. Il faut noter que la recherche de venues d'eau « froide » dans une rivière « chaude » n'a pas fonctionné par ailleurs dans l'Eure. Ceci provient des nombreux reflets du ciel, où la température apparente est très froide (de l'ordre de -60°C). L'émergence fraiche est impossible à identifier au milieu des très nombreux reflets.

## 8. Références

- **Albéric, P.** 2001. L'inversac (perte-émergence) de la résurgence du Bouillon (source du Loiret, France). *Sciences et techniques de l'environnement*. Mémoire hors-série 13: 1-4.
- **Albéric, P.** 2004. River backflooding into a karst resurgence (Loiret, France). *Journal of Hydrology* 286: 194-202.
- **Albéric, P.** 2008. Les trois pertes-émergences (ou inversacs) du domaine de la Source (Loiret). CFH *Colloque Hydrogéologie et karst au travers des travaux de Michel Lepiller*, 17 mai 2008, Orléans, France.

https://www.cfh-aih.fr/images/DOCS/2-Colloques/Colloque\_2008\_orleans/actesdefinitif.pdf

- Arnaud, L., Badinier, G., Dewandel, B., Devau, N., Lefevre, Y., Boutirame, I., Vacher, A., 2022. Etude de la nappe de la craie entre Perche et Beauce Phase 2 (Rapport final BRGM/RP-72056-FR). BRGM.
- **Billen, R., Zaki, C., Servières, M., Moreau, G., Hallot, P.,** 2012. Developing an ontology of space: Application to 3D city modeling, in: Leduc, T., Moreau, G., Billen, R. (Eds.), Usage, Usability, and Utility of 3D City Models European COST Action TU0801. Presented at the Usage, Usability, and Utility of 3D City Models European COST Action TU0801, EDP Sciences, Nantes, France, p. 02007. <a href="https://doi.org/10.1051/3u3d/201202007">https://doi.org/10.1051/3u3d/201202007</a>
- **Binet, S., Joigneaux, E., Pauwels, H., Albéric, P., Fléhoc, Ch., Bruand, A.** 2017. Water exchange, mixing and transient storage between a saturated karstic conduit and the surrounding aquifer: Groundwater flow modeling and inputs from stable water isotopes. *Journal of Hydrology* **544**: 278-289.
- **Boulton A.J. Findlay S., Marmonier P., Stanley E.H., Valett H.M.,** 1998. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. <u>Annual Review of Ecology and Systematics</u> **29**(1): 59-81.
- **Brodu, N., Lague, D.,** 2012. 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 68, 121–134. <a href="https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006">https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006</a>
- **Campbell, C.W., Latif, M.A.E., Foster, J.W.**, 1996. Application of thermography to karst hydrology. Journal of Cave and Karst Studies 58, 163–167.
- **Cardenas B.,** 2008. Surface water-groundwater interface geomorphology leads to scaling of residence times. Geophysical Research Letters. **35** (8), <a href="https://doi.org/10.1029/2008GL033753">https://doi.org/10.1029/2008GL033753</a>
- **Cartannaz, C., Dewez, T.J.B.,** 2016. Outils de traitement des Modèles Numériques de Terrain (MNT) pour la détection de cuvettes. Rapport final. BRGM/RP-65463-FR, BRGM, .
- **Davis, J.B.**, 2007. Aerial thermography surveys to detect groundwater discharge in the St. Johns river water management district, northeast Florida, in: ASPRS 2007 Annual Conference. Presented at the ASPRS 2007 Annual Conference, Tampa, Florida. **Desprez, N.** 1976. Val d'Orléans, à l'est d'Orléans. Etude hydrogéologique. BRGM/76-SGN-109-BDP, BRGM, http://infoterre.brgm.fr/rapports//76-SGN-109-BDP.pdf.

- Grabenstaetter, L., Bensaadi, K., Cartannaz, C., Dewez, T.J.B., Léval, A., 2022. Caractérisation des aléas affaissement/effondrement et glissement de terrain sur les communes de Niederhaslach et Oberhaslach. BRGM/RP-71382-FR, BRGM. http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-71382-FR.pdf.
- **Guiotte, F., Etaix, G., Lefèvre, S., Corpetti, T.,** 2020. Interactive digital terrain model analysis in attribute space. ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B2-2020, 1203–1209. <a href="https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1203-2020">https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1203-2020</a>
- **Guiotte, F., Lefèvre, S., Corpetti, T.,** 2019a. Voxel-based attribute profiles on lidar data for land cover mapping, in: IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Yokohama, Japan.
- **Guiotte, F., Lefèvre, S., Corpetti, T.,** 2019b. Attribute Filtering of Urban Point Clouds Using Max-Tree on Voxel Data, in: Mathematical Morphology and Its Applications to Signal and Image Processing. pp. 391–402. <a href="https://doi.org/10.1007/978-3-030-20867-7\_30">https://doi.org/10.1007/978-3-030-20867-7\_30</a>
- **Lague, D., Feldmann, B.,** 2020. Topo-bathymetric airborne LiDAR for fluvial-geomorphology analysis, in: Developments in Earth Surface Processes. Elsevier, pp. 25–54. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00002-3
- Lalot, E., Curie, F., Wawrzyniak, V., Baratelli, F., Schomburgk, S., Flipo, N., Piegay, H., Moatar, F., 2015. "Quantification of the contribution of the Beauce groundwater aquifer to the discharge of the Loire River using thermal infrared satellite imaging." <u>Hydrol. Earth Syst. Sci.</u> 19(11): 4479-4492.
- Le Borgne, F., Treuil, M., Joron, J.L., Lepiller, M. 2006. Bilan des impacts hydrogéochimiques naturels et anthropiques à l'intérieur du réseau karstique du Val d'Orléans établi à l'aide des éléments majeurs : Confirmation et tentative de quantification du modèle de « confinement dynamique ». Bulletin de la Société Géologique de France 177: 37-50.
- **Lepiller**, **M.** 2006. Val d'Orléans. Aquifères et Eaux souterraines en France. J. C. Roux. BRGM: p.200-214.
- Letard, M., Lague, D., Le Guennec, A., Lefevre, S., Feldmann, B., Leroy, P., Girardeau-Montaut, D., Corpetti, T., 2023. 3DMASC: accessible, explainable 3D point clouds classification. Application to bi-spectral topo-bathymetric LiDAR data. (other). oral. <a href="https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-7115">https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-7115</a>
- Perrin, J., Noury, G., Cartannaz, C., Pinson, S., Dewez, T.J.B., Gutierrez, T., 2014. ALEA-Karst: vers une approche multicritère de l'aléa lié à la présence de cavités karstiques en contexte calcaire. Rapport final Volume 1: trame méthodologique Volume 2: étude de sites. BRGM/RP-63771-FR, BRGM, http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-63771-FR.pdf.
- Rodrigues, S., Boigné, A., 2021. Lidar topo-bathymétrique de la Loire, Université de Tours ARD Intelligence des Patrimoines (Phase 2) UMR CNRS 7324 CITERES (c) tous droits réservés.

## Annexe 1 SUBSEA TECH – Rapport d'intervention

<u>Acquisitions Topo Bathymétriques sur le Loiret Réf : ST-RIE-2204- BRGM – TopoBathymetrie Loire</u>



#### RAPPORT D'INTERVENTION

### **Acquisitions Topo Bathymétriques sur le Loiret**

Réf : ST-RIE-2204- BRGM - TopoBathymetrie Loiret

N° intervention: 2204 Client: BRGM Date: 04/04/2022



Subsea Tech 167 Plage de l'Estaque, 13016 Marseille - France Tél : +33 (0)4 91 51 76 71 SAS au capital de 60 000 Euros – SIREN : 485 282 370 R.C.S. Marseille – Code APE 7112B



**Version: A** 

Date: 04/04/22

Page 2 sur 29

,	Version	Réd	igé pa	ar:		Vérifié par :	Appr	ouvé	par :	1
	Nom:	B.D	UBEGI	NY		D.CHARDARD	Y. C	HARD	ARD	
	Visa:	(C	BDU			DCH		YCH		
	Date :	04	/04/2	2		05/04/22	05/04/22  Statut nentaires obation ution			
			CLAS	SIFIC	ATIO	N DOCUMENT				
	Confid	lentialit	<u>é</u>				<u>Statut</u>			
	Non confid	dentiel			☐ Pour commentaires					
	Confident	iel Indu:	strie			Pour approx				
	Confident	iel Défei	nse			Pour exécu	ıtion			
				DIS	RIB	UTION				
	Intern	e				Exter	ne			
No	Nom	Α	I	F	No	Nom		Α	I	F
	Y.CHARDAR	D	Х			C.AUTERIVES			Х	
	D.CHARDAR	D	X		l	T. DEWEZ			х	
	<b>B.DUBEGNY</b>			X						
No =	Nombre A	= Action	I	= Info	rmati	on F = Classeme	ent			
				R	EVIS	ION				
Versi	on Date	Objet								
Α	04/04/22	Création	า							



Version: A

Date: 04/04/22

Page 3 sur 29

#### **TABLE DES MATIERES**

DI	ESCRI	PTION DE LA MISSION	. 4
	1.1	CLIENT	. 4
	1.2	OBJECTIFS	. 4
	1.3	DUREE	. 4
	1.4	INTERVENANTS	. 4
	1.5	LOCALISATION	. 5
	1.6	Materiel utilise	
	1.7	CAMERA ACOUSTIQUE 2D BLUEPRINT OCULUS 750D	. 7
	1.8	LIDAR VELODYNE PUCK	. 7
2.	DE	ROULEMENT DE LA MISSION	. 8
	2.1	PLANNING	
	2.2	CONDITIONS D'INTERVENTION	. 8
3.	RE	SULTATS DE L'INTERVENTION	10
	3.1	METADONNEES	10
	3.2	Bathymetrie	10
	3.3	TEST DE DETECTION	13
	3.4	Mesures Physico-Chimiques	14
	3.5	IMAGERIE ACOUSTIQUE	14
	3.6	TOPOGRAPHIE	16
4.	CO	NCLUSION	17
5.	TA	BLE DES REFERENCES	18
6.	AN	NEXES	20
	6.1	Drone de surface CAT-Digues	20
	6.2	SONAR DE BATHYMETRIE SEABED NORBIT WBMS	22
	6.3	CAMERA ACOUSTIQUE OCULUS M750D	26
	6.4	LTDAR PUCK-16	28



Version: A

Date: 04/04/22

Page 4 sur 29

#### **DESCRIPTION DE LA MISSION**

#### 1.1 Client

Société: BRGM

Adresse: 3 Avenue Claude Guillemin, 45060 ORLEANS

Contact: Chrystelle Auterives
Tel: +33 (0)2 38 64 34 34
Mail: C.Auterives@brgm.fr

#### 1.2 Objectifs

L'objectif de la mission est la réalisation d'une campagne d'acquisition de données bathymétriques du lit de la rivière, topographiques des rives et des caractéristiques physico-chimiques de la colonne d'eau. Les levés morphologiques du fond et des rives ont pour but de localiser des venues d'eau dans leur contexte 3D.

Le présent document est le rapport de la mission. Il est accompagné des plans 2D (cartes bathymétriques) et des fichiers 3D (.xyz) des relevés.

#### 1.3 Durée

2 jours, du mercredi 22/03/2022 au jeudi 23/03/2022

#### 1.4 Intervenants

Nom	Fonction	Société	
Thomas DEWEZ	Chargé d'étude	BRGM	
Bastien DUBEGNY	Ingénieur Hydrographe	Subsea Tech	
Damien CHARDARD	Chargé de Travaux	Subsea Tech	



**Version: A** 

Date: 04/04/22

Page 5 sur 29

#### 1.5 Localisation

Le secteur de rivière couvert pour les acquisitions se situe dans la commune d'Olivet et correspond au Bassin des Tacreniers.



Figure 1 : carte du bassin des Tacreniers

#### 1.6 Matériel utilisé

#### 1.6.1 Drone de surface CATAROB

Drone de surface Catarob de type catamaran, pilotable en mode téléopéré ou autonome. Léger (50kg), il est le porteur idéal pour toute investigation aquatique et subaquatique en eaux peu profondes. Grâce à son architecture ouverte et à sa communication haut débit « PC à PC », les possibilités d'intégration de capteurs sont quasiment illimitées. La station de pilotage à terre permet la visualisation et le contrôle en temps réel de la navigation et de toutes les fonctions des capteurs embarqués.



Figure 2 : photo du drone de surface Catarob



Version : A

Date: 04/04/22

Page 6 sur 29

#### 1.6.2 Sondeur multifaisceaux NORBIT

Sondeur multifaisceaux Norbit haute résolution très compact WBMS de NORBIT conçu spécifiquement pour une utilisation sur les plates-formes de petite taille type USV. La technologie du sonar multifaisceaux NORBIT permet la collecte de données sur une large bande (ouverture jusqu'à 150°) en temps réel, à longue portée (jusqu'à 275 m) et en très haute résolution (Distance :<10 mm; Angle : 0.9°).



Figure 3 : système multifaisceaux Norbit WBMS.

Le sondeur multifaisceaux est couplé à une sonde de bathycélérité et à une centrale d'attitude NovAtel STIM-300 permettant de corriger les mouvements du catamaran en cap, tangage, roulis et pilonnement. L'ensemble du système a un positionnement centimétrique type RTK grâce à une correction GPS de référence envoyée par le réseau de géolocalisation en ligne TERIA. La centrale d'attitude et le récepteur GPS ont les précisions de mesure suivantes : position 0.01m (1cm), tangage 0.02°, roulis 0.02° et cap 0.07°



Figure 4 : sonar multifaisceaux, sonde de célérité et centrale d'attitude montées sous le drone.



**Version: A** 

Date: 04/04/22

Page 7 sur 29

#### 1.7 Caméra acoustique 2D Blueprint Oculus 750d

Sonars multifaisceaux conçus pour couvrir un large panel d'applications. Leur encombrement réduit en font le produit idéal pour l'intégration sur les porteurs légers tels que les Mini-ROV, AUV, USV et gliders, tandis que leurs conceptions durcies en font aussi un excellent choix pour les ROV de classe inspection et construction. Ils peuvent être utilisés aussi à poste fixe.



#### 1.8 Lidar Velodyne Puck

Le modèle VLP-16 « PUCK » de Velodyne est un lidar multifaisceaux compact avec une portée de 100 m. Il génère jusqu'à 300 000 points/seconde sur 360° et 30° en vertical grâce à ses 16 faisceaux et sa vitesse de rotation ajustable de 5 à 20 Hz. Il ne consomme que 8 W et son poids de 830g seulement en font un capteur bien adapté pour embarquer sur les drones aquatiques de petite taille.





Version: A

Date: 04/04/22

Page 8 sur 29

#### 2. DEROULEMENT DE LA MISSION

#### 2.1 Planning

Date	Heure	Commentaires				
	08h30	Arrivée sur site				
2	08h45 Installation du poste du pilotage et préparation du drone					
202	10h15	Mise à l'eau du drone				
/60,	10h30	Début des acquisitions pour test des capteurs				
23/	11h00	Vérification de la qualité des données				
redi	10h15 Mise à l'eau du drone 10h30 Début des acquisitions pour test des capteurs 11h00 Vérification de la qualité des données 11h15 Début des acquisitions 14h00 Test de détection sur plaques					
erci	14h00	Test de détection sur plaques				
Σ	16h00	Reprise de la bathymétrie				
	18h00	Repli du matériel				
022	8h30	Arrivée sur site – installation du poste de pilotage et préparation du drone				
Jeudi 24/03/2022	9h30	Mise à l'eau du drone, test du système de mesure CT				
4/0	10h00	Début des acquisitions CT				
di 2	12h00	Fin des acquisitions CT, reprise de la bathymétrie				
Jeni	17h30	Repli matériel, fin de mission				

#### 2.2 Conditions d'intervention

#### 2.2.1 Alimentation électrique

L'alimentation électrique du matériel d'acquisitions et de communication était fournie par une batterie 12V, elle-même alimentée par le fourgon, et un convertisseur 12VDC/220VAC. Le drone de surface était quant à lui alimenté par deux jeux de deux batteries rechargées quotidiennement.



**Version: A** 

Date: 04/04/22

Page 9 sur 29

#### 2.2.2 Déploiement

Le poste de pilotage était installé à bord du fourgon régie. Cette station de pilotage à terre permet la visualisation et le contrôle en temps réel de la navigation et de toutes les fonctions des capteurs embarqués.



Figure 5 : poste de pilotage dans le fourgon





Version: A

Date: 04/04/22

Page 10 sur 29

#### 3. RESULTATS DE L'INTERVENTION

#### 3.1 Métadonnées

**Le système géodésique** utilisé pour le levé bathymétrique est le WGS84, le système de projection associé est le Lambert93 EPSG :2154. Le système altimétrique utilisé est le système NGF – IGN69.

Les données provenant des différents capteurs (sonar, centrale d'attitude, GPS, RTK), ont été compilées par le logiciel hydrographique QINSy afin d'obtenir les données dans un format GRD (grille) et un format QINSy QPD.

Les données QPD ont été traitées avec le module Processing Manager de QINSy. Le traitement consistait à vérifier la superposition des couches de données, supprimer les points isolés et/ou aberrants, créer une grille, légender la grille pour obtenir une carte bathymétrique 2D sous forme de gradient de couleur avec des points de sonde. Les « grilles » traitées ont ensuite été exportées sous forme de nuage points (fournis avec ce rapport au format.LAS) pour être visualisées en 3D avec le logiciel CloudCompare et représentées dans le rapport.

#### 3.2 Bathymétrie

Le rendu 2D ci-dessous sous forme de gradient de couleur (échelle en mètres) permet une observation de l'altimétrie rencontrées sur la zone d'acquisition.



Figure 6 : carte bathymétrique du bassin des Tacreniers



**Version: A** 

Date: 04/04/22

Page 11 sur 29

La totalité de la zone a été couverte en 245 passes pour la bathymétrie avec un recouvrement de 25 à 50% entre chaque passe pour permettre d'avoir une densité de sonde élevée ainsi que pour faciliter la validation des données.

Les cotes altimétriques observées dans la zone inspectée varient de 85 mNGF à plus de 89mNGF (pour les algues qui atteignent la surface).

Note: La bathymétrie apparaît incomplète au niveau des zones ou la densité d'algues est trop importante car celles – ci empêchent la pénétration des faisceaux acoustiques dans la colonne d'eau.

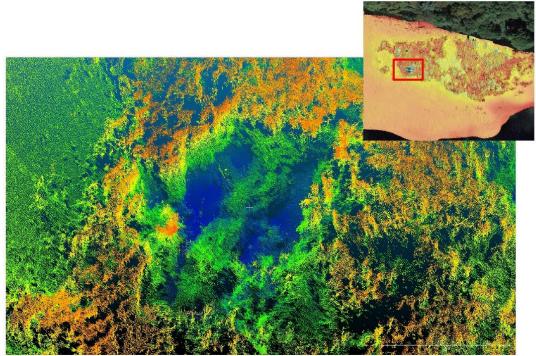


Figure 7 : visualisation 3D d'une source détecté

Un exemple ci-dessus de la visualisation 3D de la source la plus profonde détecté à l'aide du sonar multifaisceaux.



Version: A

Date: 04/04/22

Page 12 sur 29

Les données bathymétriques sont également livrées avec deux transverses qui permettent de vérifier la qualité du positionnement lors de la campagne de mesure. Le MNS est disponible au format .tif accompagné d'un raster d'ombrage et d'imagerie (intensité des faisceaux retours).

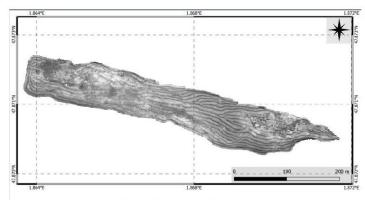


Figure 9 : raster d'imagerie

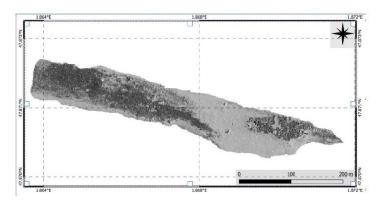


Figure 8 : raster d'ombrage (azimuth : 270°, inclinaison 45°, exagération altitude x3)



**Version: A** 

Date: 04/04/22

Page 13 sur 29

#### 3.3 Test de détection

Un test de capacité de détection du sonar multifaisceaux a été réalisé à l'aide de plaques d'aluminium.



Figure 10 : plaque d'aluminium a détecter

Cependant la réflectivité trop importante de l'aluminium combiné à une profondeur faible (~env 2m) sont deux paramètres qui combinés détériorent les qualités de détection du sondeur multifaisceaux.

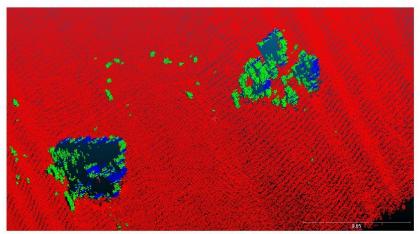


Figure 11 : nuage de point de la détection des plaques d'aluminium

Le rendu en nuage de point permet de se rendre compte de la difficulté du sonar multifaisceaux à détecter correctement les plaques. Il y a une majeure partie de la plaque qui n'est pas détecté dû à la réflectivité trop importante de l'aluminium.



**Version: A** 

Date: 04/04/22

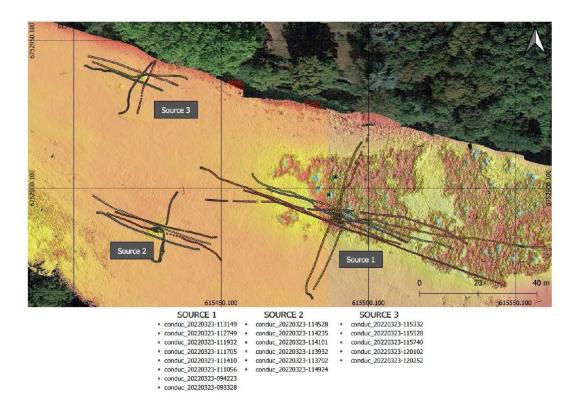
Page 14 sur 29

#### 3.4 Mesures Physico-Chimiques

Les mesures de température et de conductivité ont été relevées à l'aide d'un conductimètre de laboratoire équipé d'une sonde de mesure de température. Un data logger permet d'enregistrer à distance les données sur l'ordinateur du drone en intégrant les informations du système de positionnement.

Les mesures ont été réalisées sur 3 sources découvertes à partir de la bathymétrie.

Les fichiers comprenant les valeurs de température, de conductivité et de positionnement sont fournis au format .csv



#### 3.5 Imagerie acoustique

En parallèle des mesures physico-chimiques, des acquisitions à la caméra acoustique ont été réalisées au niveau des trois sources. La caméra a été installée de tel manière que l'image observée est une coupe verticale de la source dans le sens transversal de l'avancer du drone.



**Version: A** 

Date: 04/04/22

Page 15 sur 29

Ces images permettent d'avoir une idée de la profondeur ainsi que de la géométrie des sources.

Les vidéos acoustiques sont fournies au format .avi pour une lecture simple, mais également au format brut (lisible à l'aide du logiciel oculus viewpoint V1 téléchargeable gratuitement. Ce logiciel permet de faire des mesures précises à l'aide d'outils intégrés et de changer les échelles de couleurs et permet d'accéder aux informations tel que l'heure, fréquence d'acquisition)

Ci-dessous le résultat obtenu lors du passage au-dessus de la source 1.

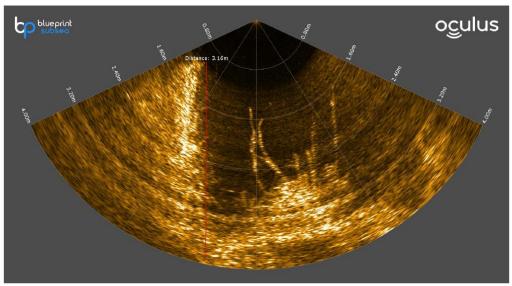


Figure 12 : imagerie acoustique au niveau de la source 1

La géométrie observée est la même qu'un transect extrait de la bathymétrie au niveau de la source :

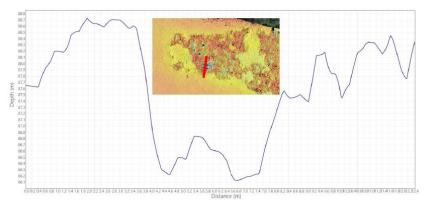


Figure 13 : Transect au niveau de la source 1



Version : A

Date: 04/04/22

Page 16 sur 29

#### 3.6 Topographie

Les relevés Lidar permettent d'avoir une reconstruction du terrain en air au niveau du bassin des Tacreniers.

Les acquisitions ont été réalisées pour chaque bord de rive de l'amont vers l'aval puis de l'aval vers l'amont pour avoir un recouvrement total permettant de valider l'exactitude des données.

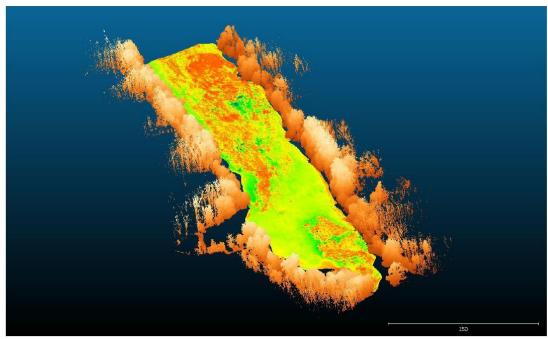


Figure 14 : visualisation 3D des relevés LiDAR + bathymétriques



**Version: A** 

Date: 04/04/22

Page 17 sur 29

#### 4. CONCLUSION

Les deux journées d'acquisitions ont permis de couvrir la zone du bassin des Tacreniers malgré la configuration complexe du site.

La densité d'algues rend difficile les acquisitions bathymétriques puisque les faisceaux acoustiques n'atteignent pas le fond.

La densité d'arbres en bord de rive agit comme un masque pour la réception satellitaire ce qui détériore la qualité du positionnement.

Mais malgré ces paramètres, après traitement, la bathymétrie et le relevé lidar permet de produire une représentation détaillée de la morphologie du site, mettant en évidence la présence de plusieurs sources.



Version : A

Date : 04/04/22

Page 18 sur 29

#### 5. TABLE DES REFERENCES

CAPTEUR	FICHIER	DESCRIPTION
	20220330_Nuage3D_echo_bateau_2500ptsm2_FR45232_Olivet_BRGM_2154_v01.las	Nuage de point bathymétrie
	20220330_MNSBathy_echo_bateau_10cmpix_FR45232_Olivet_BRGM_2154_v01.tif	MNS bathymétrie
	20220330_Ombrageecho_bateau_10cmpix_FR45232_Olivet_BRGM_2154_v01.tif	Raster ombrage bathymétrie
	20220330_Imagerie_echo_bateau_20cmpix_FR45232_Olivet_BRGM_2154_v01.tif	Raster imagerie
Sondeur multifaisceaux	20220330_crossline1_echo_bateau_2500ptsm2_FR45232_Olivet_BRGM_2154_v01.las	Nuage de point transverse vérification qualité
	20220330_crossline2_echo_bateau_2500ptsm2_FR45232_Olivet_BRGM_2154_v01.las	Nuage de point transverse vérification qualité
	20220330_plate1_echo_bateau_2500ptsm2_FR45232_Olivet_BRGM_2154_v01.las	Nuage de point test 1 détection plaques
	20220330_plate2_echo_bateau_2500ptsm2_FR45232_Olivet_BRGM_2154_v01.las	Nuage de point test 2 détection plaques
Lidar	20220330_Nuage3D_lidar_bateau_400ptsm2_FR45232_Olivet_BRGM_2154_v01.las	Nuage de point topographie
	Oculus_20220331_145059.avi	Vidéo acoustique source 1
Oculus	Oculus_20220331_150510.avi	Vidéo acoustique source 2
	Oculus_20220331_151010.avi	Vidéo acoustique source 3
	conduc_20220323-093328.csv	
Sonde	conduc_20220323-094223.csv	Mesure sur source 1
onductivité/température	conduc_20220323-111056.csv	iviesure sur source 1
	conduc_20220323-111410.csv	

Ce document est la propriété de Subsea tech. Il ne peut être ni copié, ni diffusé sans l'autorisation écrite de Subsea Tech. This document is the property of Subsea Tech and cannot be copied nor dispatched without the written permission of Subsea Tech.



### Topo-Bathymétrie du bassin des Tacreniers

Version : A

Date : 04/04/22

Page 19 sur 29

conduc_20220323-111705.csv	
conduc_20220323-111932.csv	
conduc_20220323-112749.csv	
conduc_20220323-113149.csv	
conduc_20220323-113702.csv	
conduc_20220323-113932.csv	
conduc_20220323-114101.csv	Mesure sur source 2
conduc_20220323-114235.csv	Mesure sur source 2
conduc_20220323-114528.csv	
conduc_20220323-114924.csv	
conduc_20220323-115332.csv	
conduc_20220323-115528.csv	
conduc_20220323-115740.csv	Mesure sur source 3
conduc_20220323-120102.csv	
conduc 20220323-120252.csv	



**Version: A** 

Date: 04/04/22

Page 20 sur 29

#### 6. ANNEXES

#### 6.1 Drone de surface CAT-Digues



Le Drone CATA - Digues est un drone de surface de type catamaran, télé-opéré et/ou autonome. Équipé d'un sonar de bathymétrie multifaisceaux et d'un capteur LIDAR, ce système est capable de fournir une reconstruction 3D d'un ouvrage, comme une digue ou un quai, tant pour sa partie immergée que pour sa partie émergée. Ses petites dimensions font de CATA-Digues un outil parfaitement adapté pour les eaux intérieures et les zones portuaires.

Les acquisitions réalisées à l'aide de CATA-Digues peuvent être comparées afin de suivre l'évolution des ouvrages ou de l'environnement dans le temps.





#### RECONSTRUCTION 3D

réalise des modélisations successives d'un ouvrage pour une identification précoce et un suivi des éventuelles dégradations



#### BATTERIES

cumulateurs Li-Ion embarqués dans les coques



#### NAVIGATION

CATA-Digues est équipé d'une caméra couleur HD, de 2 moteurs hors-bord, d'une communication WiFi haut-débit offrant une portée supérieure à 1km et d'un mode de navigation automatique



Version: A

Date: 04/04/22

Page 21 sur 29

### **SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES**

GÉNÉRAL		PROPULSION ET	ENERGIE
Contrôle	Commande à distance par WiFi 5GHz (liaison radio 2,4GHz en secours)	Propulseurs	2 moteurs (2x8kg / 12
Dimensions	L 1,8m x l 1m x H 1,2m (hors antenne)	Batteries	Accumulat
Poids	55kg, possibilité d'ajouter 10kg de charge utile supplémentaire		mie, affich facilement
Vitesse	4 nœuds	Alimentation	AC 110-22 batteries
Tirant d'eau	12cm, 17cm avec 10kg de charge utile		
Hauteur de vague max.	0,3m	Transport	NT Caisse de t
Tenue au courant	>1m/s		x 1 60 cm x
CAPTEURS EMBA	AROUÉS	MAINTENANCE E	T GARANT
Sonar de bathyme- trie multifaisceaux	Seabed Norbit WBMS	Documentation	Manuel opé numérique
Scanner 3D LiDAR	Norbit iLiDAR ou VLP-16 «PUCK»	Maintenance	Pas de main
DGPS	Hemisphere A101	Garantie	1 an pièces de transpor
CONTRÔLE DU S	YSTÈME	OPTIONS	
Pilotage	PC portable + boîtier joystick + modes de navigation automatiques	Bathymetrie mono- faisceau	Sondeur Air portée 0,5-
Communication	WiFi haut débit 5GHz avec portée > 1km, lien radio 2.4GHz	Sonar latéral	Starfish 450
Navigation	Caméra couleur HD, DGPS (RTK en option)	Sonar d'imagerie	Teledyne BluePrint O
Affichage capteurs	Affichage images vidéo/sonar/lidar	Courantometrie	ADCP Sonte
Amenage capteurs	sur PC de pilotage	Batteries	Pack batter
Affichage position	Affichage position et trajectoire sur tout type de carte	Couleur des	Jaune en st
Electronique em-	PC104 + alim 5V/12V/24V, dans valise	coques	demande
barquee	étanche IP67	Contrat support	Contrat and mises à jou
Interface données	Série, USB, Ethernet, autres sur demande	Autres capteurs	Sur demand
Navigation automatique	Logiciel de navigation automatique (trajectoires pré-programmées, etc.)	Addes capteurs	ou ucitali

PHOPOLSION	ET ENEROIE
Propulseurs	2 moteurs hors-bord électriques (2x8kg / 12 VDC @ 2x120W)
Batteries	Accumulateurs Li-Ion, 4h d'autono- mie, affichage charge sur PC pilotage, facilement interchangeables
Alimentation	AC 110-220V pour recharger les batteries
CONDITIONNE	MENT
Transport	Caisse de transport unique (L 195 cm x l 60 cm x H 55 cm) ou sur palette

### IAINTENANCE ET GARANTIE

Documentation	Manuel opérateur en version papier et numérique
Maintenance	Pas de maintenance spécifique requise
Garantie	1 an pièces et main d'œuvre hors frais de transport
OPTIONS	
Bathymetrie mono- faisceau	Sondeur Airmar Smart SS510, 235kHz, portée 0,5-100m, résolution 3cm
Sonar lateral	Starfish 450kHz/990kHz
Sonar d'imagerie	Teledyne BlueView Série M ou BluePrint Oculus
Courantometrie	ADCP Sontek, Flowquest ou Teledyne RD
Batteries	Pack batteries additionnel pour augmenter l'autonomie
Couleur des	Jaune en standard, autres couleurs sur demande





Contrat annuel de maintenance avec

mises à jour gratuites





**Version: A** 

Date: 04/04/22

Page 22 sur 29

#### 6.2 Sonar de bathymétrie SEABED Norbit WBMS



Seabed is introducing the first lightweight multibeam set in the world that can be transported as check-in luggage with any airline with no extra charge. The SPLMS is ideal for projects where rapid mobilization is required and where logistical challenges are taken into account due to the simple deployment.

#### Set components

#### Norbit WBMS Sona

The ultra-compact wideband sonar has low power consumption. The new technology allows long range real time data collection whilst simultaneously achieving very high range resolution. The Sonar has an integrated SV sensor.

#### Seabed SGR6-D Sx GNSS receiver

From standalone metre-level to RTK centimetre level positioning, the SGR6 is flexible to meet your positioning needs. With 240 channels and comprehensive support for all current and planned GNSS signals, the SGR6 is field upgradeable to eliminate the need for future hardware changes.

#### • SBD-IMU-SX

synchronous Position, attitude and navigation (SPAN) technology brings together two different but complementary technologies: Global Navigation Satellite System (GNSS) positioning and inertial navigation. The absolute accuracy of GNSS positioning and the stability of inertial measurement unit (IMU) gyro and accelerometer measurements are tightly coupled to provide an exceptional 3D navigation solution that is stable and continuously available, even through periods when satellite signals are blocked.





#### AML Base-X Sound velocity profiler

This rugged shallow water logging instrument is designed for profiling in coastal waters. High speed 25Hz sampling ensures excellent data resolution

#### • QINSy hydrographic Survey Software

This is an integrated navigation system software package used extensively worldwide for acquiring and processing multibeam data. A template has been prepared for the usage of above mentioned equipment

• Ruggedized Rimowa transport case

#### Set benefits

- Transportable as check in luggage by any airline with no extra charge
- · Fully integrated and ready to use
- Rapidly deployable at any vessel
- Simple Ethernet Interface
- Low power consumption. The set may be operated for a full day on a single car battery



**Version: A** 

Date: 04/04/22

Page 23 sur 29





Version: A

Date: 04/04/22

Page 24 sur 29



#### WIDEBAND MULTIBEAM SONAR

For High Resolution Bathymetry

Introducing the all-new, extremely compact and highresolution multibeam sonar from NORBIT.

The WBMS-series are ultra compact sonars designed specifically for use on even very small platforms. With low power consumption, the system may be operated for a full day on a single battery. NORBIT's wideband multibeam technology allows long range real-time data collection, whilst simultaneously achieving very-high range resolution.

The WBMS-series are based on a flexible sonar platform that utilizes the latest in analog and digital signal processing. Combined with broad R&D expertise, NORBIT may adapt the hardware technology to allow for new applications that benefit from the advantages offered by a compact wideband multibeam sonar.



#### Features

- ✓ Millimeter Range Resolution
- ✓ FM & CW Transmissions
- ✓ 78kHz Broadband
- ✓ Flexible Power Source (12-30 VDC, 90-250 VAC)
   ✓ Simple Ethernet interface
   ✓ Ultra-Compact Single unit

- ✓ Integrated Sound Speed Probe
- ✓ Integrated Attitude Sensor & **GPS Option**

#### **Applications**

- ✓ Shallow Water Bathymetry
- ✓ Exceeds IHO Special Order
- ✓ Exceeds USACE Class 1 & LINZ Special Order
- ✓ Pipeline Surveys
- ✓ Pond Surveys
- √ Harbor Surveys
- ✓ USV, UUV, AUV & ROV Surveys
- ✓ MCM & Littoral Combat Zone Surveys

#### **Options**

- ✓ Up to 150° coverage angle
- √ 4000m depth rating
- ✓ Mounting Bracket
- ✓ Motion Sensor
- √ Data Acquisition Software
- √ On-Site Senior Hydrographer
- √ Turn-Key Survey Platform
- ✓ Laptop
- √ AUV version

NORBIT. Sensors instrumentation, telemetry and communications solutions for harsh environments. NORBIT develops and delivers innovative products - allowing you to explore more

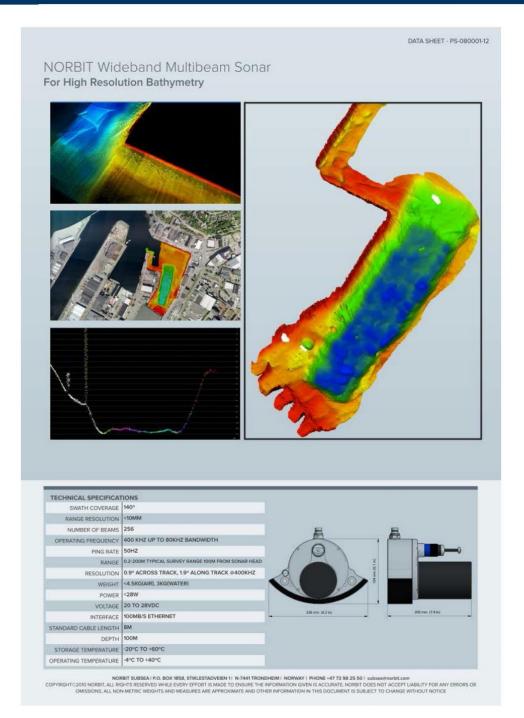
www.norbit.com



Version : A

Date: 04/04/22

Page 25 sur 29





**Version: A** 

Date: 04/04/22

Page 26 sur 29

#### 6.3 Caméra acoustique OCULUS M750d



l'intégration sur les porteurs légers tels que les Mini-ROV, AUV et gliders, tandis que leur conception durcie en font aussi un excellent choix pour les ROV de classe inspection et construction. Ils peuvent être utilisés aussi



IMAGE COPYRIGHT BLUEPRINT

#### Grâce à une architecture plug-and-play et l'interface intuitive ciel Oculus ViewPoint, les sonars Oculus constituent une



#### INTÉGRATION

Opérable par plongeur, par ROV ou en poste fixe, jusqu'à une profondeur de 4000m, c'est un équipement compact et facile à intégrer, avec des interfaces simples.

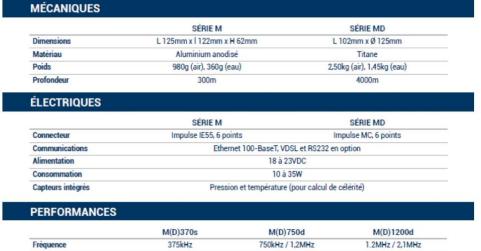


Version: A

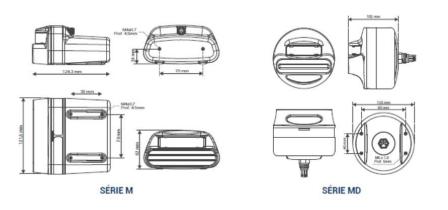
Date: 04/04/22

**Page** 27 **sur** 29

### SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES



	M(D)370s	M(D)750d	M(D)1200d
Fréquence	375kHz	750kHz / 1,2MHz	1.2MHz / 2,1MHz
Portee max.	200m	120m / 40m	30m / 10m
Resolution	8mm	4mm / 2,5mm	2,5mm / 2,5mm
Ouverture horizontale	130°	130° / 70°	130° / 60°
Nombre de faisceaux	256	512	512
Résolution angulaire	2°	1° / 0,6°	0,6° / 0,4°





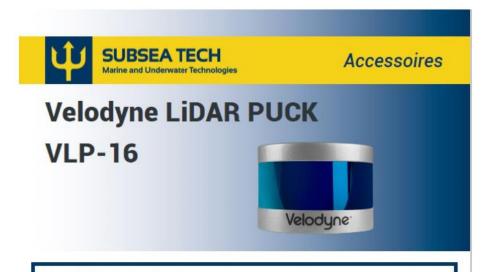


**Version: A** 

Date: 04/04/22

Page 28 sur 29

#### 6.4 LiDAR PUCK-16



#### Le VLP-16 de Velodyne est le LIDAR le plus petit, le plus récent et le plus avancé de la gamme de produits Velodyne LIDAR 3D.

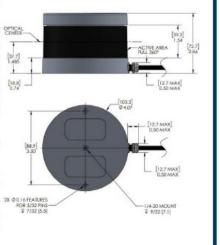
Avec une portée de 100 m, il réalise des scans 3D

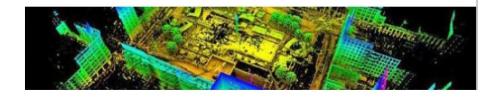
à 360° en temps réel. De faible puissance (~ 8W) et
d'un encombrement réduit (Ø103mm x 72mm pour
830 grammes), il est idéal pour les applications
de robotique de véhicules autonomes, pour les
applications industrielles nécessitant une détection
3D et les applications de levés mobiles hautes
densités en dynamique, et notamment pour les
drones.

Ce LiDAR prend en charge 16 canaux (~ 300.000 points / s) avec un rayon d'ouverture de 30°.

Tous ces capteurs intègrent la technologie Double-Echo, permettant notamment de traverser le couvert végétal.

Ce « Puck » n'a pas de pièces rotatives visibles, ce qui le rend très résistant dans des environnements difficiles (IP67).







**Version: A** 

Date: 04/04/22

**Page** 29 **sur** 29

### SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES

CAPTEUR	16 canaux		
	Distance max: 100m		
	Précision: +/- 3 cm		
	Double retour		
	Champs de vue (vertical): 30° (+15° to -15°)		
	Resolution angulaire (vertical): 2°		
	Champs de vue (horizontal/azimuth): 360°		
	Resolution angulaire (horizontal/azimuth): 0.1° - 0.4°		
	Fréquence de rotation: 5 - 20 Hz		
	Plus de 300 000 points/sec		
	Serveur Web intégré pour le contrôle et la configuration		
LASER	Classe 1 - eye safe		
	Longueur d'ondes: 903 nm		
ELECTRONIQUE/ MÉCANIQUE	Consommation: 8 W		
	Voltage: 9 - 32 VDC (avec boîtier d'interface et alimentation régulée)		
	Poids: 830 grams (sans cablage)		
	Dimensions: 103 mm (diamètre) x 72 mm (hauteur)		
	Vibration: 5 Hz à 2000 Hz, 3G rms		
	Protection environnementale: IP67		
	Température opérationnel: -10° to +60° C		
	Température d'entreposage: - 40° to +105° C		
SORTIE	Connection Ethernet 100 Mbps		
	Protocole UDP contenant:		
	- distances		
	- réflectivités étalonnées - angles de rotation		
	- horodatages synchronisés (résolution µs)		
	Phrases NMEA depuis le récepteur GPS (GPS non inclus)		



Projet CENARI-O Morphologie karstique en rivière des pertes dans la Loire à Jargeau aux résurgences du Loiret (45)





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 ou UTAM

Adresse Tél.:

www.brgm.fr