



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Reconnaissance par la géophysique de vestiges archéologiques, au sein du cordon dunaire littoral de Lège Cap-Ferret

Rapport final

BRGM/RP-72591-FR

Version 2 du 7 juin 2023

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche et développement

Billy Julie, Bernon Nicolas

Vérificateur :	
Nom :	Pierre BOURBON
Fonction :	Ingénieur géologue
Date :	12/04/2023
Signature :	

Approbateur :	
Nom :	Nicolas PEDRON
Fonction :	Directeur régional BRGM Nouvelle Aquitaine
Date :	24/04/2023
Signature :	 <small>Le Directeur Régional du BRGM Nouvelle - Aquitaine Nicolas PEDRON</small>

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 réglementation 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 <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : Dune, Littoral, Epave, Géophysique, Patrimoine, Gironde, Lège Cap-Ferret

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

Billy Julie, Bernon Nicolas (2023) - Reconnaissance par la géophysique de vestiges archéologiques, au sein du cordon dunaire littoral de Lège Cap-Ferret. Rapport final V2. BRGM/RP-72591-FR, 32 p., 21 ill.

Synthèse

Mise à jour par l'érosion de la dune littorale lors de l'hiver 2020-2021, la découverte d'une partie d'une épave d'un navire en bois, dans le versant du cordon dunaire littoral de Lège-Cap-Ferret interroge gestionnaires locaux et scientifiques. Ces vestiges sont susceptibles de présenter une haute valeur archéologique, culturelle et patrimoniale, qui intéresse l'ensemble des acteurs du territoire, dont l'ONF, la commune de Lège-Cap-Ferret, le Parc Naturel Marin du Bassin d'Arcachon (PNM-BA), le BRGM et les services chargés de leur préservation, comme la DRAC de Nouvelle-Aquitaine.

Ce projet d'investigations autour de l'épave est exploratoire, mais cette étude est un préalable essentiel avant toutes démarches pour des actions de recherches archéologiques. Les objectifs de ce projet sont d'essayer d'apporter des éléments de connaissances sur la zone supposée de la présence de l'épave en utilisant deux méthodes de géophysique : le géoradar et la méthode magnétique par drone, et plus particulièrement autour de deux aspects :

- (i) caractériser les phases d'évolutions passées de la dune, afin d'apporter des éléments de compréhension, de contexte et sur la morphologie passée de ce littoral, depuis la période contemporaine à l'échouage jusqu'à la période actuelle ;
- (ii) investiguer autour de la zone supposée de l'épave, afin de rechercher des anomalies qui pourraient symboliser la présence de l'épave dans le système plage-dune.

Les résultats de ce projet ont permis de montrer que l'architecture interne de la dune, révélée par le géoradar, est riche d'informations. Ils apportent des éléments qui renseignent sur le contexte paléo-morphologique du littoral de ce secteur, notamment la présence d'une ancienne dune (probablement du XIX^e siècle) sous la dune actuelle, qui n'avait pas été révélée jusqu'à ce jour. En considérant les premiers éléments sur l'épave, on peut donc supposer que c'est cette même géomorphologie, ou un paysage proche, qui était présente lorsque l'épave s'est échouée sur ce littoral. La phase d'implantation des palissades historiques par les « Eaux et Forêts » et les différentes phases de croissance de la dune bordière moderne, jusqu'à son état actuel, sont également enregistrées dans l'archive sédimentaire. Cette investigation fournit ainsi une idée plus précise de la morphologie passée et des évolutions de ce littoral sur plus de deux cents ans.

L'utilisation croisée des deux méthodes géophysiques a montré un fort potentiel pour l'investigation du système dunaire. D'un côté, l'épisode érosif de l'hiver 2020/2021 a pu être caractérisé et cartographié grâce aux données géoradar. De l'autre, ce travail montre qu'une seule zone possède à la fois des anomalies magnétiques et des anomalies architecturales au sein de la dune. Cette zone représente un candidat sérieux pour la localisation de l'épave. Si cela se confirme, on peut émettre l'hypothèse que la structure serait rassemblée en un bloc, et pas morcelée ou dispersée sur des zones éparses le long du linéaire côtier. L'emprise globale de cette cible s'étendrait sur une longueur de l'ordre de 12 à 15 m (*estimation à prendre avec précaution*) et serait localisée à une altitude comprise entre 4,1 et 5,5 m NGF.

Il est important de noter que l'analyse et les interprétations de cette étude sont à prendre avec précaution. Les informations tirées de cette étude peuvent néanmoins permettre d'aiguiller des actions de suivi ou de poursuites d'investigations archéologiques. En effet, le travail sur l'étude de cette épave est encore préliminaire et doit être consolidé. Actuellement, l'épave est toujours recouverte de sable, et donc protégée. Toutefois, sa localisation en pied de dune, dans une zone qui subit une érosion chronique du trait de côte, en fait une zone vulnérable à surveiller. Maintenant que l'emprise d'une zone d'intérêt a été délimitée, un suivi régulier de la zone par les agents de terrain (agents ONF, de la commune ou lors du suivi des profils de plage du secteur par l'OCNA au printemps) autour de ces coordonnées est préconisé.

Sommaire

1. Introduction.....	7
2. Investigations géophysiques	9
2.1. Le géoradar.....	9
2.1.1. <i>Les principes du géoradar</i>	9
2.1.2. <i>La campagne d'acquisition géoradar pour le projet REGAL</i>	11
2.2. Le magnétisme par drone	12
2.2.1. <i>Les principes du magnétisme</i>	12
2.2.2. <i>La campagne d'acquisition de données magnétiques pour le projet REGAL</i>	14
3. Paléogéographie et évolution du système dunaire	17
4. Système « pied de dune » - « haut de plage ».....	23
4.1. L'investigation géoradar.....	23
4.1.1. <i>La surface d'érosion</i>	23
4.1.2. <i>Les anomalies géophysiques</i>	24
4.2. Résultats de l'investigation "magnétisme en drone"	26
4.3. Interprétation croisée "géoradar et magnétisme".....	27
5. Perspectives : suivi de la zone d'intérêt	29
6. Références	31

Liste des figures

Figure 1 - Photographies de l'épave, suite à sa découverte lors de l'hiver 2020-2021 (© E. Lenain, ONF, nov. 2020).....	7
Figure 2 - a) Schéma illustrant le fonctionnement du géoradar, b) photographie des antennes géoradar (antenne 100 MHz à gauche et 500 MHz à droite, campagne T-Rex, 2021 ; © BRGM).....	9
Figure 3 - Exemple de résultats issus d'un profil géoradar, sur le site du Truc-Vert (© J. Billy, CEFREM, Université de Perpignan, 2018 ; chaque couleur représente différents dépôts, mis en place au cours de son développement et qui constituent la dune actuelle ; les lignes en pointillés bleus clairs représentent le toit de la nappe d'eau)	10
Figure 4 - Exemple de résultats issus d'un profil géoradar sur le site du Trencat (Note OCNA, Billy et Nicolae-Lerma, 2021 ; les données topographiques lidar de l'OCNA sont superposées à l'image géoradar pour mettre en perspective la dynamique de l'évolution dunaire enregistrée dans cette zone depuis 2005)	10
Figure 5 - Plan de position des profils géoradar réalisés avec les antennes 250 et 500 MHz, lors de la campagne REGAL, les 11-12 octobre 2022 (en blanc) et du profil réalisé avec l'antenne 100 MHz en avril 2022, pour le projet PRELIM_CAPREX (en bleu) ; échelle spatiale : grille 100 m (en haut) et 50 m (en bas).....	12
Figure 6 - Exemple de rendu de cartographies magnétiques pour la détection de petits objets, réalisés par la société CARDEM.....	13
Figure 7 - Equipements utilisés pour l'acquisition magnétisme en drone, par la CARDEM (Le Maire, 2022)	14
Figure 8 - Photographies de l'acquisition magnétisme en drone lors de la campagne REGAL ; vol en navigation automatique (à gauche, © N. Bernon) et en navigation manuelle (à droite, © J. Billy).....	15

Figure 9 - Carte de navigation des vols drone lors de la campagne d'acquisition des 7 et 8 novembre 2022 (modifiée depuis Le Maire, 2022, CARDEM) : en bleu, les vols à 7 m au-dessus du sol sur l'ensemble de la zone d'investigation (navigation automatique), et en orange, les vols entre 1 et 2 m au-dessus du sol sur la zone ciblée pour la recherche de l'épave (navigation manuelle).....	15
Figure 10 - Profils géoradar au nord de la zone X100 et X101 (localisation Figure 5) et interprétation des différentes unités et sous-unités (zoom autour de la palissade historique)	17
Figure 11 - Synthèse des interprétations des données géoradar imageant les principales interfaces qui structurent l'architecture interne de la dune sous la topographie actuelle (LiDAR OCNA 2021)	18
Figure 12 - Reconstitution de l'évolution du paléo-environnement de la zone d'étude depuis le début du XIX ^{ème} siècle ; étape 1 : la paléo-dune naturelle (paléo-topographies issues de l'interprétation géoradar, en m NGF).....	19
Figure 13 - Schéma du principe de construction de la dune littorale illustrant l'implantation des palissades (C. Grandjean dans le dossier forestier n°11, Favennec, 2002).....	19
Figure 14 - Reconstitution de l'évolution du paléo-environnement de la zone d'étude ; étape 2 : édification du noyau d'une nouvelle dune autour de la palissade historique (début/milieu du XIX ^{ème}) devant la paléo-dune ; paléo-topographies issues de l'interprétation géoradar (en m NGF) et exagération verticale x2.....	20
Figure 15 - Reconstitution de l'évolution du paléo-environnement de la zone d'étude ; étape 3 : accumulation de sable et développement de la nouvelle dune autour de la palissade historique (paléo-topographies issues de l'interprétation géoradar, en m NGF ; exagération verticale x2.....	20
Figure 16 - Schéma de l'évolution du système « pied de dune » - « haut de plage » entre 2020 et 2022	23
Figure 17 - Représentation 3D de profils géoradar sous DELPH et de la surface d'érosion interpolée liée à l'hiver 2020/2021 (MNT généré à partir des pointés sur les profils géoradar) : en bleu, sont représentées des anomalies (hyperboles) présentes dans les dépôts de sable récents (post-hiver 2020/2021) ; exagération verticale x2.....	24
Figure 18 - Exemple de deux profils géoradar transversaux, analysés et interprétés, illustrant le système « pied de dune » - « haut de plage ».....	25
Figure 19 - Visualisation en 3D sous DELPH et interprétation d'un profil longitudinal et d'un profil transversal au niveau de la zone de concentration d'anomalies identifiées (Exagération verticale x2)	26
Figure 20 - Carte du signal analytique (nT/m) du système « pied de dune » - « haut de plage » (localisation des profils Figure 9 ; Le Maire, 2022).....	27
Figure 21 - Interprétation croisée des données géoradar et magnétique, représentant une zone concordante de présence d'anomalies (Exagération verticale x2).....	28

1. Introduction

La découverte d'une partie d'une épave d'un navire en bois, dans le versant du cordon dunaire littoral de Lège Cap-Ferret, interroge gestionnaires locaux et scientifiques. Mise à jour par l'érosion de la dune littorale lors de l'hiver 2020-2021, les premières observations, appuyées par une analyse de la DRAC, suggèrent la présence d'une embarcation de grande taille, probablement un bateau de charge du XVIII^{ème} siècle, d'une capacité qui pourrait être de 200 à 300 tonnes. Pour des raisons de préservation de l'épave, cette dernière a été recouverte de sable en début d'année 2021 et n'est donc pas apparente. Son positionnement, en retrait du trait de côte actuel, et son âge pourraient apporter des informations précieuses sur l'environnement littoral contemporain de l'échouage et ainsi préciser les variations passées du trait de côte. Ces vestiges sont également susceptibles de présenter une valeur archéologique, culturelle et patrimoniale, qui intéresse l'ensemble des acteurs du territoire et notamment l'ONF, la commune de Lège Cap-Ferret, le Parc Naturel Marin du Bassin d'Arcachon (PNM-BA) et les services chargés de leur préservation, notamment la DRAC de Nouvelle-Aquitaine.



*Figure 1 - Photographies de l'épave, suite à sa découverte lors de l'hiver 2020-2021
(© E. Lenain, ONF, nov. 2020)*

Dans un espace littoral remarquable, en plein secteur labellisé « Forêt d'Exception® », ces acteurs locaux ont souhaité réaliser des premières investigations, dans l'objectif de préciser l'intérêt de cette découverte, en faisant appel au BRGM pour les mener. Compte tenu du fait que ce projet de reconnaissances préalables peut apporter des informations précieuses sur les positions historiques du trait de côte et de ses variations passées, et que son positionnement est situé en forêt domaniale d'un territoire labellisé « Forêt d'Exception® », l'ONF en est le porteur. L'ONF, en concertation avec le BRGM, anime le programme et est responsable des échanges avec les acteurs investis dans le projet (commune de Lège Cap-Ferret, PNM-BA, DRAC Nouvelle-Aquitaine) ainsi qu'une société de production locale chargée de la valorisation cinématographique du projet (Saison 5). Le BRGM est chargé de la mise en œuvre des moyens de reconnaissance et de l'exploitation des données. L'ONF apporte un appui logistique pour les investigations géophysiques menées sur le site.

En parallèle de la réalisation de ces travaux, une recherche bibliographique et historique est menée par les acteurs locaux investis dans le projet et l'entreprise Saison 5, en vue de la réalisation d'un film documentaire sur l'épave et le contexte géomorphologique du secteur au XVIII^{ème} siècle. C'est dans ce cadre qu'un stage, encadré par l'ONF (d'une durée de trois mois), a également été réalisé par une étudiante en master d'histoire de l'université de Poitiers, afin de poser un « portrait » des naufrages sur la côte de Lège Cap-Ferret entre la fin du XVIII^{ème} et le début du XIX^{ème} siècle et de mener une enquête sur l'identité possible de l'épave. Les résultats de ces travaux de stage ont été transmis et restitués à l'équipe projet en janvier 2023 (Vinet-Poirier, 2023).

Les objectifs de la présente étude sont d'essayer d'apporter des éléments de connaissances au droit de la zone supposée de présence de l'épave. Pour éviter toute atteinte à la structure, il est envisagé de réaliser une investigation préliminaire par géophysique, dont l'avantage est d'être non-intrusive et non-destructive pour le milieu. Il est rappelé que ce projet d'investigations autour de l'épave est exploratoire de par le couplage des méthodes géophysiques employées, l'environnement investigué et le type d'objet recherché. Cette étude est un préalable essentiel avant toute démarche pour des actions de recherches archéologiques plus approfondies. En effet, les services de la DRAC de Nouvelle-Aquitaine ne pourront être sollicités pour un projet d'ampleur qu'après avoir cerné l'intérêt de la structure.

Ainsi ce projet vise à apporter des connaissances sur deux aspects :

- 1) l'édifice dunaire du site, par l'imagerie de son architecture interne, dans l'objectif de caractériser les phases d'évolutions passées de la dune. Ces informations ont pour but d'apporter des éléments de contexte et de compréhension sur la morphologie passée de ce littoral, depuis la période contemporaine à l'échouage jusqu'à la période actuelle ;
- 2) la localisation précise de l'épave, par l'intermédiaire d'investigations autour de la zone supposée de présence de l'épave (*i.e. la localisation de l'épave est approximative et a été renseignée par les agents de terrain de l'ONF*) par l'utilisation croisée de deux méthodes géophysiques distinctes (géoradar et magnétisme en drone), afin de rechercher des anomalies qui pourraient symboliser la présence de l'épave dans le système plage-dune.

N.B. : Afin de ne pas divulguer la localisation de l'épave, les coordonnées sont masquées sur les figures du rapport.

Remarques

Il est important de rappeler que les données recueillies avec ces deux méthodes ne permettront pas de visualiser la structure du navire directement, ni son état de conservation. En effet, l'information recherchée dans l'imagerie géoradar correspond à des anomalies dans la structuration de la dune, qui pourraient être induites par la présence de l'épave. La cartographie magnétique du site vise à détecter des anomalies liées aux potentiels objets métalliques constitutifs de l'épave. La détection de ces anomalies architecturales de la dune et magnétiques pourrait, au mieux, renseigner sur la localisation de l'épave et apporter des éléments sur ses dimensions et/ou sur son intégrité ou son morcellement éventuel.

2. Investigations géophysiques

Deux méthodes géophysiques ont été déployées dans une zone élargie au droit du site de l'épave : le géoradar et le magnétisme aéroporté. L'usage en parallèle de ces deux méthodes présente un caractère exploratoire et innovant : (i) elles sont complémentaires par l'analyse de deux signaux distincts propres à chacune d'entre elles (ondes électromagnétiques hautes fréquences et mesure du champ magnétique), et (ii) le couplage de ces deux méthodes en milieu dunaire, à des fins de reconnaissance archéologique, est à ce jour peu documenté à notre connaissance. En outre, l'utilisation de la méthode magnétique apparaît pertinente en raison de la présence avérée de clous métalliques au sein de l'épave (d'après les premières observations réalisées par la DRAC de Nouvelle-Aquitaine et l'ONF). Ainsi, tout en répondant à l'objectif d'améliorer la connaissance sur l'épave, présente dans le proche sous-sol à l'interface plage-dune sans impacter les vestiges, ce projet est une opportunité d'évaluer la pertinence des investigations géophysiques, pour l'archéologie, et au sein des environnements littoraux.

2.1. LE GEORADAR

2.1.1. Les principes du géoradar

Le géoradar, ou GPR pour *ground penetrating radar*, est une méthode géophysique non-intrusive et non-destructive dont le fonctionnement repose sur l'émission, la propagation et la réflexion d'ondes électromagnétiques hautes fréquences (centaines de MHz) dans le sol (Figure 2). Le signal reçu permet d'imager rapidement et de façon continue les structures sédimentaires dans le sol. C'est une méthode qui a montré ses preuves pour imager l'intérieur des systèmes dunaires et fournir une information complémentaire aux suivis morphologiques de surface effectués le long du littoral (DGPS, LiDAR), et notamment sur le littoral de Nouvelle-Aquitaine, comme sur les sites du Truc-Vert (Robin, Billy, et al., 2020, 2021 ; Figure 3), sur la flèche du Cap-Ferret (rapport de stage Billières, 2022, projet PRELIM_CAPREX) ou encore dans la zone du Trencat et Biscarrosse (*note pour l'OCNA* Billy et Nicolae-Lerma, 2021 et Robin, Billy, et al., 2023 ; Figure 4).

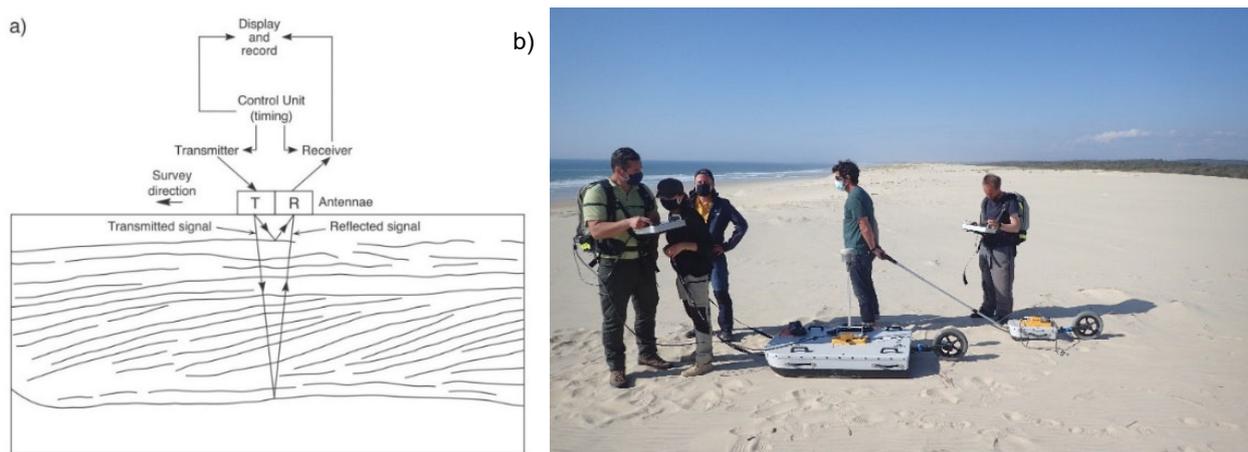


Figure 2 - a) Schéma illustrant le fonctionnement du géoradar, b) photographie des antennes géoradar (antenne 100 MHz à gauche et 500 MHz à droite, campagne T-Rex, 2021 ; © BRGM)

Les antennes communément utilisées dans l'investigation des formations superficielles littorales ont des fréquences de l'ordre de centaines de mégahertz (fréquence : 100 à 500 MHz). En fonction de l'objectif, on privilégiera une antenne basse fréquence (100 MHz) qui permet d'investiguer jusqu'à 20 m de profondeur, pour une résolution verticale de l'ordre de 15-20 cm,

ou on privilégiera une antenne haute fréquence (500 MHz), pour avoir une meilleure résolution verticale (de l'ordre de 5-7 cm) mais sur une profondeur moindre (10-12 m maximum). Les réflecteurs (les traits noirs, Figure 2) peuvent représenter des délimitations entre les unités sédimentaires, des marques d'une géomorphologie héritée, la présence de paléosol ou encore le toit de la nappe d'eau. Ils peuvent également être assimilés à des lignes temps, c'est-à-dire à des marqueurs de la morphologie à un temps donné.

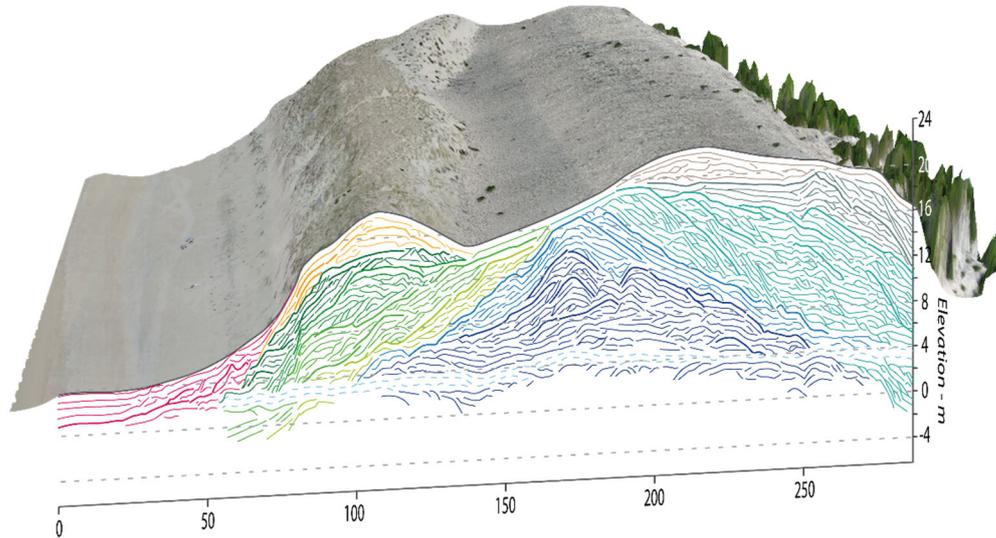


Figure 3 - Exemple de résultats issus d'un profil géoradar, sur le site du Truc-Vert (© J. Billy, CEFREM, Université de Perpignan, 2018 ; chaque couleur représente différents dépôts, mis en place au cours de son développement et qui constituent la dune actuelle ; les lignes en pointillés bleus clairs représentent le toit de la nappe d'eau)

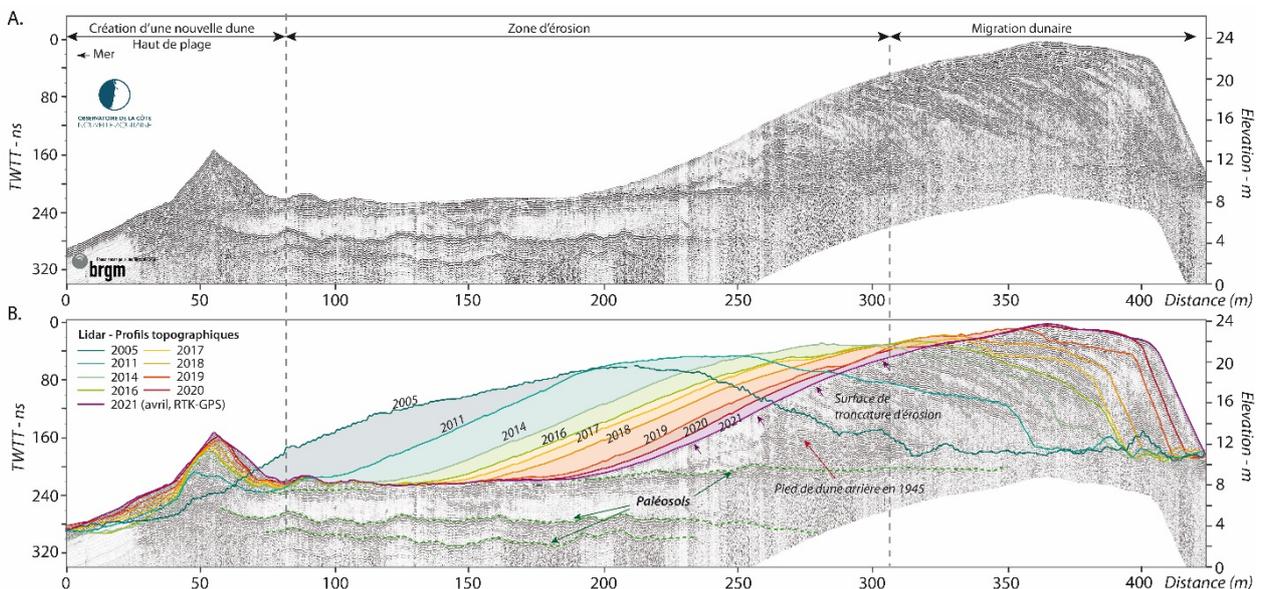


Figure 4 - Exemple de résultats issus d'un profil géoradar sur le site du Trencat (Note OCNA, Billy et Nicolae-Lerma, 2021 ; les données topographiques lidar de l'OCNA sont superposées à l'image géoradar pour mettre en perspective la dynamique de l'évolution dunaire enregistrée dans cette zone depuis 2005)

Le géoradar utilisé est le système MALA ProEX du BRGM. La vitesse des ondes dans les dunes étudiées a été calibrée à 0,14 m/ns (Billy et Nicolae-Lerma, 2021). Les échelles sur les figures géoradar seront à la fois exprimées en nanosecondes (10^{-9} sec.) temps double (le temps d'aller et retour de l'onde dans le sol ; TWTT pour *two way travel time*) et converties en mètres, dont le 0 correspond au 0 m IGN 69 (NGF), comme sur la Figure 4 ci-dessus. Les données géoradar ont été traitées sous le logiciel REFLEXW et interprétées sous le logiciel DELPH V5.0.

2.1.2. La campagne d'acquisition géoradar pour le projet REGAL

Dans le cadre de l'apport de connaissances sur la zone de l'épave, le protocole d'acquisition de données géoradar a été adapté aux questions posées :

- zone témoin et caractérisation du milieu dunaire : Afin de caractériser le milieu dunaire et d'obtenir des enregistrements de l'architecture interne de la dune dans des zones témoins, c'est-à-dire sans perturbation liée à la présence de l'épave, quatre profils traversant la totalité de la dune bordière (de la plage jusqu'à l'arrière-dune) ont été réalisés avec l'antenne 250 MHz (deux au nord et deux au sud de la zone supposée de l'épave, Figure 5 ; résolution verticale de l'ordre de 14 cm). Cette étude va également bénéficier d'un profil réalisé en avril 2022 avec l'antenne 100 MHz dans le cadre du projet PRELIM_CAPREX et localisé sur le chemin d'accès de la zone ;
- zone supposée de l'épave : quadrillage dense autour de la zone de l'épave (90 profils, espacement entre les profils : 1 ou 2 m ; Figure 5), avec des profils longitudinaux et transversaux réalisés avec l'antenne 500 MHz (résolution verticale de l'ordre de 7 cm).

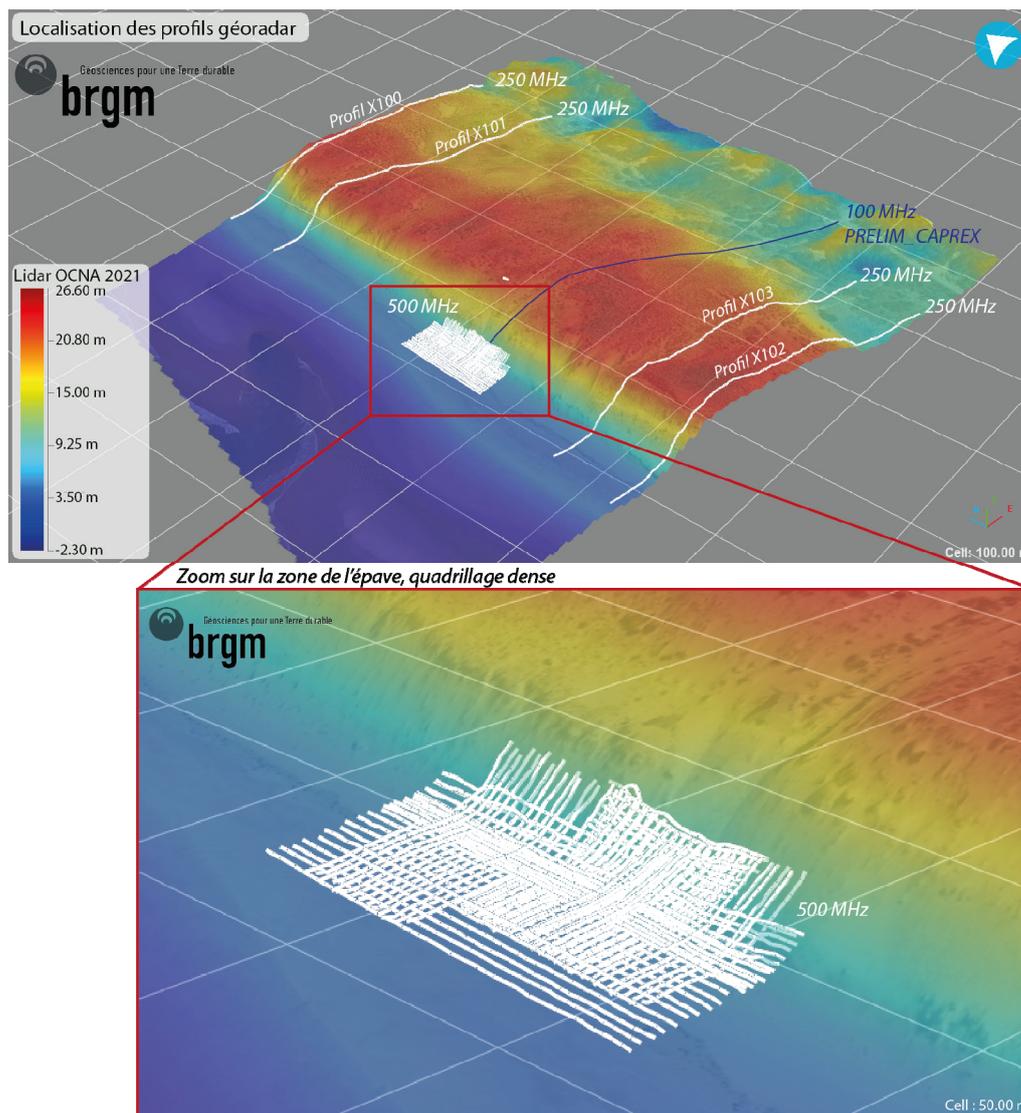


Figure 5 - Plan de position des profils géoradar réalisés avec les antennes 250 et 500 MHz, lors de la campagne REGAL, les 11-12 octobre 2022 (en blanc) et du profil réalisé avec l'antenne 100 MHz en avril 2022, pour le projet PRELIM_CAPREX (en bleu) ;
 échelle spatiale : grille 100 m (en haut) et 50 m (en bas)

La campagne d'acquisition s'est déroulée les 11 et 12 octobre 2022, en présence de trois agents BRGM et d'un agent de l'ONF. Lors du 2nd jour de mission, l'équipe de Saison 5 et l'étudiante en histoire (stage cité précédemment, voir § 1-Introduction) ont pu échanger avec nous et réaliser la prise d'images pour le film documentaire sur l'épave.

2.2. LE MAGNETISME PAR DRONE

2.2.1. Les principes du magnétisme

La méthode magnétique est une des disciplines de la géophysique qui est basée sur l'étude des variations du champ magnétique terrestre et de ses composantes. Elle permet ainsi de rendre compte de la présence de matériaux magnétiques dans le sous-sol (Géochronique N°160, 2021). Cette technique est largement utilisée dans des thématiques comme l'archéologie ou la

dépollution des sols (recherche de fondation, réseaux, cuves, munitions, etc. ; Figure 6). Comme le géoradar, cette méthode d'investigation du sous-sol est non-invasive et non-destructive.

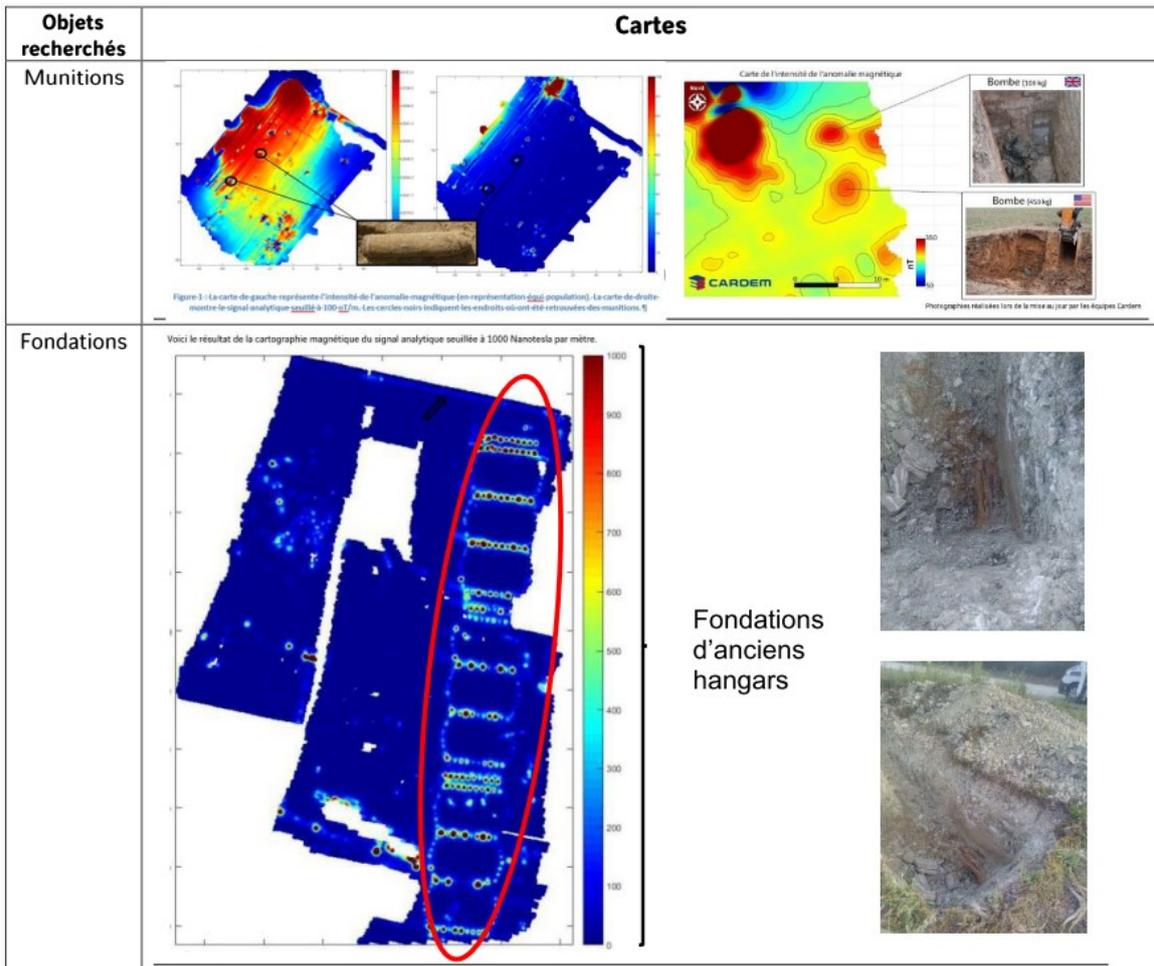


Figure 6 - Exemple de rendu de cartographies magnétiques pour la détection de petits objets, réalisés par la société CARDEM

Dans le cadre de ce projet, les investigations magnétiques ont été testées afin d'examiner la capacité de cette méthode à distinguer les clous métalliques, dont la présence a été avérée lors des observations (Figure 1), ou tous autres objets métalliques qui pourraient être des éléments constitutifs de la structure de l'épave. Afin d'investiguer l'ensemble de la zone autour de l'épave, le capteur utilisé sera fixé sur un drone. Le diagnostic magnétique a été réalisé par la société CARDEM, aussi bien pour la phase amont de préparation de l'acquisition (préparation administrative, autorisation de vol), que la réalisation des travaux (reconnaissance visuelle du terrain, acquisition, traitement des données). Les équipements utilisés ont été définis par la CARDEM afin d'être adaptés à l'objet d'étude (choix du support, espacement et hauteur des capteurs). Ainsi le dispositif utilisé est constitué de 4 capteurs magnétiques espacés de 50 cm, placés sur une perche au niveau du pied du drone (Figure 7). Le système est connecté à TERIA, un service de géolocalisation par satellites.

<p>Système d'acquisition</p> 		<p>Les capteurs employés sont des capteurs de type fluxgate (Bartington, MAG-03MC). Leurs avantages sont le poids (~100 g), la fréquence d'acquisition élevée et la mesure du vecteur (pas uniquement sa norme).</p>
		<p>Une électronique permettant l'enregistrement synchronisé de huit capteurs magnétiques et des données d'une antenne GNSS est utilisée et la tablette de terrain pour son contrôle.</p>
		<p>Drone M300 RTK (DJI)</p>
<p>CORRECTION GNSS</p> 	<p>TERIA est un service de géolocalisation par satellites de précision. Le positionnement GNSS permet de se positionner avec une précision métrique au niveau global. Notre service vient corriger ces signaux pour permettre au récepteur GNSS de fournir un positionnement de précision centimétrique en quelques secondes en utilisant les techniques RTK et N-RTK. Pour cela nous nous appuyons sur des standards tels que le protocole NTRIP pour l'échange des données et le format RTCM pour la diffusion des corrections.</p> <p>https://www.reseau-teria.com/ http://reseau-orpheon.fr/</p>	

Figure 7 - Equipements utilisés pour l'acquisition magnétisme en drone, par la CARDEM (Le Maire, 2022)

2.2.2. La campagne d'acquisition de données magnétiques pour le projet REGAL

Tout comme pour la campagne de géoradar, nous avons cherché à caractériser, dans un premier temps, le milieu dunaire puis la zone pré-ciblée de l'épave. Les acquisitions se sont réalisées sur deux jours, en présence des agents du BRGM (7 et 8 novembre 2022).

Le premier jour, les acquisitions se sont faites en navigation automatique (x, y, hauteur du sol prédéfini en amont avec une résolution RTK ; Figure 8 gauche). Ainsi le drone a pu réaliser des profils tous les 5 m et à une altitude de 7 m au-dessus du sol, soit 34 profils longitudinaux de 450 m de longueur (profils en bleu sur la Figure 9).

Le second jour, à cause des conditions météorologiques trop agitées et de la localisation des profils sur le front dunaire (entre le haut de plage et la crête de dune), les acquisitions se sont faites en navigation manuelle (Figure 8 droite). En effet, la faible hauteur de vol et la forte variation topographique du front de dune ne permettaient pas d'obtenir le service de correction (pas de signal RTK). Ainsi 47 profils transversaux d'environ 30 m de longueur ont été enregistrés à une hauteur de vol entre 1 et 2 m au-dessus du sol (profils en orange sur la Figure 9).



Figure 8 - Photographies de l'acquisition magnétique en drone lors de la campagne REGAL ; vol en navigation automatique (à gauche, © N. Bernon) et en navigation manuelle (à droite, © J. Billy)



Figure 9 - Carte de navigation des vols drone lors de la campagne d'acquisition des 7 et 8 novembre 2022 (modifiée depuis Le Maire, 2022, CARDEM) : en bleu, les vols à 7 m au-dessus du sol sur l'ensemble de la zone d'investigation (navigation automatique), et en orange, les vols entre 1 et 2 m au-dessus du sol sur la zone ciblée pour la recherche de l'épave (navigation manuelle)

3. Paléogéographie et évolution du système dunaire

Les cinq profils géoradar recoupant la dune bordière (quatre avec l'antenne 250 MHz et un avec l'antenne 100 MHz ; Figure 5) permettent d'apporter des éléments cruciaux pour la compréhension de la paléogéographie de la zone et de l'histoire de l'édification de cette dune bordière. On retrouve les mêmes caractéristiques sur les cinq profils qui traversent la dune. Les profils sont analysés et interprétés suivant les principes de la stratigraphie (stratigraphie radar détaillée dans Neal, 2004). L'intensité du signal, les géométries et l'organisation des réflecteurs (pendage, relation entre les réflecteurs, continuité du signal, troncature, délimitation, etc.) sont autant d'éléments qui permettent d'interpréter les données géoradar (unités, faciès, discontinuités). La représentation des profils X100 et X101, ci-dessous, illustre en exemple les différentes unités qui constituent l'architecture interne de la dune (Figure 10).

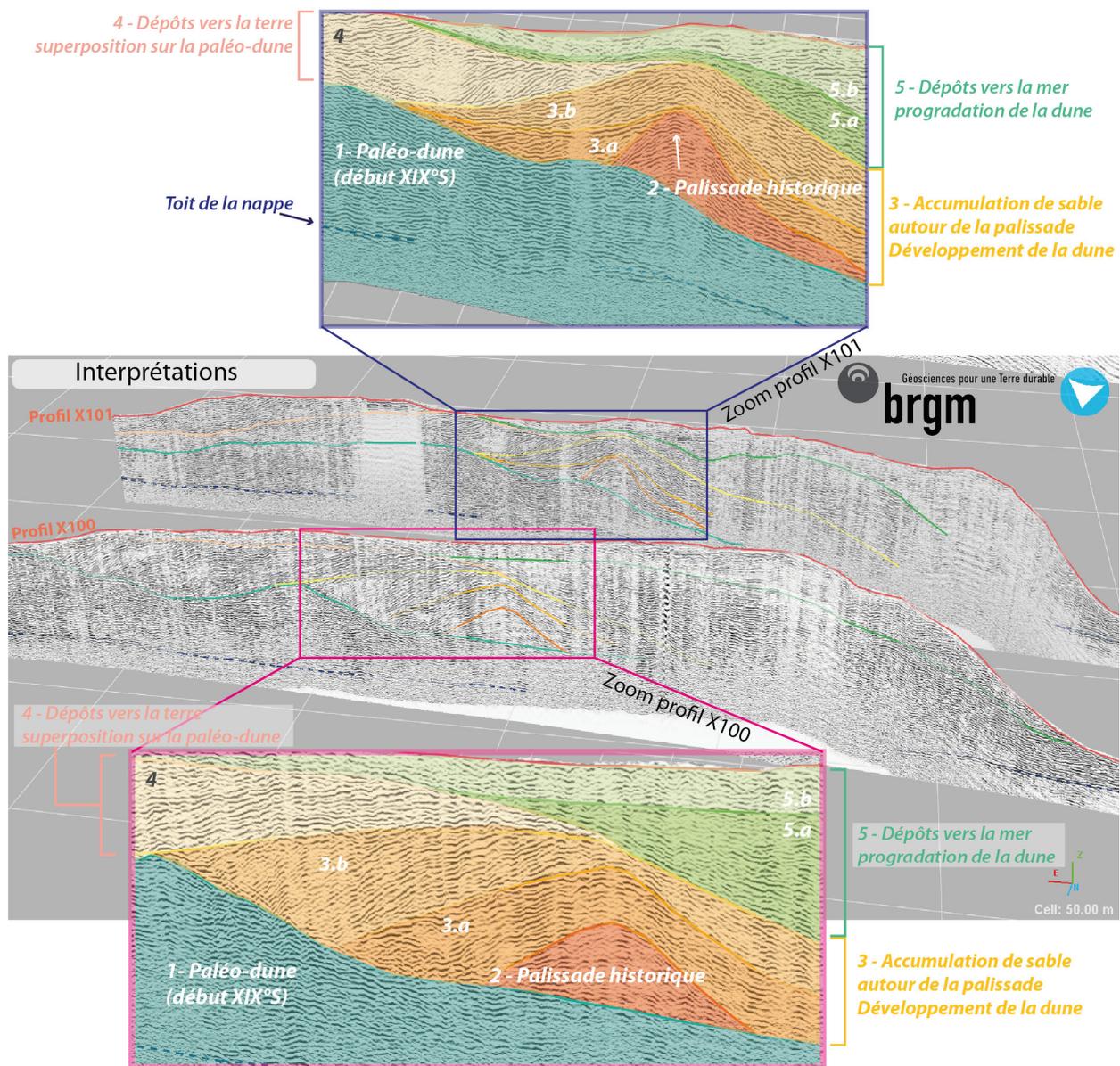


Figure 10 - Profils géoradar au nord de la zone X100 et X101 (localisation Figure 5) et interprétation des différentes unités et sous-unités (zoom autour de la palissade historique)

On distingue, à la base des profils, un réflecteur (en pointillés bleus ; Figure 10 et Figure 11) correspondant au toit de la nappe d'eau lors de l'acquisition. En dessous de cette limite, le signal ne pénètre pas ou très peu. Ainsi dans cette étude, les données ne peuvent donc être interprétées qu'au-dessus de cette limite.

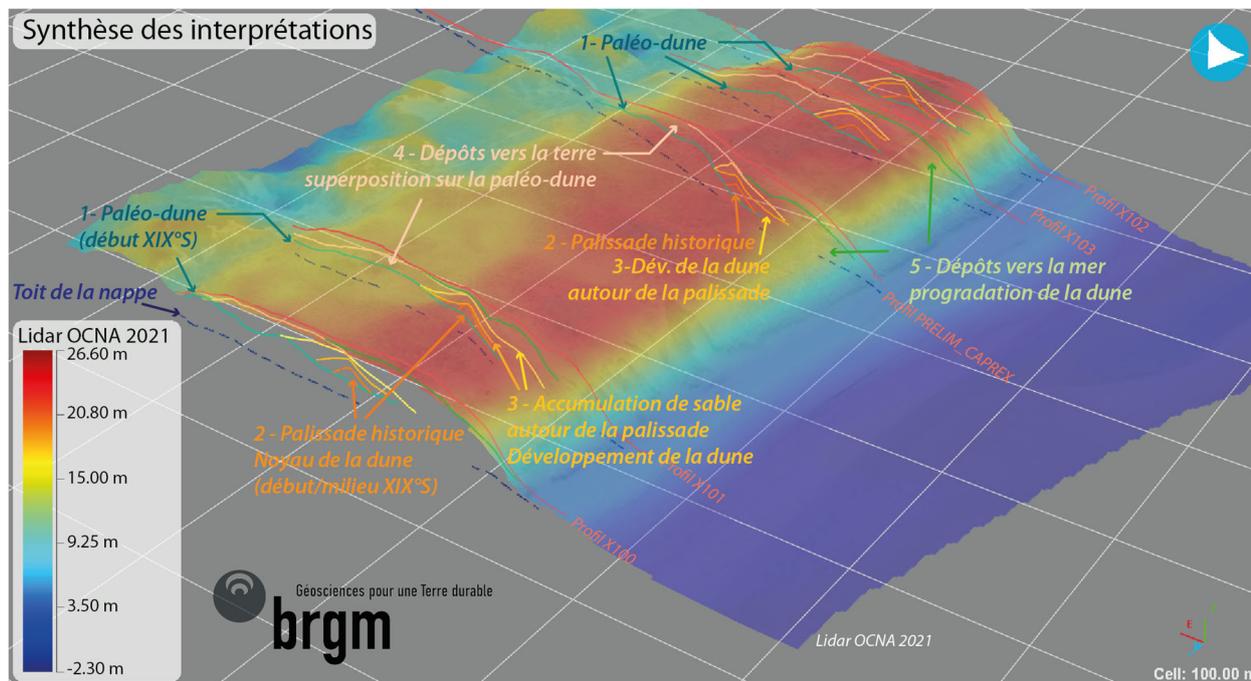


Figure 11 - Synthèse des interprétations des données géoradar imageant les principales interfaces qui structurent l'architecture interne de la dune sous la topographie actuelle (LiDAR OCNA 2021)

1 - paléo-dune illustrant le paysage littoral au début du XIX^{ème} siècle (bleu turquoise), 2 - localisation de la palissade historique au début/milieu du XIX^{ème} siècle, constituant le noyau de la dune actuelle (orange), 3 - accumulation de sable et développement de la dune autour de la palissade (jaune orangé et jaune), 4 - dépôts de sable vers la terre qui recouvre la paléo-dune (saumon), 5 - dépôts de sable vers la mer, progradation de la dune (vert), jusqu'à la morphologie actuelle de la dune (trait rouge).

Le toit de la nappe d'eau est imagé en pointillés bleus.

Représentation 3D sous DELPH, exagération verticale x2, échelle spatiale : grille 100 m.

L'interprétation des profils géoradar permet d'imager :

- une **ancienne structure dunaire** qui est totalement recouverte par la dune actuelle (Figure 10). La partie sommitale de cette paléo-dune est pointée sur les profils et représentée avec un trait bleu turquoise sur les illustrations ci-après (Figure 10 et Figure 11). La conversion des données géoradar, de nanoseconde temps double en profondeur, permet d'illustrer la paléo-morphologie de cette ancienne dune au niveau de chacun des 5 profils (Figure 12). Ainsi on constate que son emprise spatiale est concordante entre les profils, et qu'au maximum la topographie de cette paléo-dune atteint 15 m NGF.

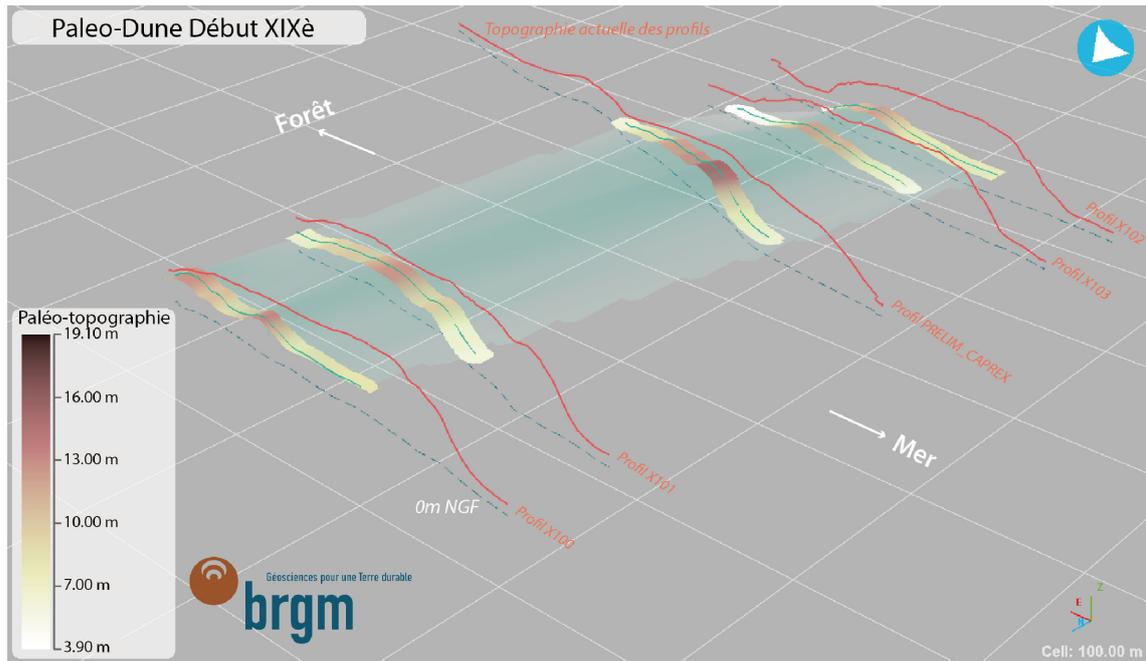


Figure 12 - Reconstitution de l'évolution du paléo-environnement de la zone d'étude depuis le début du XIX^{ème} siècle ; étape 1 : la paléo-dune naturelle (paléo-topographies issues de l'interprétation géoradar, en m NGF)

- une structure en forme de « petit mont » au relief très marqué (Figure 10) est identifiée sur l'ensemble des profils au pied de la paléo-dune (trait orange foncé ; Figure 11). Ainsi, au vue des connaissances sur le site, cette géométrie est assimilée à des dépôts de sable liés à l'**implantation des palissades** par les « Eaux et Forêts » entre le début et le milieu du XIX^{ème} siècle. Ces palissades ont été implantées sur l'ensemble du littoral sableux girondin afin de créer un point d'accroche pour le sable, éviter qu'il n'envahisse la forêt de pin maritime, et initier la création d'une dune bordière. Cette géométrie est concordante avec celle des représentations schématisées dans les documents d'archives (Figure 13) ainsi que celle préalablement identifiée sur le site du Truc-Vert, sur la flèche du Cap-Ferret (Figure 3, Robin, Billy, et al., 2021). Ainsi, cette unité marque l'empreinte des palissades, symbole de la gestion passée de ce secteur dunaire. En la suivant d'un profil à l'autre, on peut localiser l'axe d'implantation de ces palissades (Figure 11 et Figure 14), qui sont aujourd'hui dans ce secteur complètement ensevelies sous plusieurs mètres de sable.

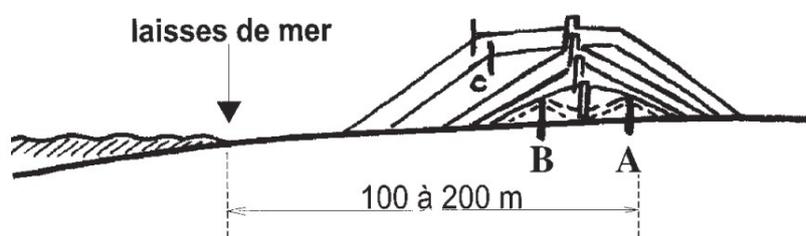


Figure 13 - Schéma du principe de construction de la dune littorale illustrant l'implantation des palissades (C. Grandjean dans le dossier forestier n°11, Favennec, 2002)

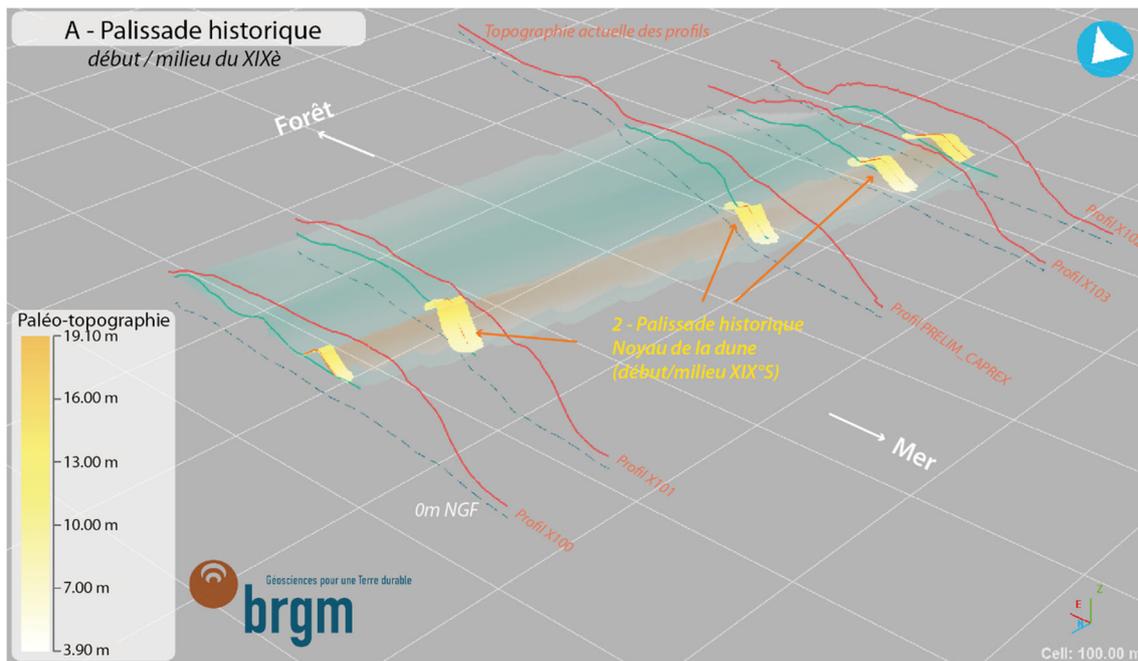


Figure 14 - Reconstitution de l'évolution du paléo-environnement de la zone d'étude ; étape 2 : édification du noyau d'une nouvelle dune autour de la palissade historique (début/milieu du XIX^{ème}) devant la paléo-dune ; paléo-topographies issues de l'interprétation géoradar (en m NGF) et exagération verticale x2

- une zone de « piège à sable » a continué à se développer autour de la palissade (traits oranges et jaunes ; Figure 10 et Figure 11) accentuant la forme de « petit mont » caractéristique, jusqu'à une altitude maximale pouvant atteindre 16 à 19 m NGF (Figure 15).

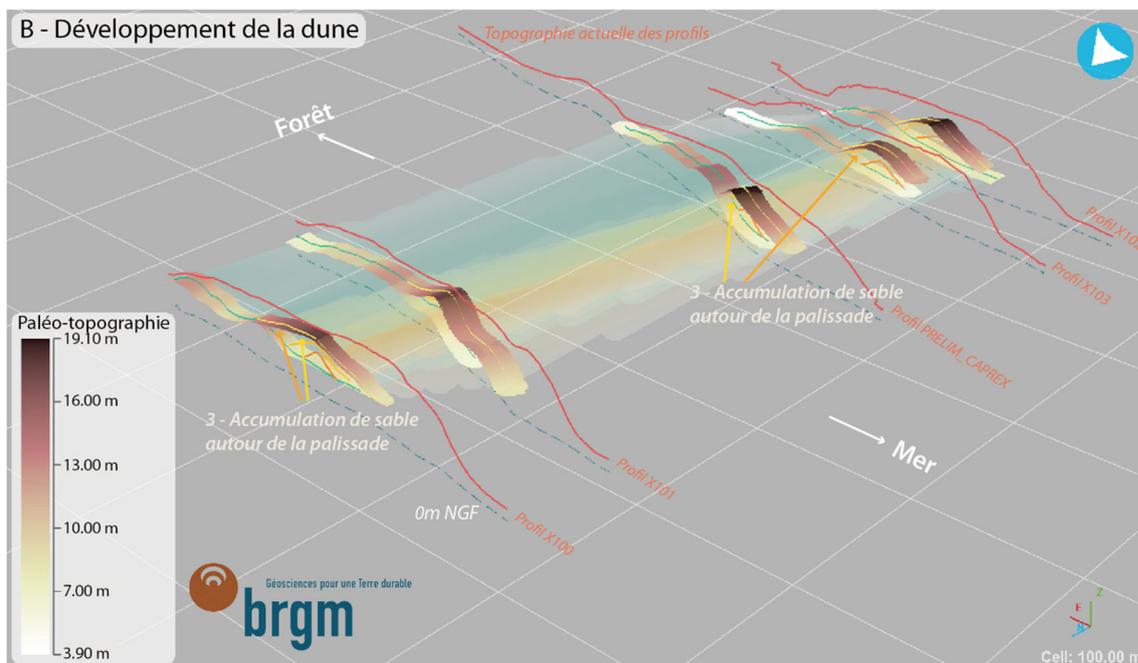


Figure 15 - Reconstitution de l'évolution du paléo-environnement de la zone d'étude ; étape 3 : accumulation de sable et développement de la nouvelle dune autour de la palissade historique (paléo-topographies issues de l'interprétation géoradar, en m NGF ; exagération verticale x2

- Le réflecteur symbolisé par un trait jaune marque une limite nette dans l'architecture de la dune (Figure 15). En effet le sable déposé au-dessus de ce réflecteur ne montre plus une organisation de type « petit mont ». Une partie va se déposer vers l'arrière et venir recouvrir la paléo-dune (Figure 11, n°4 en beige sur la Figure 10). Les pendages des réflecteurs reflètent cette dynamique de dépôts et montrent eux aussi une pente orientée vers la terre. L'autre partie du sable va venir se déposer sur la partie avant de la dune, et ainsi induire l'avancée de la dune vers la mer (n°5 en vert sur la Figure 10C). Ces dépôts, qui ont pu se développer de manière concomitante, sont à relier avec les actions de gestion sur cette dune, au cours du XX^{ème} siècle jusqu'à nos jours. Ils forment la **dune bordière** que l'on observe actuellement sur le littoral (imaginée par le LiDAR sur la Figure 11).

L'édification de la dune bordière et son évolution sont étroitement liées à l'histoire récente et aux modes de gestion des dunes depuis le début du XIX^{ème} siècle. Le couplage des données historiques de gestion ainsi que l'imagerie géoradar sont complémentaires et mettent en lumière les évolutions du site qui peuvent être contextualisées.

En résumé

L'architecture interne de la dune révélée par le géoradar est riche d'informations et renseigne sur le contexte paléo-morphologique du littoral de ce secteur, traduisant notamment la présence d'une ancienne dune (paléo-dune) sous la dune actuelle (Figure 12), qui n'avait pas été révélée jusqu'à ce jour. Les palissades érigées au début du XIX^{ème} siècle par les « Eaux et Forêts » ont été positionnées au pied du versant ouest (côté mer) de cette paléo-dune préexistante, favorisant la construction progressive du cordon dunaire littoral actuel.

Cette investigation au géoradar offre donc une vision du littoral contemporaine de l'échouage du navire sur la plage, constitué d'une dune probablement naturelle, peu élevée, et en retrait par rapport au cordon dunaire actuel.

4. Système « pied de dune » - « haut de plage »

4.1. L'INVESTIGATION GEORADAR

L'ensemble des 90 profils géoradar (transversaux et longitudinaux ; Figure 5), réalisés dans la zone supposée de présence de l'épave, permet d'avoir une image haute résolution de l'architecture sédimentaire de l'ensemble « pied de dune » - « haut de plage » de la zone étudiée (espacement des profils : 1 à 2 m, et résolution verticale ~7 cm). La forte densité de profils nous permet d'obtenir un bloc de visualisation 3D de la zone (à l'aide du logiciel DELPH V5.0). Plusieurs informations sont recherchées dans ce bloc de données : (i) des disparités dans l'architecture dunaire pouvant indiquer la présence de l'épave ; (ii) des anomalies dans le signal pouvant attester de la présence d'objets métalliques (ex : clous de l'épave) ; (iii) une singularité dans l'architecture dunaire associée à la surface d'érosion de l'hiver 2020-2021.

En première approche, deux constats peuvent être faits concernant ce jeu de données :

- la présence d'une surface d'érosion très bien visible (encoche d'érosion) au niveau du pied de dune, liée à l'hiver 2020-2021 ;
- l'identification de nombreuses anomalies géophysiques sur les profils.

4.1.1. La surface d'érosion

L'hiver 2020-2021 a connu principalement quatre épisodes tempétueux ayant engendré des conditions météo-marines susceptibles d'impacter les plages et les cordons dunaires de Gironde et des Landes : la tempête Alex (2 octobre 2020), un coup de mer survenu les 12 et 13 décembre, la tempête Bella du 27 au 29 décembre 2020, et enfin la tempête Justine, du 30 janvier au 1^{er} février 2021. L'impact érosif cumulé de ces événements et plus globalement de l'hiver 2020-2021, calculé par l'Observatoire de la côte de Nouvelle-Aquitaine, est considéré sévère au droit de Lège Cap-Ferret, faisant état d'un recul généralisé du cordon dunaire de plus d'un mètre (<http://www.observatoire-cote-aquitaine.fr/L-hiver-2020-2021-sur-le-littoral-aquitain-156>). Notons enfin que la saison hivernale précédente, de 2019-2020, avait déjà largement fragilisé l'état des plages et des dunes du littoral aquitain, et a contribué à la mise à jour de l'épave en 2020.

L'érosion du littoral s'est traduite par un décaissement du sable au niveau du haut de plage et du front de dune et un recul du trait de côte vers l'est (pied de dune). L'encoche d'érosion générée à l'interface plage/dune a laissé une empreinte dans l'architecture interne dunaire actuelle et peut être identifiée sur les profils géoradar (Figure 16B). En effet, cela se manifeste par la présence de réflecteurs tronqués de la dune. Cette limite peut être pointée sur l'ensemble des profils transversaux (limite surface d'érosion de l'hiver 2020/2021, Figure 17, Figure 18), ce qui permet de pouvoir réaliser un modèle numérique de terrain précis de la surface d'érosion du pied de dune.

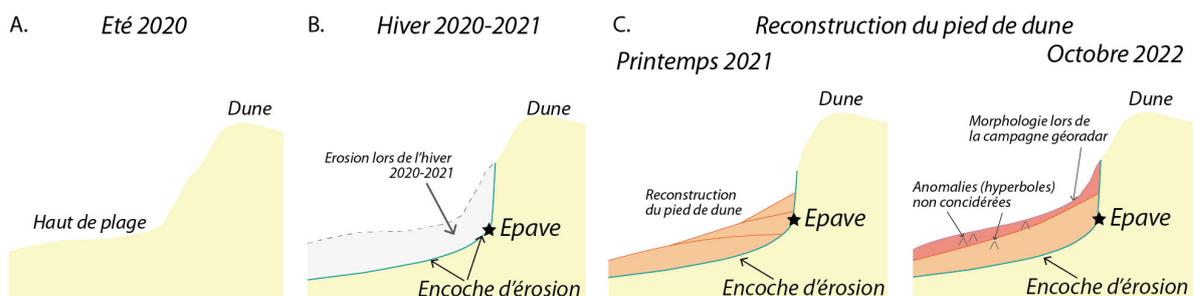


Figure 16 - Schéma de l'évolution du système « pied de dune » - « haut de plage » entre 2020 et 2022

4.1.2. Les anomalies géophysiques

Ces anomalies, qui se présentent sous la forme d'hyperboles, sont probablement à relier avec la présence de « petits objets » métalliques dans le sol. Elles peuvent être liées à des objets déposés par la mer et enfouis dans le sable, à la présence de canalisation dans la dune, mais encore à l'acquisition de données au-dessus d'un clou du bateau. En conséquence, le tri de ces anomalies apparaît nécessaire pour poursuivre l'interprétation. Pour ce travail, le marqueur de la surface d'érosion constitue un marqueur chronologique déterminant voire indispensable (Figure 16). En effet, l'épave est apparue en surface lors de l'hiver 2020/2021, donc les dépôts sableux et toutes les anomalies localisés au-dessus de la surface d'érosion sont donc du matériel plus récent (2021-2022). Ainsi, on peut donc exclure les anomalies localisées au-dessus de l'encoche d'érosion (Figure 16, Figure 17).

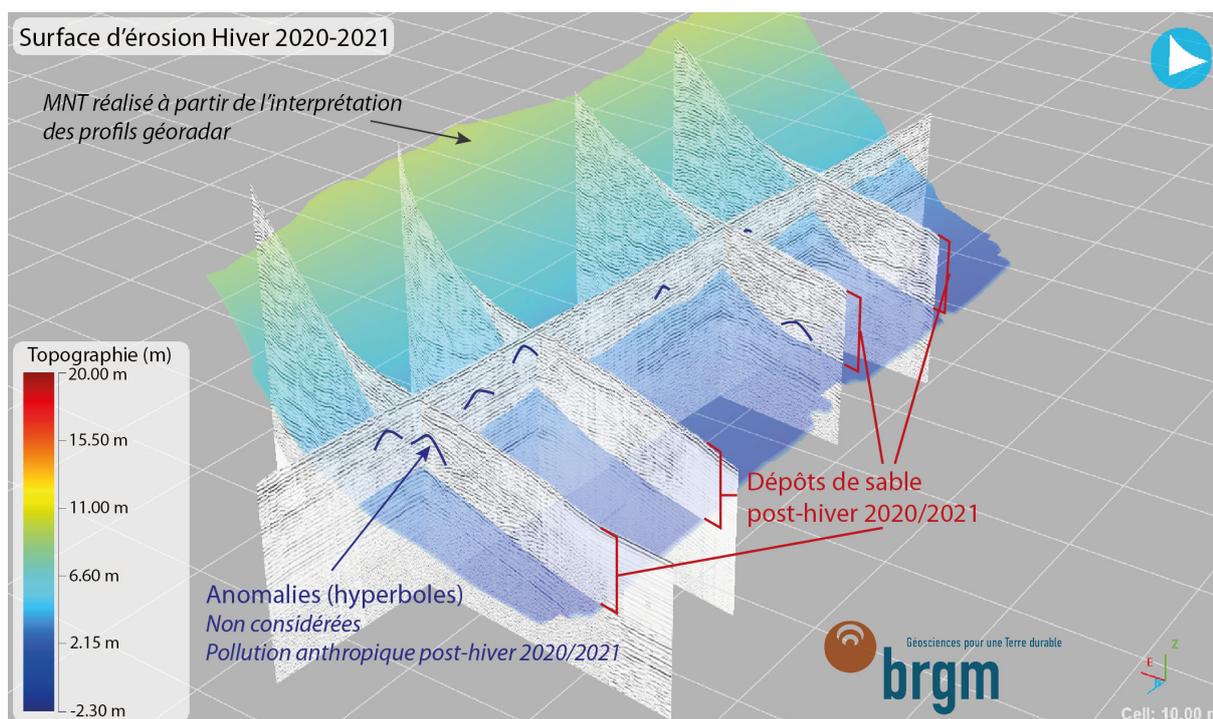


Figure 17 - Représentation 3D de profils géoradar sous DELPH et de la surface d'érosion interpolée liée à l'hiver 2020/2021 (MNT généré à partir des pointés sur les profils géoradar) : en bleu, sont représentées des anomalies (hyperboles) présentes dans les dépôts de sable récents (post-hiver 2020/2021) ; exagération verticale x2

L'interprétation des données a permis d'identifier une zone comprenant un regroupement d'anomalies localisées au niveau de la surface d'érosion, ou à proximité de cette interface sous la partie de la dune non érodée. Ci-dessous est illustré un exemple de profil géoradar (brut et interprété) au nord de la zone d'étude, considérée ici comme zone témoin (Figure 18A), et un profil au niveau de la zone de concentration des anomalies (Figure 18B). L'hypothèse qui peut être faite au vue des connaissances de ce site, est que ce regroupement d'anomalies peut marquer la présence d'un objet, ou l'influence d'un objet sur l'accumulation de sable adjacent. En croisant les profils transversaux et longitudinaux de ce secteur (Figure 19), on constate qu'un réflecteur dans l'axe longitudinal (de forme concave) surplombe ces anomalies. Sa limite sud est difficile à interpréter avec confiance, car elle coïncide avec l'axe du chemin d'accès à la plage, qui a subi de nombreux remaniements dans le passé. Cette zone n'est donc pas considérée par la suite.

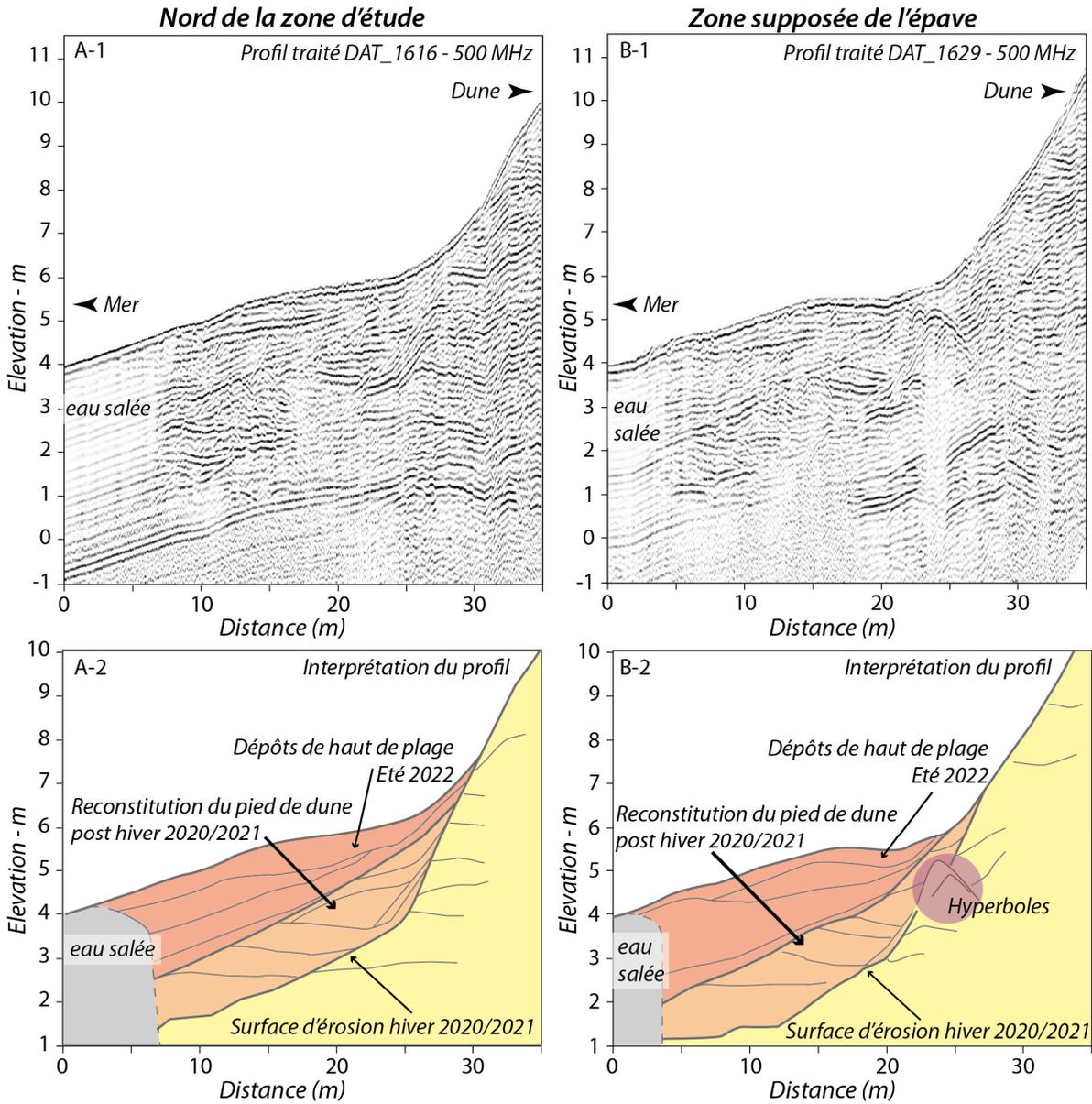


Figure 18 - Exemple de deux profils géoradar transversaux, analysés et interprétés, illustrant le système « pied de dune » - « haut de plage »

Les deux profils montrent respectivement une zone témoin sans anomalie (A1-A2) et une zone avec une anomalie majeure (hyperboles) au niveau de l'encoche d'érosion (B1-B2). Exagération verticale x3,2.

L'emprise globale de ces anomalies semble être rassemblée sur une seule cible, qui s'étendrait sur une longueur de l'ordre de 12 à 15 m (*estimation à prendre avec précaution*) et serait localisée à une altitude comprise entre 4,1 et 5,5 m NGF. Cette zone représente un candidat sérieux pour la localisation de l'épave.

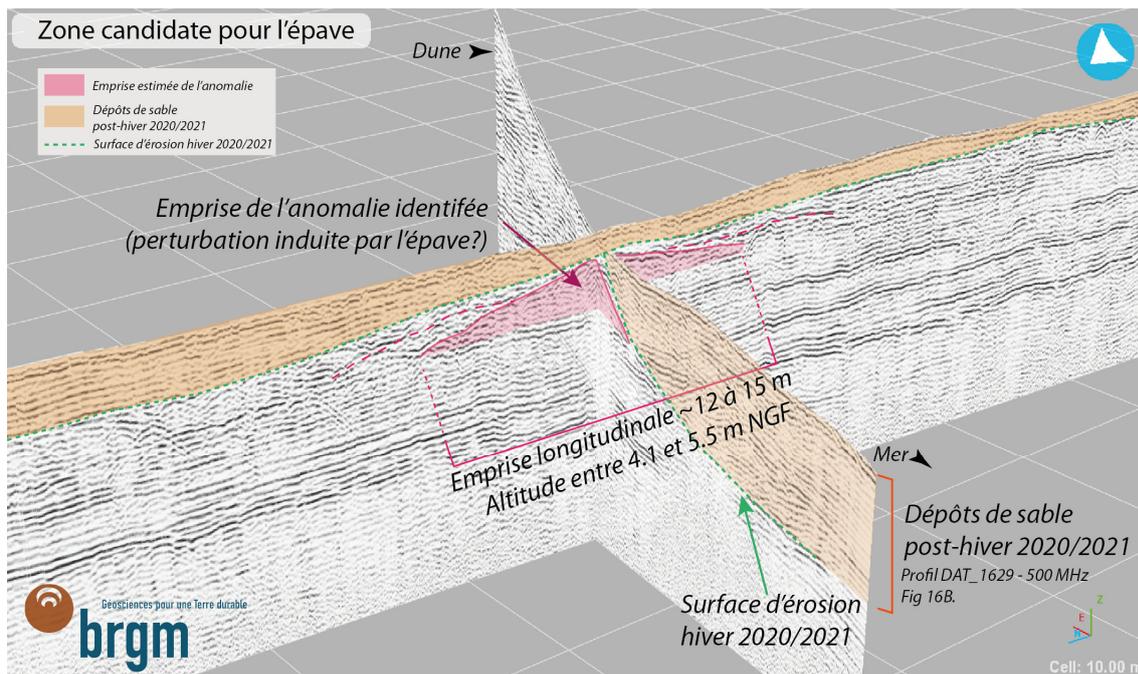


Figure 19 - Visualisation en 3D sous DELPH et interprétation d'un profil longitudinal et d'un profil transversal au niveau de la zone de concentration d'anomalies identifiées (Exagération verticale x2)

4.2. RESULTATS DE L'INVESTIGATION "MAGNETISME EN DRONE"

Le vol drone réalisé à basse altitude (entre 1 et 2 m au-dessus du sol ; Figure 9) permet d'illustrer les anomalies magnétiques présentes au niveau du système « pied de dune » - « haut de plage ». L'objectif de cette acquisition est de tester cette méthode afin de voir s'il est possible de détecter la présence des clous de l'épave dans cet environnement dunaire.

La carte générée montre six anomalies magnétiques dans l'ensemble de la zone étudiée (N#1 à N#6 sur la Figure 20 ; Le Maire, 2022¹). Les anomalies N#2 à N#6 ont de faibles amplitudes (< 9 nT/m) et peuvent possiblement être rattachées à la présence de petits objets métalliques sub-affleurants ou à la localisation de zone de feu sur la plage, etc. Elles ne semblent pas correspondre à notre objet d'étude. L'anomalie N#1 quant-à-elle montre une amplitude contrastée par rapport aux autres (216 nT/m) et une profondeur de l'anomalie estimée à 1,1 m. Ainsi seule la cible N#1 semble être intéressante pour notre étude, mais sans certitude.

¹ Afin d'obtenir les informations sur la localisation et sur la propriété magnétique des sources présentes dans le sous-sol (anomalies), des inversions ont été réalisées sur la carte de signal analytique. Le signal analytique est une transformée mathématique, qui permet d'aider à l'interprétation, en replaçant les maxima à l'aplomb des sources. L'inversion consiste à calculer quatre paramètres (X, Y, Z et moment magnétique) permettant de minimiser l'écart entre le signal analytique obtenu pour une source simple (une sphère) et celui résultant des données (Le Maire, 2022).

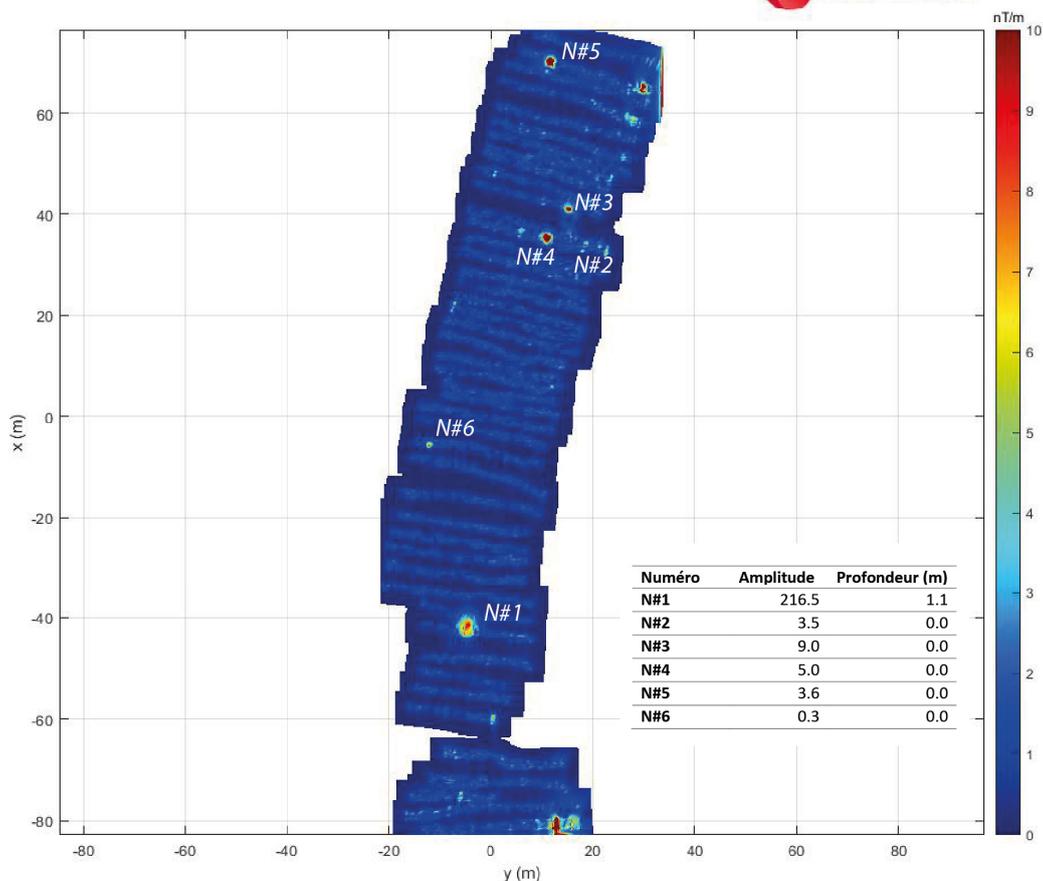


Figure 20 - Carte du signal analytique (nT/m) du système « pied de dune » - « haut de plage » (localisation des profils Figure 9 ; Le Maire, 2022)

Préconisation

Il serait intéressant de voir s'il est possible de se procurer un exemplaire de clou similaire à ceux recherchés, afin d'avoir une anomalie « étalon », ce qui permettrait de faciliter les interprétations.

4.3. INTERPRETATION CROISEE "GEORADAR ET MAGNETISME"

Les résultats des analyses des profils géoradar et de la cartographie magnétique de la zone « pied de dune » - « haut de plage » ont été confrontés (Figure 21). On constate que la localisation de l'anomalie magnétique N#1 concorde avec l'anomalie identifiée par l'interprétation des profils géoradar (Figure 19). Cette cible est la seule zone commune d'anomalies entre le géoradar et le magnétisme. De plus, la profondeur estimée de l'objet générant ces anomalies est également concordante entre les deux méthodes (soit entre 0,75 et 2 m sous la surface, aux dates des acquisitions).

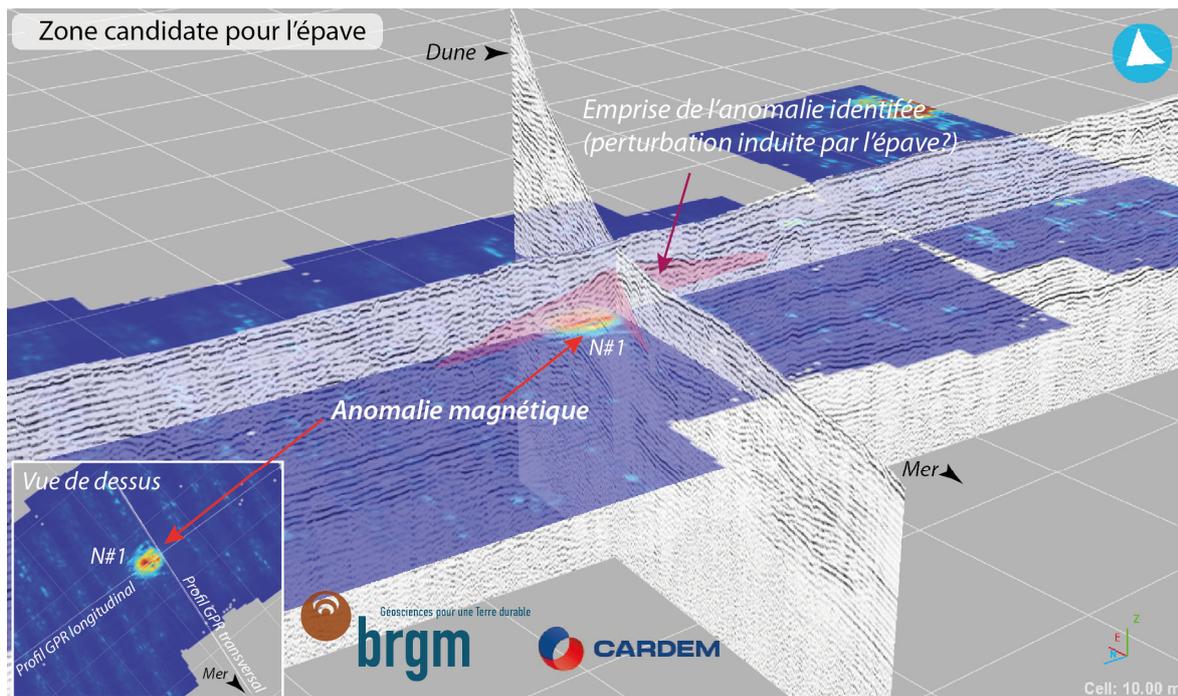


Figure 21 - Interprétation croisée des données géoradar et magnétique, représentant une zone concordante de présence d'anomalies (Exagération verticale x2)

En conclusion

L'utilisation croisée des deux méthodes géophysiques a montré un fort potentiel pour l'investigation du système dunaire. Ce travail montre qu'une seule zone possède à la fois des anomalies magnétiques et des anomalies sur le géoradar. S'il s'avère que cette cible est l'épave, on peut émettre l'hypothèse que la structure soit rassemblée dans un périmètre restreint, en un ou plusieurs éléments métriques au sein de la zone identifiée (et non morcelée ou dispersée sur des zones éparses le long du linéaire côtier).

Il est important de noter que l'analyse et les interprétations de cette étude sont à prendre avec précaution. Les données recueillies ne permettent que l'émission d'une hypothèse qu'il conviendrait de préciser par des opérations de reconnaissance in-situ.

5. Perspectives : suivi de la zone d'intérêt

L'interprétation croisée du géoradar et de la cartographie magnétique par drone permet d'identifier une seule zone commune d'anomalies, susceptible de correspondre à un ou plusieurs éléments, rassemblés sur une distance de l'ordre de 12 à 15 mètres dans l'axe du pied de dune, entre les cotes 4,1 m NGF et 5,5 m NGF. Cette zone représente une candidate sérieuse pour la localisation de l'épave. En l'absence de reconnaissance visuelle directe lors des campagnes de terrain, il conviendrait de préciser ce résultat obtenu sur la base de l'interprétation de signaux indirects, à partir par exemple d'une mise à jour partielle des éléments détectés (ex : fouille).

Actuellement, l'épave est toujours enfouie, et donc protégée, sous une fine épaisseur de sable (métrique). Toutefois, sa localisation en pied de dune, dans une zone qui subit une érosion chronique du trait de côte, en fait une zone à surveiller. Maintenant que l'emprise d'une zone d'intérêt a été délimitée, un suivi régulier de la zone par les agents de terrain (agents ONF, de la commune ou lors du suivi des profils de plage du secteur par l'OCNA au printemps) autour de ces coordonnées est préconisé.

6. Références

- Billières, C., 2022. Etude du système dunaire de la flèche du Cap-Ferret : Synthèse de l'état des connaissances, analyses morphologique des dunes, SIG, traitement, analyse et interprétation des données géoradar. Stage de fin d'étude. BRGM, ENSEGID, Bordeaux INP.
- Billy, J., Nicolae-Lerma, A., 2021. Note de l'observatoire de la côte Aquitaine, Prospection de l'architecture interne des dunes. NT-BRGM- 2021-021, 7.
- Favennec, J., 2002. Connaissance et gestion durable des dunes de la côte atlantique. Les dossiers forestiers n°11., l'Office n. ed.
- Géochronique, 2021. Géophysique un voyage intérieur. Géochronique N 160, 72.
- Le Maire, P., 2022. Rapport de diagnostic magnétique, lège cap Ferret (33) recherche d'une épave (CARDEM).
- Neal, A., 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Rev.* 66, 261–330. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>
- Robin, N., Billy, J., Castelle, B., Hesp, P., Laporte-fauret, Q., Nicolae, A., Marieu, V., Rosebery, D., Bujan, S., Destribats, B., 2020. Beach-dune Recovery from the Extreme 2013-2014 storms erosion at Truc Vert Beach , Southwest France : New Insights from Ground- Penetrating Radar. <https://doi.org/10.2112/SI95-115.11>
- Robin, N., Billy, J., Castelle, B., Hesp, P., Nicolae Lerma, A., Laporte-Fauret, Q., Marieu, V., Rosebery, D., Bujan, S., Destribats, B., Michalet, R., 2021. 150 years of foredune initiation and evolution driven by human and natural processes. *Geomorphology* 374, 107516. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107516>
- Robin, N., Billy, J., Nicolae Lerma, A., Castelle, B., Hesp, P.A., Rosebery, D., Fauny, C., Deparis, J., Marieu, V., Bouchet, C., Miot da Silva, G., 2023. Natural remobilization and historical evolution of a modern coastal transgressive dunefield. *Earth Surf. Process. Landforms* 1–20. <https://doi.org/10.1002/esp.5535>
- Vinet-Poirier, S., 2023. Etude historique de l'Histoire maritime de la côte de Lège-Cap-Ferret de la fin du XVIIIe siècle au début du XIXe siècle. Rapport de Stage. ONF, Université de poitiers, CRIHAM.



Direction régionale Nouvelle-Aquitaine - site de Bordeaux
Parc Technologique Europarc
24, avenue Léonard de Vinci
33600 Pessac - France
Tél. : 05 57 26 52 70
www.brgm.fr