

Comprendre l'interaction fortifications/dunes côtières de l'île d'Yeu (approche historique et géophysique)



Crédit photo : Elsa CARIOU



Crédit photo : Elsa CARIOU

**Réalisé sous la direction de : Agnès BALTZER (LETG), Elsa CARIOU (LETG)
et Donatienne LEPAROUX (UGE)**

**Mémoire de fin d'étude
Master 2 Géographie Aménagement Environnement et Développement
Parcours : Cartographie des Espaces à Risques**

**Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de
Nantes**

Présenté par Robin PIEL

Août 2021

Remerciements

Je tiens à remercier pleinement Elsa CARIOU, Agnès BALTZER ainsi que Donatienne LEPAROUX pour m'avoir fait confiance dans la réalisation de ce projet universitaire qui m'a tout particulièrement intéressé. Je remercie doublement Elsa CARIOU et Vincent LACOMBE pour l'accueil chaleureux lors de mon séjour de longue durée sur l'île d'Yeu.

Je remercie Patrick JADE de l'association « 1846 », pour son temps consacré au partage des connaissances concernant les fortifications napoléoniennes.

Merci aussi à Annabelle CHAUVITEAU pour m'avoir aidé dans le travail de recherche d'archives historiques.

Un grand merci à la famille GRAVIER : Mousso, Emmanuel, Sixteen, Théo, Nils et Oumar, qui m'a accueillie à bras ouverts pour cette petite période de colocation vraiment chouette de début avril à début mai. Merci aussi à Nils pour m'avoir fait découvrir les vagues de l'île d'Yeu.

Merci également à Raphael « Triphon » MARCHAL pour m'avoir soutenu pendant cette phase de rédaction. Ta source de motivation fut inégalable.

Merci Benoît DUCOURTIOUX pour les impressions du mémoire faites à l'agence. Heureusement que t'es là !

Enfin, merci à ma famille, en particulier à ma très chère mère qui m'a soutenue tout le long de ces années d'études et pendant la rédaction de ce mémoire. Un grand merci !

Sommaire

Remerciements	2
Sommaire.....	3
Introduction	4
1. Contexte général de l'étude.....	7
1.1 Le littoral de l'île d'Yeu, un objet d'étude d'intérêt scientifique	7
1.2 Une île marquée par des aménagements militaires côtiers depuis le XVIIème	15
1.3 La géophysique appliquée aux risques côtiers.....	21
2. Matériels et Méthodes.....	26
2.1 Constitution d'une base de données de l'historique des tempêtes de l'île d'Yeu	26
2.2 Recherche d'archives historiques identifiant une chronologie des aménagements sur les trois sites fortifiés	27
2.3 La prospection géoradar.....	31
2.4 Stratigraphie et structures sédimentaires	45
3. Résultats	49
3.1 Chronologie des aléas météo-marins recensés depuis IV siècle	49
3.2 Le fort Gauthier	52
3.3 Le fort Neuf	61
3.4 La pointe de la petite Conche	68
4. Discussion.....	80
4.1 Interprétation et analyse de la géométrie des unités géologiques	80
4.2 Dynamique littoral de la côte du nord-est	84
Conclusion et perspectives.....	86
Bibliographie	88
Annexes	92
1. Archives historiques Napoléoniennes	92
2. Résultats des profils géoradar	94
3. Données du BRGM.....	105
Table des illustrations	106
Table des matières	110
Résumé	113
Abstract.....	113

Introduction

Dans un contexte de réchauffement planétaire, les populations locales résidant proche du littoral sont menacées par la modification des régimes climatiques liée à la remontée eustatique. Aujourd'hui, cette remontée globale du niveau marin serait de 3.6mm par an, soit deux fois plus vite qu'au siècle dernier (selon le rapport du GIEC datant d'août 2021) et génère une modification de la trajectoire, de l'intensité et de la fréquence d'occurrence des tempêtes qui impactent la morphologie du littoral. Ces phénomènes sont statistiquement plus fréquents lors de la période hivernale (Trzpit, 1977). En effet, on peut identifier l'hiver 2013 - 2014 comme étant une période très morphogène en raison d'un recul majeur de 30 mètres du trait de côte à Soulac-sur-Mer, en Nouvelle-Aquitaine (Lerma et al., 2014).

Dans le cadre de ce changement global qui nécessite de repenser l'aménagement des territoires, la Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte (SNGITC), créée en 2012 et actualisée en 2017, a pour ambition de renforcer la connaissance sur le trait de côte et de favoriser la mise en place de stratégies locales pour adapter les territoires aux évolutions du littoral.

De ce programme d'action découle l'indicateur national de l'érosion côtière qui est l'outil développé depuis la mise en place de la SNGITC. Il révèle qu'à l'échelle de la France métropolitaine, 30km² de terre ont disparu en 50 ans et que 20 % des côtes sont en recul (Céréma., 2018). Des territoires sont plus affectés que d'autres et si certains sont à l'inverse en accrétion, la moyenne générale est en recul. De plus, selon l'échelle considérée, un territoire peut être globalement stable, mais connaître localement de très forts reculs (Céréma, 2018).

Ces outils d'aide à la décision sont élaborés dans le but de réguler la densification du bâti le long du littoral (la densité de construction sur le littoral est quatre fois supérieure à la moyenne nationale (Zaninetti, 2006)). Cette pression sociétale est responsable de la perturbation de la dynamique et des équilibres naturels (dégradation des habitats floristiques et faunistiques, accentuation de l'érosion côtière) ainsi que de l'accroissement du risque dans le cas où les infrastructures sont implantées dans des zones soumises à un ou plusieurs aléas (Juigner 2017).

Au regard de ces problématiques, les campagnes LIDAR réalisées chaque année à l'île d'Yeu, dans le cadre des missions d'observation de l'OSUNA (Observatoire des Sciences de l'Université de Nantes Atlantique), permettent de suivre la dynamique sédimentaire côtier de l'ensemble du littoral de l'île par une résolution spatiale de l'ordre de quelques dizaines de centimètres. Le programme de recherche « ODySéYeu » se focalise sur l'étude et le suivi de la dynamique côtière à l'île d'Yeu, et met en place de nouveaux outils et méthodologies collaboratives.

Ce stage de fin d'étude présente le projet universitaire « FortiPhi », qui s'inscrit dans la continuité de ces campagnes scientifiques menées actuellement à l'île d'Yeu. Il est porté par l'université de Nantes, et soutenu par l'ADEME, la région des Pays de la Loire, le Conseil Départemental de la Vendée, la Mairie de l'île d'Yeu, et la Fondation de l'université de Nantes.

Le projet est transdisciplinaire. Il propose de combiner la prospection géophysique et la connaissance des phases de construction des vestiges historiques au sein des massifs dunaires de l'île reposant sur le socle géologique.

Trois sites historiques situés le long du linéaire côtier de la côte nord-est de l'île ont été déterminés afin de mener la campagne géophysique et la recherche historique : Le fort Gauthier, la Pointe de la petite Conche et le fort Neuf.

Cette étude propose une méthodologie collaborative qui associe une pluralité d'acteurs. Les compétences et méthodes scientifiques de trois laboratoires ont été associées. Ainsi l'UGE (Université de Gustave Eiffel) qui a pour objectif de développer des méthodes d'auscultation géophysique de subsurface, met à disposition un radar géologique. L'IGARUN (Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes) est quant à lui, spécialisé en cartographie et en analyses sédimentologiques. Enfin, le laboratoire CreaaH, qui est une unité interdisciplinaire du CNRS, œuvrant pour la recherche en archéologie.

Ces compétences universitaires sont alliées au service patrimoine de la municipalité de l'île d'Yeu, à l'association « 1846 » spécialisée des fortifications littorales du XIX^{ème} siècle, et enfin aux propriétaires des trois sites historique étudiés.

Ce projet tentera de répondre à une interrogation majeure qui est : quelle est la géométrie de l'interface entre le milieu dunaire et le socle géologique sous-jacent ?

Deux hypothèses ont émergées quant à la configuration du sous-sol de la côte-est de l'île d'Yeu. Soit la géométrie du socle est en pente douce vers l'est (vers le continent), soit le socle géologique représente une surface plane avec une couche sédimentaire qui a fluctué durant les variations du niveau marin depuis le début du Quaternaire. Sachant que le plus haut niveau des pleines mers de vives-eaux correspond au niveau du socle géologique observé sur le site du fort Gauthier, si l'hypothèse d'un socle à surface plane est validée, quel serait le volume de sable stocké sur cette façade est de l'île ? Et comment évaluer le risque côtier face au réchauffement climatique ?

Pour répondre à ces problématiques, plusieurs objectifs ont été identifiés.

D'après les archives historiques, il s'agira de retracer l'histoire des fortifications de l'île depuis 4 siècles afin d'identifier les périodes de constructions sur les massifs dunaires des trois sites étudiés.

A l'aide de la méthode d'acquisition géophysique, il conviendra à la fois, d'identifier les corps sédimentaires et les ensembles remaniés et de déterminer la géométrie du toit du socle rocheux.

Enfin, le dernier objectif sera de déterminer les différentes phases de recouvrement des dunes autour des fortifications. Par l'interprétation de ces phases de croissances dunaires, une vitesse de sédimentation pourrait être évaluée pour comprendre les capacités de résilience de ce linéaire nord-est de l'île.

Cette estimation de la vitesse de régénération des massifs dunaires de l'île pourra ensuite être corrélée avec une chronologie d'aléas météo-marins qui auraient potentiellement impactés l'évolution dunaire au regard de leurs effets morphogènes.

Dans un premier temps, il sera opportun de se questionner sur le contexte général de l'étude en explicitant le cadre géographique et géomorphologique de l'île d'Yeu et son linéaire côtier nord-est.

Ensuite, l'histoire de la fortification littorale de l'île sera évoquée, puis un état de l'art sur la méthode géophysique appliquée à l'environnement côtier.

Le deuxième temps sera consacré à la méthodologie. Il s'agira de présenter les archives historiques permettant de déterminer des phases de fortifications, d'explicitier la méthode d'investigation du sous-sol

par radar géologique, et enfin d'exposer un inventaire des faciès géologiques observés sur les terrains d'études. C'est sur ces faciès que repose l'interprétation des profils géoradar.

Dans un troisième temps, il s'agira de communiquer les résultats concernant la chronologie des événements météo-marins depuis quatre siècles, ainsi que les aménagements militaires sur les trois sites fortifiés. L'interprétation des profils géoradar sera enfin interprétée.

Enfin, une discussion permettra de confronter les données géoradar avec celles prééxistantes et complémentaires provenant d'autres études. L'estimation d'une vitesse de recouvrement des dunes sera proposée, puis corrélée avec un premier inventaire recensant les occurrences marines qui auraient pu érodées les massifs dunaires de l'île

1. Contexte général de l'étude

1.1 Le littoral de l'île d'Yeu, un objet d'étude d'intérêt scientifique

1.1.1 Alimenter un observatoire de la dynamique sédimentaire en construction

ODySéYeu, est l'acronyme de l'Observatoire de la Dynamique Sédimentaire et des Environnements autour de l'île d'Yeu. Comme son nom l'indique, ce projet a pour principal objet d'étudier les mouvements sableux autour de l'île en réalisant un bilan sédimentaire permettant de déterminer les stocks de sable disponible à terre, sur l'estran mais également en zone subtidale.

La réalisation d'un tel bilan et l'étude des mouvements sableux à différentes échelles de temps permettront ainsi de mieux appréhender la résilience du littoral de l'île d'Yeu face à la problématique des risques côtiers. Ces risques sont expliqués par l'accroissement des enjeux liés à la densification du bâti et la pression touristique durant la période estivale et à l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des aléas météo-marins.

Aussi, dans un contexte de remontée du niveau marin, les études mises en place cherchent à connaître l'évolution des environnements de l'île et d'établir un diagnostic des facteurs d'érosion ou d'accrétion afin de proposer des actions adéquates pour chaque situation permettant de limiter l'érosion du trait de côte.

Toutefois, la collectivité de l'île d'Yeu ne bénéficie pas de « Plan de Submersions Rapides » de « Gestion du Trait de Côte » et de « Programmes d'Action de Prévention des Inondations ». L'insularité qualifiant cette collectivité de « commune isolée », Yeu ne fait partie d'aucun Etablissement Public de Coopération Intercommunale, et ne peut donc pas bénéficier d'un Plan de Prévention des Risques Littoraux.

ODySéYeu, à travers son expertise scientifique et son action participative, contribue à la gestion, et à la diffusion de l'information concernant les risques côtiers insulaires de l'île d'Yeu.

En effet, les particularités de ce projet de recherche sont la dimension collaborative impliquant une pluralité d'acteurs publics et privés et la dimension participative émanant d'une volonté d'intégrer pleinement les habitants de l'île dans la réalisation des études scientifiques. L'objectif à travers cette proximité avec les habitants est d'accroître la sensibilisation et les connaissances environnementales du territoire et des enjeux associés afin de favoriser des comportements durables sur le littoral.

De nombreux projets adjacents au projet FortiPhi sont en cours de réalisation dans le but d'alimenter ce futur « observatoire » de la dynamique sédimentaire.

Le dispositif « Sentinelles de la Côte » développé par l'équipe du projet ODySéYeu, souhaite établir un suivi à très haute fréquence de l'évolution géomorphologiques de 9 sites soumis à l'érosion côtière autour de l'île (le suivi des sites de la pointe de la petite Conche et le Puits Marie-Françoise situé à quelques dizaines de mètres de la batterie de la pointe de la Petite Conche, sont directement en lien avec le projet FortiPhi).

La méthode repose sur un scan 3D du site à partir de clichés photographiques depuis mai 2019. Au long terme, le projet mettra à disposition une application afin que chaque promeneur puisse participer à l'étude de l'évolution des sites.

Un projet prénommé APPISMIle étudie le facteur d'érosion des dunes à l'aide des mesures d'humidité et de résistivité électrique. Les structures dunaires de la pointe de la Petite Conche sont également l'objet d'étude de ce projet, ce qui le relie directement au projet FortiPhi.

1.1.2 Présentation de l'île d'Yeu

1.1.2.1 Aspects géologiques et géomorphologiques de l'île

L'île d'Yeu, située à une vingtaine de kilomètres au large du département de la Vendée, est partie intégrante du Massif armoricain (figure 1).

Celle-ci doit son existence au fait de se trouver au croisement de 2 anticlinaux : le pli anticlinal d'âge hercynien des Sables d'Olonne, lui-même situé au sud-ouest d'une zone synclinale d'âge briovérien de direction ouest nord-ouest à est, sud-est, et un anticlinal antérieur à la transgression du Jurassique inférieur venant de l'est, que l'on peut suivre dans le Bas-Bocage vendéen aux environs de Saint-Martin-Des-Noyers (Dupont et al., 1985).

Près de la côte sauvage, au sud-ouest de l'île d'Yeu, le flanc gneissique marque des pendages redressés à plus de 45°, alors que le flanc nord-est de l'anticlinal montre des pendages de 5 à 15°C (Mathieu, 1938).

Selon G.Mathieu (1938), il est nécessaire de s'intéresser aux dépôts des variations eustatiques quaternaires si l'on veut étudier la topographie de l'île d'Yeu. Les plateaux de l'île d'Yeu ont été sculptés par l'érosion durant l'étage Monastirien (défini par une ligne de rivage équivalent entre 18 et 20 mètres NGF). On trouve

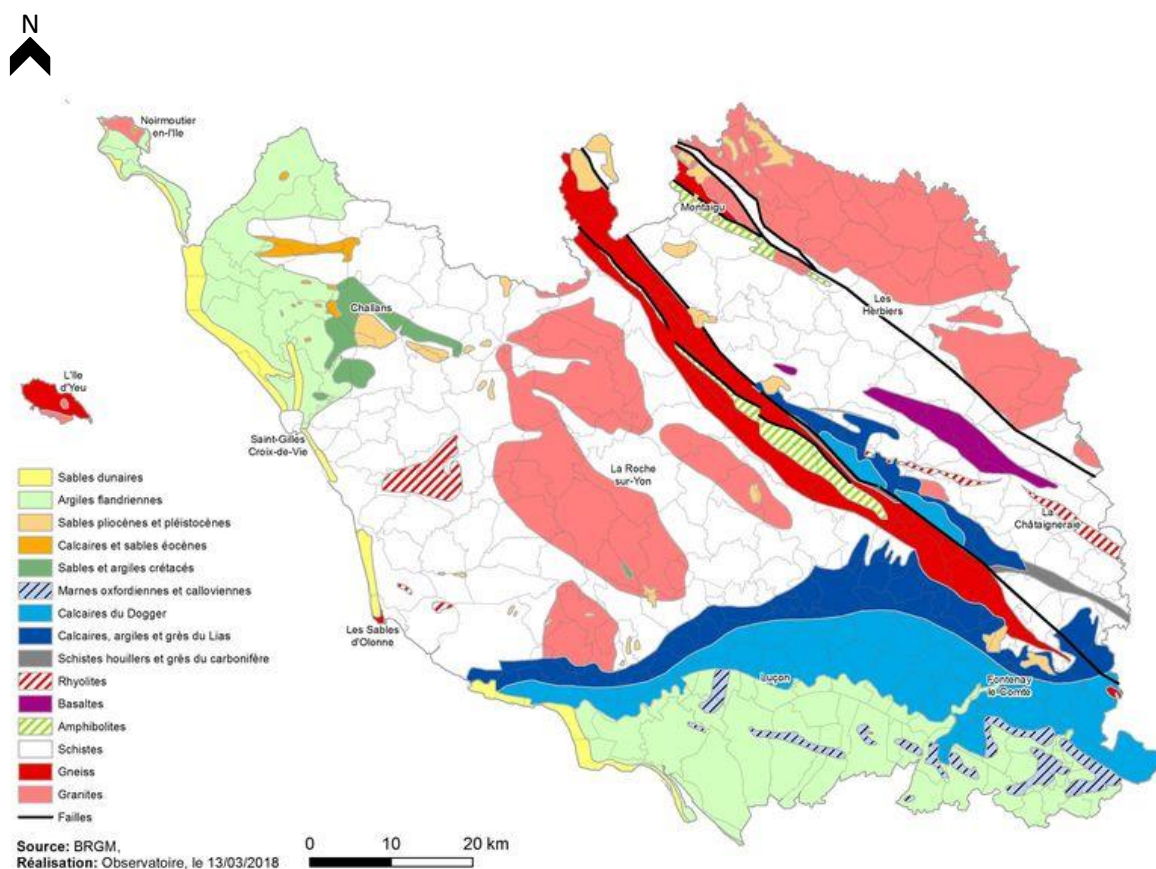


Figure 1 : Carte géologique de la Vendée, réalisée par le BRGM, 2018.

en particulier sur le littoral nord-ouest de l'île une structure sous-jacente à la dune représentant un paléosol¹ composé de dreikanter².

Deux versants caractérisent la topographie de l'île et sont séparés par une crête partant au Nord-ouest, du grand phare à 21 mètres d'altitude, qui traverse le plateau de Saint-Sauveur à 35 mètres d'altitude, pour gagner un autre point haut près du sémaphore de la Pointe de la Tranche (figure 2). Cette dernière butte domine à l'Ouest l'Anse des Vieilles (Mathieu, 1938 ; figure 2).

D'un point de vue géomorphologique l'île est protégée par des hautes falaises de gneiss au sud-ouest, et présente une côte basse, au nord-est, formée d'un système plages - dunes - marais, tournée vers le continent (figure 3). Les sables de ce secteur contiennent du calcaire en raison de la présence de débris coquilliers, d'où l'existence de plantes calcicoles sur l'île (Dupont et al., 1985)

¹ Sol dont les caractères sont dus à une évolution ancienne dans des conditions de climat et de végétation différentes de celles qui prévalent actuellement (George, 1970).

² Bloc façonné en pyramide (généralement à trois faces) par les vents (Wave, 1910).

Topographie de l'île d'Yeu et localisation des 3 fortifications militaires étudiées.

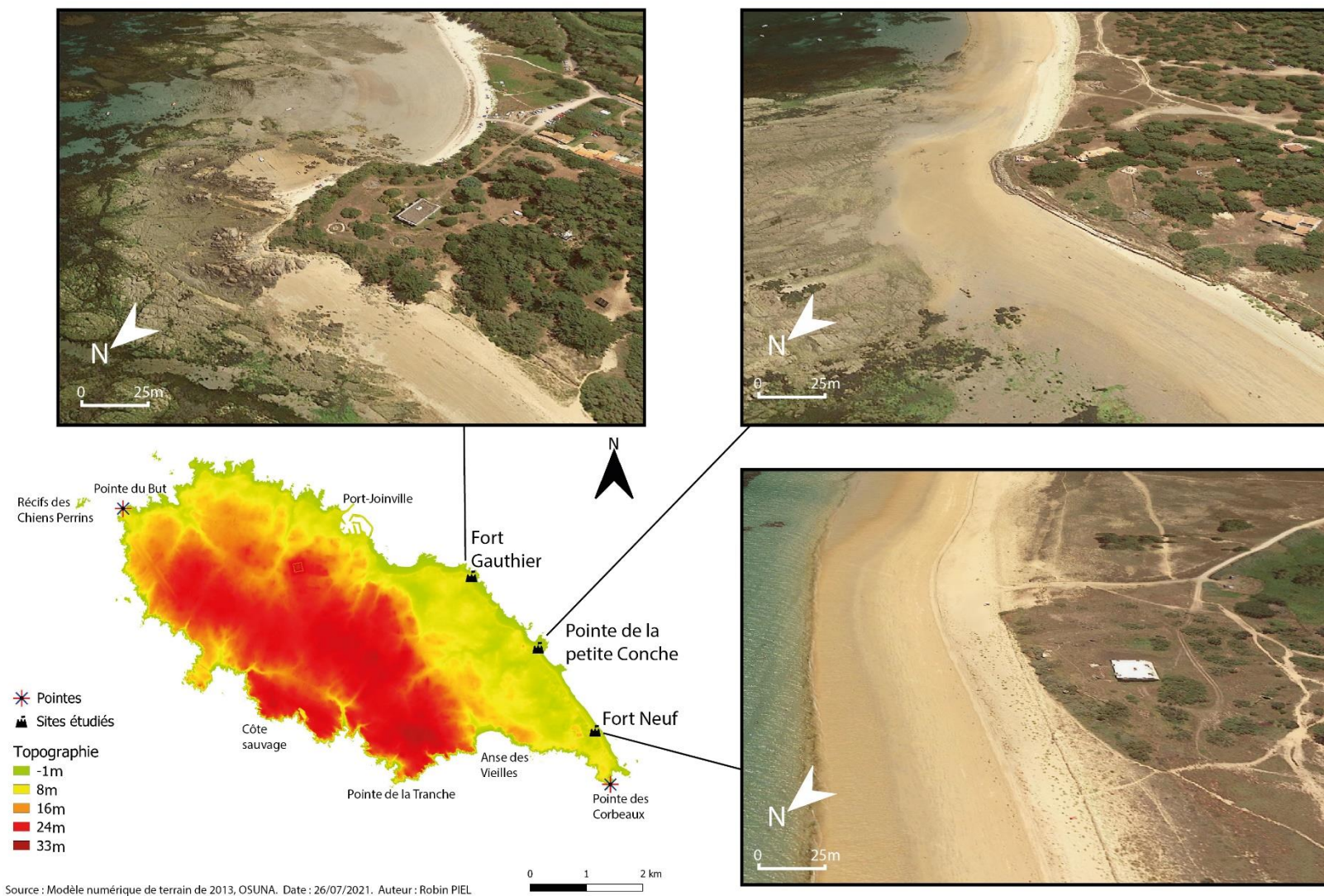


Figure 2 : Topographie et localisation des 3 sites étudiés. Les photos aériennes sont issues de GoogleEarth.

Sur le linéaire côtier à l'ouest de Port-Joinville (figure 2), au nord-ouest de l'île, les gneiss et les micaschistes présents sur l'estran à pente douce, plongent vers la mer. Cette configuration géomorphologique explique une côte plate avec une plateforme d'abrasion marine que l'on découvre lors des basses mers de vives-eaux, sur plusieurs centaines de mètres (Mathieu 1938).

Ces roches émergées de faibles profondeurs, forment de dangereux récifs entre l'îlot des Chiens-Perrins et la côte (récifs de Basse Flore, Grand Champ et le Petite Champ), ce qui expliqua le naufrage d'un certains nombres de navires.

L'île d'Yeu est étroitement liée avec le continent par un coureau (« sinuosité entre des bas-fonds et des rochers que l'eau recouvre » définition tirée du dictionnaire Larousse) caractérisé par une bathymétrie indiquant une profondeur maximale de 15 mètres.

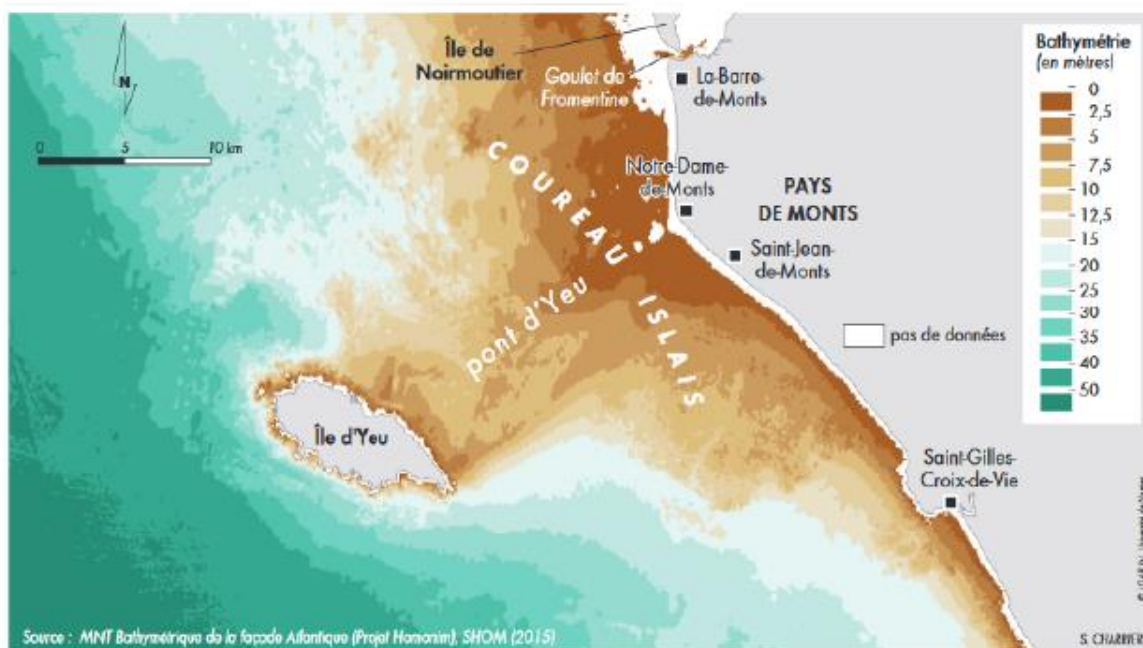


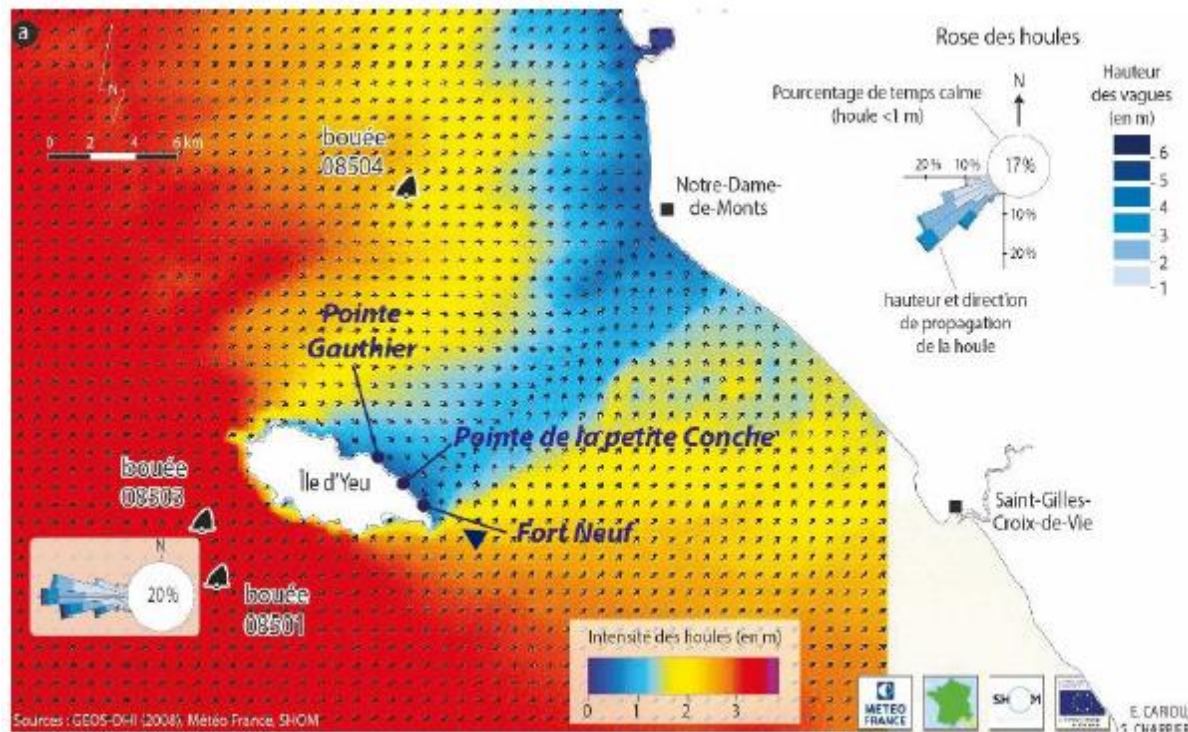
Figure 3 : Représentation du Pont d'Yeu, reliant l'île au continent durant des périodes d'abaissement du niveau marin. Cette distance pouvait être réalisée à pied par les hommes de l'époque jusqu'à la transgression d'il y a environ 7000 ans. Carte réalisée par S. CHARRIER, 2018.

Le plateau du Pont d'Yeu, partie intégrante des plateaux vendéens, forme un haut fond calcaire d'âge Éocène moyen (46-37 Millions d'années), et perpendiculaire au Coureau Islais. Comme dans la baie de Bourgneuf, les dépressions de ce seuil rocheux émergé sont perpendiculaires au littoral et correspondent à l'ancien réseau hydrographique incisé dans l'ensemble calcaire.

Les sédiments meubles en transits (graviers, graviers sableux, sables, sables fins (Datashom, 2013) comblent les dépressions de ce haut-fond, et sont peu présents sur le toit des plateaux, mais s'épaississent à l'approche du littoral des côtes du Pays de Monts, comme de l'île d'Yeu (Lemauff, 2018).

1.1.2.2 Contexte hydrodynamique et météorologique

Les données de houles sont actuellement mesurées à hautes fréquences par la bouée « 08504 » entre Noirmoutier et l'île d'Yeu (Cariou et al., 2017, figure 4). Comme dit précédemment, les houles dominantes sont de secteur ouest et les plus fortes proviennent essentiellement du sud-ouest. Lors de tempêtes hivernales, la hauteur des houles est régulièrement enregistrée à 9mètres.



Les vents dominants sont de secteurs sud-ouest à nord-ouest, et ceux les plus violents viennent des secteurs ouest et sud-ouest. Les données météorologiques indiquent que les vents d'ouest représentent 50% des observations, et ils constituent 75% des vents les plus violents de force 5 sur l'échelle de Beaufort, alors que les vents de secteur nord-est ne sont observés que pendant 24% des cas (Cariou et al 2017).

La dynamique sédimentaire au sein du coureau demeure stable du fait de la présence du Pont-d'Yeu et de la réfraction des houles dominantes (de nord-ouest au sud-ouest) à la rencontre des pointes nord-ouest (Pointe du But) et sud-est (Pointe des Corbeaux) de l'île. L'angle d'incidence des houles impacte l'amplitude de la diffraction lors de leur arrivée sur les 2 pointes de l'île. Cette configuration géomorphologique et océanographique génère un rabattage du flux sédimentaire sur le Pont-d'Yeu (Vanney 1977).

Sur le linéaire côtier nord-est de l'île, les courants de dérives littoral générés par cette diffraction des houles impactent les transferts de sables transversalement et longitudinalement et influent donc sur le stock sédimentaire des plages.

La marée est un facteur certes moins considérable que les houles dans le transport sédimentaire, cependant les derniers travaux de modélisation hydrodynamiques (Lemauff, 2018) démontrent un scénario de circulation du flux sédimentaires aux deux extrémités de l'île indiquant une forme circulaire de transport des matériaux.

La divergence des vecteurs de transferts de sédiments démontre une faible capacité de transport au nord, nord-est de l'île, dans le prolongement du pont d'Yeu, alors que la côte nord-ouest, indique à l'inverse un flux dominant généré par la convergence des paramètres hydrodynamiques (marée et vagues).

Le linéaire côtier à l'extrême sud-est de l'île, aux abords de la pointe des Corbeaux est, quant à lui, traversé par un flux sédimentaire du nord-ouest au sud-est.

Ces résultats déclinent une circulation majeure avec pour référence une marée moyenne et des conditions de vagues particulières. Selon ces conditions, le transport des sédiments peut s'affaiblir sur une partie ou la totalité de la façade nord de l'île (tournée vers le continent), ce qui expliquerait la présence de bancs de sables immergés, comme celui de la Sablaire, entre le port Joinville et la Pointe Gauthier.

1.1.2.3 Les risques côtiers à l'île d'Yeu

Les risques côtiers à l'île d'Yeu ont récemment fait l'objet de plusieurs travaux de master (Bozec, 2016 et Giraud, 2020). La côte nord-est de l'île étant la zone d'étude où se situe les ouvrages fortifiés, il est nécessaire de présenter succinctement le risque d'évolution du trait de côte qui affecte directement ces enjeux bâtis d'intérêt patrimonial.

Le risque peut être défini comme une « confrontation systémique entre un système social et un système «naturel» à un instant donné » (définition repris de Robin, 2002). Dans le cadre du contexte géographique de l'étude, le risque côtier peut être représenté à partir de la formule : $R = f(A, V)$ où le risque est fonction de l'aléa ou des aléas (noté A), et de la vulnérabilité (notée V) d'origine naturelle ou artificielle.

Le contexte géographique de l'île d'Yeu est singulier, car le versant nord-est identifie une vulnérabilité des enjeux plus importante liée à une zone topographiquement basse. Une « zone basse »³ est une surface terrestre située sous une cote de référence, principalement employée pour caractériser le risque de submersion marine (Juigner, 2017). Le risque de submersion marine (« inondation temporaire des zones côtières par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques » définition reprise de Mercier et al. 2013) survient lorsque, sous l'effet de forçages naturels et/ou anthropiques, la mer inonde des zones basses habituellement hors de la zone d'envahissement de celle-ci. Il y a conjonction de plusieurs phénomènes : l'élévation du niveau marin généré par un creux barométrique au passage d'une dépression, la poussée d'un vent d'afflux et l'action de la houle dans la zone de déferlement. La submersion est caractérisée par deux phénomènes : le « set up », symbolisant l'élévation du plan d'eau par la houle, et le « run-up » qui est le niveau d'eau maximum atteint par les vagues (Maanan & Pouzet 2019). La mer envahie à la fois par débordement ou par paquet de mer et peut dans certains cas générer des brèches dans des structures naturelles (dunes) ou anthropiques (digues).

³ Selon l'Observatoire National de la Mer et du Littoral (ONML), « les zones basses sont définies comme l'ensemble des territoires littoraux dont l'altitude est inférieure aux niveaux atteints par la mer lors de conditions extrêmes (occurrence centennale)».

L'évolution du trait de côte (linéaire côtier soumis à des phénomènes d'érosion et d'accrétion) s'étudie à partir de différents forçages, à des échelles temporelles différentes. Bien que depuis la moitié du XXème siècle, la tendance évolutive mondiale indique un recul majeur des littoraux vers l'arrière-pays (Bird & Dewey, 1970). Cette tendance peut être expliquée par les conditions hydrométéorologiques (tempêtes, pluviométrie), la remontée eustatique, éventuellement la biogéomorphologie (Pirazzoli, 1993), l'impact anthropique ainsi que la dynamique sédimentaire locale qui jouent un rôle prépondérant.

En effet, l'érosion du trait de côte est définie comme étant un phénomène d'origine naturelle ou anthropique, générant des effets positifs sur les milieux et les écosystèmes, mais également des effets négatifs qui présentent aussi un risque pour les populations (Observatoire des Risques de la Nouvelle-Aquitaine). Ce phénomène peut être accentué par l'interruption des échanges sableux entre l'estran et la dune par l'artificialisation du trait de côte, provoquées par des aménagements de défense contre la mer (brise lame, épis, enrochement), les extractions de sédiments marins, et les changements d'occupation des sols dans les bassins versants (Meur-Férec et Morel, 2004 ; Sabatier et Suanez, 2003),.

Le trait de côte de la côte nord-est a été étudié à une échelle temporelle de 61 ans, à l'aide des photos-aériennes permettant l'analyse diachronique de l'évolution du littoral (figure 5). On peut clairement observer un contraste à l'extrême sud-est de l'île au regard d'une zone qui connaît le plus fort recul, située au fort Neuf, avec plus de 400 m² de surfaces perdues et un transect déclinant une période de forte accrétion (plus de 400m²) au nord-ouest de ce même site.

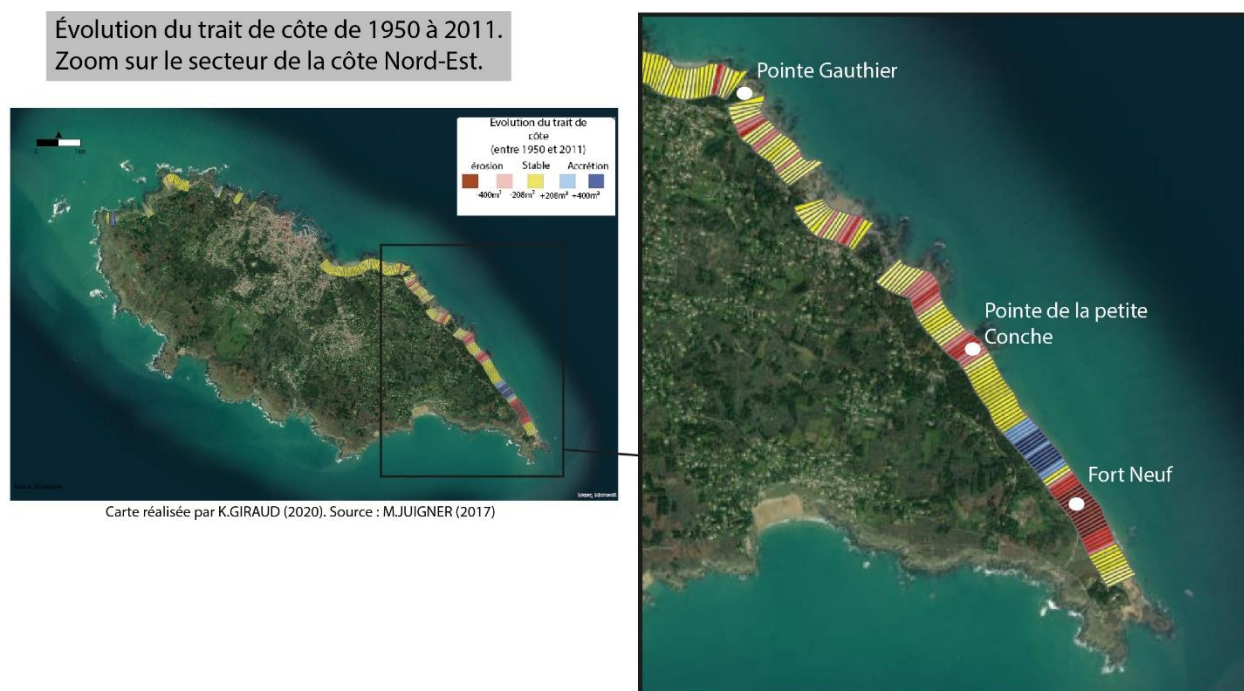


Figure 5 : Évolution du trait de côte de 1950 à 2011 de la côte nord-est de l'île d'Yeu. Carte reprise de l'étude de K.Giraud (2020), réalisée à partir des données de M.Juigner (2017).

La pointe de la petite Conche soumise à la même dynamique sédimentaire locale connaît une perte de sable conséquente. Plus au nord, vers la pointe Gauthier, on trouve un linéaire côtier majoritairement stable (figure5).

On note la dichotomie évolutive des deux transects du linéaire côtier à l'extrême nord-est de l'île. Cela prouve que les facteurs d'érosions à l'échelle d'un même linéaire côtier régi par une dérive littorale similaire divergent.

Le travail réalisé dans le cadre du projet FortiPhi contribue à l'étude de M.Juigner (2017) en particulier au Fort Neuf. Les résultats apporteront des informations importantes sur le recul important enregistré dans les années 1980 justifiant les transects coloriés en « rouge » (figure 5).

Les études diachroniques de l'évolution du littoral à très hautes fréquences comme se propose de réaliser ODySéYeu à travers le programme « Sentinelles de la côte », contribuera également à actualiser cette première analyse de l'évolution du trait de côte au nord-est de l'île.

1.2 Une île marquée par des aménagements militaires côtiers depuis le XVIIème

Du milieu du XVIIème et cela jusqu'au XXème siècle, les fortifications militaires de l'île d'Yeu sont l'œuvre d'une volonté politique d'armer les littoraux pour faire face à l'ennemi. Ces structures ont été modifiées et aménagées selon leur importance stratégique sur l'île au cours de 4 périodes historiques

1.2.1 Premières redoutes sous le règne de Louis XIV (1643-1715)

Les premières fortifications côtières sont édifiées en 1657 sous les ordres de Nicolas Fouquet, surintendant des finances du cardinal Mazarin, lui-même 1er ministre de Louis XIV. En effet, Nicolas FOUQUET, accusé par le Roi d'avoir fortifié sa seigneurie de Belle-île en 1662, est également responsable des premières édifications militaires à l'île d'Yeu (Petitfils, 2002). Au cours de ses nombreuses acquisitions de terres en Bretagne, ce dernier rentre en affaire avec sa cousine, Jeanne Pélagie de Rieux, qui, depuis la mort de son mari, Jean-Emmanuel D'ASSERAC, demeure la dame d'Yeu. Cette dernière, assistée par le surintendant Desnoyer, gouverneur de l'île d'Yeu, suit les conseils de Nicolas FOUQUET et fait construire « 7 redoutes⁴ et figures triangulaires » sur la côte nord de l'île en guise de premiers points d'observations sur le continent suivant.

Les premières fortifications ont en effet, été édifiées sur la côte nord-est (figure 7), car cette portion du littoral, composée d'un estran sableux à pente douce, et abritée des forts vents et houles d'ouest, est la seule possibilité d'accoster sur l'île pour les bateaux ennemis.

A la même année, une grande digue de protection fut construite au nord-ouest du port munie à son extrémité de trois canonnières, par Charles Logier, ingénieur à Amsterdam. Cependant ces coûts considérables, conduits par Nicolas Fouquet obligèrent Jeanne Pélagie de Rieux à vendre l'île à la sœur de la première femme de son époux, Madeleine Mangot (Coutureau et Maheux, 1994).

⁴ Une redoute est « *un ouvrage fermé de petite taille et ne disposant pas de l'autonomie d'un fort* » (définition reprise du site internet de l'association « 1846 », <https://association-1846.over-blog.com/glossaire.html>)

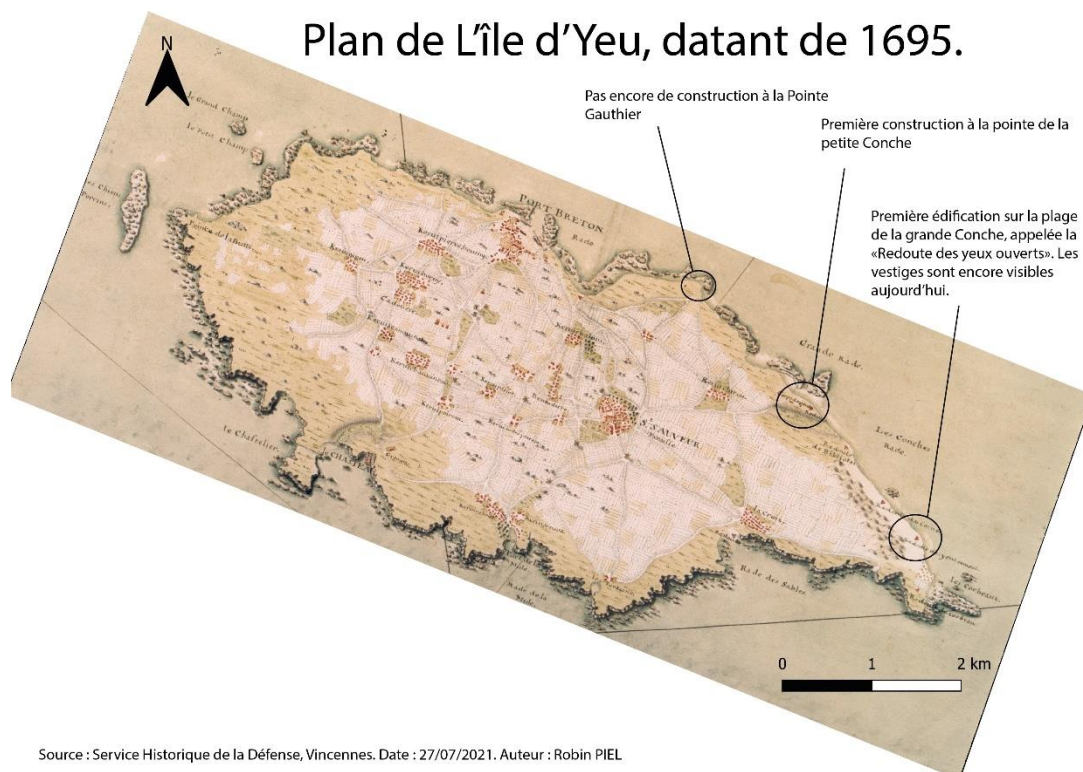


Figure 6 : Situation des premières fortifications côtières mises en place par Mme Pélagie de Rieux sous les conseils de Nicolas Fouquet. Les premiers travaux de fortifications à la Pointe Gauthier ne sont pas commencés. Réalisation Robin PIEL.

La guerre de Hollande (1672-1678) et la guerre de succession d'Espagne de 1701 à 1714 est une période menaçante pour le Royaume de Louis XIV qui fait face à des soulèvements des populations protestantes françaises, alliées aux troupes étrangères, notamment hollandaises. Pour cela, le lieutenant Charrité, pour le roi à l'Île d'Yeu, avait fait construire en 1689, de chaque côté du port deux batteries appelées « fort Saint-Jean » et « fort Blainville ». Ces batteries, également établies sur les conseils de Nicolas Fouquet, contenaient 40 canons, mais sont aujourd'hui détruites en raison de leur construction sur le sable.

1.2.2 Défense côtière durant la Restauration (1715-1830)

Au début du XVIII^{ème} siècle, le contexte géopolitique instable caractérisé par de nombreux conflits maritimes et des débarquements anglais pendant plus d'un siècle détermine la politique de défense des côtes (Coutureau et Maheux, 1994), les batteries côtières occupaient surtout les sites les plus menacés où l'on avait établi les premiers ouvrages au XVII^{ème} siècle. Cependant on voit une densification des réseaux de batteries, sur l'île d'Yeu comme sur Noirmoutier du début du XVIII^{ème} siècle au milieu du XIX^{ème} siècle. La multiplication de ces aménagements militaires côtiers serait justifiée par une artillerie qui conserverait une portée de tir réduite. Cette carence est toutefois compensée par un accroissement des effectifs militaires dans les fortifications, mais aussi de leur entretien régulier ainsi que de l'amélioration des équipements.

Malgré un réarmement en 1747, les pièces d'artilleries des batteries côtières de la côte nord (de la Pointe du But à celle des Corbeaux) de l'île d'Yeu sont défectueuses et de petits calibres. On constate une grande différence entre les aménagements réalisés sur le littoral de Noirmoutier qui bénéficie, contrairement à l'île d'Yeu, d'une restructuration du relief et du réarmement des batteries (creusement de tranchée, établissement d'un parapet gazonné, installation de canons ; Coutureau et Maheux,. 1994).

Durant la guerre de Sept Ans s'achevant par la victoire Anglo-Prussienne (1756 - 1763), et la défaite de la France, l'île d'Yeu est marquée par l'invasion anglaise en décembre 1759. 11 canons furent encloués, rendant la défense pratiquement inexistante.

La période qui s'en suit traduit de nouveau une dégradation de l'état des batteries côtières de l'île, car en 1785, le domaine royal des seigneuries d'Yeu rachète la totalité des fortifications. En 1788, on rapporte de nouveau la vétusté des ouvrages militaires de l'île (Coutureau et Maheux,. 1994). Aucune amélioration des équipements n'a été réalisée avant la Révolution.

En 1795, le comte d'Artois (futur Charles X de France) rejoint l'île d'Yeu avec 6000 hommes, comprenant des anglais et émigrés ayant fuis la Révolution, et l'occupèrent de septembre à décembre de la même année (Sutherland, 1973).

Durant cette occupation, les anglais commencèrent à implanter 17 batteries (Coutureau et Maheux,. 1994). L'île fut reconquise une fois que le royaume anglais demanda le retour de la flotte, et on proposa de réduire les ouvrages de défenses militaires à 8 ou 10, mais de construire une fortification aux abords de Port-Joinville.

En septembre 1803, le général Bertrand, sous l'ordre de Napoléon 1er durant le Premier Empire, eu pour ordre de réorganiser la défense française. Dès lors, 12 batteries côtières, dont 6 sur la côte nord-est furent rétablies en restaurant les ouvrages anciens⁵.

Le projet prévoyait également la construction d'un ouvrage central (Fort de Pierre-Levée) servant à assurer la défense du port.

Autour de 1820-1825, on compte 12 batteries côtières désarmées depuis 1815 à l'île d'Yeu. Ces ouvrages étant désormais d'une conception obsolète datant du XVIIIème et ne répondant plus aux enjeux militaires actuels. Les batteries étaient composées d'un parapet (*partie supérieure d'un rempart qui couvre les défenseurs de par-dessus laquelle ils font feu*, définition reprise du site « Histoire et Fortification ») formé par des monticules de terres ou de sables, ouverte à la gorge (partie d'une fortification non construite), certaines étaient équipées d'une maçonnerie et possédaient des abris à munitions et provisions isolés, et rarement voûtés.

1.2.3 Époque napoléonienne (1841-1885)

Le Maréchal Soult, ministre de la Guerre sous le règne de Napoléon III, créa en 1841 une commission mixte appelée « Marine-Génie-Artillerie » pour réorganiser la défense du littoral et l'armement des côtes de France.

Cette commission définit 3 types de réduits de batterie (*retranchements aménagés dans un ouvrage extérieur, en l'occurrence ci, en forme de demi-lune* ; définition reprise du site « Fortification et Mémoire ») résultant d'un modèle standardisé de réduit spécifique à la défense des côtes.

Le type de réduit utilisé pour fortifier les ouvrages de défenses de l'île d'Yeu est le « corps de garde crénelé », qui lui-même est classé en 3 sous-types. Dans le vocabulaire de la fortification bastionnée, un corps de

⁵ Les sources n'indiquent pas le nom des ouvrages de défense rétablies.

garde est « une construction militaire protégeant l'entrée d'un fort souvent située au-dessus de l'unique pièce fortifiée » (définition reprise du site Fortification et Mémoire⁶).

Le 1er type de corps-de-garde crénelé est prévu pour soixante hommes avec pour armement douze canons, le 2ème type, pour quarante hommes et armé de huit canons, et enfin le 3ème type pour vingt hommes avec pour armement quatre canons. Les projets de constructions des corps-de-garde peuvent être modifiés, en termes de contenance d'homme et de nombre de canons installés.

Les batteries côtières, durant l'époque Napoléonienne, sont caractérisés par des modalités de constructions spécifiques. En effet, les projets de constructions devaient être en adéquation avec « l'instruction des batteries de côtes », qui est un document administratif datant de 1850, signé par le ministère de la guerre et l'inspecteur générale de la défense des côtes concernant la construction des parapets, leurs dimensions, reliefs et talus.

Par rapport aux matériaux utilisés pour la construction, les parapets seront toujours en terre et purgés de pierres et de cailloux aux talus extérieurs et intérieurs, principalement dans la dernière épaisseur. Ceci permet d'éviter la projection d'éclat de cailloux en cas d'impact d'obus ou de balles sur la construction



Figure 7 : Exemple d'un parapet en terre d'époque Napoléonienne à la Bastille de Grenoble. Photo tirée du site internet de l'association « 1846 ».

Le parapet est composé de deux talus (figure 7), un talus abrupte extérieure (appelée « plongée ») qui lui correspond, dans le cas des batteries côtières, à un escarpement face à la mer, à proximité de la dune. Le talus intérieur (tourné vers le continent) est quant à lui plus long. Il est construit en plusieurs niveaux, appelées «

plateformes en terre-plein ». Ces plateformes sont établies à partir du mur de parement qui est composé de pierre taillée. Elles sont parfaitement horizontales, en terre, et leur largeur varie selon l'artillerie déployée sur la batterie (figure 8).

Le premier niveau de la plateforme est généralement à 2m en contrebas de la crête du talus intérieur pour protéger les canonnières des coups de l'ennemi (figure 8).

L'espacement entre deux plateformes est généralement incliné de 3.4 mm de pente tous les mètres afin de faciliter l'écoulement des eaux.

⁶ <http://fortificationetmemoire.fr/que-cherchez-vous/dictionnaire/>

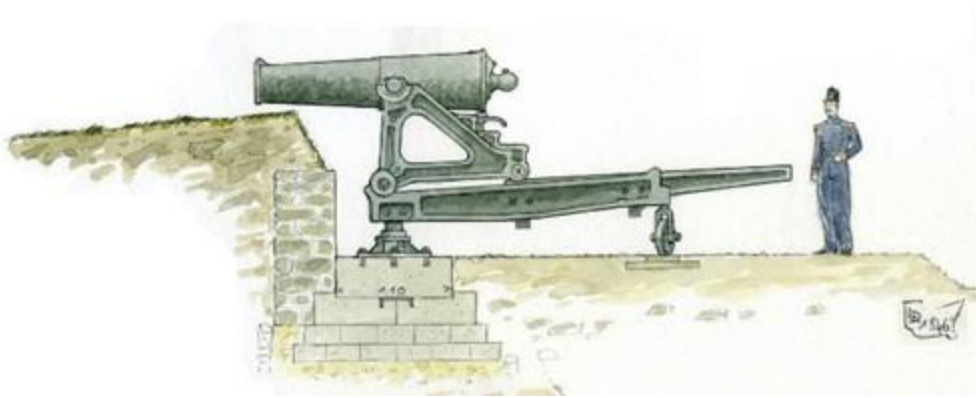


Figure 8 : Coupe d'une batterie côtière d'époque Napoléonienne : une plateforme en terre-plein est aménagée d'une artillerie d'obusier. Dessin réalisé par Lionel Duigou.

Ces règles de constructions indiquent également les actions contre l'érosion éolienne des dunes, sur lesquelles sont établies les parapets. Des « saucissons » (*branchages compactés pour combler les fossés* ; définition tirée du site internet de l'association « 1846 ») d'une hauteur de 65cm sont utilisés pour limiter l'érosion sur les terrassements nouvellement édifiés. Le gazonnement des talus était également employé afin de ne pas laisser à nu le sable et ainsi éviter la déflation éolienne.

Les batteries côtières de l'île furent conservées jusqu'en 1885, qui marqua le début de la « crise des obus torpilles » (invention de nouveaux obus destinés à paralyser ou à détruire ces ouvrages modernes) et imposa le déclassement de nombreux ouvrages devenus obsolètes. Cette commission de déclassement, d'après la loi du 27 mai 1889, a déclassé tous les ouvrages de défenses côtiers de l'île d'Yeu. Une décision ministérielle du 1er avril 1890 demande la conservation des batteries en guise d'éventuels casernements en temps de guerre.

Peu de temps après, le fort Neuf (anciennement nommé la « redoute des Yeux Ouverts ») est effectivement réquisitionné durant la Première guerre Mondiale pour établir des communications à télégraphie sans fil.

1.2.4 Occupation allemande (1940-1945)

La présence des allemands sur l'île d'Yeu depuis 1940 est expliquée par le « Mur de l'Atlantique », qui est un important système de fortifications côtières s'étendant de la frontière hispano-française jusqu'au nord de la Norvège. Cette limite de défense est destinée à empêcher une invasion du continent par les Alliés depuis la Grande-Bretagne. C'est au début de l'année 1943 que commencèrent les travaux de fortifications des batteries côtières à l'île d'Yeu.

En soit, les constructions durant la période allemande, ne furent pas conçue de manière privilégiée car la situation de l'île n'était pas comprise dans la zone de forteresse de la base sous-marine de Saint-Nazaire. Par ailleurs, le rôle de l'île d'Yeu s'est réduit seulement à la simple surveillance de la route côtière de La

Rochelle à Saint-Nazaire. Les armements sont donc moins conséquents qu'à Noirmoutier en raison de la moindre importance géostratégique de l'île d'Yeu.



Figure 09 : Défenses militaires allemandes à l'île d'Yeu. Carte provenant du rapport Delpuech entre 1952 et 1956 Modifiée et tirée de Coutureau et Maheux (1994).

Les batteries aménagées d'artilleries furent au nombre de 3 (Fort Gauthier, Chiens-Perrins et Pointe de la



Figure 10 : Mise en place de l'artillerie sur le site de l'ancien réduit de la Pointe Gauthier par les allemands en 1943. Photo extraite du Mur de l'Atlantique en Vendée. Tirée de Chazette, 2008.

grande Conche). Le reste des sites (Marais Salé, plage des Roses, anse des Vieilles, pointe du Chatelet, port de la Meule, plage de Ker Chalon) est équipé de mitrailleuses, et de canons anti-aériens.

Implantée autour du fortin, la batterie de la grande Conche, codée « Gleiwitz » par les allemands, en raison de son armement, composé de trois canons de 7,5 cm F.K.231 (canon de campagne, créé en 1938) sur plates-formes bétonnées (canon

de campagne, créé en 1938), garde le passage entre l'île et la côte.

La défense est aussi complétée par des obstacles de plage, un champ de mines et un canon de 5 cm « Kwk » (canon pour véhicule de combat) sous casemate légère couvrant le littoral de la côte nord-est (Chazette, 2008).

A la pointe Gauthier, les allemands équipent également la batterie, codée « Essen » en raison de son armement, d'une artillerie composée de trois canons de 7,5 cm F.K.231 (figure 10) installés sur plates-formes bétonnées autour de l'ancien réduit napoléonien. A l'ouest, un projecteur de 150 cm permet le tir de nuit et une soute à munition est construite sous forme de casemate⁷.

Lors de la commission de déclassement et d'aliénation des ouvrages militaires de 1946 à 1947, les fortifications militaires côtières de l'île sont vendues par les domaines, et deviennent des propriétés privées. Depuis, elles ont subi des travaux destinés à transformer ces infrastructures militaires en habitations secondaires. Dans le cas du fort Neuf et de la pointe de la petite Conche, des aménagements destinés à prévenir l'érosion côtière ont également été mis en œuvre. En effet, un enrochement au pied de la pointe de la petite Conche a été implanté en 2010.

1.3 La géophysique appliquée aux risques côtiers

1.3.1 La prospection géophysique

1.3.1.1 Définition et origine

La géophysique est une branche des géosciences qui examine la constitution interne de la Terre ainsi que tous les phénomènes sismiques, électriques, thermiques et magnétiques qui se produisent sur Terre. Elle aborde des sujets techniques et produit des cartes géophysiques. On peut noter 3 champs d'applications. La géophysique interne, la géophysique des couches-limites et la géophysique externe. Dans le cas de cette étude, c'est la géophysique appliquée (qui est une sous discipline de la géophysique interne aux études environnementales ; Chouteau, 2002) qui sera mise en œuvre.

La discipline est apparue entre 1918 et 1939, on doit l'invention de cette branche de la géophysique à Conrad et Marcel Schlumberger, qui ont eu l'idée de mesurer les propriétés électriques et physiques du sous-sol d'un terrain afin de mieux le caractériser.

L'exploration du sous-sol en géophysique appliquée peut être étudiée par de nombreuses méthodes, utilisant chacune un appareillage spécifique. Les résultats obtenus sont à but pratiques et peuvent donc être employés dans de nombreux champs de recherches scientifiques : la recherche de matières premières (pétrole, eau, minerais), la recherche de dépôts de stockage, investigation de sites contaminés, études géotechniques et archéologiques.

⁷ Petit ouvrage fortifié à l'épreuve des bombes et des obus (Abellio, 1946)

1.3.1.2 Matériels déployés pour les études en géophysique appliquée

Ici, le but est de présenter les différentes méthodes de sondage de la subsurface. Seuls les appareillages utilisés dans le cadre des campagnes scientifiques d'ODYséYeu seront explicités. Cette liste des appareillages utilisés en géophysiques appliquées, n'est en aucun cas exhaustive.

Le radar géologique

Le géoradar (Ground Penetrating Radar (GPR)) est un appareil de prospection géophysique utilisé dans l'analyse de la proche subsurface, selon la bande de fréquence de l'antenne utilisée (Neal, 2004). Cette bande de fréquence radio peut varier entre 10 et 1000 MHz voire 2000 MHz et son fonctionnement s'appuie sur l'émission, la propagation, la réflexion et la réception d'ondes électromagnétiques (EM) dans la bande des fréquences radio (10- 1 000 mégahertz (MHz ; Neal, 2004 ; Dallaire, 2010).

L'antenne du géoradar génère un pulse électromagnétique du fait de la circulation accélérée d'un courant électrique. Ce courant est une impulsion temporelle rapide, de l'ordre de la nanoseconde (valant 10^{-9} seconde), et l'énergie se propage selon une onde pénétrant dans le sous-sol, mettant ainsi en place un champ électromagnétique propagatif.

Selon la lithologie du sous-sol, ainsi que de la fréquence de l'antenne utilisée, la profondeur d'investigation possible par l'onde radar peut varier entre quelques centimètres et plusieurs mètres de la subsurface. La fréquence de l'antenne choisie dépend des objectifs de l'étude ; autrement dit, si l'on s'intéresse à la très proche subsurface (jusqu'à 1 ou 2 mètres) la fréquence utilisée sera comprise entre 400MHz et 1GHz, alors que les investigations plus profondes (jusqu'à 10 mètres) utiliseront une gamme de fréquence plus basse entre 500 et 10Mhz.

Lors de la propagation de l'onde dans le milieu, celle-ci rencontre une interface entre différents matériaux de propriétés diélectriques variables (Annan, 2009), on parle ici de paramètres électromagnétiques (perméabilité magnétique (μ), la permittivité diélectrique (ϵ) ainsi que la conductivité électrique (σ)). Alors, à la rencontre d'un contraste de ces propriétés, une fraction de son énergie est réfléchi. L'antenne réceptrice enregistre alors cette partie du signal électromagnétique par le biais du contraste de l'impédance électrique (mesure de l'opposition d'un circuit électrique au passage du courant alternatif en son sein (Cassidy, 2008 ; Annan, 2009)).

Les données sont représentées sous forme de signaux constitués par l'amplitude du champ électrique reçu en fonction du temps d'enregistrement pour chaque position d'antenne le long du profil de mesure selon un échantillonnage spatial régulier.

Visuellement, le profil de mesure obtenu est représenté en section temps-distance avec le temps (en ns) sur l'axe des abscisses et la distance parcourue en surface (en mètre) en ordonnée. L'axe vertical indique le temps de l'onde à parcourir en aller-retour entre les antennes et les différentes composantes de la lithologie. Il est nécessaire ensuite de traiter les données afin d'estimer la vitesse de l'onde au sein du milieu investigué et reconstruire la géométrie spatiale des interfaces en profondeur (Bristow 2009 ; Jol et Bristow 2003).

Le géoradar étant l'outil employé dans cette étude, il s'agira d'évoquer plus en détail cette méthode de prospection géophysique au cours de la deuxième partie « Matériel et méthode ».

La méthode électrique.



Figure 11 : Resistivimètre déployé par Pascal LUTZ (Université de Beauvais) sur la plage des Roses à l'île d'Yeu, dans le cadre du projet APPISMILE. Photo prise par Pascale LUTZ.

Les profils géoélectriques sont acquis par la mesure de résistivité électrique du sol (exprimé en Ohm/m) qui est sa capacité à s'opposer au passage d'un courant électrique.

Afin de recueillir ces données, un courant électrique est injecté dans le sol grâce à des électrodes placées à un intervalle constant, qui sont elles-mêmes raccordées à la bobine où le courant électrique se propage.

La résistivité électrique du sol dépend de plusieurs facteurs : la nature du sol que l'on cherche à caractériser (texture, granulométrie, profondeur d'apparition d'hétérogénéité), et les propriétés physico-chimique (l'état hydrique, la température, et la structure (surtout dans des environnements où l'horizon de surface a été tassé par des véhicules ; Turu, 1997).

Les profondeurs d'investigation varient en fonction des propriétés lithologiques du sol, le courant se propagera plus profondément dans un terrain conducteur que dans un terrain résistant. Ainsi un sol cohérent (sol granitique) aura une résistivité électrique élevée, tandis qu'un sol composé de matériau plus fins (argiles) aura une résistivité faible.

Cette méthode permet de détecter les failles géologiques, ou d'identifier les circulations hydriques dans le sous-sol.

La sismique

La sismique est une technique de mesure indirecte qui consiste à enregistrer en surface des échos issus de la propagation dans le sous-sol d'une onde sismique provoquée artificiellement (Nouzé et Chauchot, 1999). Ces échos sont générés par les hétérogénéités du sous-sol. Le passage par exemple d'une couche d'argile à une couche de sable dans une colonne sédimentaire va se traduire par la présence d'un réflecteur sur les enregistrements.

L'avantage de cette méthode par rapport aux autres méthodes géophysiques réside, d'une part, dans sa capacité à prospecter aussi bien à terre qu'en mer, et d'autre part, dans sa très haute résolution. Cette dernière dépend de la longueur d'onde dominante du signal générée par l'onde sismique.

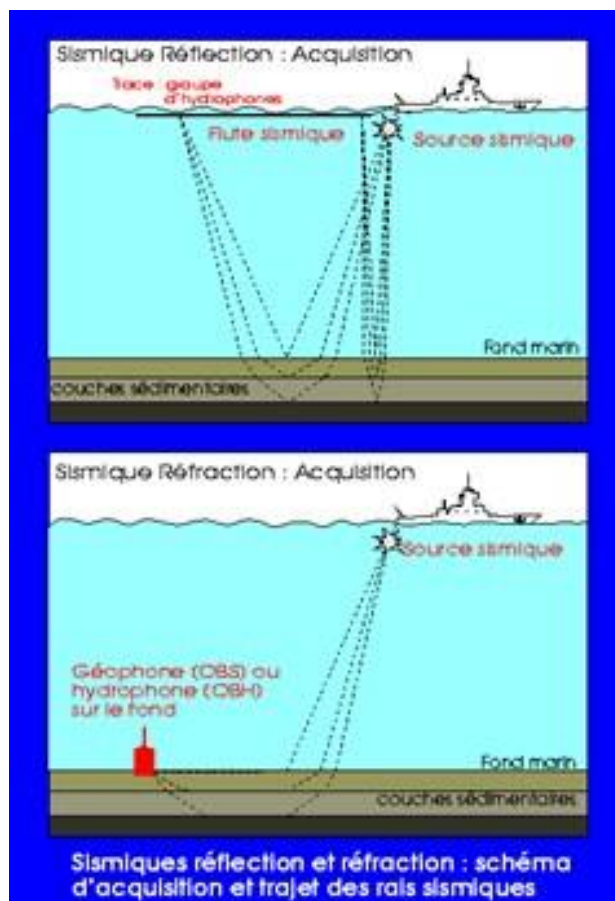


Figure 12 : Schéma décrivant les deux systèmes de propagation de l'onde sismique en milieu marin. Illustration tirée du site de l'IFREMER.

En effet, en sismique marine, 2 systèmes de propagation de l'onde sont utilisés. Dans le cas de la sismique de réflexion, la source de l'onde située à l'arrière du bateau émet un signal qui réfléchit sur le fond marin et est réceptionné par un groupe d'hydrophone en flottaison. Dans l'autre cas, la source d'émission de l'onde sismique émise est réceptionnée par un Géophone ou Hydrophone placé sur le fond (figure 12).

Le temps d'arrivée de l'écho permet de situer la position de cette transition dans l'espace, et son amplitude permet d'identifier certains paramètres physiques des milieux en interaction. Les études sismiques fournissent une image de la structure du sous-sol et dans certains cas des informations sur sa nature.

Cette méthode géophysique est présentée ici car une campagne scientifique du projet ODySéYeu, basée sur des mesures sismiques marines a été menée en 2018 au large de l'île d'Yeu à l'aide du bateau Halieutis d'Ifremer. Ces mesures avaient pour principal objectif d'identifier les potentiels stocks sédimentaires présents en zone sous-marine.

1.3.2 Contribution à l'étude des systèmes dunaires côtiers des Pays de Monts et de l'île d'Yeu par méthode géophysique

En termes de risques naturels, les dunes bordières présentes en Pays de Monts comme sur l'île d'Yeu contribuent à la résilience du littoral face aux aléas de submersions marine et d'érosion côtière pouvant générer des brèches et arasement. Depuis l'occurrence Xynthia de février 2010, plusieurs études ont été menées dans la région du coureau Islais pour étudier les risques et les capacités de résiliences de l'environnement sous différents angles (Lemauff 2018, Baltzer et al, 2014, Cariou et al, 2017).

Dans le cadre d'une étude du BRGM menée sur le littoral des Pays de Monts en 2018 (Baudouin et al., 2018) déployant une pluridisciplinarité de méthodes géophysiques (électrique, sismique, géoradar), les premiers résultats mettent en évidence une première interprétation de la structure des dunes situées sur le littoral des Pays de Monts.

En exemple, un profil sismique (figure 13, C) réalisé à la Parée Grollier (commune de Notre-Dame de Mont), met clairement en évidence une paléosurface (date non indiquée) sur laquelle repose les dépôts depuis de la période Holocène.

Ici, la sismique permet d'ausculter, sur des distances de l'ordre de plusieurs kilomètres, l'interface entre les sédiments meubles et le toit du substrat. En revanche, on distingue relativement moins l'interface entre un environnement composé d'éléments alluvionnaires sableux, exposés aux facteurs météo-marins dépôt (zone de « washover », ou dépôt de matériau d'origine marine) et un milieu caractérisé par des dépôts abrités (argiles, argiles sableuses, vases, tourbes) et continentaux.

Sur le même transect, la méthode électrique (figure 13, a et b) identifie assez nettement les sables dunaires en raison de leur forte résistance électrique. On distingue également la profondeur de la nappe phréatique en raison de la forte conductivité de l'eau, à la fois conditionné par de l'eau saumâtre et/ou la présence du biseau salé (interface entre eau douce provenant de la nappe et de l'eau salé de la mer). Ainsi, l'interprétation de ces profils électriques démontrant des milieux plus humides, argileux et organiques ont

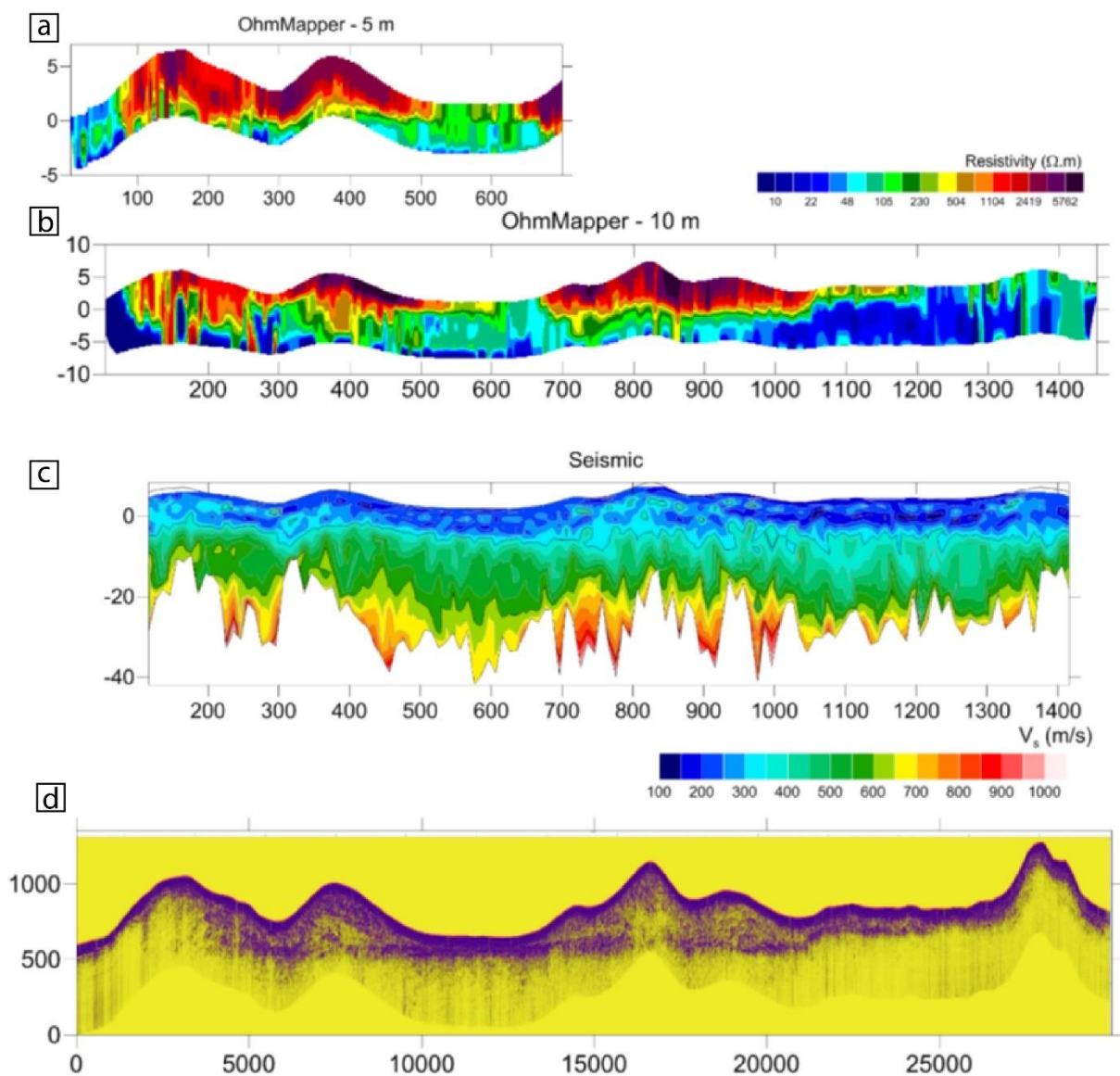


Figure 13 : Profil électrique (a et b), sismique (c) et géoradar(d) réalisés sur le site de la Parée à Notre Dame de Monts. Modifiée et tirée de l'étude de Baudouin et al., 2018.

permis de pallier l'inconvénient de la méthode sismique concernant la caractérisation des milieux composés d'éléments d'origine continentale.

Enfin, le géoradar (figure 13, d) met en exergue la géométrie des surfaces obliques et parallèles aux versants abrités et illustre la mobilité des dunes lors des phases d'accrétion et d'érosion.

D'autres surfaces inverses, inclinées vers l'océan, pourraient être interprétées comme d'anciens hauts de plages, témoignant d'un système en accrétion ou bien encore des pieds de dunes et cordons conservés. En subsurface, des réflecteurs horizontaux assez nettes sont également observés à la base des acquisitions, mettant en évidence le niveau de la nappe et le mode de piégeage du sable et des phases de sédimentation.

Même si au cours de cette première étude les interprétations n'en sont qu'à leurs début, la confrontation des résultats obtenus par différentes méthodes géophysiques permet d'appréhender l'hétérogénéité du système dunaire (Baudouin et al., 2018), et de pouvoir, dans une deuxième phase d'interprétation, retracer la configuration paysagère lors de périodes historiques antérieures marquées par des phases d'érosion et/ou d'accrétion.

Les résultats de cette campagne de prospection géophysique pourraient servir de référence quant aux résultats et à l'interprétation des profils géoradar acquis lors de cette étude.

2. Matériels et Méthodes

Cette partie explicitera la méthodologie générale utilisée afin de parvenir aux objectifs du projet. Cette méthodologie repose principalement sur le couplage des archives historiques avec les données issues de la prospection géophysique par géoradar, afin d'observer l'intégration de ces différentes phases de fortification côtières au sein des massifs dunaires.

2.1 Constitution d'une base de données de l'historique des tempêtes de l'île d'Yeu

Cette part de l'étude entre dans la continuité du travail réalisé par Kevin Giraud (Giraud, 2020) qui avait pour but de dresser un premier inventaire des événements tempêteux qui ont marqué les mémoires des islais depuis 4 siècles. Ici, l'aspect socio-historique de ce premier travail sera complété par l'approche environnemental qui consiste à recenser les événements météo-marins morphogène, autrement dit, les tempêtes qui ont impactées la morphologie du paysage littoral de l'île d'Yeu.

L'outil employé afin de présenter visuellement cet inventaire des tempêtes historiques est le logiciel « TikiToki ⁸ ». Ce dernier permet de réaliser des frises chronologiques et est plus spécifiquement dédié au monde académique. En plus des nombreuses fonctions permettant de rendre le contenu attractif, c'est un outil intéressant pour la diffusion de l'information puisque, hormis les licences payantes offrant l'accès à un large panel de fonctionnalités, l'entreprise met à disposition la plateforme numérique gratuitement, et accessible au grand public. En effet, une frise chronologique peut être créée à partir d'un compte utilisateur et être partagée à d'autres usagers, qui peuvent éventuellement en modifier le contenu.

⁸ <https://www.tiki-toki.com/>

2.2 Recherche d'archives historiques identifiant une chronologie des aménagements sur les trois sites fortifiés

La plupart des archives historiques concernant l'aménagement des batteries côtières de l'île d'Yeu proviennent du Service Historique de la Défense à Vincennes. Ce centre de stockage d'archives, créé le 1^{er} janvier 2005, dépend du ministère des armées. Il est chargé d'homologuer, de répertorier et de rassembler les éléments du domaine militaire (insignes, cartes, plans, photos...) et de contribuer aux travaux relatifs à l'histoire de la défense.

Les ressources documentaires sont évaluées à près d'un million d'ouvrages depuis le début du XVIII^{ème} siècle ce qui correspond à la période des premières fortifications de batteries côtières à l'île d'Yeu.

Au cours de ce travail en raison de la crise sanitaire, il n'a pas été possible d'organiser la visite au service historique de la défense à Vincennes initialement prévue. En revanche, l'ensemble des partenaires a été sollicité pour mettre en commun les documents et archives des uns et des autres afin d'en réaliser une synthèse. Ainsi, un grand nombre de documents cités ici proviennent-ils effectivement de Vincennes mais avaient été numérisés avant le projet par différents partenaires.

2.2.1 Archives historiques concernant les fortifications napoléoniennes

Au XIX^{ème} siècle, les nouveaux ouvrages de défenses côtières implantés sur l'île d'Yeu ont été conçus selon des plans types élaborés par une pluralité d'instances hiérarchiquement distinctes.

Les projets de batteries de côte de l'île d'Yeu sont travaillés par une première instance qui est le chef du génie. Cet « officier du génie » est un ingénieur chargé d'établir chaque année les travaux des fortifications, à partir de mesure, chiffrage, dessins, et rapports écrits.

Le travail du chef du génie est contrôlé par la Direction du Génie, basée à Nantes. Le directeur des fortifications dirige la direction et commande les chefs du génie. Les projets sont ensuite transmis au Ministère de la Guerre. Cette instance supervise les Directions du Génie et est chargée du budget alloué aux projets de fortifications.

La plus haute entité administrative est le comité des fortifications. C'est un organe de l'administration du Génie chargé de l'entretien et du classement des places de guerre et des postes militaires en France pendant la Révolution (Roelly, 1995). Le comité était assisté par le Dépôt des Fortifications. Ce dernier avait pour mission de réunir le travail des ingénieurs militaires et de le renseigner sur toutes les questions réglementaires relatives au génie et aux fortifications, ainsi que de collecter les productions quotidiennes des officiers du génie (Salat et Penicaut, 2011).

Finalement, le comité des fortifications est purement consultatif, mais dans la plupart des cas, il est suivi au niveau local par le chef du génie. Les inspecteurs généraux du comité des fortifications évaluent sur le terrain l'état d'avancement des projets et échangent directement avec le chef du génie local sur les futurs travaux et transmettent au ministère de la guerre un avis favorable au projet qui pourra dès lors recevoir l'allocation permettant de finir les constructions.

Plans et coupes (illustrations) des projets de fortifications par le Chef du Génie.	Délibérations (manuscrites) du Comité des Fortifications.
<u>Projet de 1848 :</u> Pointe Gauthier Batterie de la petite Conche Batterie de la Grande Conche	Avis du comité des fortifications datant du 2 septembre 1847.
<u>Projet de 1859-1860 :</u> Pointe Gauthier	Avis du comité des fortifications datant du 25 juillet 1848.
	Avis du comité des fortifications datant du 5 décembre 1849.
	Avis du comité des fortifications datant du 17 décembre 1857.
	Avis du comité des fortifications datant du 11 mai 1859.
	Avis du comité des fortifications datant du 20 mars 1860
	Avis du comité des fortifications datant du 16 mai 1860
	Avis du comité des fortifications datant du 19 avril 1861
	Avis du comité des fortifications datant du 04 février 1862

Figure 14 : Synthèse des archives historiques d'époque Napoléonienne.

Dans le cadre de cette étude, les délibérations du comité des fortifications associées aux plans et coupes des projets de constructions des batteries côtières (figure 14) sont les archives de référence permettant de relever l'historique des aménagements napoléoniens entre 1847 et 1862.

Le travail du chef du génie est explicité par les projets de batteries qu'il illustre sous forme de coupes et de plans du site. Les projets devaient être validés par chacune des instances mentionnées précédemment, pour pouvoir commencer les travaux de fortifications. Les tracés en grisâtre (figure 17, C et D) entre la structure originelle de la batterie (pré 1848) en marron et le projet napoléonien de rehaussement du parapet en jaune, indiquent la modification du projet de

construction ordonnée par les instances plus hautes. Le socle rocheux illustré en bleu (figure 17, D) sur lequel reposerait la citerne d'eau douce ferait également office de support pour l'installation des fondations du corps de garde pour le chef du génie (tracés en gris, figure 17, D). Les côtes altimétriques servent de repères afin d'identifier l'altitude des différentes composantes de la batterie (figure 17, C et D). Par rapport à une limite horizontale « 100 » caractérisant le niveau moyen de la mer, le parapet (figure 17, C) serait à une cote de « 93.5 ».

Les délibérations du comité des fortifications sont retranscrites à la main. Le contenu présente un avis du comité concernant le projet de batterie dessiné par le chef du génie. Après chaque délibération le chef du génie retravaille ses documents pour repropose un projet de batterie jusqu'à ce que ce que celui-ci aboutisse.

Les documents des projets de fortifications par le Service Historique de la Défense sont classés selon des côtes. Ces dernières renseignent sur la version finale des projets, autrement dit, dans le cas de l'époque Napoléonienne, la cote « 1 VH » classe des documents sur lesquels le Comité des Fortifications a travaillé pour émettre son avis, mais ne représente pas les projets de constructions validés par l'ensemble des instances chargés des projets de fortifications.

Quant aux projets de constructions définitifs, ils font l'objet de croquis dont les copies sont conservées dans une autre sous-série d'archives avec pour cote « 1 VK ».

Ici, les archives collectées de cette période ne montrent essentiellement les projets non actés (cote VH). Cela signifie que ces projets ne sont pas les définitifs, et qu'il faut être prudent concernant leur interprétation.

2.2.2 Les archives historiques concernant l'occupation allemande

Les dossiers de commission de déclassement des ouvrages militaires côtiers après la deuxième Guerre Mondiale (1946/1947) mettent en évidence l'état de dégradation des structures occupées par les allemands. Au regard de cette commission de déclassement, les batteries du fort Neuf et du fort Gauthier sont représentées sur un « plan d'ensemble » (figure 16, A) et sur « un plan des locaux » (figure 16, B) indiquant l'agencement de la batterie et les fonctions des pièces des corps de garde napoléonien.

Ces sites correspondent, comme évoqué précédemment aux deux des trois sites où un équipement d'artilleries lourdes fut déployé, en plus de la construction de casemates servant à abriter les troupes, et stocker les munitions et les vivres (Chazette, 2008).

En exemple ici, le réduit de la grande Conche, qui, contrairement au Fort Gauthier, fut arasé (figure 16, B et C) lors du départ des allemands.

Plan de la batterie et du réduit de la grande Conche après le départ des allemands.

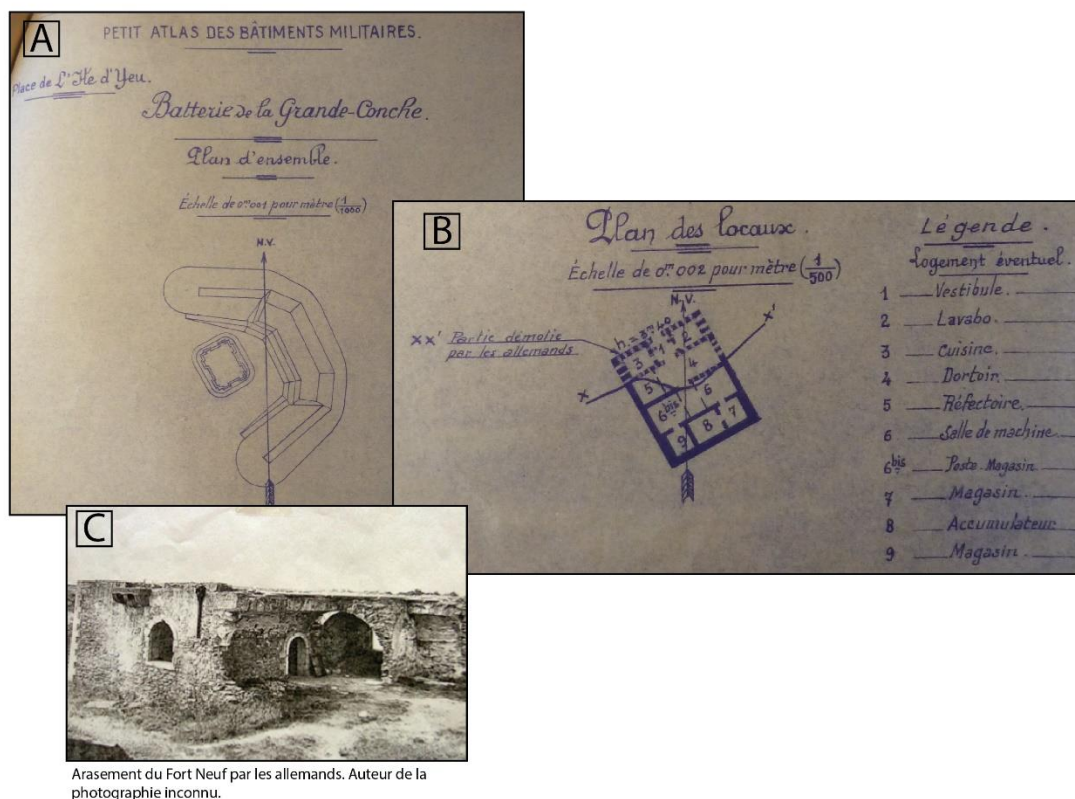


Figure 16 : Plans de la commission de déclassement des ouvrages anciens datant de 1946/1947 et photographie du réduit de la grande Conche après le départ des Allemands.

Le site de la pointe de la petite Conche n'est pas explicité dans ce dossier de déclassement des ouvrages anciens. L'absence de corps-de-garde et sa moindre importance stratégique du point de vue allemands pourraient expliquer l'absence de documents.

2.3 La prospection géoradar

2.3.1 Le radar géologique

2.3.1.1 Origine du géoradar

En 1904, un premier radar basé sur un système d'émission-réception d'ondes électrique est inventé par l'allemand C.Hülsmeier. Cet appareillage a été conçu pour la détection des objets métalliques, afin d'éviter les collisions entre navires (Belmecheri.A.B, 2014).

A partir de 1910, la méthode non destructive géoradar intéressa les chercheurs allemands Leimbach et Lowy qui sont les premiers à décrire la méthode électromagnétique, et fut employée pour localiser les cibles enterrées et notamment les puits, en raison de leur forte conductivité par rapport au milieu environnant (Neyrat, 2009).

Mais c'est en 1929, qu'une méthode impulsionnelle est utilisée et brevetée par le chercheur Hulsenbeck, pour déterminer la structure d'un objet enfoui. Ce dernier met en évidence que les variations diélectriques d'un sol peuvent exercer une influence sur les échos radar.

Depuis lors, la méthode impulsionnelle s'est largement développée et a permis d'impulser les premières études d'investigation environnementale (milieux désertiques, polaires, et rocheux).

Enfin, en 1972, R.Morey et A.Drake, contribuent aux études antérieures en améliorant la compréhension des principes physiques du géoradar, concernant les propriétés électriques sur la propagation des ondes (Annan, 2003). Ainsi, l'application du géoradar devient courante dans de nombreux domaines s'intéressant à la prospection en subsurface (étude de la profondeur du permafrost (Annan et al.1976), détection de cavités (Bjelm.L, et al. 1982), archéologie (Goodman et al. 2009, génie civil (Zeng et MacMehan., 1996)).

2.3.1.2 Principe physique

- Les paramètres électromagnétiques

Comme expliqué précédemment⁹ la propagation de l'onde radar dépend des matériaux géologiques rencontrés ainsi que de la fréquence émise de l'antenne. Les paramètres diélectriques décrits ci-dessous auront un impact sur la vitesse et donc la longueur d'onde propagée et la résolution du signal mais aussi sur son amplitude et donc la distance de propagation maximale. En effet, lors de l'interaction avec les éléments

⁹ Paragraphe 1.3.1.2

lithologiques, l'onde est contrainte par différentes sources d'atténuation. Une forte atténuation générera une diminution de la pénétration du signal, ce qui réduira la profondeur investiguée (Cassidy, 2008).

En premier lieu, la permittivité diélectrique, dont l'unité s'exprime en Faraday/mètre [F/m], détient une influence majeure dans l'explication des phénomènes de réflexions et de propagation de l'onde car elle exprime le mécanisme physique entre l'onde émise par le radar géologique et l'environnement en subsurface (VanDam et al, 2002).

Cette constante diélectrique peut être identifiée comme étant la capacité d'un corps à absorber et relâcher le signal électromagnétique (Cassidy, 2009 ; Dallaire 2010).

L'eau liquide est le matériau qui possède la plus haute valeur de constante diélectrique globale (Davis et Chudobiak, 1975 ; figure 17).

Matériau	Permittivité diélectrique relative ϵ_r	Conductivité électrique σ [mS/m]	Atténuation ϵ [dB/m]
Argiles	3-60	0,1-2000	1-1000
Calcaire sec	4-8	0,1-1	0,4-1
Granit	4-6	0,01-1	0,01-1
Grès	4-5	0,3-1	?
Sable sec	3-6	0,001-1	0,01
Sable saturé	20-30	0,1-100	0,03-0,3
Roches salines	5-6	0,001-0,01	0,01-1
Glace	3,2	0,001-0,01	0,01
Eau distillée	81	0,01	0,002
Eau fraîche	81	0,01-0,1	0,1
Eau salée	81	3000	1000
Gasoil	2,3	0,003	?
Air	1	0	0

Figure 17 : Exemple de valeurs d'atténuation, de conductivité et de permittivité relative de quelques matériaux géologiques. Tableau tiré de Bano et Loeffler., 2005.

La conductivité électrique décrit la facilité d'un milieu à transmettre un courant. Ce phénomène est relatif à la loi d'Ohm, décrivant l'établissement d'un courant de conduction électrique par déplacement de charges libres.

En effet, quand un courant électrique se déclenche, les charges libres sont déplacées de façon irréversible, c'est-à-dire que l'interaction entre les charges et le milieu cause une perte d'énergie générant l'atténuation de l'onde. La conductivité électrique dépend donc de la composition du matériau et de son niveau d'altération éventuelle.

Au regard de la constante diélectrique, l'eau salée est l'élément le plus conducteur. Cependant, en milieu aqueux, la conductivité électrique est variable selon des propriétés distinctes. Elle est régie par la quantité d'eau dans le milieu (présence ou non d'élément en suspension), sa distribution, sa chimie (concentrations en sels dissous) et son stade (liquide, gazeux, solide ; Doolittle et Butnor, 2009).

Sur le tableau (figure 17), on observe que l'argile, qui est un matériau imperméable, est très conducteur, il est donc prohibitif dans le cadre de l'exploitation des données géoradar. Par conséquent, les milieux marécageux, souvent argileux, se prêtent généralement mal aux investigations par géoradar. En revanche, les niveaux sableux, à condition qu'ils ne soient pas trop salés, et le socle rocheux sont généralement bien identifiables.

Enfin, la perméabilité magnétique, qui représente l'équivalent magnétique de la constante diélectrique, décrit la capacité d'un matériau à se polariser sous l'action d'un champ magnétique externe.

Mesurée en Henri par mètre (H/m), ce paramètre électromagnétique peut être négligeable dans un milieu sableux organique, en raison de sa faible influence sur la propagation de l'onde (Neal, 2004). Les matériaux détenant une haute teneur en oxyde fer seraient d'influence majeure sur la diffusion du signal en raison de leur forte valeur de perméabilité magnétique (Cassidy, 2008)

- Vitesse de l'onde

La vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans les milieux géologiques est formulée en fonction de la vitesse de la lumière et de la permittivité diélectrique. Comme la permittivité diélectrique dépend de la fréquence, on considère que, dans une gamme de fréquence qui serait comprise entre 100 Mhz et 1Ghz, ce paramètre reste constant.

La vitesse d'une onde radar (Loeffler, 2005) peut être formulée :

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

V est la vitesse de l'onde radar en mètre par seconde.

C est la vitesse de la lumière dans le vide (3.108 mètres/ seconde).

ϵ_r est la permittivité diélectrique relative du milieu.

- La longueur d'onde

Comme la longueur d'onde correspond au rapport de la vitesse sur la fréquence $\lambda = v/f$, elle influe sur la résolution verticale des profils, selon la fréquence de l'antenne utilisé et la vitesse de l'onde électromagnétique par rapport à la constante diélectrique des milieux où elle se propage.

- L'atténuation

L'atténuation du signal dépend de la conductivité électrique du milieu, plus précisément du rapport entre la conductivité et la perméabilité électrique. Donc, les milieux les plus conducteurs sont les plus atténuants. Sa formulation peut être approchée par :

$$\alpha \approx \frac{60\pi\sigma}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

En décibel par mètre, cette atténuation peut s'écrire :

$$\alpha \approx 8.68\alpha \text{ dB /m}$$

Cela signifie qu'on a une perte de 8.68 décibels par mètre.

- La résolution verticale

La résolution de l'information correspond à la distance minimale séparant deux points de l'espace ayant généré un écho capable d'être différencié sur l'image radar.

Elle dépend de la fréquence, de la longueur d'onde et de la géométrie des objets.

La résolution verticale dépend de la fréquence émise par l'antenne géoradar. Cependant, elle s'amointrit en profondeur à cause des paramètres électromagnétiques des milieux auscultés.

2.3.1.3 Visualisation des données

Ici, nous tâcherons d'expliciter les différentes composantes visibles sur un profil géoradar, à savoir l'écho de surface, l'écho penté et l'hyperbole de diffraction, et de définir leurs causes d'origines.

- Réflexions du signal électromagnétique

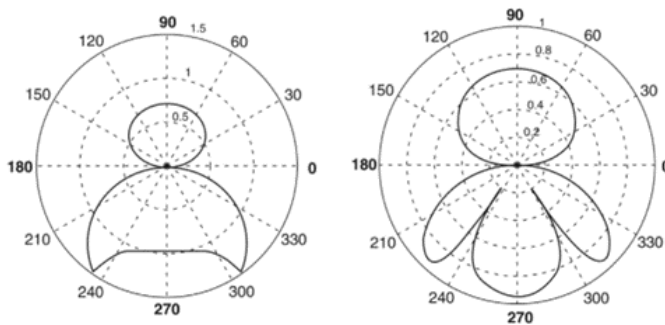


Figure 18 : Antenne de type dipôle. Le pôle inférieur est subdivisée en 3 "sous-pôles" indiquant des directions différentes. Tirée de Annan, 2009.

Premièrement, lors de l'émission du pulse générée par l'antenne du géoradar, les ondes électromagnétiques sont envoyées selon deux directions principales, c'est ce qu'on appelle une antenne dipôle. Le pôle supérieur (de 0 à 180°) qui représente la part des ondes envoyés au-dessus de la surface du sol (à l'air libre), et le pôle inférieur, subdivisée en 3 pôles de directions différentes (de 180 à 360°) qui lui émet des ondes électromagnétiques en subsurface. Ici,

l'antenne est non directionnelle, c'est-à-dire que le signal scanne le sous-sol sous différents angles.

Dans le cas de notre étude, l'émission des ondes électromagnétiques est réduite par un blindage métallique couvrant l'antenne réceptrice et émettrice, le pôle d'émission supérieur est donc inexistant

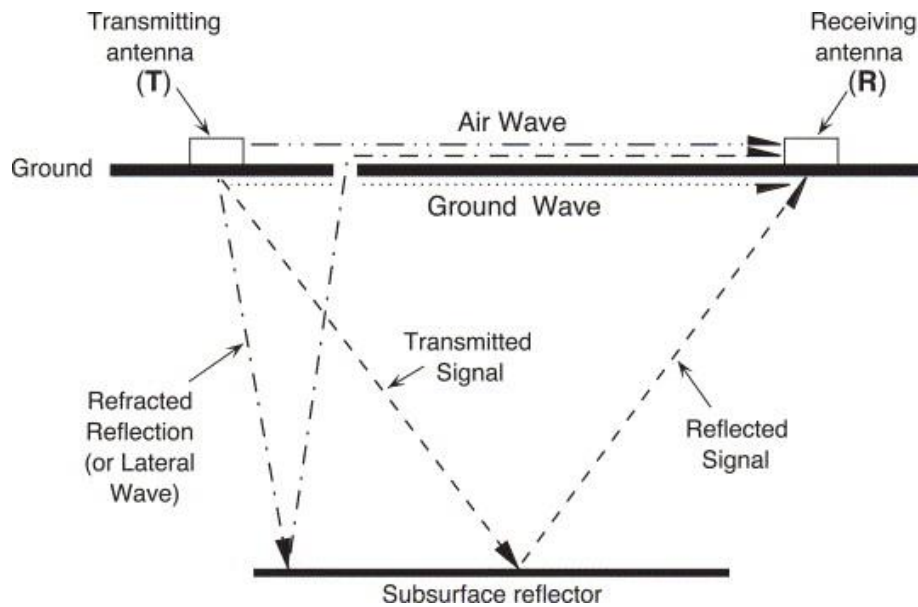


Figure 19 : Directions et interactions du signal pour un système d'antenne bi-statique (émetteur séparé du récepteur). Tiré de Fisher et al., 1996.

Avant tout, il faut rappeler que ce schéma représentatif ci-dessus (figure 19) ne correspond pas au même système d'antenne géoradar que celui utilisé dans cette étude, car le capteur d'émission et de réception sont dans le même boîtier. Cependant ce schéma (figure 19) permet de déterminer l'ensemble des milieux entrant en interaction avec le signal depuis son émission jusqu'à sa réception.

Maintenant, si l'on s'intéresse aux différentes phases de réflexion du signal depuis son émission, trois types d'arrivées se produisent : l'onde aérienne, l'onde directe et l'onde réfractée à l'interface air-sol (figure 19). La première interaction est la réflexion du signal avec le contact de l'air (l'onde aérienne) entre l'antenne émettrice et la surface du sol.

La deuxième interaction est avec le sol (onde parallèle au sol située entre l'émetteur et le récepteur). L'onde latérale ou réfractée, est le résultat d'une première réflexion avec les interfaces à l'approche de la surface. Cette première réflexion ne détermine pas la réelle profondeur et la localisation correcte (en z) de l'interface sur laquelle elles réfléchissent, et sont finalement réfractées le long de l'interface air/sol (figure 19, Neals, 2004).

Ces phénomènes combinés constituent l'écho de surface qui masquent les premières réflexions dans les tous premiers centimètres de la subsurface.

Il convient de préciser que ces interactions peuvent être corrigées lors de la phase de traitements des profils, qui sera précisée ultérieurement.

- Échos temporels continus et pentés

La pente temporelle est en lien avec la pente du sous-sol, mais elle est également en lien avec la vitesse de propagation dans le milieu.

A travers les interactions de l'onde au sein du milieu, l'écho réfléchi du signal contient la signature des interactions de l'onde électromagnétique avec le milieu de la subsurface qui sera enregistrée. Autrement dit, le radar enregistre des échos réfléchis et rétro-propagés vers l'antenne à la surface, en fonction du temps. De plus, les objets localisés en subsurface sont visibles sur la section radar (temps-distance), appelée aussi radargramme, suivant la position de l'antenne réceptrice que l'on déplace le long de la direction du profil avec un pas de déplacement donné (Annan, 2009).

Ainsi, le radargramme présente la série de signaux, également appelés « traces », acquises, selon la distance parcourue (en mètres) sur l'axe horizontal du profil, et le temps (en nanosecondes) d'enregistrement inscrit sur l'axe vertical (figure 20)

- Hyperboles de diffraction

Ces objets sont appelés des hyperboles. Ce sont des phénomènes de diffractions, relativement petits et éclairés selon un lobe de rayonnement par l'onde électromagnétique. Ce dernier envoie un pulse diffracté dans toutes les directions, nous pouvons dès lors repérer cet objet avant et après avoir passé l'antenne. Dès lors, ces objets diffractant permettent d'estimer la vitesse de propagation des ondes dans les milieux traversés et la distance critique entre l'émetteur et le récepteur (Belmecheri, 2014).

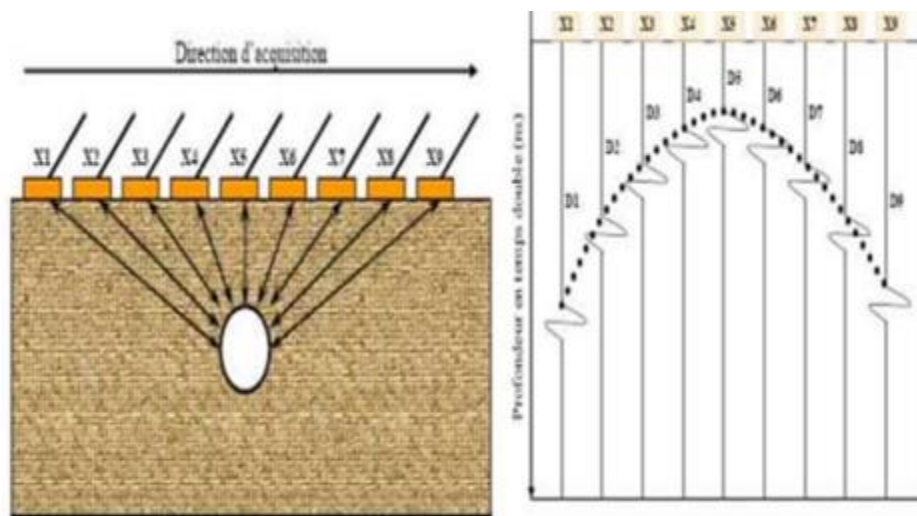


Figure 20 : Représentation graphique du phénomène de diffraction générant une hyperbole sur l'image radar lors de l'interaction d'un objet avec le passage du signal électromagnétique. Ferhoun.M, 2020.

2.3.2 Le géoradar en milieu duniaire littoral

Avant l'investigation de la subsurface par géoradar, l'étude des structures internes des massifs dunaires côtiers étaient réalisés par le biais de creusements manuels ou mécaniques de tranchées (Britstow, 2009, McKee, 1966). Cette méthode, dite "destructrice", raison de la dégradation du milieu naturel qu'elle génère, est limitée en termes de profondeur d'investigation, en raison du risque de déstabilisation des structures qu'elle peut provoquer.

La technique géoradar est intéressante en milieu sableux côtier en raison de la méthode d'acquisition rapide de données à haute résolution. Elle permet également d'identifier les différentes phases de croissances et de décroissances des massifs, et d'observer les migrations des sédiments au sein de la structure (Bristow, 2009).

De plus, les sables dunaires étant des matériaux de faible conductivité électrique et de perméabilité magnétique, le milieu est propice à une investigation en subsurface. D'après Bristow (2009) la profondeur d'investigation peut être supérieure à 25 mètres, ce qui est nettement plus efficace que le creusement de tranchées.

2.3.2.1 Auscultation des dunes au géoradar : lien entre structures observées et genèse du système dunaire

L'apport de matériau au sein de la structure dunaire est expliqué par l'assèchement de l'estran dû au vent. Ce dernier est sélectif et entraîne les grains fins et grossiers en les triant jusqu'à leur dépôt au niveau supralittoral venant alimenter les systèmes dunaires. Ce tri est dû à une vitesse relative de la granulométrie (FAO, 1988). Autrement dit, les particules fines et légères (comme la matière organique) sont déplacées plus rapidement que les grosses, et atteignent des distances et des hauteurs plus importantes.

A travers ces contrastes de textures du sable liés à la granulométrie, le géoradar peut identifier les phases de sédimentation au sein d'un massif dunaire.

2.3.2.2 Résolution verticale en milieu sableux

La résolution verticale comme vue précédemment, varie en fonction de la fréquence émise et de la vitesse de l'onde propagée dans un milieu géologique. Ce paramètre est important car il détermine l'habilité au radar « d'imager » les unités dans les structures sédimentaires. Généralement, la résolution verticale est égale à $\frac{1}{4}$ quart de la longueur d'onde émise par le radar dans le sol (tout milieu confondu ; Bristow, 2009). Ainsi, les antennes basses fréquences (50MHz) ont une plus grande longueur d'onde que les hautes fréquences (400/500MHz ; figure 21), et la longueur d'onde sera plus grande si la vitesse de propagation dans le milieu est forte. A l'inverse, elle sera plus courte dans le cas où la vitesse est faible.

Antenna central frequency (MHz)	Theoretical resolution saturated sand (0.06 m ns^{-1})	Theoretical resolution damp sand (0.1 m ns^{-1})	Theoretical resolution dry sand (0.15 m ns^{-1})
50	0.3 m	0.5 m	0.75 m
100	0.15 m	0.25 m	0.375 m
200	0.075 m	0.125 m	0.1875 m
400	0.0375 m	0.0625 m	0.09375 m

Figure 21 : Valeurs théoriques des résolutions sur profils géoradar des milieux sableux saturés, humides et secs, selon plusieurs fréquences de l'antenne géoradar. Tiré de Bristow, 2008, modifié de Jol et Bristow., 2003)

Donc, si un signal à haute fréquence est émis dans un milieu à vitesse de propagation faible, la longueur d'onde sera courte avec une forte résolution et inversement.

Si l'on prend l'exemple d'un milieu sableux sec avec une vitesse de 0.15 mètre par nanoseconde, sondé par une fréquence de 100MHz avec un pulse électromagnétique de 10 nanosecondes (correspondant au temps du signal entre le départ de l'antenne et la profondeur maximale atteinte), on obtient une longueur d'onde de 1.5mètre ($0.15\text{m/ns} * 10\text{s}$), et donc une résolution d'environ 0.375 ($1.5\text{m} * 0.25$; le 0.25 correspond au quart de la longueur d'onde). La valeur de la résolution verticale dans un milieu de dépôt éolien peut varier entre le quart et la moitié de la longueur d'onde (donc entre 0.75 et 0.375m).

Toutefois, la résolution verticale peut mener à une fausse interprétation stratigraphique. En effet, dans le cas précédemment étudié (entre 0.750 et 0.375mètre pour un milieu sableux et pour une fréquence de 100Mhz), le géoradar peut identifier graphiquement les grandes structures sableuses équivalant à sa résolution, cependant il lui est difficile d'imager les inter stratifications, autrement dit, les différentes couches de sable au sein même des unités dunaires car leur fine épaisseur de quelques centimètres est nettement inférieure à sa résolution.

La nappe phréatique, présente à des profondeurs variables selon la saisonnalité, modifie la résolution verticale des profils géoradar. Elle forme un réflecteur subhorizontal et continu, en raison du contraste important de permittivité électrique relative entre le sable sec, situé au-dessus de la nappe phréatique, et le sable saturé en eau au sein de celle-ci.

La vitesse dépend également de la teneur en eau du sédiment (figure 23, ci-dessus). Un milieu composé de sable sec a une vitesse de 0.15m/ns, alors qu'un sable légèrement humide détient une vitesse de 0.12m/ns et un sable saturé en eau 0.06m/ns. Ce phénomène est intéressant puisque on obtient une résolution verticale, plus on distinguera les interstratifications de l'ordre de la dizaine de centimètres.

De plus, ce facteur n'est pas négligeable car à partir du niveau de la nappe, la conversion temps/profondeur doit être changée en raison du changement de vitesse. La vitesse de propagation étant plus faible au sein de la nappe, la résolution verticale est améliorée car la longueur d'onde est raccourcie.

Aussi, l'eau de mer a une conductivité électrique très élevée, ce qui occasionne également une très forte atténuation de l'onde radar. Ainsi la profondeur d'investigation n'est jamais plus profonde que l'altitude à laquelle est localisée le biseau salé.

2.3.3 - Application du géoradar sur le terrain d'étude

2.3.3.1 Installation du matériel



Figure 22 : Description des composantes d'un géoradar GSSI SIR-300.

Dans le cas de l'étude menée avec le géoradar (GSSI SIR-3000) de l'Université Gustave Eiffel, l'émetteur et le récepteur se situent dans le même boîtier qui constitue l'antenne radar. Ce boîtier est blindé par une structure métallique (interne à l'antenne) afin d'éviter l'émission électromagnétique vers le haut (domaine aérien) et ainsi diriger l'émission du signal vers le sol uniquement.

Le géoradar est configuré dans une situation dite « offset constant », c'est-à-dire que le récepteur et l'émetteur effectuent une distance à vitesse constante ; contrairement au mode d'application « bi-statique » qui lui, tracte un émetteur et un récepteur (Neals, 2004)

pouvant être à des distances variables.

Plus particulièrement dans notre cas (figure 22), l'enregistrement est dit à « offset nul » car la distance émetteur-récepteur est très faible.

Une roue codeuse est calée au niveau de la roue latérale droite du support de système de mesure. Grâce à cet équipement, le géoradar enregistre un signal avec un pas de temps régulier en fonction de la distance, en d'autres termes la roue codeuse, indique la cadence d'acquisition au niveau de l'antenne réceptrice.

Enfin, un ordinateur de contrôle en hauteur (positionné à hauteur du visage, figure 22), alimenté par une batterie, et relié à l'antenne par des connectiques, permet de paramétrer le visuel des données en direct et donc d'observer instantanément les résultats du profil réalisé.

Lors de la manipulation effectuée sur le terrain avec le géoradar, l'antenne doit être en contact direct avec le sol, donc parallèle avec la surface sondée afin de maximiser la qualité des données recueillis. Si ce

paramètre n'est pas respecté, une partie du signal électromagnétique est perdue car ce dernier est transmis dans l'air plutôt que dans le sol (Dallaire, 2010 et Cassidy, 2008).

Le sondage géoradar est réalisé avec une antenne de 500MHz sur le site de la pointe Gauthier, de la pointe de la petite Conche et du fort Neuf. Le choix de la fréquence est adapté à la profondeur recherchée, en l'occurrence ici de plusieurs mètres. La résolution attendue est de l'ordre de quelques centimètres à la dizaine de centimètres.

Lors de cette campagne, 52 profils géophysiques ont été acquis au sein des trois sites d'études. Dix-neuf au fort Gauthier, vingt-deux à la pointe de la petite Conche et onze au Fort Neuf.

En parallèle de la prospection géoradar, l'emploi d'un DGPS (Differential Global Positioning System) est nécessaire afin de géoréférencer chaque profil géophysique réalisé.

Le DGPS utilisé provient du service environnement de la collectivité de l'île d'Yeu et utilise un système de référence géographique propre à l'île.

2.3.3.2 Contraintes liées au terrain dans l'acquisition des profils géophysiques

Prospection géoradar sur le parapet extérieur de la batterie du Fort Gauthier.

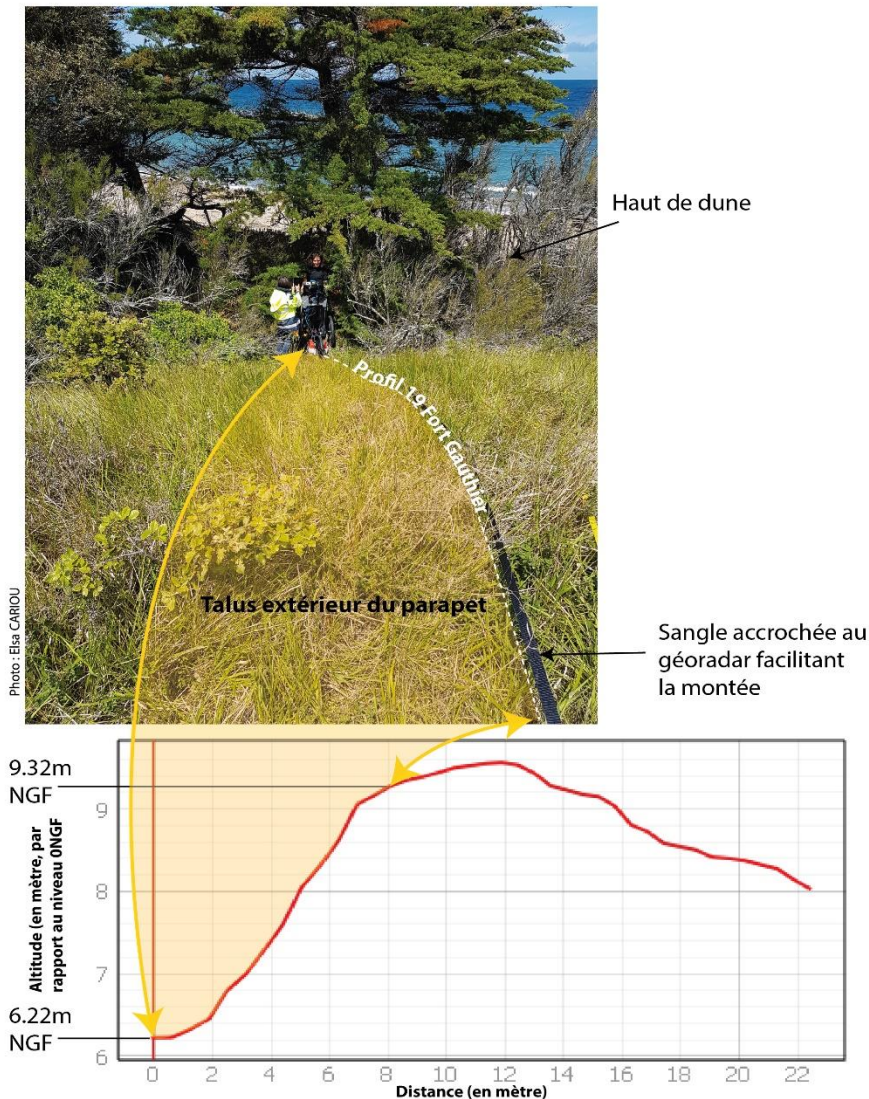


Figure 23 : Démonstration d'acquisition de données géoradar sur une surface abrupte. Réalisé par Robin PIEL.

En lien avec les objectifs de l'étude, les profils géoradar doivent être réalisés sur les différentes composantes des batteries côtières (douve, parapet, plateformes en terres-plein.). Le passage du géoradar sur des structures à fort relief, comme le parapet, est complexe en raison du poids de l'appareil, et nécessite soit un système de tractage (sangle et éventuellement treuil) soit l'aide de plusieurs personnes afin de faire avancer, et de maintenir l'antenne en contact avec le sol, au risque de perdre des données. Certains transects ont été réalisés sur des dénivelés de 3 mètres et ont nécessité une sangle fixée au géoradar (figure 23).

Les interférences entre les autres appareils électromagnétiques représentent également une contrainte car elles sont directement observées sur les profils de l'ordinateur de contrôle lors des manipulations. La présence de téléphone portable, même située à une certaine distance peut interférer avec le signal électromagnétique émis par le géoradar et provoquer des artefacts brouillant l'image.

Les mesures géophysiques ne doivent pas être effectuées en même temps que l'enregistrement des coordonnées géographiques par le DGPS car celui-ci contient un émetteur radio générant une interférence des fréquences avec le géoradar.

La perte de réseau du DGPS est également un des facteurs à prendre en compte sur le terrain. Elle peut être causée par une couverture nuageuse, ou la présence d'arbre bloquant la liaison avec les satellites.

2.3.4 Traitements des données géoradar

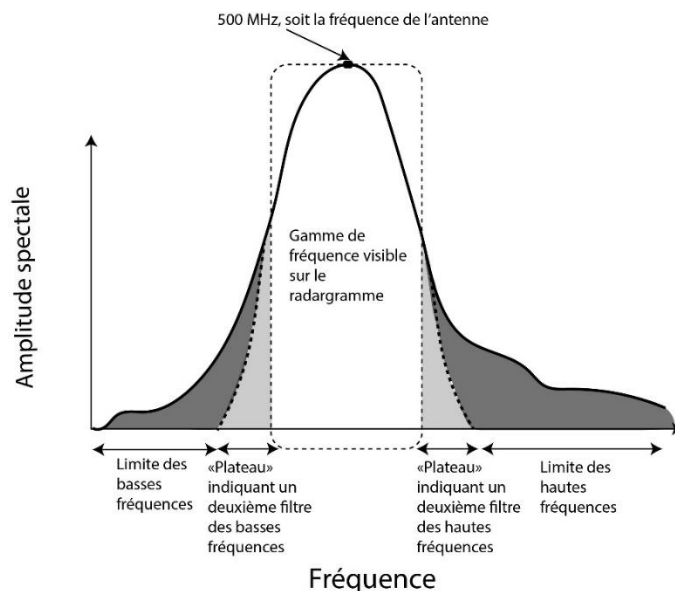
2.3.4.1 Application sur logiciel

Une fois avoir acquis les profils par sondage géoradar, les données doivent être traitées sur logiciel afin d'obtenir une visibilité optimale pour l'interprétation.

Pour cela, le logiciel « Reflexw », créé par l'entreprise Sandmeier spécialisée en géophysique et en développement d'outil permettant le traitement de données sismiques et géoradar de proche subsurface, offre un éventail de traitements appliqués aux données géoradar. Cet outil requiert un certain nombre de paramètres comme la fréquence de l'antenne utilisée, la géométrie du sol, la permittivité diélectrique, la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du milieu sondé.

2.3.4.2 Traitements des données brutes

Première correction de la bande passante



Les filtres temporels dits « 1D » altèrent la forme des traces verticalement, (en temps) afin d'améliorer ou d'éliminer le bruit causé par les fréquences plus hautes ou plus basses que la fréquence de l'antenne du géoradar. Dans le cas de cette étude, une antenne de 500MHz est utilisée, et le filtre « bandpassfrequency » permet de filtrer la bande passante avec une limite minimale de 50MHz et maximale de 1000MHz, et un plateau permettant de filtrer à un autre étage de fréquence (100MHz pour les basses et 800Mhz pour les hautes ; figure 24)

Figure 24 : Gamme de fréquence pour une antenne de 500Mhz.
Schéma Tiré et modifié de Bristow, 2009.

Le temps 0

Les premières nanosecondes des profils sont généralement illisibles. Ceci est expliqué par les premières interfaces entre l'onde et l'air, et puis entre l'onde et la surface du sol (figure 25). Ici, les deux interfaces correspondent au temps compris entre 0 et 9.20 nanosecondes, qui est coupé afin d'obtenir directement l'interactions du signal avec le milieu

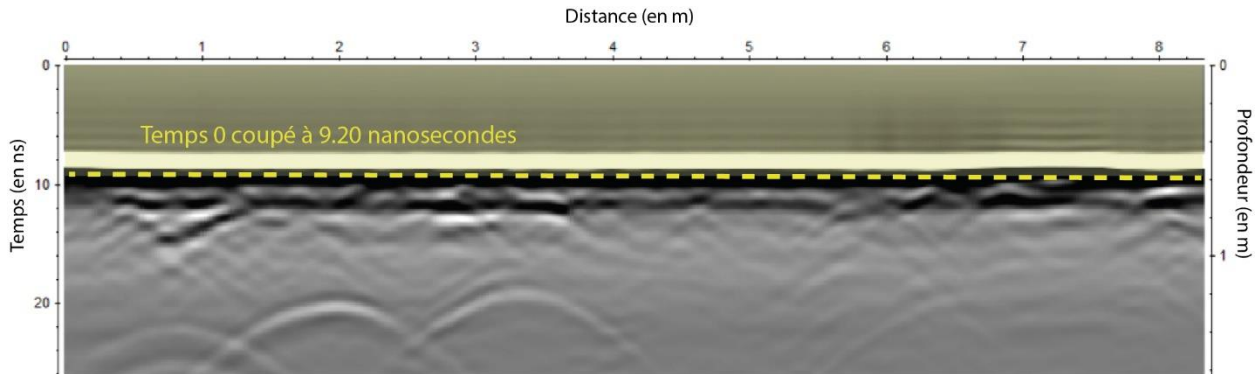


Figure 25 : « Temps0 » appliqué aux profils radar.

Temps coupé

Lors de l'acquisition des données géophysiques, le radargramme a été paramétré pour obtenir un sondage assez profond de la subsurface, allant jusqu'à 150 nanosecondes. Les données sont rognées à 120 secondes en raison de l'occurrence d'artefacts, rendant illisible les traces du profil.

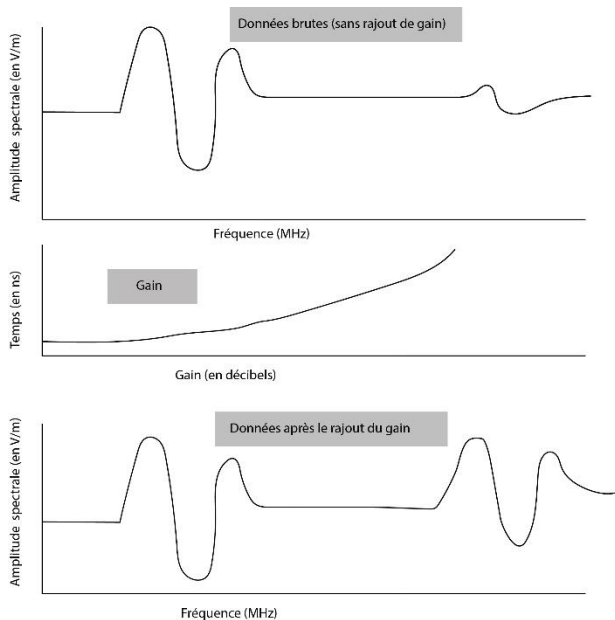


Figure 26 : Schéma représentant l'effet de "gain" sur un signal électromagnétique. Schéma inspire de Annan, 2009.

Gain.

Le gain permet d'amplifier (en décibels) une partie du signal à partir d'un certain temps. On applique une fonction « gain » afin de compenser la perte du signal due à la propagation, et d'augmenter la visibilité des structures et objets en profondeur (figure 26).

Réduction du bruit

Le bruit est une contamination par une source externe du signal qui est un problème récurrent en géophysique, car il altère la qualité des données, ainsi que les interprétations qui en découlent. En géoradar, le bruit a tendance à réduire la continuité des réflexions, voire, dans certains cas à les masquer (Dujardin, 2000)

Sur le logiciel Reflexw, le bruit est identifié par la résonnance de l'antenne ou « ringing » et par des réflecteurs subhorizontaux. Il est réduit en soustrayant la moyenne des traces (en fréquence) d'une section à chaque trace du profil.

La moyenne sur 5 traces

Ce filtre permet également d'améliorer la visibilité du profil en extrapolant la moyenne du signal à partir de 5 traces, afin de « lisser » la texture du profil et de souligner les réflecteurs subhorizontaux (si toujours existant après la réduction du bruit).

Deuxième correction de la bande passante

Une nouvelle correction est appliquée à la bande passante afin d'optimiser la visibilité du profil. Le filtre restreint la gamme de fréquence de 150Mhz à 750Mhz.

Migration et correction topographique.

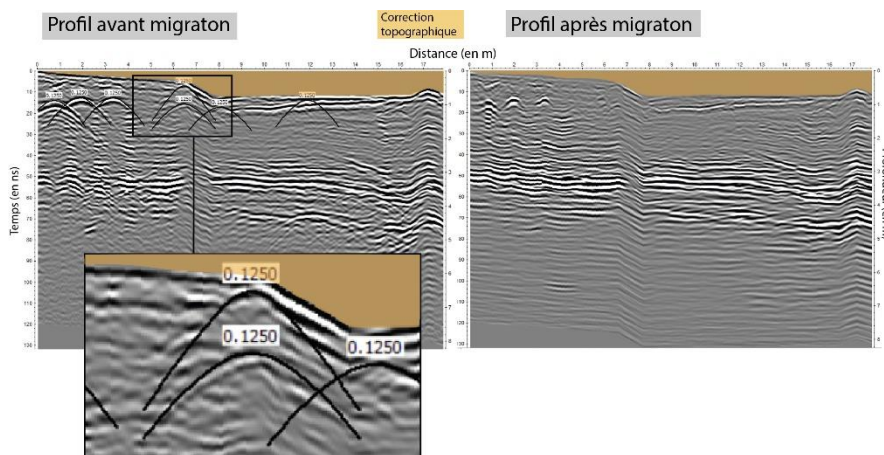


Figure 27 : Exemple de profil avant et après migration des hyperboles.
Réalisé par Robin PIEL.

La migration est une fonction qui permet de rehausser la reconstruction visuelle de la représentation du sol en remplaçant les points de diffraction dans l'espace. Cette fonction nécessite une connaissance précise de la distribution de la vitesse dans le sol (Neals, 2004). En théorie, la vitesse des ondes électromagnétiques dans les milieux géologiques est mesurée entre 0.10 et 0.15m/ns.

Sur Reflexw, le repositionnement des objets localisés en subsurface se réalise à partir de l'estimation de la vitesse des ondes électromagnétiques se propageant dans le sol. Les hyperboles marquées par la diffraction des objets sont utilisées comme marqueurs afin de déterminer la vitesse adéquate (figure 27). La correction topographique est effectuée en dernier lieu, à partir des coordonnées relevées au DGPS.

2.4 Stratigraphie et structures sédimentaires

Dans la mesure où l'essentiel des données de terrain de ce mémoire sont des données géoradar, c'est-à-dire des sections du sous-sol vues en coupe verticale, il est ici nécessaire, en complément du contexte géologique, de réaliser un rapide inventaire des différents faciès géologiques présents sur le terrain (ou du moins déjà signalés à proximité immédiate), et de leurs caractéristiques. C'est sur cet inventaire que reposent notamment les interprétations des faciès radar et des profils géoradars présentés dans la section résultats.

2.4.1 Le socle

L'ensemble des formations sédimentaires de l'île d'Yeu repose sur un socle en gneiss, déformé à l'époque hercynienne. Ce socle affleure très largement sur les estrans des plages sableuses, ainsi qu'à la base de l'ensemble des pointes rocheuses, comme la Pointe Gauthier ou la Pointe de la Petite Conche. Lorsqu'il est visible sur le littoral, le socle affleure sous forme de têtes de roches, souvent groupées. La hauteur des têtes de roches varie. En revanche, toutes présentent une orientation commune, directement liée à la foliation des gneiss (Figure 28).

Lorsqu'il se démantèle sous l'action des vagues et de l'érosion, le socle produit des blocs plus ou moins arrondis. Ces derniers restent généralement à proximité des zones d'affleurement du socle, mais selon leur taille, ils sont parfois également présents en haut de plage où ils se dispersent, ou forment des bermes.



Figure 28 : Plage des Sapins à marée basse (photographie Elsa Cariou, 2020)

2.4.2. La tourbe

En 2020, les forts vents d'est de mars et avril ont fait apparaître des dépôts de tourbe à plusieurs endroits sur la côte est de l'île, et en particulier sur la plage des Sapins, qui jouxte la Pointe Gauthier, et au pieds de l'enrochement artificiel qui protège la pointe de la Petite Conche (Figure 29).

Les prélèvements effectués dans ces dépôts sur la plage des Sapins montrent qu'il s'agit en réalité d'alternances d'horizons pluricentimétriques de tourbes riches en débris de roseaux et d'horizons sableux. L'épaisseur de ces dépôts varie latéralement et peut atteindre plus d'un mètre. Dans les zones où ont été effectués les prélèvements, ils reposent directement au contact du socle. Les datations effectuées sur la tourbe indiquent un âge autour de 3100 BP (Rapport annuel ODySéYeu 2020)



Figure 29 : Dépôts de tourbe découverts en 2020 sur la plage des Sapins, lors des opérations de prélèvements (photographie Agnès Baltzer, 2020).

2.4.2 Paléosol argileux



Figure 30 : Secteur nord de la Pointe Gauthier (photographie Godefroy Belhomme, 2015).

Les dépôts de tourbe ne sont pas continus et semblent se limiter aux zones où le socle forme des dépressions. Dans les secteurs où le socle ressort en saillies, comme à la pointe Gauthier, le socle est fréquemment coiffé par un paléosol argileux (figure 30), rougeâtre, localement riche en dreikanter, et dépassant rarement une trentaine de centimètres d'épaisseur. Ce dernier est visible en plusieurs points de la Pointe

Gauthier. Il n'a pas été daté précisément à l'île d'Yeu, mais la présence des dreikanter indiquerait une mise en place dans des conditions périglaciaires, c'est-à-dire il y a au moins 18 000 ans.

2.4.3 Les dunes

Les fortifications côtières étudiées ayant été mises en place dans les dunes de la partie est de l'île, les dépôts dunaires sont évidemment prépondérants ici. Naturellement, les dépôts de dune éolienne sont caractérisés par une stratification complexe dont l'organisation dépend du type de dunes et du sens d'écoulement du vent. Si sur l'île d'Yeu, des dunes en barkhanes ont été signalées (Commentaires personnels d'Hervé Diot), il n'a pas été véritablement possible d'en identifier sur le terrain. Les observations ont plutôt mis en évidence des dunes littorales globalement parallèles à la plage, mais dont la géométrie est difficile à caractériser dans le détail du fait de la présence d'arbres en arrière-dune et de la fréquence des remaniements d'origine anthropique. Néanmoins, la structure des dunes naturelles comporte des stratifications obliques et parfois entrecroisées (Figure 31), généralement soulignées par des différences de granulométrie du sable. Dans ce type de milieux dunaires, les études préalables employant le géoradar ont montré que l'organisation de la stratification est souvent visible au géoradar, et soulignée par des réflecteurs mineurs (figure 31).

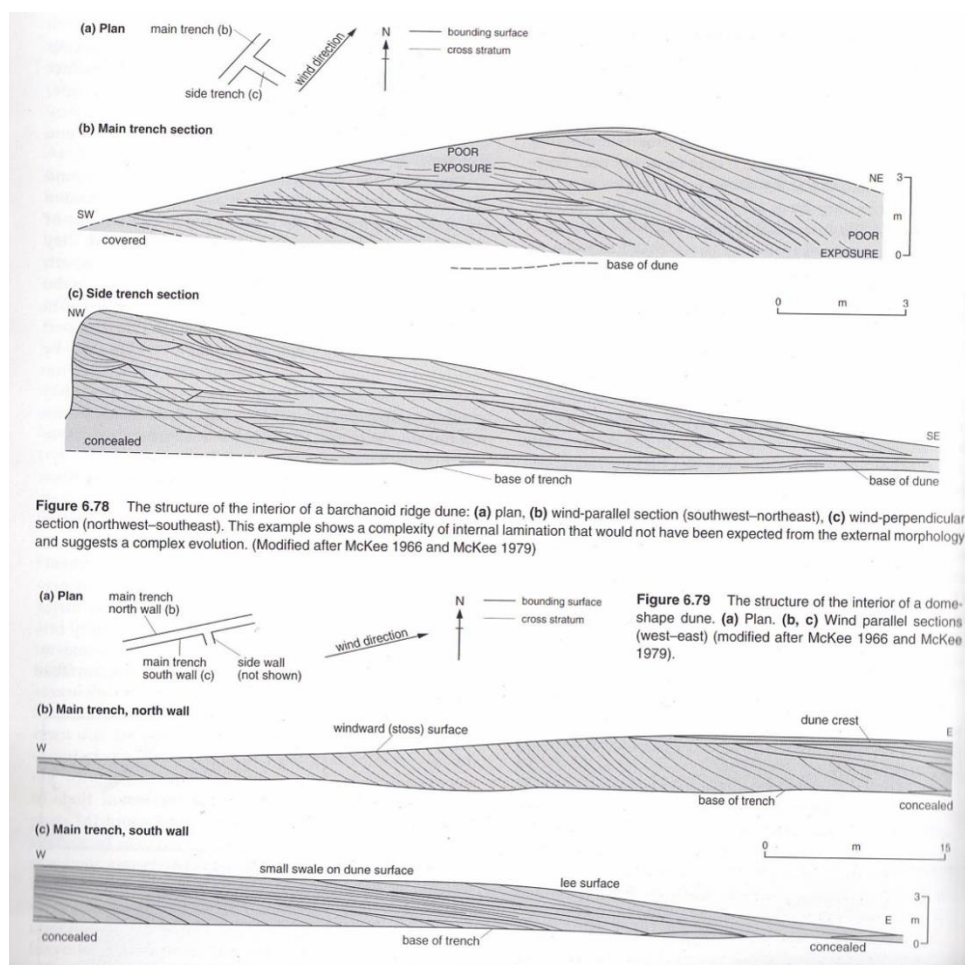


Figure 31 : Organisation interne de trois types classiques de dunes éoliennes. Figure extraite de *Sedimentary Structures*, Collinson, Mountney and Thompson, third edition, 2006).

Les dunes étant par nature très mobiles - et dans le cas des dunes côtières, soumises à la fois à l'érosion éolienne et à l'érosion marine - la stratification est fréquemment interrompue par des surfaces de réactivation, elles aussi visibles sur les profils géoradar par l'intermédiaire de réflecteurs plus ou moins importants.

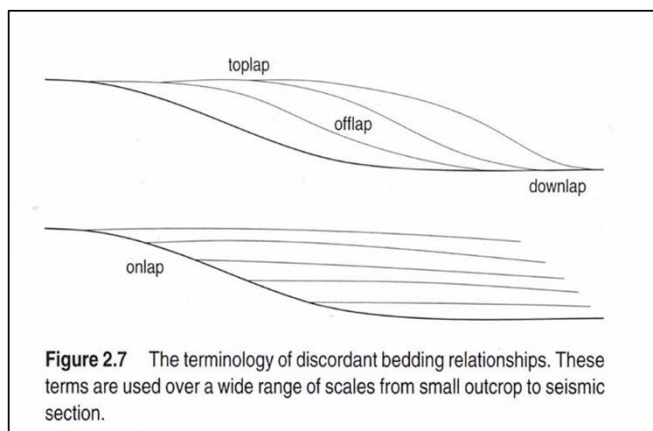


Figure 32 : Terminologie des relations géométriques observables dans les stratifications discordantes. Figure extraite de *Sedimentary Structures*, Collinson, Mountney and Thompson, third edition, 2006.

Afin de décrire au mieux l'organisation de ces dépôts lorsqu'ils sont visibles sur les profils géoradar, les termes anglais de tolap, offlap, downlap et onlap ont été utilisés dans ce mémoire.

Un « onlap » est un réflecteur à faible pendage, se terminant sur autre réflecteur plus incliné. Dans les environnements côtiers, une succession d'onlaps est interprétée comme une hausse relative du niveau marin.

Un « tolap » est caractérisé par une couche inclinée butant sur une interface supérieure (eau-sédiment, ou cortège sédimentaire supérieur). Ces interfaces sont observables dans le cas d'une chute du niveau marin, générant une érosion sur la partie supérieure (interface

supérieure du biseau), qui est émergée par rapport aux cortèges sédimentaires en dessous, donc plus anciens. Enfin, un « downlap » est un réflecteur à forte pente venant se déposer sur une couche à faible pente. Cette figure est interprétée comme une phase de rétrogradation (période régression de la ligne de rivage) ou d'aggradation (période de stabilité du rivage).

La figure 32 illustre la signification géométrique de ces termes, qui s'appliquent non seulement dans le cadre des niveaux dunaires naturels, mais aussi dans le cadre des éventuelles discordances ¹⁰observées.

2.4.4 Les dépôts anthropiques

Les dunes de l'île d'Yeu étant construites depuis plusieurs centaines d'années, un certain nombre de dépôts sédimentaires résultent de l'activité anthropique. Aux abords des fortifications, il s'agit essentiellement de dépôts de remblais sablonneux, de composition variable en fonction des époques et des usages, ou de structures bâties. Ces remblais sont peu documentés. Néanmoins, les documents liés à la construction des fortifications militaires françaises d'époque napoléonienne indiquent que la partie avant des remparts était généralement constituée de remblais fins/tamisés, afin d'éviter les projections lors des impacts (Instructions sur les batteries de côtes, février 1850, Service Historique de la Défense, Vincennes). Bien que des stratifications « artificielles » puissent apparaître dans des remblais par tri granulométrique d'origine gravitaire, les remblais sont généralement dépourvus de structure interne bien définie. En revanche ils peuvent s'intercaler avec des surfaces de piétinement et de tassement.

¹⁰ Contact érosif séparant deux unités géologiques dont la plus récente est matérialisée par un dépôt (définition tirée du site internet du BRGM (<https://infoterre.brgm.fr/fiche-registry/thesaurus.php?ncl=geolstrcon>))

3. Résultats

Cette partie de l'étude présentera les résultats du travail de recherche historique concernant à la fois le recensement des tempêtes historiques de l'île d'Yeu et l'historique de l'aménagement des trois sites fortifiés étudiés.

L'historique des tempêtes ayant marqué les mémoires humaines et le paysage littoral est présenté sous forme de frise chronologique conçue à partir de l'outil TikiToki.

L'historique des aménagements réalisés sur les 3 sites étudiés est également présenté sous forme d'une frise chronologique. Ce choix se justifie par l'aspect interactif de l'outil qui permettra aux propriétaires des fortifications, non seulement de prendre connaissance des résultats, mais aussi d'enrichir la frise et la modifier afin de préciser certains faits historiques.

Les profils géoradar seront ensuite présentés afin de proposer une première lecture de la subsurface, mettant en évidence les relations géométriques entre les différents aménagements anthropiques et les massifs dunaires naturels.

3.1 Chronologie des aléas météo-marins recensés depuis IV siècle

L'inventaire des événements météo-marins extrêmes depuis quatre siècles survenus à l'île d'Yeu, initié l'an passé (Giraud, 2020), met actuellement en évidence 54 occurrences marines. Ce nombre n'est évidemment pas exhaustif, mais explicite les événements météorologiques extrêmes majeurs survenus à l'île d'Yeu.

Lors de l'étude précédente, la recherche d'archives historiques permettant de recenser les tempêtes à l'île d'Yeu s'est focalisée sur les ressources locales (presse locale de l'île « Oya Nouvelles », créée en 1948) et nationales (« Petite journal de la République de 1870 »).

Dès lors, les événements retranscrits chronologiquement ont été classés en plusieurs catégories :

- Les tempêtes, dont on a connaissance, qui ont affecté l'île d'Yeu, et qui ont eu pour effet une submersion.
- Les tempêtes, dont on a connaissance des conséquences néfastes (naufrages, mort de marins), mais dont on ne sait pas si elles ont affecté l'intérieur des terres de l'île d'Yeu.
- Les tempêtes qui ont affecté l'île d'Yeu, d'intensité faible ou moyenne.
- Les tempêtes majeures dont on sait qu'elles ont eu un impact important aux environs de l'île d'Yeu, sans savoir si cela a été le cas à l'île d'Yeu.

Les événements tempêteux datant du XIX et du XXème siècle ont majoritairement été recensés dans l'inventaire proposé par Kevin Giraud (2020). La plupart de ces tempêtes recensées durant cette période est expliquée par le nombre important de naufrages des thonnières (ou « dundees ») et de leurs équipages, partis pêchés au large des côtes bretonnes, dans la région de la croix de l'Irlande (en mer Celtique) où étaient localisés les bancs de thons.

La tempête du 20 septembre 1930 (figure 31, A) est l'une des tempêtes les plus connues de la population d'Yeu, mais également des communes où le secteur de la pêche était prédominant (Concarneau, Les Sables d'Olonne). 207 marins pêcheurs ont péri en mer.

Le présent travail a contribué à alimenter cette base de données de l'historique des tempêtes sur la période antérieure au XVIIIème siècle, ainsi que sur la période 1960 - 1990.

La période pré 1700 a été étudiée à l'aide de ressources mettant en évidence des « vimers » (terme utilisé autrefois désignant les phénomènes de tempêtes générant des submersions marines à l'intérieur des terres) occasionnant de nombreux dommages humains et économiques à l'échelle régionale.

En exemple, on note un événement tempétueux datant du 31 décembre 1598 au 1er janvier 1599 qui aurait impacté le littoral des Pays de la Loire. Cette occurrence aurait été générée par la conjonction d'une chute barométrique et par un fort coefficient de marée. Durant cet événement plusieurs habitants de Bouin (Vendée) ont été contraints de fuir leurs habitations (Athimon et al., 2016).

Il est important de noter que l'affirmation d'un tel coefficient de marée lors d'un événement tempétueux à cette période de l'histoire, est basé sur des faits provenant de témoignages subjectifs. Il faut donc être vigilant quant à l'interprétation de la caractérisation des occurrences marines à cette époque de l'histoire.

De plus, il faut souligner que cette occurrence de l'hiver 1598-1599 a été recensée par les populations locales résidant sur le continent, ce qui signifie qu'il n'y a aucune certitude que les effets induits de cette occurrence sur le continent ont été avérés sur le littoral de l'île d'Yeu.

Aussi, lors de l'incendie du château de Blain, en novembre 1793, les archives de l'île d'Yeu aurait brûlées réduisant considérablement les sources historiques des impacts de tempêtes (Athimon et al, 2016). Au regard de cette information, les événements tempétueux recensés à cette temporalité marquent une certaine improbabilité. Dès lors, les événements recensés avant le XVIIIème siècle sont classés dans une nouvelle catégorie nommée « Tempête mémorable dans la région de l'île d'Yeu, mais non-avérée sur les côtes de l'île d'Yeu ».

Par ailleurs, plusieurs occurrences marines entre 1960 à 1990 ont pu alimenter cette banque de données, au regard de l'analyse des archives locales conservées par Oya Nouvelles, mais aussi régionales et nationales provenant du site de météo-France, et de la littérature scientifique (Pouzet, 2018 ; Bourdy, 2019).

Aussi, l'un des objectifs de cette étude est d'identifier les événements météo-marins impactant la géomorphologie du littoral de l'île d'Yeu. Dès lors, les données météorologiques (relevés anémométriques, pluviométriques et barométriques, mesure de la hauteur de la houle et le calcul des coefficients de marées) provenant des stations météorologiques et du SHOM du continent représentent une source non négligeable afin d'inventorier et de caractériser les occurrences marines.

Ce travail de recherche d'archives météorologiques recense des événements tempétueux qui n'ont surement pas été marqués dans les mémoires des islais, cependant l'impact environnemental de ces occurrences a surement été enregistrées dans les faciès sédimentaires des massifs dunaires de la côte est de l'île d'Yeu. Les potentiels enregistrements de ces événements météo-marins au sein des structures dunaires sera abordée dans la partie discussion.

3.2 Le fort Gauthier

3.2.1 Chronologie des aménagements réalisés à la Pointe Gauthier

3.2.1.1 Fortifications napoléoniennes

Les premiers travaux d'aménagements du fort Gauthier durant le XIX^{ème} siècle, impulsés par le lieutenant L'Herillier envoyé en mission sur l'île pour le compte de la Direction du Génie de Nantes en 1843, ont été retranscrits grâce aux 9 délibérations du comité des fortifications de 1847 à 1862, fournies par le Service Historique de la Défense.

D'après ces archives, la batterie côtière de la Pointe Gauthier, à la fin des travaux qui se déroulèrent entre 1848 et 1861, serait composée d'un parapet, bénéficiant d'une crête qui serait élevée à 6m50 par rapport au niveau des pleines mers de vives-eaux¹¹ (qui est, lui, estimé à 2m50 par rapport au niveau 0 NGF de l'époque ; annexes 2 archives 1859-1860). Ce parapet est réhaussé afin de situer la crête à la même altitude que le toit du corps-de-garde, afin que le réduit ne soit pas repéré par les ennemis venant du large. Une citerne constituant un réservoir d'eau potable construite probablement durant les fortifications du XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle, est située sous le réduit et, est surélevée de 0.50mètre afin que le fond du fossé du réduit soit au même niveau des pleines mers de vives-eaux, pour limiter les infiltrations des eaux marines.

Concernant l'artillerie, le nouvel état d'armement datant du 15 mars 1860 et arrêté par la commission des défenses de côtes, contraint l'ouvrage de s'armer de 4 canons et de 2 mortiers. Les bouches à feu sont réparties de la façon suivante : 3 canons sur la face droite du réduit, 1 mortier au saillant, 1 canon et 1 mortier sur la face gauche. Le réduit est un corps de garde de type n°2 modifié pour 30 hommes, construit entre 1860 et 1861.

Les directions des feux des mortiers sont changées à la fin des travaux en 1861 (avis du comité des fortifications du 20 mars 1860). L'un est orienté au nord-ouest, vers le Port breton (actuellement Port-Joinville), et le second est tourné vers les Conches (sud-est).

Au regard des neuf avis des comité des fortifications, on décèle un manque de moyens humains et financiers afin d'achever les projets de batteries côtières de l'île. On note par exemple, une proposition du comité des fortifications de diminuer les dépenses lors des travaux en réduisant l'épaisseur des traverses (« mur ou massif terrassé construit en travers d'un ouvrage ou perpendiculairement à un parapet pour éviter les tirs à revers » définition tirée du site internet de l'association « 1846 ») à 3m ou à 3m50, et de revêtir les talus de vases et non de gazons. Ce type de revêtement, moins couteux, a déjà été employé sur d'autres sites fortifiés par la direction des batteries de Nantes.

Cependant, en raison de l'importance stratégique du Fort Gauthier, le comité des fortifications, le chef du génie et le directeur des fortifications sollicitent régulièrement le ministère de la guerre afin d'attribuer des allocations supplémentaires pour mener à bien les aménagements prévus.

¹¹ Il est important de préciser que les données altimétriques inscrites dans ces archives sont fictives et ne correspondent pas exactement à ces hauteurs indiquées. Ces informations constituaient un ordre de grandeur afin d'améliorer la lecture du projet de batterie dessiné par le chef du génie.

Par conséquent, le ministère de la Guerre octroie un financement afin de gazonner les talus. Aussi, afin de préserver les terrassements, une clôture est établie pour empêcher le bétail de détruire les gazonnements et de mettre à nu le sable qu'ils recouvrent.

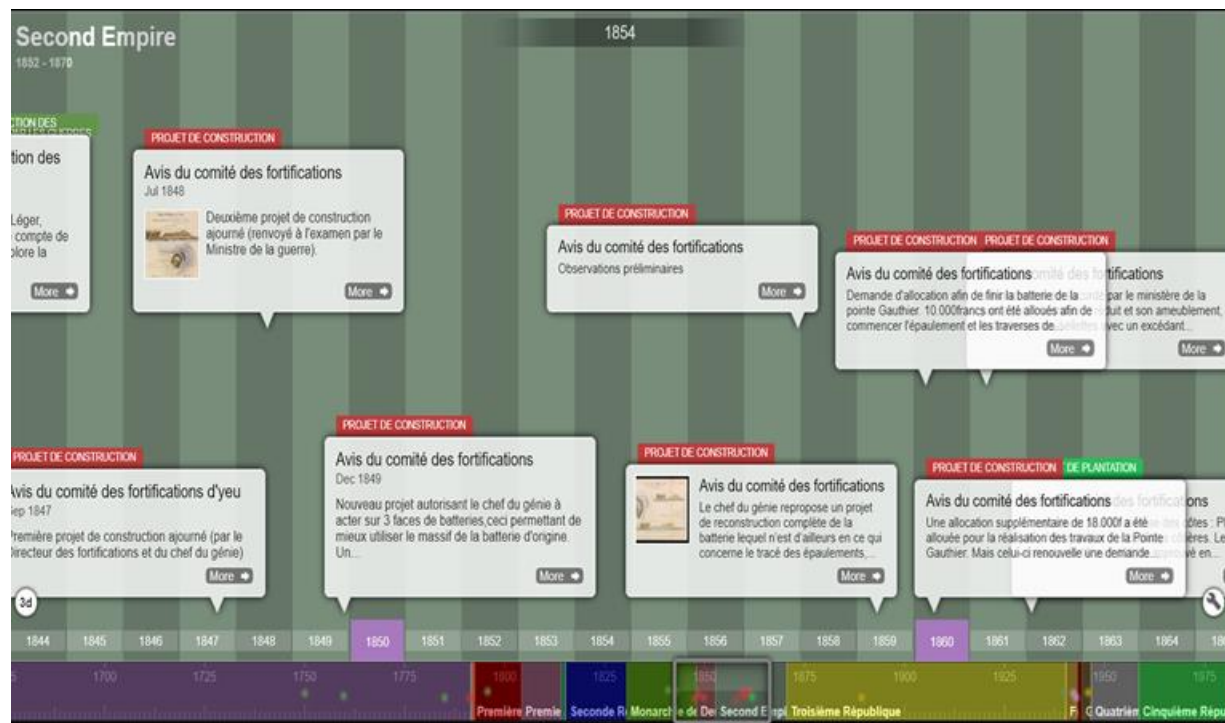


Figure 34 : Aperçu (en capture d'écran) de la frise chronologique retraçant l'histoire de la batterie du fort Gauthier

Lors de la fin des travaux de fortifications en 1861, le chef du génie, concerté avec le Maire de l'île envoie une demande de fonds pour l'exécution des plantations d'arbres dans les dunes aux alentours des batteries. Pareillement, le directeur des fortifications regarde comme indispensable ces actions afin de finaliser la défense des côtes.

Ce projet fut premièrement ajourné, en raison d'un litige administratif entre l'état et la commune d'Yeu concernant les prétentions sur la propriété des dunes. En effet, dans le cas du financement du projet de plantation des dunes par le ministère de la guerre, l'état requiert la possession administrative des parcelles littorales, qui sont durant cette période, agricoles ou urbanisées. Seulement, d'après les informations contenues dans un procès-verbal du conseil municipal datant de 1852, les propriétaires de ces parcelles ne possédaient aucun titre justifiant leurs bien privés. Ceci est expliqué, d'une part, parce que la production de titre sur l'île d'Yeu est difficile en raison de l'absence de notaire ; les actes se faisaient donc de manière informelle. Ou bien, les actes notariaux présents dans les archives familiales ou à la mairie furent détruits durant la révolution de 1793 mais également en 1795, lors de l'invasion des Anglais.

Dans un premier temps, en 1861, la commune consent à l'interdiction du libre accès et l'abandon de jouissance des parcelles de dunes, mais à condition que le ministère de la guerre accepte que la moitié des ressources en bois provenant de l'élagage annuels soit attribuée à la commune. Cette proposition est reprise par le directeur des fortifications, qui est d'avis que la commune d'Yeu rachète les terrains nécessaires aux

plantations autour des batteries, en raison du faible coût qu'ils imposent. Le comité des fortifications valide cette suggestion en évoquant que le chef du génie est chargé de traiter à l'amiable la vente des terrains. Le comité incite la commune à réaliser cette action afin d'exécuter le plan des plantations sans retard, avant le printemps et par la même, accepte en 1862, les crédits ouverts pour la défense des côtes.

La commune accepte l'achat des terrains et ainsi les plantations sont effectuées. Elles consistent en des tamarins espacés de 1m, entre lesquels sont présents des semi de pins maritimes. En raison de l'absence de terre végétale, les semis sont protégés du vent et des embruns par des algues marines ; des clôtures sont aussi envisagées pour prohiber le passage du bétail, avec en plus, des murs en pierres sèches de 1mètre 30 de hauteur.

Ainsi, 2 hectares sont plantés sur le linéaire côtier depuis la batterie de la Pointe Gauthier jusqu'à celle de la grande Conche.

3.2.1.2 Fortifications allemandes

La pointe Gauthier n'aurait subi aucun travaux ou dégradation jusqu'à la seconde guerre mondiale. Si tel est le cas, aucune archive recensée dans cette étude n'a permis de valider cette affirmation.

Cependant, les archives historiques acquises provenant de la commission de déclassement et d'aliénation des ouvrages anciens datant de 1946 et 1947 ne permettent pas d'obtenir une coupe du relief de la batterie, ni de rapport écrit évoquant les détails des travaux durant l'occupation.

Cependant, une visite sur site en compagnie d'Alain Chazette, historien et archéologue spécialiste de « bunkerarchéologie » (étude de l'agencement des vestiges de guerres allemands) a permis d'enrichir les résultats concernant les aménagements datant de l'époque allemande, et d'apporter des éléments de réponse



Figure 35 : "L" inscrit sur l'un des abris casematés de la pointe Gauthier. Les lignes en pointillés ont été rajoutées afin de bien distinguer le lettrage. Photo prise par Robin PIEL.

par rapport les aux particularités des agencements des batteries datant de cette époque, ainsi que les matériaux utilisés pour la construction.

D'après Alain Chazette, le numéro de construction des ouvrages allemands, est précédé d'une lettre identifiant le corps militaire ayant construit l'ouvrage (armée de l'air, de terre ou marine). Par exemple, un « S » signifie « Scwhere » et correspond aux forces terrestres allemandes armées d'ouvrages lourds. Il détermine une épaisseur de béton d'au moins 2 mètres, appliquée sur les ouvrages de défenses des batteries du Nord-Pas-de-Calais, du Danemark ou de la Norvège.

A la pointe Gauthier, un « L » est inscrit sur un des murs de construction de l'une des casemates (figure 33). Ce sigle signifierait « Luftwaffe », ce qui correspond à l'armée de l'air. D'après Alain Chazette, l'armée anti-aérienne était présente seulement sur des espaces de moindres importances stratégiques (absence d'hôpital, éloignement du continent).

Cette casemate, au regard du sigle inscrit d'origine allemande, serait édifiée en tôle métro (métallique) recouvert par un mur bétonné d'une épaisseur de 0.40 à 1mètre, et servait d'abris, de stockage de munitions et de nourritures (Chazette, 2008).

3.2.2 Synthèse des faciès radar obtenus

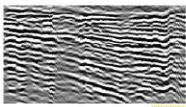
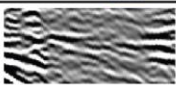
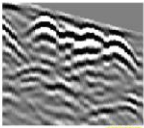
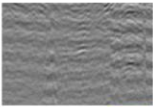
Faciès radar	Description	Interprétation
 FR1	Réflecteurs continus à faible ou moyen pendage, et de forte amplitude.	Figures obliques traduisant un offlap, qui symboliserait des dépôts éoliens.
 FR2	Réflecteurs faiblement inclinés voire, subhorizontaux et continus. Ils sont marqués par une forte amplitude.	Surface majeure pouvant correspondre à une ancienne surface d'érosion marine.
 FR3	Réflecteurs concaves et continus mais coupés par des réflecteurs horizontaux. Identifiés dans les premiers centimètres d'émission du signal et démontrant une très forte amplitude.	Structures horizontales et parallèles rappelant les figures en onlap. Cela caractériserait une sédimentation récente.
 FR4	Hyperboles de diffraction superposées et d'amplitude variable.	Les hyperboles sous-jacentes marqueraient la schistosité des têtes de roches correspondant au toit du socle.
 FR5	Réflecteurs discontinus et à faible pendage. Marqués par des variations d'amplitude.	Réflecteurs obliques et entrecroises, caractéristiques du milieu dunaire.
 FR6	Réflecteurs de très forte amplitude, et discontinus. Également, des hyperboles de diffraction sont caractérisées par des largeurs de branches variables.	Structures « chaotiques » voire inexistantes. Les réflecteurs traduiraient une épaisseur de matériaux grossiers s'apparentant à des pierres de constructions.
 FR7	Réflecteurs subhorizontaux ou faiblement inclinés, marqués par une forte atténuation du signal.	Milieu homogène, qui marquerait une épaisseur remaniée ou remblayée.
 FR8	Hyperboles de diffraction de forte amplitude. Située en proche subsurface.	Objets présents dans le sol. Il peut être d'origine anthropique (matériel de guerres ou de construction) ou naturelle (terrier de lapin, racine d'arbre)
 FR9	Réflecteurs invisibles en profondeur, en raison d'une forte atténuation.	La forte conductivité électrique d'un milieu argileux, tourbeux ou contenant un fort taux de salinité peut générer l'atténuation du signal électromagnétique.

Figure 36 : Tableau classant des faciès géoradar identifiés sur les 17 profils interprétés.

L'interprétation des données géoradar a pu être réalisée au regard de réflecteurs traduisant une interaction avec le signal électromagnétique (réflexion, diffraction et atténuation). La figure 36, présente un inventaire exhaustif des faciès géoradar mettant en évidence les différents milieux investigués. Chacun de ses faciès est codé et pourra être référencé pour l'interprétation de chaque profil géoradar.

L'identification de ces milieux dépendent des filtres appliqués lors de la phase de traitements des données. L'interprétation des réflecteurs sur les données géoradar a été réalisée au regard de profils « migrés » ou « non migrés », et en fonction d'une amplitude plus ou moins forte du signal. La plupart des profils ont été interprétés à partir de données non migrées, avec une forte amplitude du signal.

3.2.3 Interprétation des profils géoradar réalisés à la pointe Gauthier

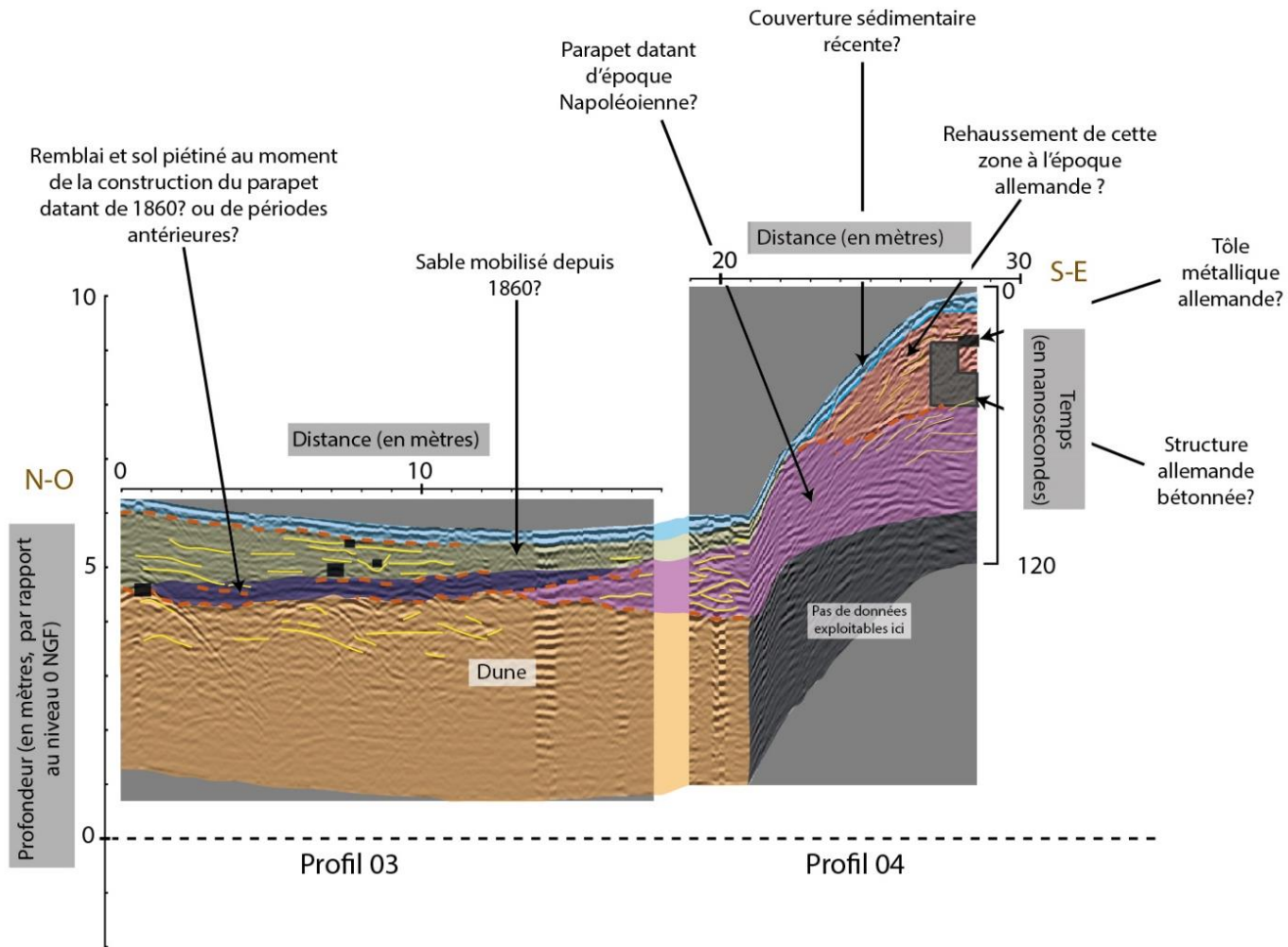


Figure 37 : Les profils 03 et 04 suivent une direction sud-est. Ils ont été réalisés du haut de la dune jusqu'à la crête du talus extérieur du parapet.

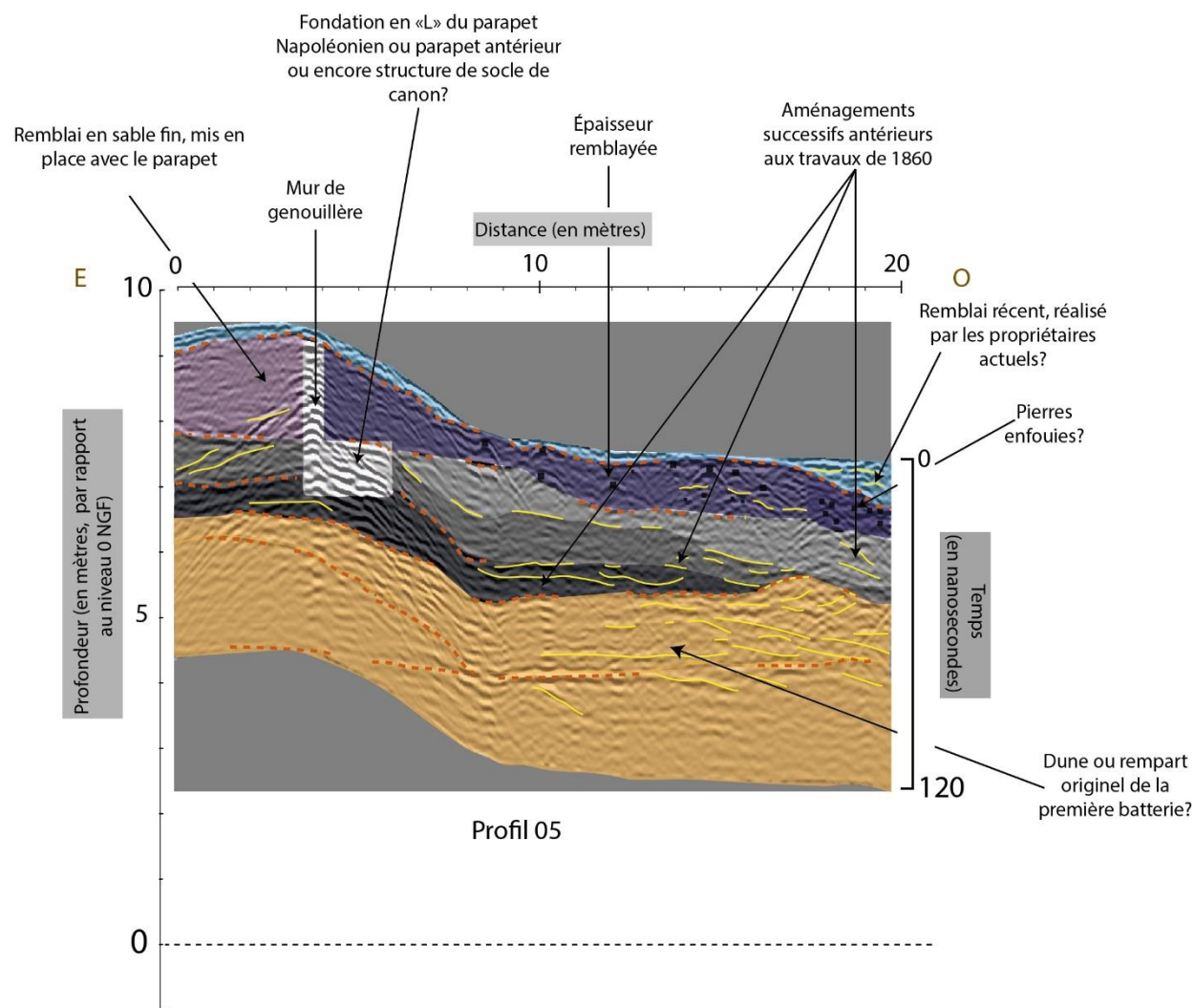


Figure 38 : Le profil n°05 réalisé à partir de la crête du talus intérieur du parapet situé à l'est de la batterie. Le profil suit une trajectoire d'est en ouest et le géoradar coupe l'enregistrement de données à partir d'un escarpement (à 20m de distance) marquant la limite de la plateforme en arrière du parapet.

Les profil 03 et 04 (figure 37 ; annexe 2.1), et le profil 05 (figure 38, annexe 2.1) ont été réalisés sur le relief actuel de la batterie côtière de la Pointe Gauthier. Les profils 03-04 sont de direction sud-est, du haut de dune jusqu'à la crête du talus extérieur du parapet, situé sur la façade nord de la batterie, alors que le profil 05 (figure 35) est orienté d'ouest en est, du haut du parapet de la façade est de la batterie, jusqu'à la fin d'une plateforme arrière aplanie.

Le profil 03 (figure 37) montre une interface entre un milieu remanié et la structure dunaire naturelle sous-jacente entre 4 et 5 m NGF (violet foncé). En proche subsurface, une première épaisseur est marquée par des réflecteurs horizontaux identifiant une fine couche de sable récent. Au niveau sous-jacent, une zone de réflecteurs légèrement inclinés (FR04 ; figure 36) qui marquerait également une zone de sable dunaire. Cette unité reposerait sur un ensemble assez fin, et qui serait caractérisée par des réflecteurs de forte amplitude associés à une série d'hyperboles marquant la diffraction du signal sur des objets naturels ou anthropiques (FR8 ; figure 36). Le massif dunaire serait la zone la plus profonde (couleur orange) en raison des réflecteurs biseautés déterminant les dépôts sableux.

Le profil 04 suit la trajectoire du profil 03, et met en évidence des réflecteurs subhorizontaux au sein de la structure escarpée, différenciés par des contrastes d'amplitude du signal. Les données sont lisibles jusqu'à une zone atténuante (coloriée en gris), équivalent à des données non interprétables. Ce phénomène peut être expliqué par l'escarpement trop abrupte du parapet, mais aussi par le « gain » qui amplifierait le signal entre 20 et 40 nanosecondes et qui ne permet pas d'augmenter la visibilité des réflecteurs au-delà des 40 ns. Les réflecteurs marqués par une forte amplitude du signal au sein des épaisseurs superficielles, peuvent également amoindrir la visibilité des données en profondeur.

Sur le profil 04 les réflecteurs observés entre 26 et 30m (figure 37) sur un temps d'arrivée de 0 à 30 ns, marqueraient la présence d'objets plutôt massifs ou des surfaces denses. Ce milieu pourrait correspondre à une épaisseur remaniée durant la période d'occupation allemande (FR6, figure 36). Un objet enterré à 29m, dans les premiers temps d'arrivées du signal, est identifié par une très forte réflexion de l'onde électromagnétique sur une surface sûrement métallique. Cet objet pourrait être l'identification d'un milieu remanié pendant l'époque allemande en raison de la « tôle métro » utilisée pour la construction des casemates allemandes.

L'ensemble sous-jacent (colorié en mauve) est caractérisé par des réflecteurs subhorizontaux faisant référence à des successions de remblaiements qui pourraient correspondre aux terrassements du parapet napoléonien. L'altitude de la crête du parapet établie aux alentours de 8.50m NGF selon les archives napoléoniennes serait ici confirmée au regard de l'unité en violet qui symboliserait le parapet datant du 2nd Empire.

Le profil 05 a été réalisé dans le but d'obtenir une coupe verticale sur un transect équivalent à celui dessiné par le chef du génie présenté dans les projets de construction de la pointe Gauthier de 1859-1860 (Annexe 1.2 et figure 38). Le remblai qui a servi à construire le talus extérieur du parapet semble être marqué par un milieu homogène qui correspondrait à du sable fin, du premier mètre du profil jusqu'au mur de genouillère à 4m de distance. Ce mur de genouillère (faisant en général quelques dizaines de centimètres de hauteur) semble être maintenu par une structure massive, s'apparentant à un socle, sûrement en béton, qui daterait de l'époque Napoléonienne (figure 38).

Ce socle est marqué par une forte amplitude du signal, observé jusqu'à 2m50 de profondeur depuis la surface du sol, ce qui laisserait penser que cette structure massive serait originaire des premiers aménagements de batteries du XVIII^{ème} voire, du XVII^{ème} siècle. Les potentiels constructions à cette période antérieure au XIX^{ème} siècle ont été identifiés selon trois nuances de gris. A la vue des surfaces

mineures identifiées, les réflecteurs n'apparaissent pas homogènes (FR7, figure 36) sur ces trois ensembles ce qui pourrait identifier des travaux réalisés à des intervalles de temps plus ou moins espacés au cours de l'histoire.

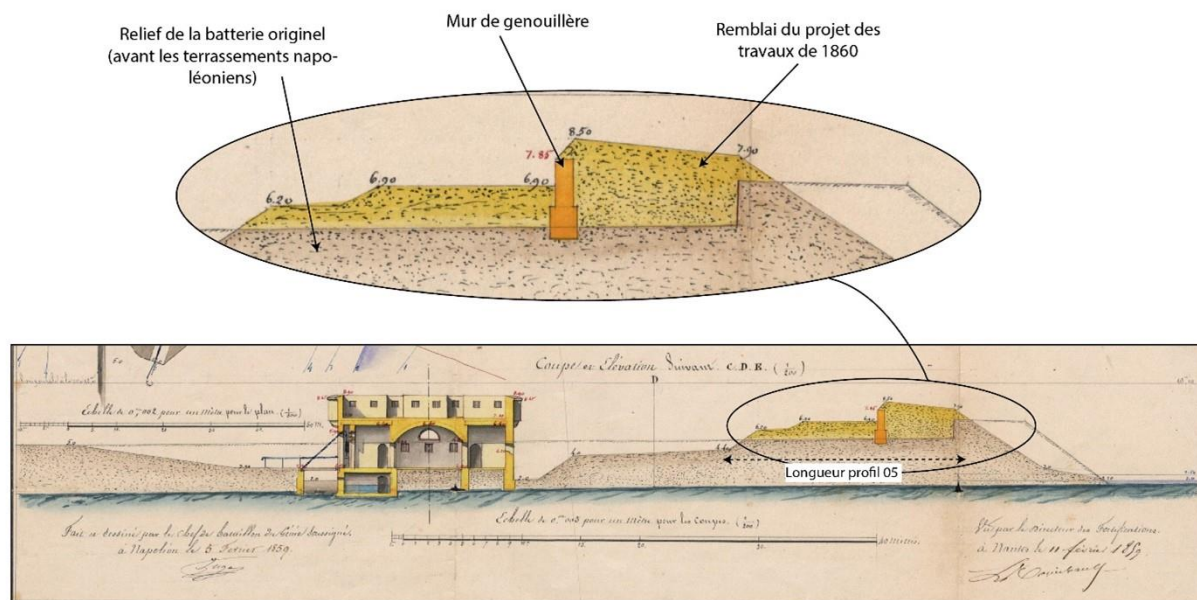


Figure 39 : Coupe transversale du projet de construction du parapet de la batterie de la pointe Gauthier et de son réduit en 1859-1860. Archive provenant du Service Historique de la Défense, Vincennes.

3.3 Le fort Neuf

3.3.1 Chronologie des aménagements et modifications réalisés au Fort Neuf

3.3.1.1 Fortifications napoléoniennes

Pareillement au fort Gauthier, les premiers aménagements du Fort Neuf proviennent des projets de constructions retranscrits par les avis du comité des fortifications.

C'est à la date du 20 mars 1860 que les modalités de constructions sont actées pour la batterie de la grande Conche. Un corps-de-garde de type n°3, correspondant à une contenance de 20 hommes est construit entre 1860 et 1861. Ces murs auraient un mètre d'épaisseur (façade ouest-sud-ouest) et ses voûtes 0.60mètre, afin que la plateforme puisse être résistante en cas d'impact d'obusier de 20cm de diamètre. D'après les archives, le socle serait assez profond (aucun relevé métrique n'a été mentionné). Les fondations ont sûrement été établies sur arceaux maintenus dans le sol sablonneux comme l'a proposé le chef du génie de Nantes.

Aussi, quatre canons (ou bouches à feu) seront installés pour l'armement. Trois canons ont été placés sur la face centrale de la batterie (façade tournée vers le nord-est) en arrière du talus intérieur du parapet, et le dernier canon, sur la face gauche (vers le nord-ouest).

Le positionnement de ces pièces à feu permettait d'optimiser la défense de la plage en ayant de bonnes directions de tire.

Aussi, les crêtes du parapet originel ont été abaissées afin d'adapter le relief du terrain à l'artillerie.

Quant à la construction des plateformes en terreplein des batteries, le remblai offre une largeur de 4 mètres de terreplein, permettant d'accueillir l'artillerie afin de faire feu dans les directions sud-est et nord-ouest.

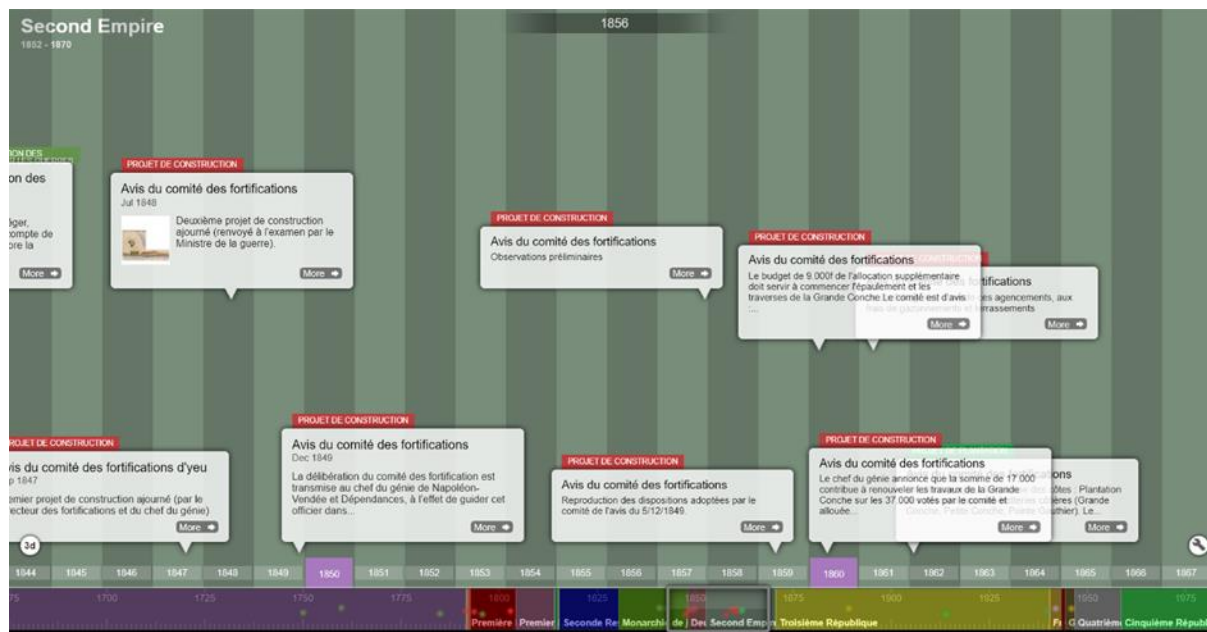


Figure 40 : Aperçu (en capture d'écran) de la frise chronologique retraçant l'histoire de la batterie du fort Neuf.

3.3.1.2 Fortifications allemandes

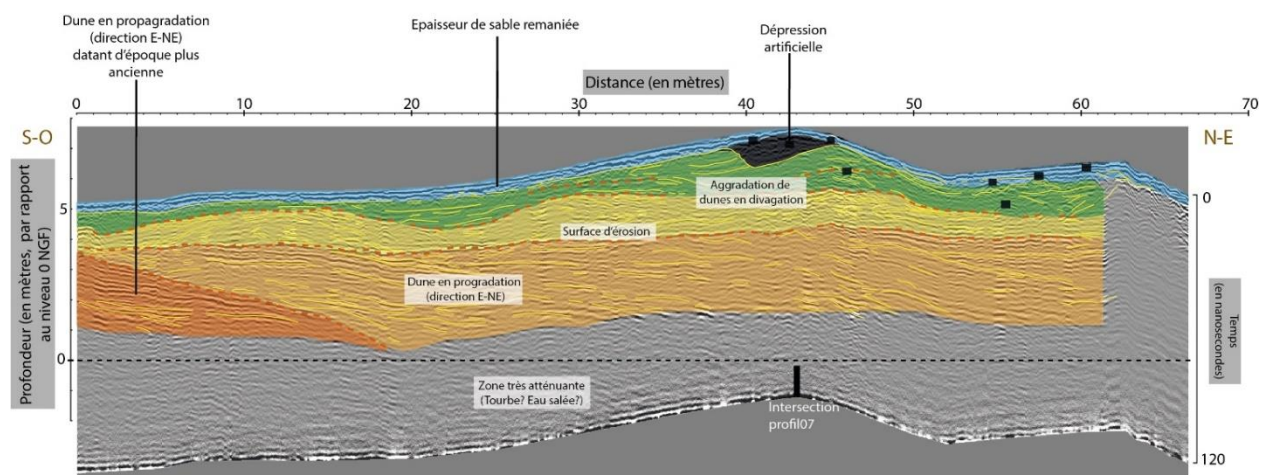
Durant l'occupation allemande à l'île d'Yeu, cette batterie côtière, comme à la pointe Gauthier, a fortement été investie en raison des nombreuses casemates qui ont été construites à partir de l'épaulement datant du Second Empire. Ces éléments ont considérablement modifié le relief et la configuration du site du Fort Neuf (figure 41).



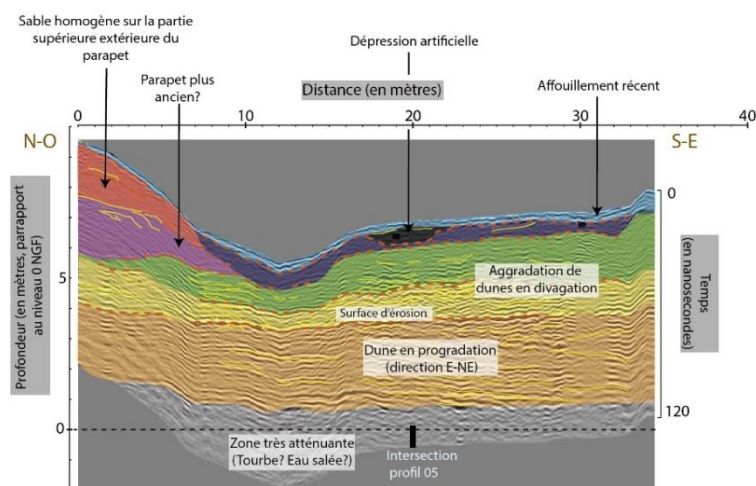
Figure 41 : Casemate allemande construite sur le talus intérieur du parapet napoléonien, au fort Neuf. Photo prise par Robin PIEL.

A travers les éléments évoqués concernant l'aménagement de la pointe Gauthier pendant l'occupation allemande, on peut penser que les murs extérieurs des trois casemates autour du Fort Neuf ont une épaisseur de 0.40 à 1mètre et que le toit de ces abris est composé de tôle métallique.

3.3.2 Interprétation des profils géoradar réalisé au fort Neuf



Profil 05



Profil 07

Figure 42 : Les profils 05 et 07 ont été réalisés à l'est de la batterie du Fort Neuf. Le transect 05 suit une trajectoire transversale au trait de côte et offre une coupe verticale de la dune grise jusqu'au haut de la dune blanche. Le profil 07 intersecte le profil 05 en partant de la crête du parapet à l'est de la batterie et traverse longitudinalement la dune grise.

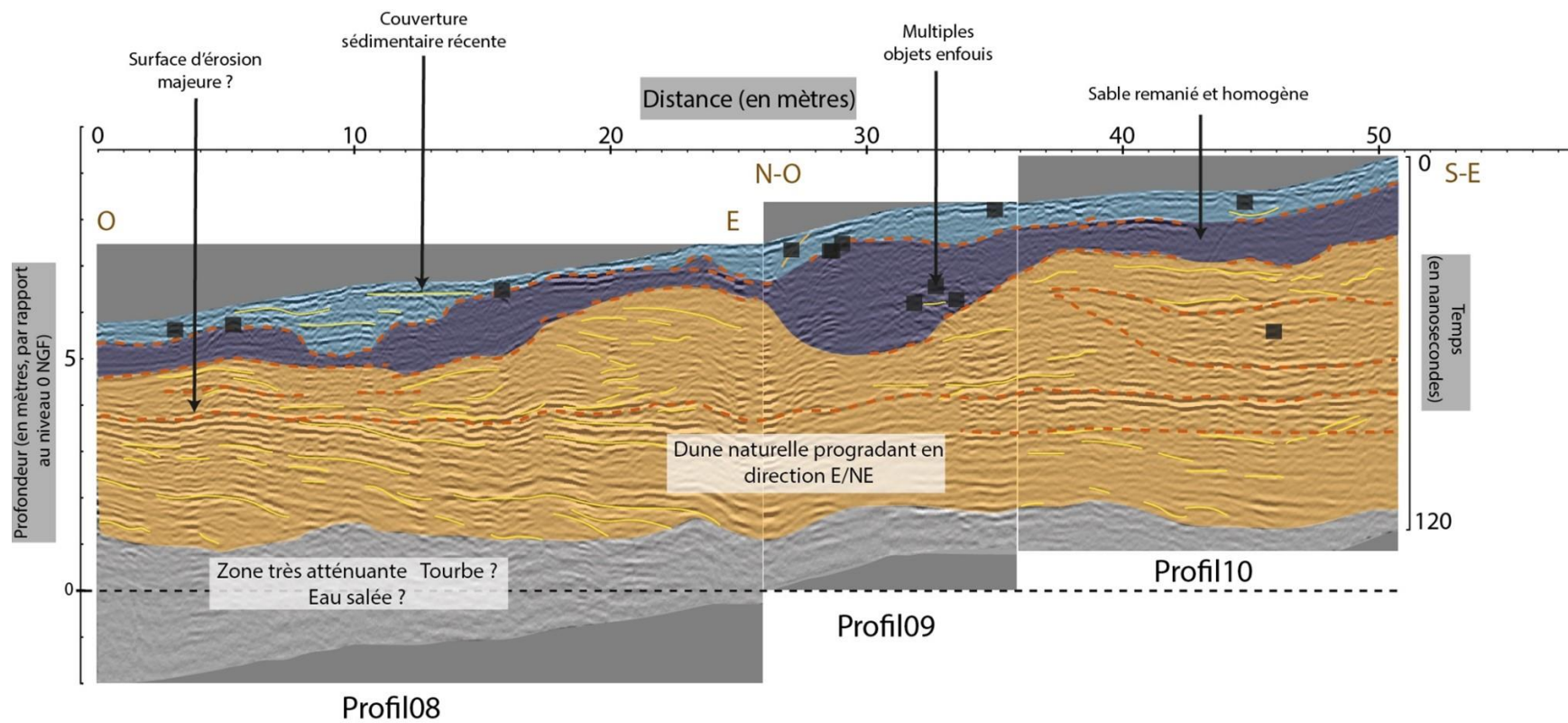
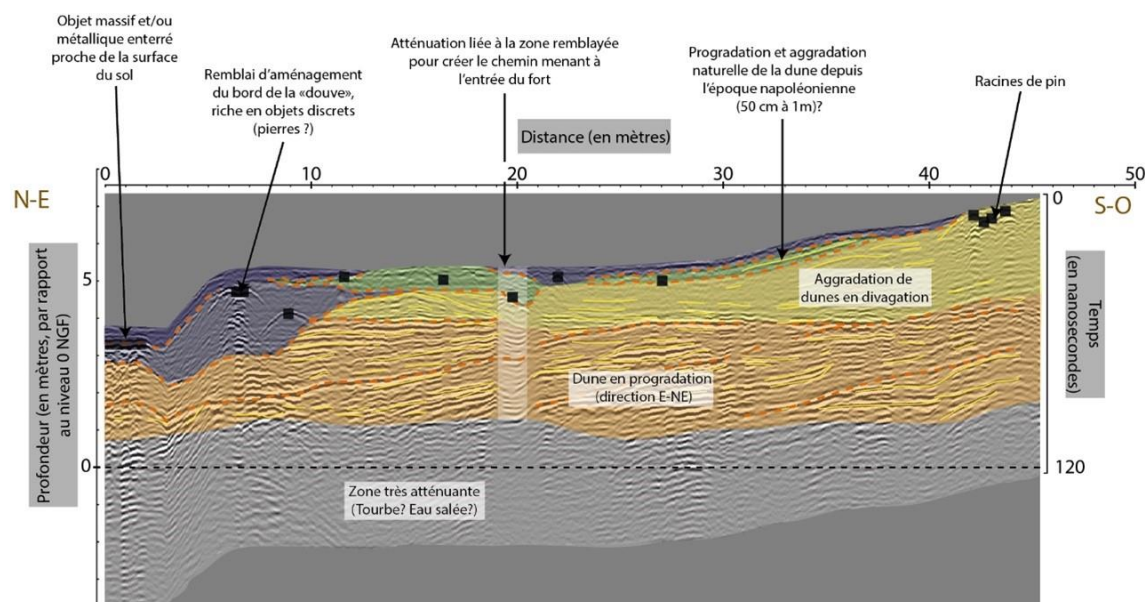
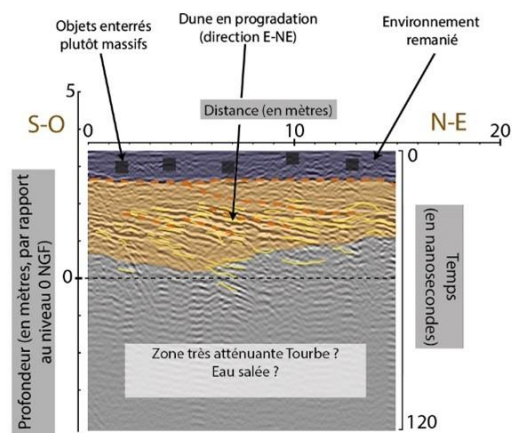


Figure 43 : Les profils 8-9-10 ont été réalisés à partir d'un seul enregistrement. Le profil suit la crête du parapet de l'entrée du fort Neuf jusqu'aux anciennes plateformes où étaient installés des canons anti-aériens allemands.

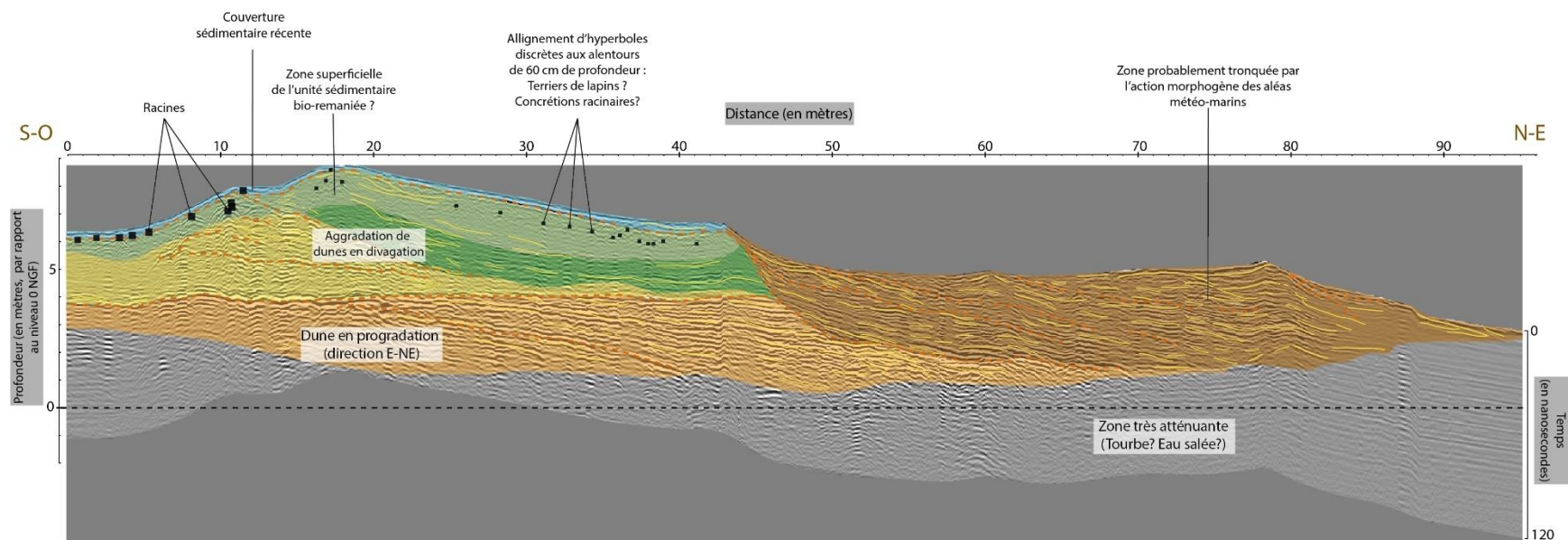


Profil 13



Profil 12

Figure 44 : Les profils 12 et 13 ont été réalisés au sein du périmètre de la batterie de la grande Conche. Le profil 12 a été effectué sur le sol des douves de la façade orientale du Fort Neuf. Le profil 13 a été réalisé du début des douves jusqu'à la ganivelle délimitant une propriété au sud.



Profil 15

Figure 45 : Le profil 15 traverse transversalement le linéaire de dune qui se situe au nord-ouest de la batterie de la grande Conche. Le géoradar parcourt l'arrière-pays dunaire et stoppe l'acquisition des données une fois arrivé sur l'estran.

Les 6 profils géophysiques sont marqués par une interface entre le milieu dunaire et une zone atténuée, qui est visible généralement proche du 1m NGF. Ce phénomène peut être expliqué soit par des matériaux géologiques possédant une forte conductivité électrique comme de l'argile, ou de la tourbe, mais aussi par un fort taux de salinité ou de matière organique au sein du milieu dunaire dans les épaisseurs plus profondes.

Les profils 5 et 15 (figure 42 et 45 ; annexe 2.2) identifient une zone atténuante et bloquent totalement la visibilité dès la première interaction du signal avec le milieu sableux (à partir de 60m pour le profil 05, et 85m pour le profil 15 ; [FR9](#), figure 36). La lecture des données y est impossible en raison de la conductivité du milieu trop importante et générant des réflecteurs horizontaux traduisant une résonnance (ou « ringing ») visible sur le radargramme. Ce phénomène apparaît très clairement au fur et à mesure que la géoradar se dirige vers l'estran, on peut donc penser que les facteurs de salinité et de saturation en eau sont la cause majeure de cette résonnance. La topographie relativement basse de la côte nord-est induisant la proximité de la surface du sol avec l'eau salée expliquerait également l'origine de l'atténuation.

Sur chacun des 6 profils géoradar présentés, on observe à l'altitude de 4m NGF des réflecteurs marquant un pendage de 15° plongeant vers l'est et de forte amplitude, sont observés en partie par le « gain » appliqué sur l'intervalle de 20 à 40 nanosecondes. Cette géométrie démontrerait une zone dunaire progradant vers l'est/nord-est ([FR5](#), figure 36).

La zone colorée en jaune et celle en verte sont composées de surfaces mineures horizontales légèrement inclinées et identifiées comme des couches de sables empilées (figure 42, 44 et 45 ; [FR 2](#), figure 36).

Une zone d'atténuation (coloriée en vert pâle) constituée d'objets diffractant sur le profil 15, peut traduire un ensemble homogène et certainement remanié ([FR7](#), figure 36) par l'action de facteurs floristiques et faunistiques locaux (comme les terriers de lapin, racines d'arbre...).

Le profil 05 (figure 42) identifie dans les premiers centimètres de la subsurface une épaisseur de sable certainement remaniée en raison des objets diffractant ([FR8](#), figure 36). On peut penser que le remaniement de cette couche est dû aux mobilités allemandes lors des travaux de fortifications. La présence d'objets ponctuels peut être expliquée par l'enterrement du matériel de guerre ou de construction, sur la partie orientale de la batterie.

Une dépression marquée par une géométrie en « cuve » à 43m du profil 05 et à 20m sur le profil 07 (figure 42 ; annexe 2.2) indique un ensemble remanié, qui daterait de plusieurs années après l'occupation allemande, et qui évoquerait des travaux par le propriétaire des lieux pour lutter contre l'érosion des dunes.

Le profil 07 (figure 42) met en évidence deux unités superposées au sein des premiers centimètres investigués. Ces unités sont caractéristiques de remblais anthropiques. Un ensemble est situé entre 9.40m et 7.80m NGF (colorié en rouge) au commencement de l'enregistrement des données. Il démontre des réflecteurs d'amplitude faible, ce qui pourrait correspondre à un milieu homogène ([FR7](#), figure 36) caractéristique d'un remblai avec du sable fin. L'ensemble identifié sous-jacent (en rouge) correspondrait aux travaux datant du Second Empire. Les réflecteurs détermineraient ici un milieu plus hétérogène avec des éléments plus grossiers. Aussi, un réflecteur subhorizontal marqué par un contraste d'amplitude du signal à 6m NGF identifierait la base du terrassement napoléonien.

Le profil 8 9 10 (figure 43, annexe 2.2) a réalisé un enregistrement de données sur le terre-plein montant de la crête du parapet, depuis l'entrée du fort, jusqu'aux plateformes où étaient aménagées les canons anti-aériens. Ce profil permet de mettre en évidence une épaisseur d'origine anthropique (zone colorée en violet) grâce notamment à des objets enterrés et diffractant le signal. En effet, ce milieu remanié serait caractérisé par des réflecteurs de faible amplitude ([FR7](#), figure 36) évoquant un milieu plus homogène que

le milieu dunaire sous-jacent et la potentielle couverture sédimentaire depuis la fin de l'occupation allemande.

Les profils 12 et 13 (figure 44 ; annexe 2.2) permettent de visualiser un milieu fortement remanié proche de la surface du sol (FR6, figure 36). Les nombreuses diffractions localisées sur le profil 12 sont également visibles sur le premier mètre du profil 13. L'apparence « chaotique » des réflecteurs et les hyperboles soulignent des objets massifs, voire métalliques, au regard d'un réflecteur marqué par une forte amplitude à 3m40 NGF sur le profil 13. Ces objets dateraient certainement de l'époque allemande en raison de l'utilisation de la tôle pour les constructions casematées. Les diffractions ponctuelles du profil 12 pourraient être provoquées par des pierres provenant de l'arasement d'une partie du fort Neuf.

3.4 La pointe de la petite Conche

3.4.1 Chronologie des aménagements réalisés à la Pointe de la Petite Conche

3.4.1.1 Fortifications napoléoniennes

Les travaux d'aménagements, comme pour les deux derniers sites, ont été retranscrits dans les archives historiques du XIX^{ème} siècle, durant la période du Second Empire correspondant aux délibérations du comité des fortifications (de 1847 à 1862).

L'histoire de la fortification napoléonienne sur le site de la pointe de la petite Conche est singulière puisque le site ne présente pas de corps-de-garde destiné au logement du personnel d'infanterie comme on peut voir au fort Gauthier ou au fort Neuf. Les travaux réellement réalisés sur ce site sont donc difficilement interprétables à travers l'analyse des archives en raison de l'ajournement d'une grande partie du projet de construction de la batterie côtière durant l'époque napoléonienne.

Les premières propositions d'aménagement de la batterie de la pointe de la petite Conche retranscrites dans les délibérations du comité des fortifications entre 1847 et 1857 mettent en évidence la nécessité de construire une façade centrale d'un épaulement (parallèle au trait de côte) sur le parapet originel datant des travaux du XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle. Cet aménagement a pour but de placer 5 pièces d'artilleries (canons ou obusiers) sur les plateformes en terre-plein située sur le talus intérieur du parapet.

Des traverses devaient également figurées sur les flancs ouest et est d'un corps-de-garde défensif n°2 prévu pour 25 hommes, similaire à la pointe Gauthier, qui devait être situé à 30 mètres en arrière de la crête du parapet. Cependant, le comité des fortifications, dans sa délibération datant de décembre 1859, affirme que les travaux concernant la construction du corps-de-garde prévu pour la pointe de la petite Conche sont ajournés pour cause de manque de fonds, mais que l'épaulement serait « massé » (c'est-à-dire qu'il soutiendrait le parapet en masse de terre).

Néanmoins les délibérations successives des années 1860 et 1861 mettent en évidence l'importance, vu par le comité, de finaliser les travaux entrepris en gazonnant les terrassements, ainsi que de protéger les maçonneries commencées.

Il est déjà annoté dans ces écrits que cette batterie sert « principalement à défendre les abords de la plage » (avis du comité des fortifications datant du 20 mars 1860), ce qui signifie que la complexité des travaux est fonction de l'importance géostratégique de chaque site. En l'occurrence, la batterie de la petite Conche, située entre la pointe Gauthier et la grande Conche ne jouerait pas un rôle prépondérant quant à la surveillance de l'île, mais servirait de site d'appui stratégique en cas de débarquement ennemi sur le littoral.

Concernant les travaux d'époque napoléonienne retranscrits d'après les archives, le facteur principal qui a permis de mettre en évidence la réalisation des travaux sur chaque site est le budget alloué au chef du génie par le ministère de la guerre. Les inspecteurs du comité des fortifications en charge du contrôle des travaux de fortification mettent en garde le chef du génie régulièrement sur le budget des travaux qui tend, au fil des années, à dépasser largement les sommes initialement prévues



Figure 46 : Aperçu (en capture d'écran) de la frise chronologique retraçant l'historique de la batterie de la pointe de la petite Conche.

3.4.1.2 Fortifications allemandes

Le travail de recherche d'archives historiques concernant les aménagements de la pointe de la petite Conche par les infanteries allemandes de 1942 et 1943 n'a pas permis de relever des indications concernant



Figure 47 : Tranchée creusée au sein du parapet napoléonien par les allemands. Photographie : Robin PIEL.

l'exploitation du site durant cette période. Néanmoins, la visite du site de la petite Conche en compagnie de l'archéologue Alain Chazette a permis, après expertise, de clarifier que les travaux napoléoniens furent exploités par les allemands et que le relief de la batterie en a été modifié.

La crête du parapet qui daterait d'époque napoléonienne a en effet été modifiée lors de l'occupation allemande. On peut voir sur la

figure 47 qu'une tranchée a été réalisée au sein du remblai du XIXème siècle. En arrière du talus intérieur du parapet, on trouve également une casemate qui servait certainement de logis pour le personnel allemand de la batterie.

Le site fut également exploité à divers endroits de la pointe afin d'y installer des canons, surement anti-aériens, permettant d'assurer une troisième base d'observation du rivage sur cette côte propice au débarquement.

3.4.2 Interprétation des profils géoradar réalisés à la pointe de la petite Conche

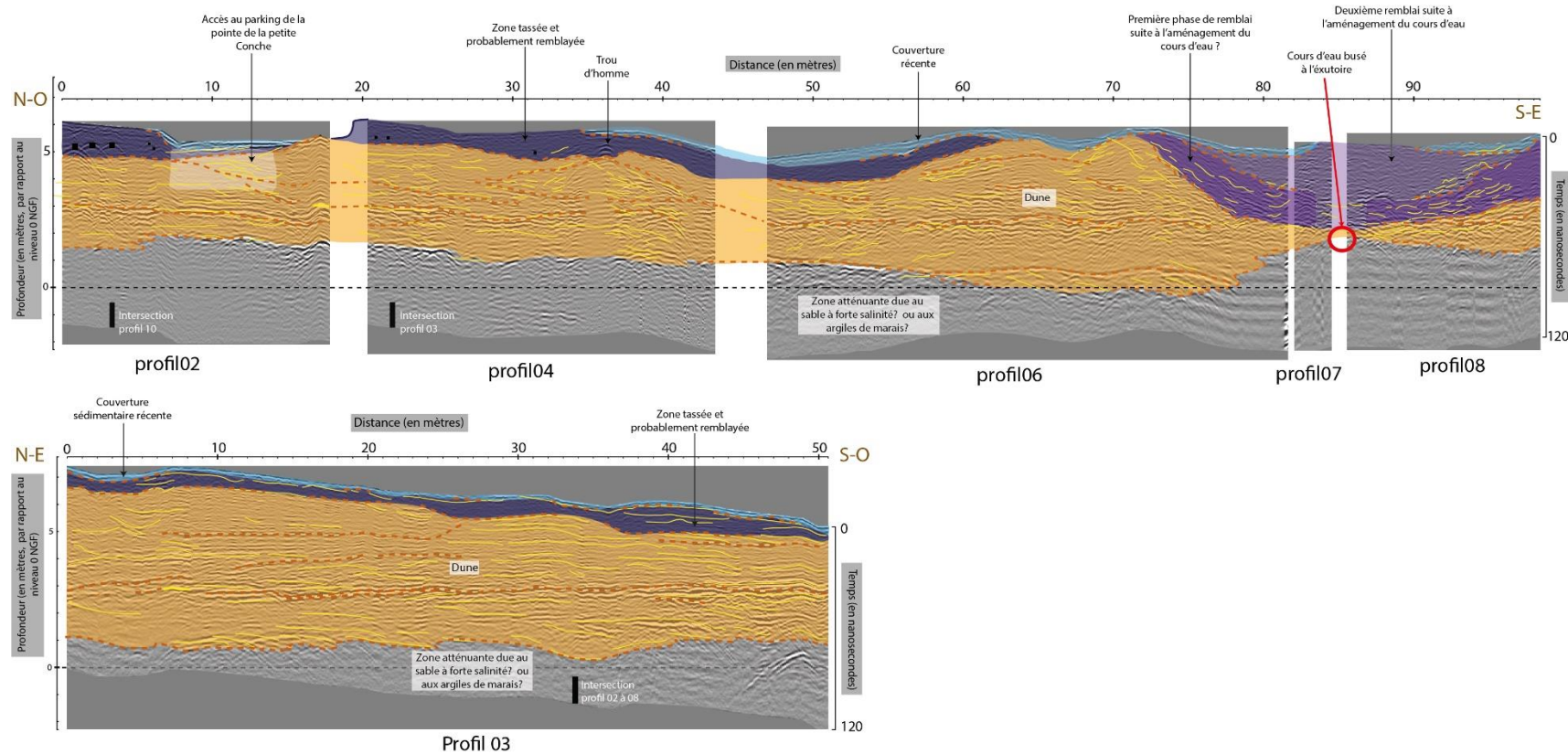


Figure 48 : Les profils 02 à 08 longent le versant oriental de la pointe de la petite Conche.. Le profil 03 suit une direction transversale et coupe le profil 04 à 22m. Les faciès superficiels traduisent un environnement remanié qui se superposeraient au massif dunaire originel. De 70m à 98 (profil06 à 08), la coupe verticale démontrerait un remaniement du sable réalisé en plusieurs phases qui serait dû à l'aménagement de l'exutoire de la Gorelle.

Le transect représentant les profils 02, 04, 06, 07 et 08 (figure 48 ; annexe 2.3) suit une direction sud-est, et longitudinale au système dunaire à l'est de la pointe de la petite Conche. Le profil 03, de direction sud-ouest, intersecte perpendiculairement le profil 04 et permet d'obtenir une coupe transversale, du haut de dune, jusqu'à une limite marquée par des ganivelles banalisant le sentier du littoral.

Le profil 02 à 04 identifie une fine épaisseur (coloriée en bleu ciel) marquée par des réflecteurs de forte amplitude qui représenterait un apport sédimentaire recouvrant la zone remaniée, au sein des premiers centimètres de la subsurface (FR3, figure 36).

Aussi, une très forte atténuation est relevée entre 7 et 14 mètres. Ce phénomène coïnciderait avec le tassement de l'épaisseur de sable afin d'accéder au site de la pointe de la petite Conche qui comprend trois propriétés en arrière du cordon dunaire du versant occidental de la pointe.

Le milieu annoté en violet, de 0 à 61m sur les profils 02 à 06, et que l'on observe également sur le profil 03, met en évidence des réflecteurs subhorizontaux et une atténuation du signal (RF7, figure 36) rappelant un milieu remanié et tassé qui serait lié à la fréquentation du lieu par les allemands.

En effet, cette hypothèse est plausible en raison d'un aménagement allemand situé sur le haut de dune à quelques mètres au sud-est de la pointe de la petite Conche, et composé d'une butte surélevée et d'un abri avec un toit casematé. On peut effectivement penser que la fréquentation humaine associée au passage des machines transportant le matériel nécessaire à la construction des différentes structures défensives ont impacté l'épaisseur du massif dunaire originel.

Cette hypothèse peut être également soutenue au regard d'un objet ponctuel, localisé à 36m, sur le profil 04, marquant une forte diffraction. Cette structure est identifiée comme étant un trou d'homme allemand¹². Elle marque une forte amplitude témoignant que le signal électromagnétique est au contact du vide.

La zone sous-jacente au milieu remaniée (coloriée en orange) est identifiée par un contraste d'amplitude au regard des réflecteurs qui témoigneraient d'un milieu hétérogène caractérisant l'environnement dunaire originel (FR2, figure 36). Cette zone rencontre une interface atténuante identifiée sur les deux transects entre 1 et 2m NGF (FR9, figure 36). Ce phénomène serait dû à un fort taux de salinité contenu dans le sable mais également à la présence d'éléments d'origine continentale tels que l'argile ou la tourbe (détenant une forte conductivité électrique) au regard des marais de la Gorelle situés en arrière-pays du site de la pointe de la petite Conche.

Aussi, la zone comprise entre 70 et 98m, observée sur les profils 06 à 08, semble représenter un environnement remanié en plusieurs périodes. La zone dite « de première phase de remblai » démontre des réflecteurs pentés, caractéristiques de structure remblayée lors de la réalisation de tranchée. La zone supérieure, caractériserait un remblai de date plus récente (colorié en violet clair) en raison de réflecteurs marquant un signal de faible amplitude (RF7, figure 36). La présence de l'exutoire de la Gorelle (annexe 3.3) situé à environ 2m NGF entre le profil 07 et 08, expliquerait ce milieu artificialisé. La présence d'un conduit transversale (ou buse) serait à confirmer auprès des services techniques de la collectivité, afin de dater la réalisation des remblais.

La zone atténuante serait sûrement expliquée ici par la remontée de la nappe ou la présence d'éléments à forte conductivité qui auraient tendance à remonter en surface.

¹² Le trou d'homme est un fossé droit et court, d'en général 80 cm de largeur et de 1m.80 de longueur. Il permettait à un soldat de se reposer tandis que l'autre montait la garde (définition tirée du site internet de l'association « Les Lufteaux ». <https://www.leslufteaux.com/bienvenue-dans-la-section-lutwaffe/le-trou-dhomme/>)

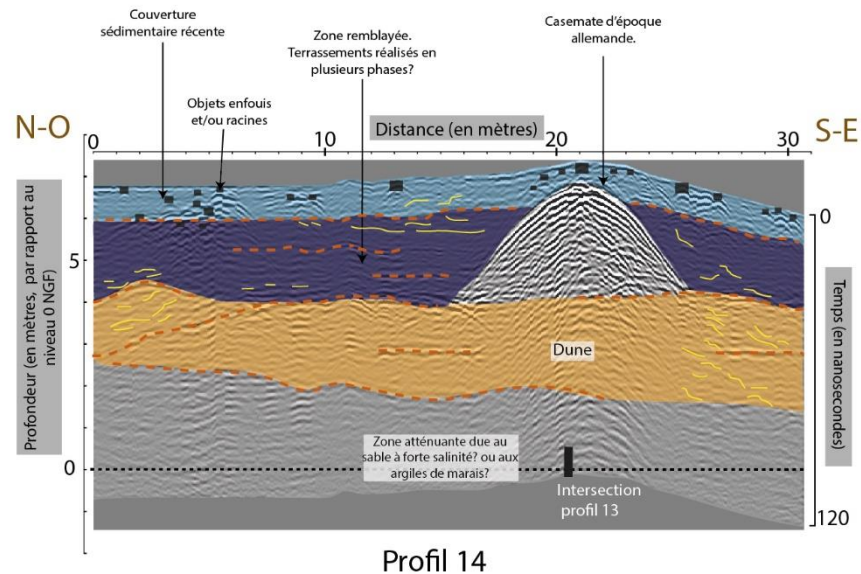
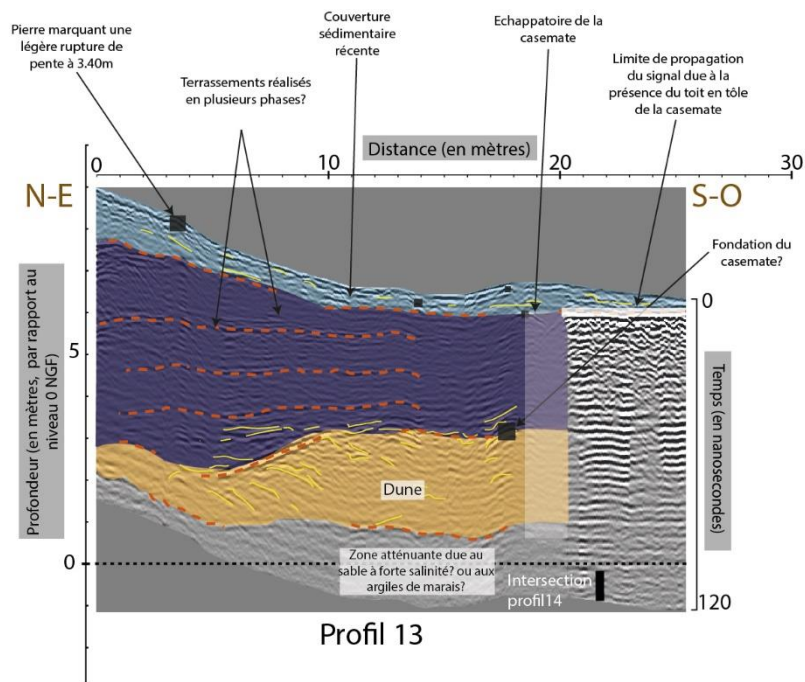


Figure 49 : Les profil 13 et 14 s'intersectent perpendiculairement sur une levée de terre qui marque le toit de la casemate enterrée. Les deux coupes verticales sont situées à quelques mètres en arrière-pays des profils 18 et 19.

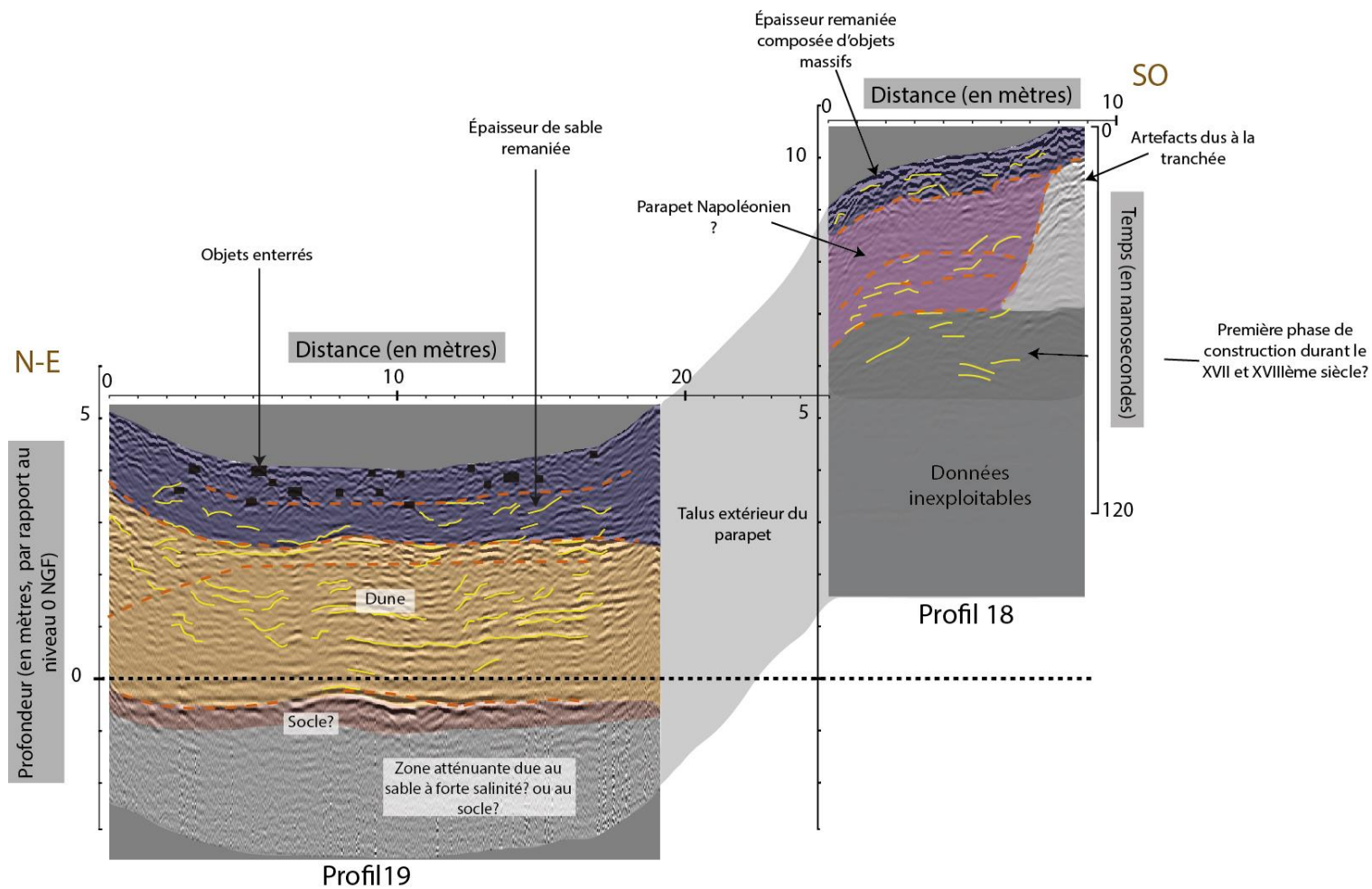


Figure 50 : Les profil 18 et 19 mettent en évidence un transect partant du haut de dune jusqu'à la crête du talus extérieur du parapet. Ce talus extérieur n'a pas été prospecté au géoradar en raison de sa pente trop escarpée.

Les profils 13, 14 (figures 49 ; annexe 2.3) et 18, 19 (figure 50 ; annexe 2.3) ont été acquis à l'ouest de la pointe de la petite Conche (voir annexe 3.3), au sein d'une zone où sont présents les différents aménagements historiques, d'après les archives napoléoniennes.

Les profils 18 et 19 (figure 50) ont été acquis à partir du haut de dune jusqu'au haut du talus extérieur du parapet, du nord-est au sud-ouest. Le profil 19 met en évidence un ensemble de la proche subsurface qui serait remanié, au regard des nombreuses hyperboles diffractant le signal dans les premiers temps d'émission (FR8, figure 36). Une surface majeure suivant la topographie serait l'interface entre le sol remanié et le massif dunaire sous-jacent (entre 3 et 4m NGF). Plus en subsurface, une deuxième structure majeure marquée par des hyperboles pourrait déterminer la limite du socle rocheux. Dans ce cas-là, les hyperboles seraient générées par la diffraction du signal au contact de la schistosité de la roche (FR4, figure 36). De plus, cette surface identifiée à -1m NGF peut en effet correspondre à l'altitude du socle gneissique car l'affleurement des platiers sur l'estran est compris entre 1 et -1m NGF. La zone atténuée sous-jacente peut appuyer cette hypothèse en raison du phénomène d'atténuation du signal au contact de la roche. La forte teneur en sel du milieu peut également expliquer cette atténuation.

Le profil 18 a été réalisé sur le haut du parapet, entre 9m et 10m50 NGF, dans la continuité du tracé du profil 19. Les données enregistrées mettent en évidence à l'observation des premiers centimètres de la subsurface des réflecteurs à forte amplitude, ainsi que d'importantes diffractions (FR6, figure 36).

Cet ensemble pourrait correspondre à un remblai allemand qui avait pour fonction de surélever l'ancienne structure. Un ensemble sous-jacent résulterait d'une composition lithologique différente en raison du contraste d'amplitude et des réflecteurs légèrement inclinés, voire subhorizontaux (FR7, figure 36), et donnant une apparence moins « chaotique » du profil à cette profondeur. Ces réflecteurs subhorizontaux mettraient en évidence les terrassements réalisés durant la période du 2nd Empire.

Une dernière unité, très atténuée, localisée à 7m NGF a été identifiée par un réflecteur subhorizontal, qui pourrait correspondre à un remblai d'époque antérieure à 1860.

Cependant cette interprétation reste hypothétique car le milieu de forte amplitude couvrant la première épaisseur du sous-sol génère une forte atténuation au regard des faciès en profondeur. Ceci explique l'impossibilité d'interpréter les données à partir de 80-90ns.

Aussi, la tranchée d'époque allemande, qui se situe à la fin du profil 18, génère des artefacts biaisant la lecture des données de 8 à 9m. Ces artefacts sont représentés par des réflecteurs pentés (environ 45°) qui coupe la continuité des réflecteurs de la subsurface.

En arrière du talus intérieur du parapet, le profil 13 et 14 (figure 49) suivent deux trajectoires perpendiculaires. Le profil 13 met en évidence une coupe verticale du haut du parapet (au sud-est du profil 18) jusqu'à la limite du toit de la casemate. Le transect 14 suit une trajectoire sud-est et croise le profil 13 au niveau du toit de la casemate puis redescend d'une dizaine de mètres.

On observe un premier ensemble caractérisé par des objets diffractant disséminés au sein de cette épaisseur visible sur les deux profils (FR3, figure 36). Cette première unité correspondrait à une couverture sédimentaire d'origine naturelle, qui se serait accumulée depuis le toit de la casemate allemande après l'occupation allemande.

Au regard du profil 14, on distingue nettement l'interface marquant la limite de la propagation du signal au contact de la tôle métallique qui a servi à construire le toit de la casemate.

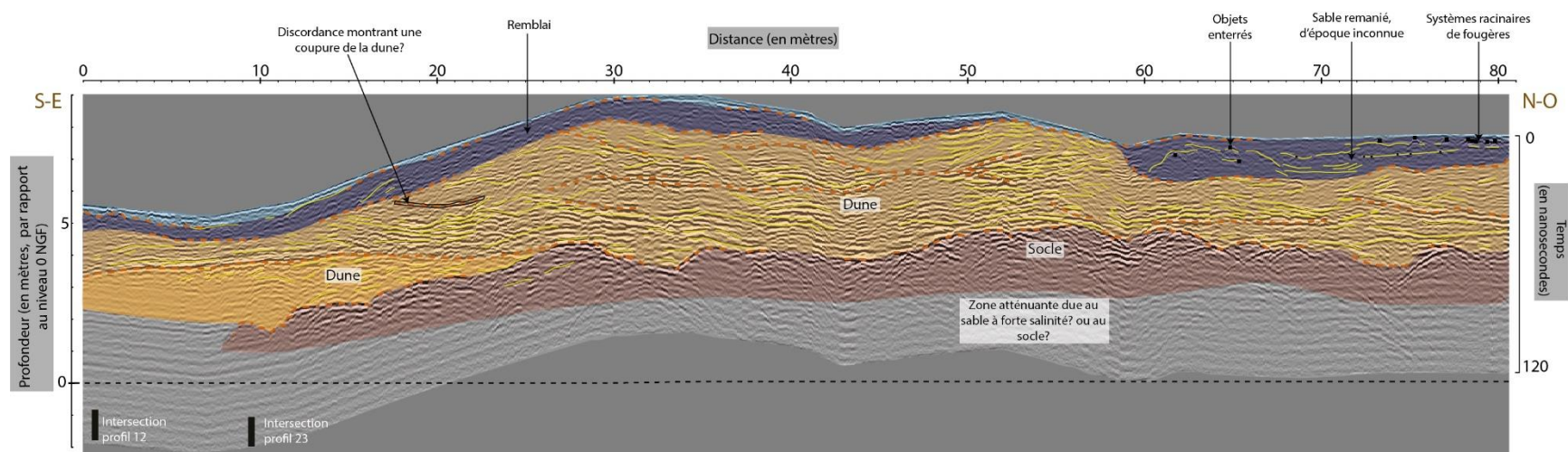
La profondeur des fondations de la casemate est estimée aux alentours de 3.40m en profondeur (à 18m du profil 13) d'après l'identification d'un réflecteur de grande amplitude. Cette donnée a été extrapolée au profil 14, qui marque également une interface à 3.40m de profondeur. Cependant cette interprétation peut s'avérer approximative puisque la tôle métallique bloque la propagation du signal et rend la lecture des données médiocre.

Aussi, l'atténuation de l'onde électromagnétique à 18-19 m, aux environs des 6m NGF du profil 13 peut être expliquée par l'échappatoire de la casemate. La signature du signal est caractérisée par une rupture de la continuité des réflecteurs qui serait due à l'épaisseur de vide de l'échappatoire.

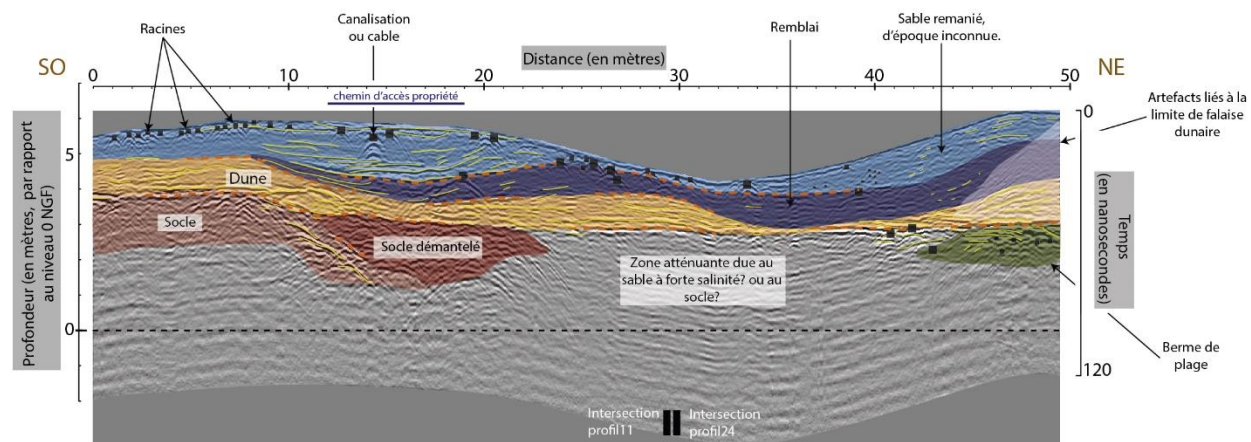
Sur le profil 13, la première diffraction entre 3 et 4m est marquée par l'affleurement d'une pierre au sol. Cette pierre identifierait un mur de genouillère utilisée pour la construction du talus intérieur du parapet. La zone sous-jacente (coloriée en violet) correspondrait à une épaisseur remblayée en plusieurs phases historiques, en raison de réflecteurs subhorizontaux majeurs (continuité à intervalle régulier sur le profil 13) et une atténuation de réflecteurs intermédiaires. Ces surfaces pourraient cependant correspondre à des « multiples » qui sont des réflecteurs répétés par le signal électromagnétique en subsurface biaisant l'interprétation.

La structure sous-jacente au remblai (coloriée en orange, sur les deux profils) est composée de réflecteurs mineurs et faiblement pentés (FR5, figure 36) qui détermineraient la structure dunaire originelle. Une surface majeure inclinée localisée sur le profil 13 entre 2 et 3m NGF et entre 5 et 9m (en distance) déterminerait l'interface entre le milieu remblayé et dunaire.

La zone atténuée en dessous de la dune serait due à la forte conductivité électrique du sable à forte salinité, ou la présence d'éléments argileux ou tourbeux qui serait expliquée par la localisation de ces profils situés en arrière-pays dunaire, plus proche d'un milieu marécageux.



Profil 11



Profil 12

Figure 51 : Les profils 11 et 12 ont été réalisés en arrière du cordon dunaire, à l'ouest de la pointe de la petite Conche. Le profil 11 suit une direction nord-ouest, longitudinale au linéaire dunaire, tandis que le profil 12 établit un transect du sud-ouest au nord-est, et intersecte le profil 11 au centre d'une dépression puis monte jusqu'au haut de dune.

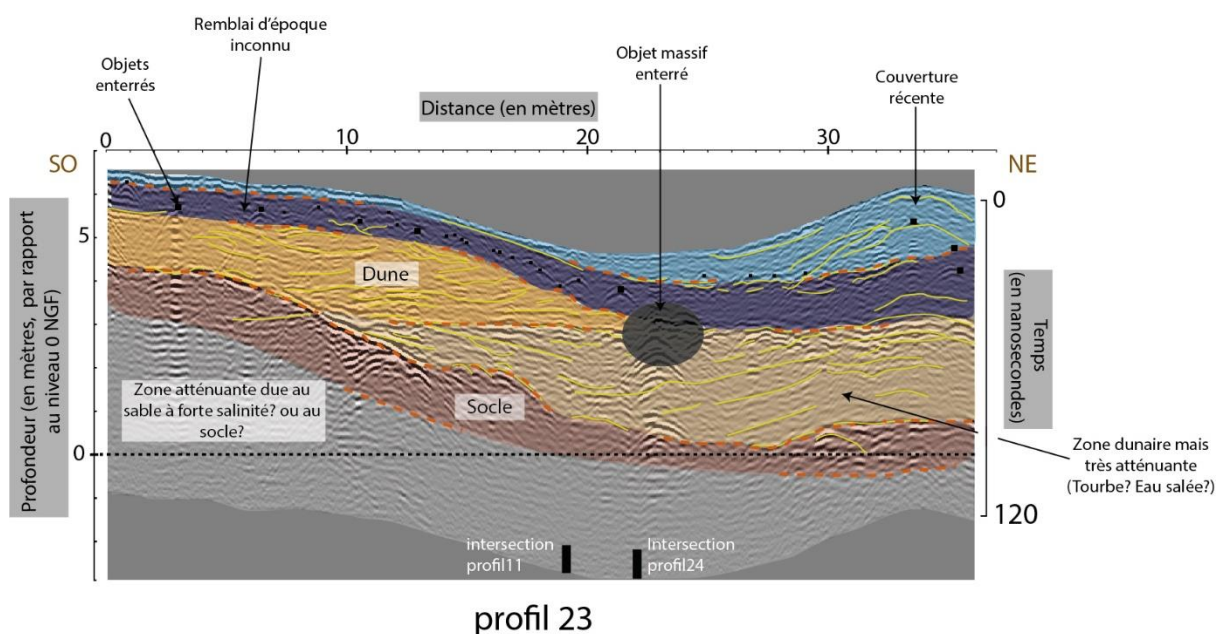


Figure 52 : Le profil 23 est réalisé à l'ouest du profil 12 en gardant une trajectoire similaire à ce dernier. Il permet d'obtenir un second profil transversal à la dépression jusqu'au haut de dune.

Les trois profils 11 12 (figure 51 ; annexe 3.3) et 23 (figure 52 ; annexe 3.3) ont été réalisés sur le versant occidental de la pointe de la petite Conche. Le profil 11 propose une coupe verticale réalisé longitudinalement au système dunaire. Les deux autres profils intersectent le profil 11 et mettent en évidence une coupe traversant une dépression jusqu'au haut de dune. Le haut de dune est marqué par des artefacts provoqués par l'écho du signal au contact du vide de la falaise dunaire, sur le profil 12, entre 55 et 60m.

La dépression clairement visible sur les trois profils, est située à l'ouest des propriétés et présente un creux topographique localisé à 3.99m NGF. Les données géoradar réalisés au sein de cette unité géomorphologique démontreraient, sur les 3 profils, une lithologie similaire : un milieu « remaniée » en proche subsurface, un milieu dunaire sous-jacent, puis une interface marquant le socle rocheux, et enfin une zone atténuée.

Cependant le sous-sol de cette zone d'étude est tout de même marqué par une certaine hétérogénéité au regard de la première épaisseur des profils 12 et 23. En effet, le profil 12 présente de nombreuses hyperboles au sein des premiers centimètres, atténuant le signal et bloquant la lecture des réflecteurs sous-jacents (FR8, figure 36). Ces diffractions seraient expliquées par un grand nombre d'objets enterrés d'origine anthropique. Ces derniers seraient des câbles enterrés alimentant une propriété située à une quinzaine de mètres à l'est du profil 12 (annexe 3.3). Les premiers enregistrements, réalisés à proximité des arbres de la même propriété, expliqueraient la présence de racines dans les premiers mètres. Le profil 23 met en évidence, de 30 à 36m, une épaisseur superficielle considérable (coloriée en bleu claire) et caractérisée par des réflecteurs en biseaux représentant le milieu dunaire (FR5, figure 36).

La zone sous-jacente (coloriée en violet) à la première épaisseur a été identifiée comme une zone de remaniement en raison des réflecteurs subhorizontaux représentant un milieu artificiellement aplani (FR7, figure 36). Les objets diffractant sont également bien présents au sein de cette zone remaniée, particulièrement sur les profils 23 et 11. A 23m du profil 23, l'onde électromagnétique est diffractée sur un

objet ponctuel générant une forte amplitude, et une hyperbole est multipliée en profondeur. Ce phénomène indiquerait la présence d'un objet massif.

Le niveau inférieur (colorié en orange) représente un milieu hétérogène et marqué par des réflecteurs pentés témoignant d'une unité sédimentaire dunaire. Cette zone est toutefois atténuée au regard du profil 23, en raison de la présence d'une remontée de la salinité ou de matériaux conducteurs (argiles ou tourbes) dans le sous-sol de la dépression. Cependant, on identifierait au sein des derniers mètres du profil 12 (55 à 60m), à une altitude d'environ 2m50, une berme de plage qui aurait été observée en coupe dans la falaise, en janvier 2021, à la suite de facteurs érosifs encore mal identifiés.

Le profil 11 distingue une unité sous-jacente au massif dunaire. Cette unité serait également dunaire, au regard des réflecteurs similaires des profils 12 et 23 surement d'âge plus ancien, en raison d'une surface majeure qui marquerait une interface entre cette structure sédimentaire ancienne et le niveau supérieur indiquant une structure dunaire plus récente ([FR1](#), figure 36).

Le socle rocheux observé sur les trois profils est retranscrit en raison d'une ligne continue d'hyperbole générée par la diffraction du signal au contact de la schistosité de la roche ([FR6](#), figure 36). Cette unité semble remonter vers l'arrière-pays dunaire de manière assez abrupte, jusqu'à 4m NGF sur les profils 12 et 23. On note cependant une structure rocheuse démantelée entre 12 et 20 m, et 2-3m NGF. Les nombreuses hyperboles superposées mettraient en évidence des têtes de roches probablement concassées. Sur ce profil, l'unité rocheuse est soudainement atténuée par un niveau de salinité élevé ou par la présence d'argiles et/ou de tourbes. La coupe transversale du profil 11 marquerait l'ensemble rocheux entre 2 et 4m NGF.

Enfin, si l'origine de la dépression investiguée par ces trois profils est anthropique, cela expliquerait la mise en place du parapet (profil 18 et 19 ; figure 50) construit à partir de matériau provenant cette unité dunaire. Cette incision pourrait être identifiée sur le profil 11, à 5m50 NGF, et entre 18 et 22 m, par une discordance au sein du massif dunaire. Enfin, l'objet massif détecté à l'interface du milieu dunaire et l'épaisseur remanié pourrait coïncider avec l'hypothèse de l'enfouissement de matériels de guerre allemand.

4. Discussion

Dans la première partie de cette discussion, les résultats seront comparés aux données antérieures afin de vérifier la cohérence de ces nouvelles données et de leur interprétation par rapport à celles préexistantes.

Dans la seconde partie de la discussion, les observations réalisées concernant la géométrie des dépôts et leurs relations avec les structures anthropiques, permettront d'aborder l'évolution de certaines unités dunaires afin de déterminer leur résilience face aux aléas météo-marins.

4.1 Interprétation et analyse de la géométrie des unités géologiques

Il existe peu de données sur la géologie de l'île d'Yeu¹³ et sur l'organisation des dépôts sédimentaires au-dessus du socle. Quelques forages ont néanmoins été documentés sommairement et sont référencés dans la Base de Donnée du Sous-Sol du BRGM. En particulier, un forage est référencé dans le Marais de la Gorelle, à 200-300 m du site de la Petite Conche, en direction du sud-ouest (annexe 4). La stratigraphie mise en évidence par ce forage au niveau du marais de la Gorelle est synthétisée en figure 53. Ce forage ayant été effectué dans une zone où le sol se situe à une altitude de 7m NGF, les altitudes des limites des ensembles sédimentaires ont été déduites et reportées.



Figure 53 : Résumé des données stratigraphiques acquises lors d'un forage dans le marais de la Gorelle, au sud de la pointe de la Petite Conche, à l'île d'Yeu (annexe 3).

Dans le secteur de la pointe Gauthier et du Fort Neuf, il n'existe pas de tel forage. Néanmoins, les plans du génie font état de la stratigraphie. En particulier, les plans de 1859 indiquent qu'au Fort Gauthier, le toit du socle est plat sur l'ensemble de la pointe et se situerait à une altitude de 2 m NGF (niveau datant de l'époque napoléonienne). La topographie de la surface du sol telle qu'elle était à l'époque est également retranscrite sous forme de courbes de niveau.

Au fort Neuf, les plans de 1848 (figure 54 ; annexe 1.1) n'indiquent pas explicitement de mesures altimétriques, cependant on peut penser que le toit du socle se situe à la même altitude en raison de la même forme plane dessinée sur l'ensemble de la pointe.

¹³ La réalisation d'une carte géologique à l'échelle locale de l'île d'Yeu par le BRGM est en cours.

4.1.1 Géométrie du toit du socle

Sur les profils géoradar, le toit du socle n'a été identifié que sur les profils 11, 12, 19 et 23 du site de la Petite Conche. Sur le profil 19, il apparaît à une altitude estimée autour de -0.5 m NGF, tandis que sur les profils 11, 12 et 23, il se situe autour de 3.5/4 m NGF. Sur les profils 12 et 23 il marque néanmoins un abaissement très fort et très rapide en direction du nord est, qui l'amène à une altitude estimée autour de 0m NGF au nord-est du profil 23.

Ainsi, bien que ce ne soit pas visible actuellement, les dépôts superficiels de la pointe de la Petite Conche semblent trouver une assise sur une saillie du socle située sous la partie nord-ouest de la pointe.

Dans le forage du BRGM (figure 53 et annexe 3), cette saillie n'est pas retrouvée, puisque le toit du socle est indiqué à 1m NGF. Ceci n'est pas surprenant puisque le carottage a été effectué au niveau du marais, lui-même installé dans une dépression du socle.

A la pointe Gauthier, l'absence de socle sur les profils s'explique tout simplement par la profondeur d'investigation. En effet, dans les profils 3, 4 et 5 illustrés dans ce mémoire, la profondeur de pénétration maximale est toujours située au-dessus de 2m NGF. Si les plans fournis par le Génie sont exacts, il est donc normal que le toit du socle n'ait pas été repéré sur ces profils. Il a cependant bien été observé à la côte indiquée, dans les profils réalisés au niveau des douves (non traités dans ce travail, mais réalisés au cours de la même mission de terrain), en revanche, il montrait alors une morphologie moins plane et plus irrégulière qu'indiquée sur les plans.

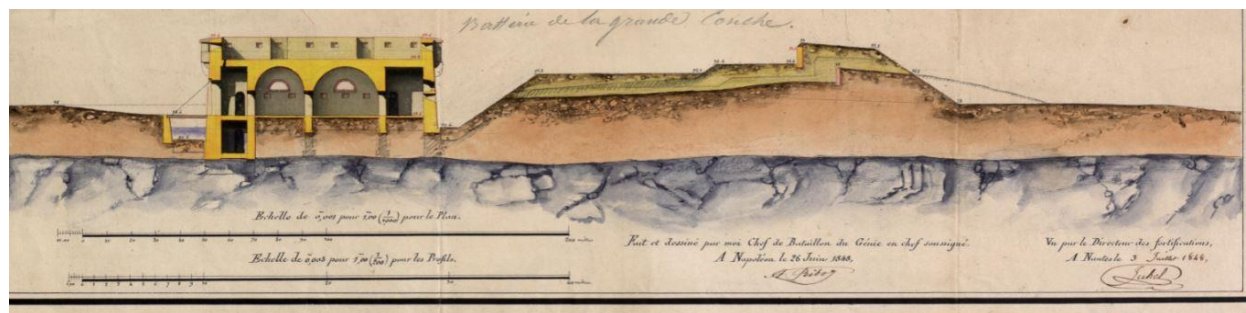


Figure 54 : Profil de la batterie de la Grande Conche en 1848. Document provenant du Service historique de la Défense.

4.1.2 Tourbe, argiles ou salinité

Sur le site de la petite Conche, la plupart des profils deviennent inexploitable aux alentours de 1 m NGF, y compris lorsque l'épaisseur de sédiments traversés est faible, comme vers 33m sur le profil 12 ou avant 10m sur le profil 11.

Les paramètres électromagnétiques explicités dans la partie méthodologie¹⁴, sont responsables de l'atténuation du signal qui peut s'expliquer soit par la présence de sédiments très fins de type argiles, soit par la présence de sel.

¹⁴ Paragraphe 2.3.1.2

Sur ce site, de la tourbe a été mise temporairement à jour en 2020, en haut de l'estran, au pied de l'enrochement artificiel qui protège la pointe. La présence de dépôts argileux et fins au-dessus du socle dans les parties où celui-ci est particulièrement bas ne peut donc pas être exclue. Une autre hypothèse à considérer est l'existence d'un coin salé, imprégnant les sédiments jusqu'à une altitude d'environ 1 m NGF, et potentiellement jusqu'à plusieurs dizaines de mètres vers l'intérieur des terres.

Le même phénomène se produit également sur les profils du Fort Neuf. Les profils 5 et 15 de ce site se terminent sur la plage, et les dépôts de plage, nécessairement salés sont effectivement marqués par une très forte atténuation, qui provoque la remontée rapide de la profondeur de pénétration. Sur ce site où l'existence de tourbe n'a jamais été décrite, l'hypothèse d'un coin salé limitant l'investigation géoradar aux dépôts situés au-dessus d'un mètre (NGF) semble plausible.

4.1.3 Dunes et surfaces d'érosion majeures

Au-dessus de l'altitude critique d'1m NGF, tous les profils étudiés commencent par des unités dunaires qui semblent naturelles et s'empilent les unes sur les autres d'une manière concordante, à l'exception de la dernière unité sédimentaire du profil 15 du fort Neuf. Cette ultime unité repose en effet sur une surface d'érosion très importante, qui recoupe l'ensemble des unités sédimentaires sous-jacentes. Cette surface est identifiée comme une surface d'érosion très récente (voir paragraphe suivant), à partir de laquelle le cordon dunaire s'est rapidement reconstitué, l'avant dune et le haut de plage progradant alors en quelques dizaines d'années de plusieurs dizaines de mètres en direction de la mer.

On observe néanmoins des différences notables dans les structures sédimentaires soulignées par les réflecteurs.

Au Fort Neuf, la première unité dunaire, visible en jaune orangé sur tous les profils, prograde clairement en direction du nord est. Les deux unités sédimentaires naturelles plus superficielles (jaune et verte) montrent quant à elles une organisation plus erratique, avec une grande quantité de structures entrecroisées. Cette organisation étant visible sur les profils quelle que soit leur orientation, on en conclut que ces deux unités superficielles résultent de la divagation de dunes irrégulières. L'empilement de ces deux types de dépôts traduirait donc un changement de régime sédimentaire.

De plus, le corps sédimentaire de l'unité en orange foncé à partir de 43m de distance (sur le profil 15) serait une phase de progradation rapide de l'avant-dune, marquant une phase de reconstitution de la dune. Cette dernière unité aurait été formée dans le même contexte que l'épaisseur en orange plus clair en raison de la similarité des figures sédimentaires, cependant la date de formation serait inconnue.

Par ailleurs, l'interface entre les épaisseurs jaunes et vertes sus-jacentes à l'épaisseur jaune orangé correspondrait donc à un changement de régime sédimentaire plus aggradant que progradant.

Par conséquent, deux hypothèses peuvent être évoquées. Soit l'unité dunaire en jaune orangé reposerait sur le socle géologique sous-jacent, et a été mis en place lors de la formation des massifs dunaires vendéen, auquel cas, la base de la zone orange foncé serait vraiment liée à un événement d'érosion majeur depuis la formation du massif dunaire, soit la base de l'unité jaune orangé est elle aussi une ancienne surface d'érosion identique à la base de l'unité en orange foncé. Auquel cas, un épisode d'érosion plus important que celui responsable de la base de la surface en orange foncé s'est déjà produit par le passé. La deuxième hypothèse mettrait en évidence que cet événement d'érosion majeur est nécessairement antérieur à la construction du fort Neuf, puisque les douves de ce dernier sont construites au sein de l'unité jaune orangé

Ces deux hypothèses seraient à discuter avec les nouvelles interprétations des données géophysiques du BRGM (Baudouin et al., 2018) acquis sur les massifs dunaires des Pays de Mont.

A la petite Conche, les profils du nord de la pointe (11, 12 et 23) montrent, dans les corps dunaires, des stratifications obliques pentées vers la plage, à l'image des surfaces de réactivation, indiquant globalement des unités progradantes en direction de la mer, à partir d'un épaulement du socle. Les profils du sud de la pointe montrent en revanche une organisation très différente, avec sur les profils 2 à 8, des surfaces de réactivations et des stratifications indiquant une progradation vers le sud-est (c'est-à-dire parallèles à la plage), et sur le profil 3, des surfaces de réactivations plutôt planes, et des laminations tournées vers le sud-ouest (c'est-à-dire vers l'intérieur des terres. Cette organisation des dépôts atypique pourrait s'expliquer par la présence ancienne d'une flèche littorale à cet endroit, dont la pointe, parallèle à la plage, aurait avancé en direction du sud-est, et dont le flanc tourné vers la terre aurait pu porter une stratification pentée vers le sud-ouest et l'intérieur des terres. Cette hypothèse est plausible compte tenu de la position de l'exutoire du marais de la Gorelle, situé au sud-est de la pointe.

En effet, il est possible qu'une flèche sableuse, barrant l'estuaire du cours d'eau se soit créée à une certaine période. La création d'une telle structure aurait alors nécessité de forts apports sédimentaires marins, venus du nord-ouest, ce qui renseignerait sur le régime de dérive littoral de cette époque.

4.1.4 Dépôts anthropiques

Visibles sur tous les profils, les dépôts anthropiques sont caractérisés par de nombreux faciès radar, et à la vue des résultats, le type de faciès permet de renseigner la période historique d'occupation du sol. Les réflecteurs les plus superficiels marquent des unités majoritairement atténuées, identifiées par les remblais et le tassement du sol lors de l'occupation allemande. Les objets enterrés marqués par les diffractions du signal en proche subsurface sont également des indicateurs permettant de postuler les remblais allemands. Le récent suivi de l'évolution dunaire du versant occidental de la pointe de la petite Conche par l'équipe ODySéYeu¹⁵ a permis d'observer des vestiges de la seconde guerre mondiale à la suite de l'érosion du cordon dunaire en octobre-décembre 2020).

Les dépôts anthropiques plus anciens datant de l'époque Napoléonienne et celles antérieures seraient marqués également par des réflecteurs atténués, mais qui, sur certains profils (comme sur le profil 19 de la pointe de la petite Conche, et le profil 05 du fort Gauthier) mettraient en évidence des réflecteurs subhorizontaux de plus forte amplitude, représentant les terrassements des batteries.

¹⁵ <https://storage.net-fs.com/hosting/6665760/1/>

4.2 Dynamique littoral de la côte du nord-est

4.2.1 Détection d'une phase d'érosion majeure au secteur nord-ouest du fort Neuf

Les profils observés n'ont pas permis de mettre en évidence et de dater réellement des épisodes météo marins érosifs, hormis la surface de troncature (en orange foncé) du profil 15 du fort Neuf.

Selon le propriétaire du fort Neuf, l'action morphogène d'aléas météo-marins successifs, aurait érodée la dune blanche jusqu'à la limite avec le massif dunaire ancien, à 43m (figure 55). Cette date limite correspond à la limite du trait de côte depuis 1990. Depuis 1950, l'érosion dunaire serait équivalent à 70m de surface érodée en 40 ans, soit 1.75m² perdu par an. Depuis 1990, la dune prograde et tend à atteindre la limite du trait de côte en 1950.

Au regard des archives météorologiques régionales et nationales (Bourdy, 2019), l'occurrence de 1982 et celles datant de l'année 1984 pourraient correspondre aux événements tempétueux qui auraient pu générer des impacts morphogènes sur ce secteur de la côte nord-est de l'île entre 1979 et 1986.

L'occurrence du 6 au 8 novembre 1982 génère des vents de 120 km/h et de fortes précipitations (50 mm en 24 heures mesurés en Vendée. La houle a également été mesurée entre 6 et 9m en région Pays de la Loire.

Le 23 et 24 janvier 1984 sont marqués par une tempête amenant des vents violents d'une vitesse observée de 140 km/h, mais non mesurée. La tempête Hortense du 4 octobre 1984 est caractérisée par ses rafales de 100 km/h de secteur sud-est que subissent les îles d'Yeu et Belle-Ile, au nord de la dépression.

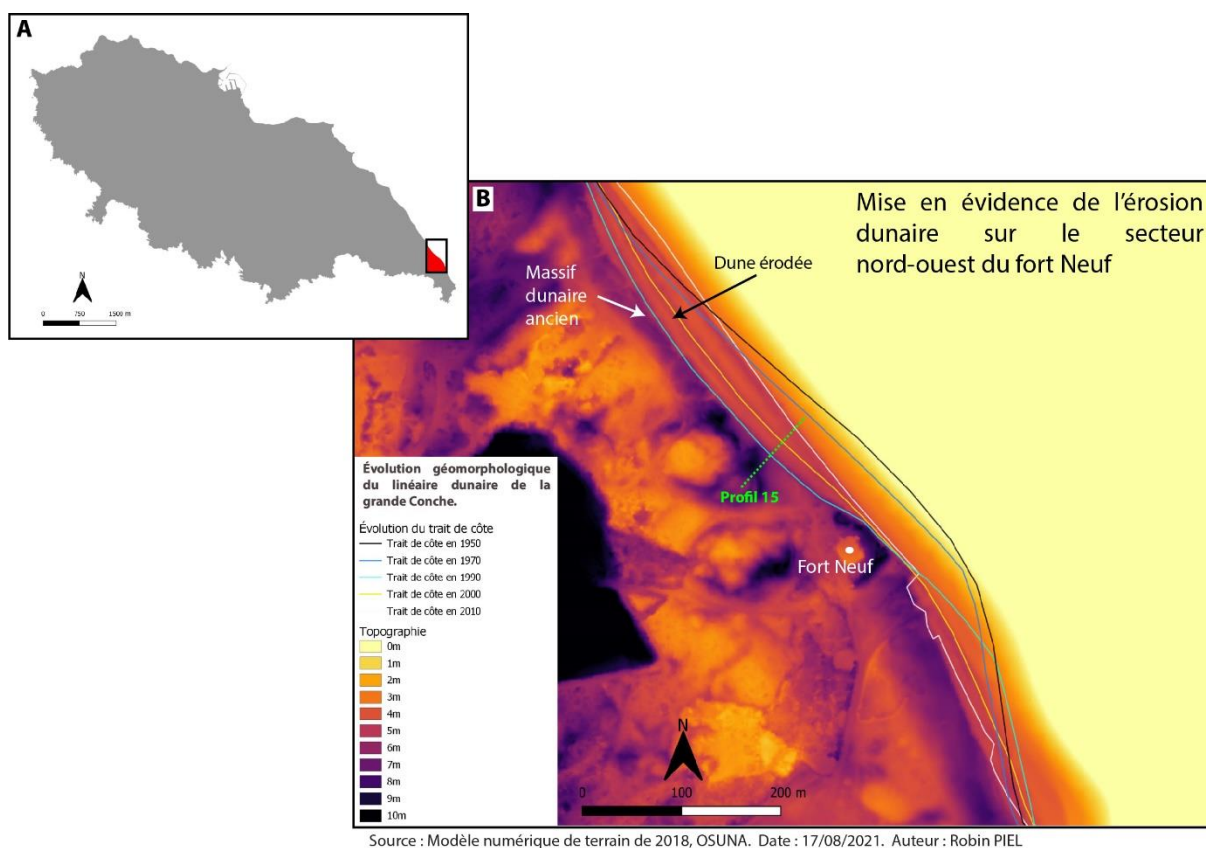


Figure 55 : Évolution du trait de côte entre 1950 et 2010 sur le secteur nord-ouest de la grande Conche.

Enfin, « l'ouragan » du 23 et 24 novembre 1984 relèvent des pointes maximales de vents à 170 km/h sur le littoral de la façade atlantique. L'absence de surface identique autre que celle identifiée en orange foncé sur le profil 15, indiquerait que cette surface aurait été impactée par plusieurs facteurs érosifs : l'érosion liée aux aléas météo-marins et l'érosion d'origine anthropique identifiée par le prélèvement de sable dunaires pour la construction. Cependant, il faut préciser que la limite d'érosion du 1990 a été provoquée par l'envahissement de la mer jusqu'à cette position et non par les engins mécaniques pour le prélèvement. Depuis 1990, ce transect dunaire prograde (figure 55) progressivement. On constate entre 1990 et 2010, une transgression du trait de côte de 36m, soit 1.8m² gagné par an, sur une durée de vingt ans. Cette première analyse traduit une très forte capacité de résilience sur le secteur nord-ouest du Fort Neuf.

4.2.2 Dynamique des massifs côtiers de l'île d'Yeu sur une période de 400 ans

A l'exception du profil 15, les profils géoradar n'ont pas permis de mettre en évidence de phase d'érosion majeure. Cependant, l'agencement des corps sédimentaires naturels et anthropiques dans certains profils permet de discuter de la résilience des massifs côtiers de la côte nord-est de l'île d'Yeu.

Le profil 03 du fort Gauthier (figure 37) met en évidence une unité « sable mobilisé » à 5mNGF qui caractériserait une phase de sédimentation entre les époques Napoléoniennes et allemandes. Cette unité met en évidence une épaisseur de sédiment comprise entre 1.50m et 0.30 et marquerait finalement un engraissement dunaire majeure vers le large (Nord-ouest). En estimant un volume moyen de 90cm³ sur une distance de 21m, cette unité aurait eu une vitesse de sédimentation de 1.12cm³ par an entre 1860 et 1940. Cela traduirait une forte capacité de résilience du massif dunaire nord-ouest de la pointe Gauthier.

Par ailleurs, les différentes périodes de fortifications depuis le XVII^{ème} siècle ont engendré à un certain endroit du littoral, un surplus de matériel sédimentaire, mais également des prélèvements causant aujourd'hui des fragilités dans les cordons dunaires. Le profil 11, offrant une coupe verticale d'une dépression à l'ouest de la pointe de la petite Conche met en évidence une surface de discordance au sein du massif dunaire (unité orange clair). Cette incision dans le massif dunaire (figure 50) daterait d'époque inconnue. Mais si l'on estime que cette marque anthropique date des premières fortifications datant du XVII^{ème} siècle, alors on estimerait un volume de sable moyen de 1.75m³, sur une distance de 30m, entre cette discordance et l'unité remaniée sus-jacente qui daterait de l'époque allemande.

Ainsi, on aurait une approximativement une vitesse de régénération de 0.71cm³ par an, entre la période de la première carte datant de 1695 établissant une première redoute à la pointe de la petite Conche, jusqu'en 1940.

Enfin, la période d'aggradation récente, datée depuis la 2nd Guerre Mondiale, marquée en unité bleu ciel sur les premiers centimètres de la subsurface serait favorisée par le piégeage des sédiments par le couvert végétal dunaire. Si cette épaisseur peut être identifiable sur la plupart des profils, elle est particulièrement épaisse sur ceux de la pointe de la petite Conche. Les profils 23 et 12 (figure 50 et 51) présentent une épaisseur d'engraissement au niveau du haut de dune pouvant être mesuré jusqu'à 1m50 de hauteur, ce qui indiquerait une vitesse de recouvrement de 1.85 cm³ /an entre la fin de la seconde guerre mondiale et l'époque actuelle. Cela traduit une très forte capacité de résilience du système dunaire situé à l'ouest de la pointe de la petite Conche.

Conclusion et perspectives

En conclusion, ce projet a mis en place une méthodologie transdisciplinaire permettant le couplage de données historiques et géophysiques afin de répondre à une problématique de risques côtiers en milieu insulaire. L'innovation de cette étude réside dans la collaboration entre les acteurs de différents domaines qui ont contribué à améliorer la connaissance du patrimoine historique et environnemental de l'île d'Yeu.

Cette étude a permis de répondre aux objectifs fixés lors de l'élaboration du projet de stage de fin d'étude.

L'historique des aménagements sur chacun des trois sites étudiés (fort Gauthier, de la pointe de la petite Conche et de la grande Conche) a pu être retranscrit sous la forme d'une frise chronologique qui met en évidence à la fois, les premières constructions des ouvrages militaires au XVII^{ème} siècle, les aménagements datés et illustrés d'époque napoléonienne, et l'occupation des batteries côtières par les allemands durant la seconde guerre mondiale.

En second lieu, les données géophysiques, une fois traitées et interprétées, ont permis de distinguer des faciès marquant les interfaces entre un milieu naturel dunaire et un milieu artificiel.

La plupart des profils marquent la présence d'une première épaisseur de sable récent qui reposerait sur un milieu remanié qui correspondrait à l'époque allemande. Sur les profils réalisés au sein des reliefs des batteries, les travaux de fortifications d'époque napoléonienne et antérieure sont identifiés plus en profondeur, marqués par des murs de genouillères et des terrassements qui ont été réalisés sur le massif dunaire originel.

Les unités dunaires sont également identifiées sur tous les profils géoradar, cependant les épaisseurs variables à certains endroits, notamment à l'ouest de la pointe de la petite Conche, démontreraient une exploitation des dunes probablement effectuée pendant le période d'établissement des terrassements d'époque napoléonienne.

Aussi, l'interface dune-socle a été déterminée essentiellement sur les données acquises à la pointe de la petite Conche. Il semblerait qu'elle caractérise un socle rocheux plongeant de plusieurs mètres vers le nord-est, composé de dépressions localisées en arrière-pays dunaire. Cette géométrie n'est pas identifiable sur les profils géoradar réalisés à la pointe Gauthier et au fort Neuf, en raison de la limite de profondeur d'investigation et de l'atténuation du signal électromagnétique provoquée par une forte conductivité électrique en subsurface.

Toutefois, d'autres profils géoradar au fort Gauthier (situés au niveau des douves du fort) ont fait l'objet d'une première interprétation qui indiquerait une géométrie du socle plus irrégulière.

Enfin, la capacité de résilience de la côte nord-est de l'île d'Yeu a été discutée en corrélant la géométrie de certaines unités dunaires avec certaines occurrences marines.

Sur le secteur nord-ouest du fort Neuf, les données géophysiques marquent une surface d'érosion identifiant le recul majeur du trait de côte jusqu'en 1990. Ce recul serait traduit par les effets morphogènes de la succession d'occurrences marines de l'année 1984 sur un linéaire dunaire affaibli dû au prélèvement de sable pour la construction. Cette analyse reste à préciser en recueillant des témoignages permettant d'affirmer la date d'arrêt d'extraction du sable dunaire de l'île.

Sur le secteur du fort Gauthier et de la pointe de la petite Conche, même si aucune surface d'érosion n'est observée dans les données géoradar. Une estimation du volume de sable a pu être établie à partir de l'agencement des dépôts dunaires sur les dépôts anthropiques. Cette estimation met en évidence une forte capacité de régénération de la dune au nord-ouest de la pointe Gauthier entre 1860 et 1940, ainsi qu'une très forte croissance dunaire à l'ouest de la pointe de la petite Conche, depuis le milieu du XX^{ème} siècle.

Dans ce mémoire de fin d'étude, la corrélation entre les aléas météo-marins et les phases de croissances dunaires a seulement été introduite. L'inventaire des occurrences marines à l'échelle de l'île d'Yeu pourra être complété par les futures données dendrochronologiques ¹⁶ obtenus par le carottage, réalisé par Armelle Decaulne (CNRS) sur des tamaris de l'île.

L'approche sédimentologique, prévue initialement dans ce projet d'étude, serait à réaliser sur chacun des trois sites, afin d'avoir la composition des mètres sondés et ainsi affirmer les interprétations sur profils géophysiques.

Les résultats du projet FortiPhi alimentent directement les données au sein du programme scientifique ODySéYeu et contribuent à accroître la connaissance de la résilience du littoral nord-est de l'île d'Yeu.

Au regard du contexte de réchauffement climatique, les systèmes naturels, en l'occurrence les massifs dunaires de l'île, peuvent être soumis à de soudaines transformations. La pluralité des études scientifiques participatives menée par ODySéYeu, pallie la carence de documents de gestion des risques côtiers au sein du territoire, et par la même, réduit la vulnérabilité des risques littoraux.

L'analyse des résultats de la prospection électrique menée par le projet APPISMILE réalisée à la pointe de la petite Conche en mai 2021 et de la campagne d'acquisition de données sismiques marines datant de 2018 et 2019, pourront faire l'objet d'un futur projet de recherche qui complétera ce travail effectué lors de ce stage de fin d'étude.

¹⁶ Étude des événements à travers le temps, recensés dans la structure des cernes de croissance des végétaux ou pouvant être datés par les cernes » (selon Speer, 2012 et traduit par Pouzet, 2018).

Bibliographie

ANNAN.A.P « Ground penetrating radar, principles & methods » Elsevier Science, 2009 p 509.

ATHIMON.E, MAANAN.M, SAUZEAU.T, SARRAZIN.J-L , « Vulnérabilité et adaptation des sociétés littorales aux aléas météo-marins entre Guérande et l'île de Ré, France (XIV^e - XVIII^e siècle) », VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, Volume 16, numéro 3, décembre 2016.

BALTZER A., MAANAN.M , ROLLO.N , DURAND.A , « Approche géophysique de la couverture sédimentaire au large des Pays de Monts », XIII^{ème} journées nationales génie côtier. 2014.

BANO.M & LOEFFER.O « Modeling GPR reflections from a water table. Why high gpr frequencies don't image the water table » American Geophysical Union, 2005.

BAUDOUIN.V, GARCIN.M, DEPARIS.J, PLAT.E, A BITRI.A, et al.. « Méthode pluridisciplinaire de caractérisation physique des systèmes dunaires côtiers ». Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil - JNGCGC, La Rochelle, France. 2018.

BELMERCHI .A.B « Modélisation des signaux georadar - application à l'archéologie -> Mémoire de master en science de la terre, spécialité géophysique, Université Houari Boumediene. 2014

BIRD.J.M, DEWEY.J.F « Lithosphere Plate-Continental Margin Tectonics and the Evolution of the Appalachian Orogen », p1031–1060, 1970.

BJELM.L FOLLIN.S, SVENSSON.C « Un système de radar pour l'investigation du sous-sol » Bulletin de l'association internationale de géologie de l'ingénieur, 1982.

BOSTANUDIN.N.J.F, « Computational Methods for Processing Ground Penetrating Radar Data », Degree of Doctor of Philosophy of the University of Portsmouth, May 2013.

BOURDY.L, « Etude des événements extrêmes dans le sud de la Vendée », mémoire de master en Géographie, Université de Nantes, 2019.

BRISTOW.C.S & J.H.M “An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments” Geological Society, London, Special Publications, 211, 1-7, 1 January 2003.

BRISTOW.C.S Ground penetrating radar, principles & methods » Elsevier Science, p509, 2009.

CARIOU.E, BALTZER.A, ROLLO.N, « L'Île d'Yeu, le Coureau Islais et les Pays de Monts : une dynamique sédimentaire complexe à décrypter », Cahiers Nantais [En ligne], 2 | 2017.

CASSIDY.N.J Ground penetrating radar, principles & methods » Elsevier Science, p509, 2009.

CASSIDY.N.J; GPR Attenuation and Scattering in a Mature Hydrocarbon Spill: A Modeling Study . Vadose Zone Journal; 7 (1): p140–159, 2008.

CHAZETTE.A « AtlantikWall, mythe ou réalité », Histoire et Fortifications, 2008.

CHOTEAU.M « Géophysique appliquée I : Gravimétrie » Ecole Polytechnique de Montréal, 26 août. 2002.

COLLINSON.J, MOUNTEY.N, THOMPSON.D, “Sedimentary structures” Third edition, 2006.

COUTUREAU.E et MAHEUX.H, "Yeu et Noirmoutier, îles de Vendée", Cahier du Patrimoine, 1994.

- DALLAIRE.P-L, « Utilisation d'un géoradar afin de caractériser la stratigraphie de la tourbe et estimer le carbone organique accumulé dans une tourbière boréale, région d'Estmain, Baie James, Québec » mémoire de maîtrise en Géographie, Université du Québec à Montréal, 2010.
- DUJARDIN.J.R, « Imagerie Géoradar en milieu hétérogène : Application aux failles actives en Mongolie et aux dépôts pyroclastiques du Tungurahua (Equateur). » Thèse de Doctorat de l'université de Strasbourg, 2014.
- DOOLITTLE.L.A & BUTNOR.J.R.. «Soils, Peatlands, and Biomonitoring». In *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*”, Harry M. Jol eds, 524. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- DAVIS.J. L. & CHUDOBIAK.W. J.. “In Situ Meter for Measuring Relative Permittivity of Soils.” *Environmental Science*, 1975.
- DUPONT.P, HERAULT.A et BOUZILLE.J.B, « Contribution à la connaissance de la flore et de la végétation de l'île d'Yeu (Vendée) », *Bulletin de la société botanique du Centre-Ouest, Nouvelle-Série*, Tome 16, 1985.
- FAO (Nation Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture) « Manuel de fixation des dunes » 1988.
- FERHOUNE.M « Détection et classification des objets enfouis par les radars à pénétration de sol (GPR) » Mémoire de master en électrotechnique industrielle, Université de Jijel, 2020.
- FISHER.S.C, STEWART.R.R, and JOL.M.H, "Ground Penetrating Radar (GPR) Data Enhancement Using Seismic Techniques," *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 1: 89-96. 1996.
- GEORGE.P « Dictionnaire de la géographie », Paris, Presses universitaires de France, p448, 1970.
- GIRAUD.K, « Risques, connaissances et représentations du territoire insulaire de l'île d'Yeu Mise en place d'outils collaboratifs de partage du savoir. », Mémoire de Master 2, l'Université de Nantes, 2020.
- GOODMAN.D “Ground penetrating radar, principles & methods » Elsevier Science, p509, 2009.
- HARARI.Z, “Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes” *Journal of Applied Geophysics*, Volume 36, Issue 1, Pages 43-52, November 1996.
- HUISMAN J. A., S. HUBBARD S., REDMAN J. D., ANNAN A. P “Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review. *Vadose Zone Journal* 2 (4): 476–491. 2003.
- JUIGNER.M, « La géomatique au service de l'observation du trait de côte » Thèse de doctorat en géographie, Université de Nantes, 2017.
- LEMAUFF.B « Les dynamiques hydro-sédimentaires du Goulet de Fromentine, de la Baie de Bourgneuf et des plages adjacentes » Thèse de doctorat en géographie, Université de Nantes, 2018.
- LERMA.N.A, BULTEAU.T, LECACHEUX.S, IDIER.D « Période de retour des événements de fortes houles le long des côtes françaises (Atlantique et Manche) ». XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Dunkerque, France, 2014.
- MAANAN.M, & POUZET.P, « Les paléo-événements extrêmes. Outils et méthodes ». Université de Nantes, 2019.
- MATHIEU.G. «Notes de Géographie physique et économique sur l'île d'Yeu In: Bulletin de l'Association de géographes, français, N°116, 15e année., pp. 119-124, novembre 1938.
- MCKEE.E, sStructures of dunes at white sands national monument, new mexico (and a comparison with structures of dunes from other selected areas), *Sedimentology*, Volume7, Issue1, p. 3-69, August 1966.
- MEUR-FEREC.C MOREL.V « L'érosion sur la frange côtière : un exemple de gestion des risques » *Nat. Sci. Soc.* Volume 12, Number 3, Juillet-Septembre, p263 – 273, 2004.
- MERCIER, D., « Géomorphologie de la France ». Dunod, Paris, 2013.

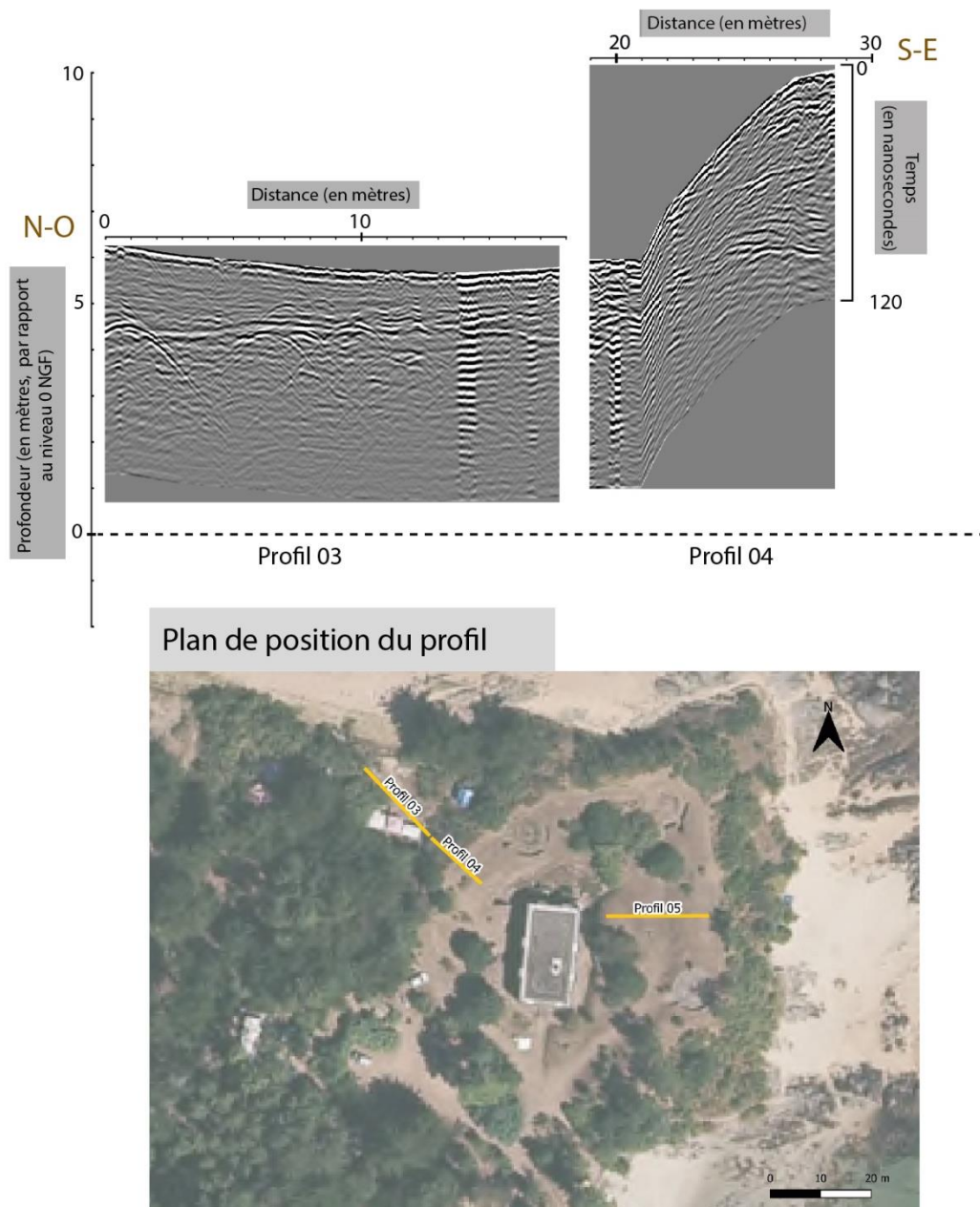
- NEAL.A, « Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress » *Earth-Science Reviews*, Volume 66, Issues 3–4, Pages 261-330, 2004.
- NEYRAT, « Contribution à l'étude de G.P.R. (Ground Penetrating Radar) multicateurs. Méthodes directes et inverses en temporel », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2009.
- NIU.Q et al., « Use of ground penetrating radar to investigate feathery complex linear dunes in the Kumtagh Desert, North-west China, 2012.
- NOUZÉ.H & CHAUCHOT.P « Les sismiques : des outils essentiels pour l'étude des structures océaniques » *Geosciences Marine*, Vol: 21, pp: 25-29, 1999.
- PANCRAZZI et al., *Cross Analysis of Morphological Evolution and Internal Architecture of an Active Mixed Sand-Gravel Barrier Spit (Somme Bay, Northern France)*, 2020
- PETITFILS J-C. Louis XIV et Fouquet. In: *Versalia. Revue de la Société des Amis de Versailles*, n°5, pp. 86-95, 2002.
- PIRAZZOLI P.A "Global sea-level changes and their measurement, *Global and Planetary Change*, Volume 8, Issue 3, Pages 135-148, 1993.
- POUZET.P, « Etude des paléoenvironnements extrêmes de long de la façade atlantique française, approches sédimentologiques, dendrochronologiques et historique », Thèse de doctorat en géographie, Université de Nantes, 2018.
- ROBIN.M « Étude des risques côtiers sous l'angle de la géomatique » *Annales De Géographie*, vol. 111, no. 627/628, pp. 471–502, 2002.
- ROELLY.A « Le Comité des fortifications de 1791 à 1800 » *Ecole des chartes*, Paris, 1995.
- SABATIER.F, SUANEZ.S. "Evolution of the Rhone Delta coast since the end of the 19th century. Géomorphologie : relief, processus, environnement, *Groupe français de géomorphologie (GFG)*, p.283-300, 2003.
- SAILHAN P, « La fortification – Histoire et dictionnaire », Paris, Tallandier, 1991.
- SALAT (N.) et PENICAUT (E.), « Le Dépôt des fortifications et ses archives (1660-1940) », Paris, Ministère de la Défense-Éditions Archives et culture, 535 pages. 2011.
- SUTHERLAND.D « L'Expédition de l'île d'Yeu en 1795 » *Annales historiques de la Révolution Française*, Janvier-Mars 1973, 45e Année, No. 211 (pp. 51-70), Armand Colin, 1973.
- ROELLY.A « Le Comité des fortifications de 1791 à 1800 » *Ecole des chartes*, Paris, 1995.
- TRZPIT.J.P. Les tempêtes nord-atlantiques : Essai d'analyse géographique (1re partie). In: *Noroi*, n°93, pp. 33-52; 1977L.
- TURU i MICHEL.V « Méthodologie de la prospection géoélectrique appliquée -annexe de documentation » *Géologie, cartographie, prospection géophysique et services scientifico-techniques*, 1997
- VAN DAMR.L, VAN DEN BERG.E.H, VAN HETEREN.S, KASSE.C, KENTER.J.A.M, KOOS GROEN.J « Influence of Organic Matter in Soils on Radar-Wave Reflection: Sedimentological Implications ». *Journal of Sedimentary Research*; 72 (3): 341–352, 2002
- VANNEY, J.-R. : « Géomorphologie des plates-formes continentales », Paris, Doin, 300 p, 1977
- VERGER F., , « Les conséquences de l'élévation du niveau de la mer sur les côtes basses à marée », *La Jaune et la Rouge*, n°575, 2002
- WADE.A. « On the Formation of Dreikante in Desert Regions. *Geological Magazine* », 7(9), p394-398. 1910.

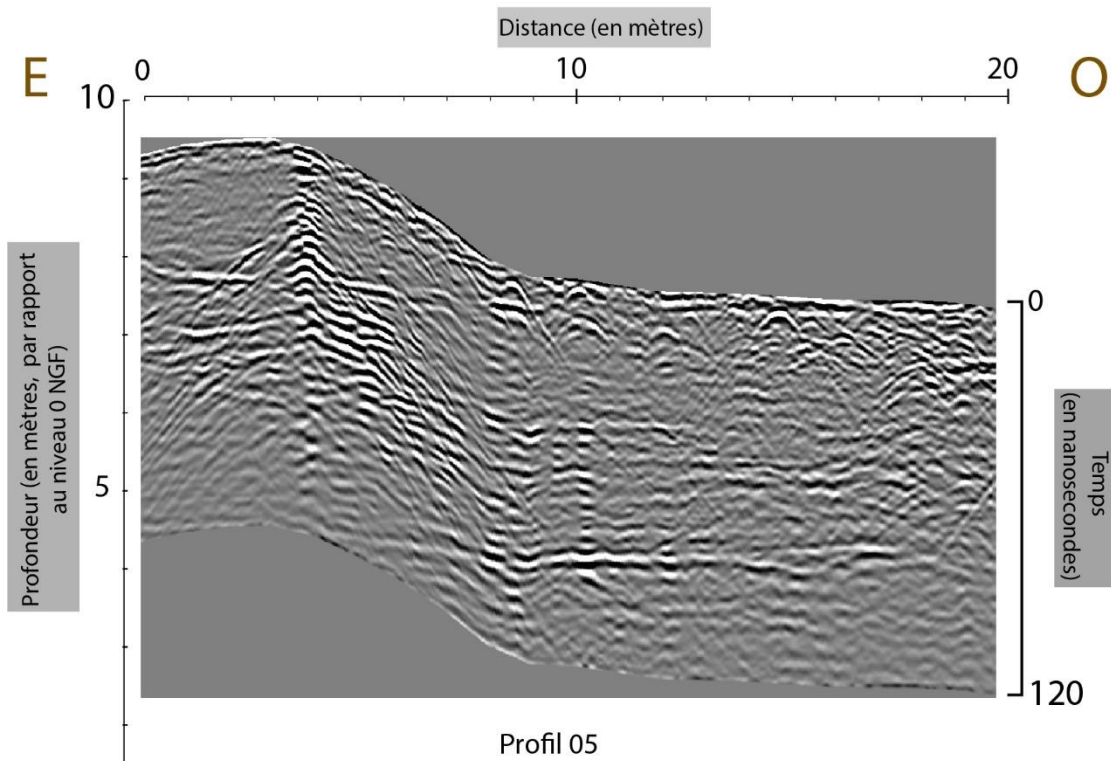
ZANINETTI.J.M « L'urbanisation du littoral en France », Population & Avenir, vol. 677, no. 2, , pp. 4-8. 2006.

ZENG.X & MCMECHAN.A., « GPR characterization of buried tanks and pipes », GEOPHYSICS p62, 1997.

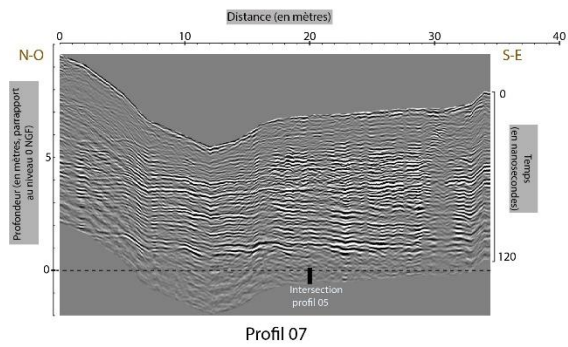
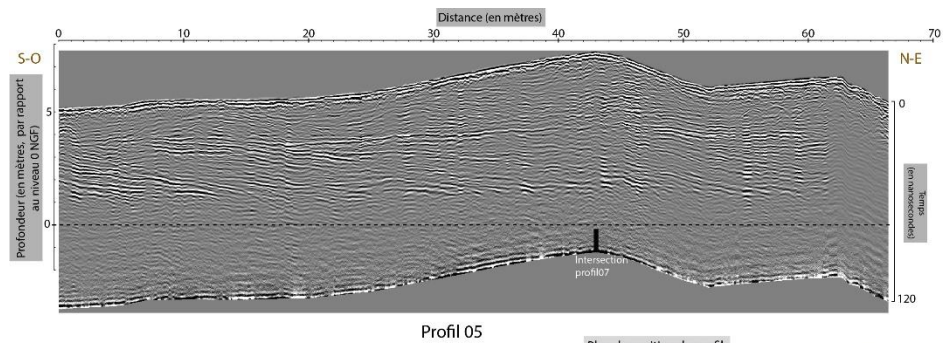
2. Résultats des profils géoradar

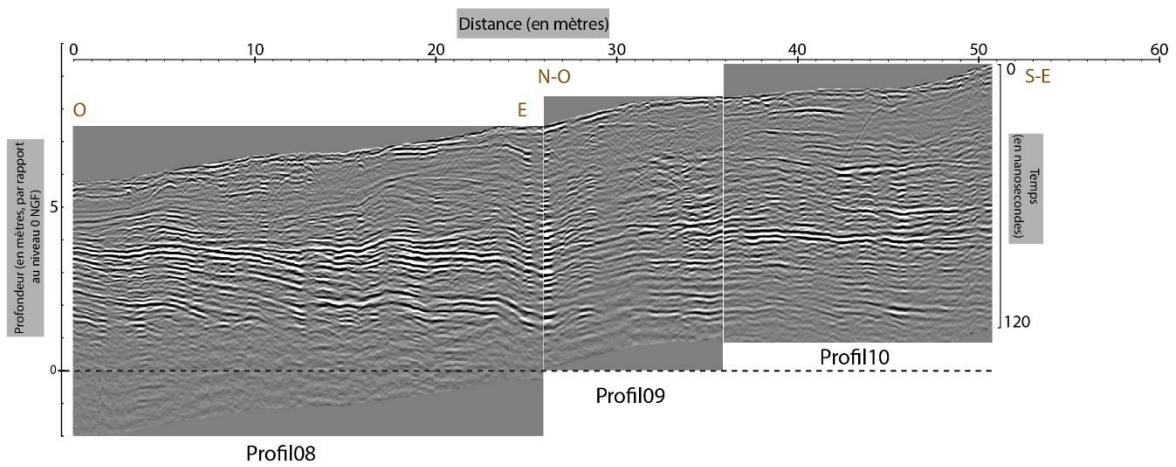
2.1 Pointe Gauthier





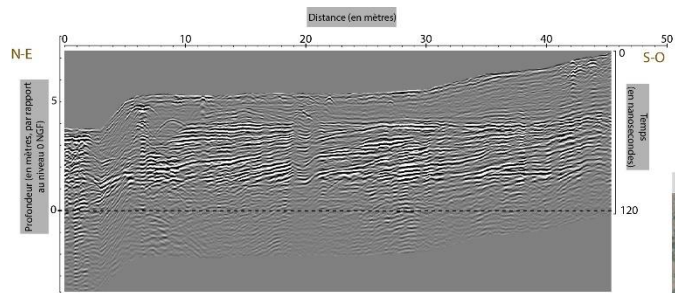
2.2 Fort Neuf



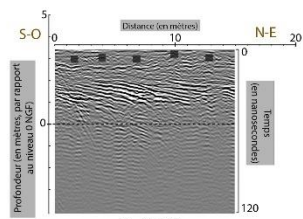


Plan de position du profil





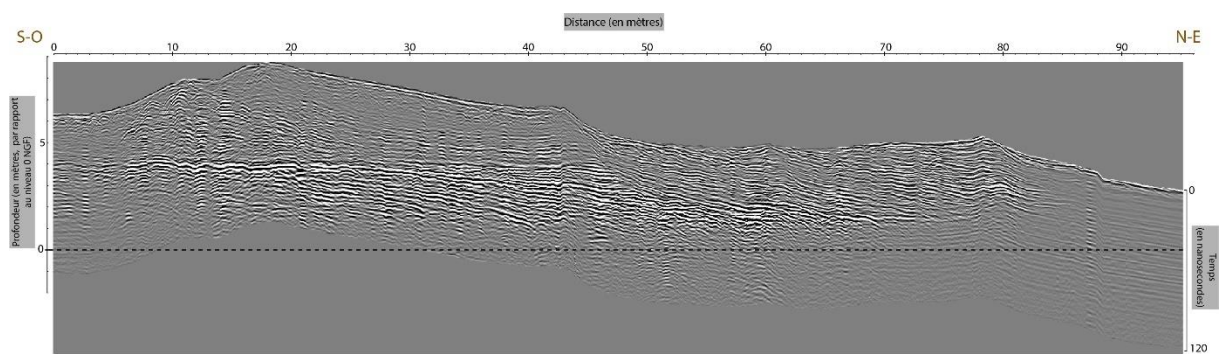
Profil 13



Profil 12

Plan de position du profil

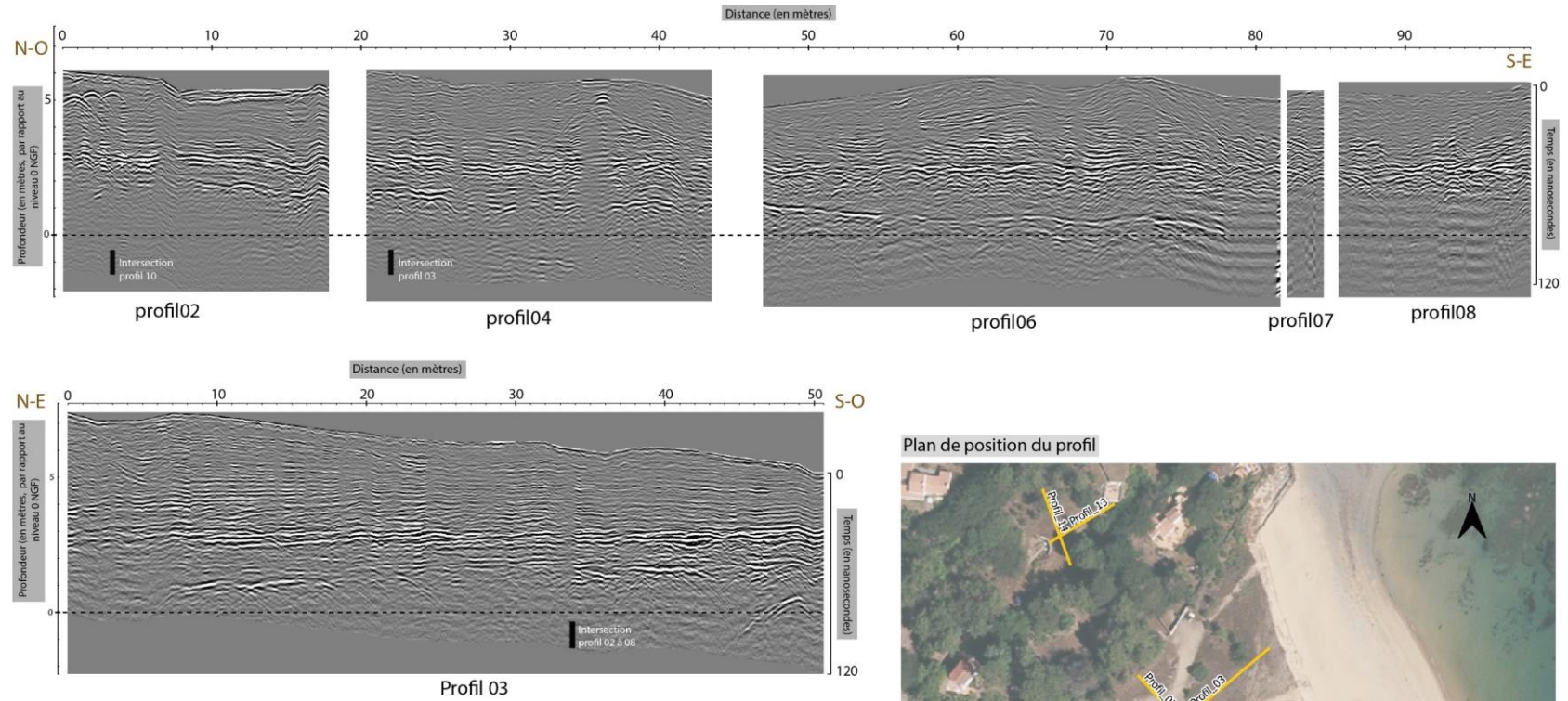


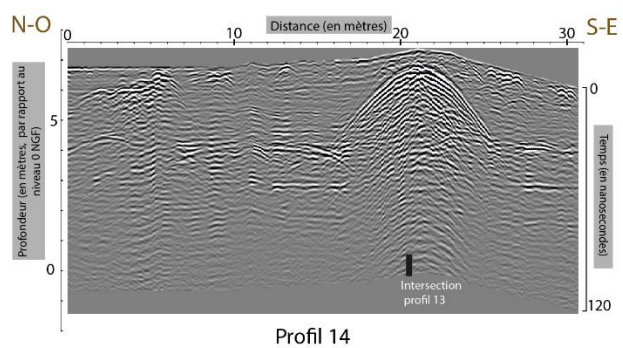
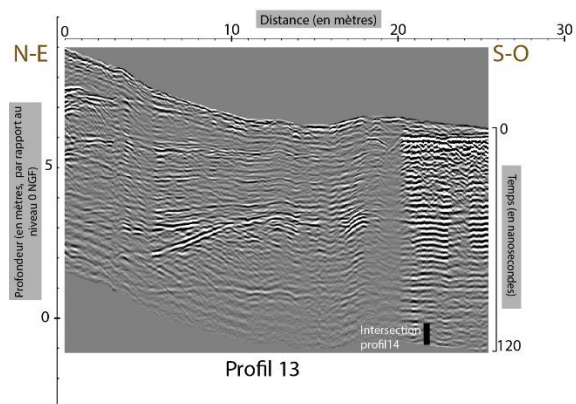


Profil 15



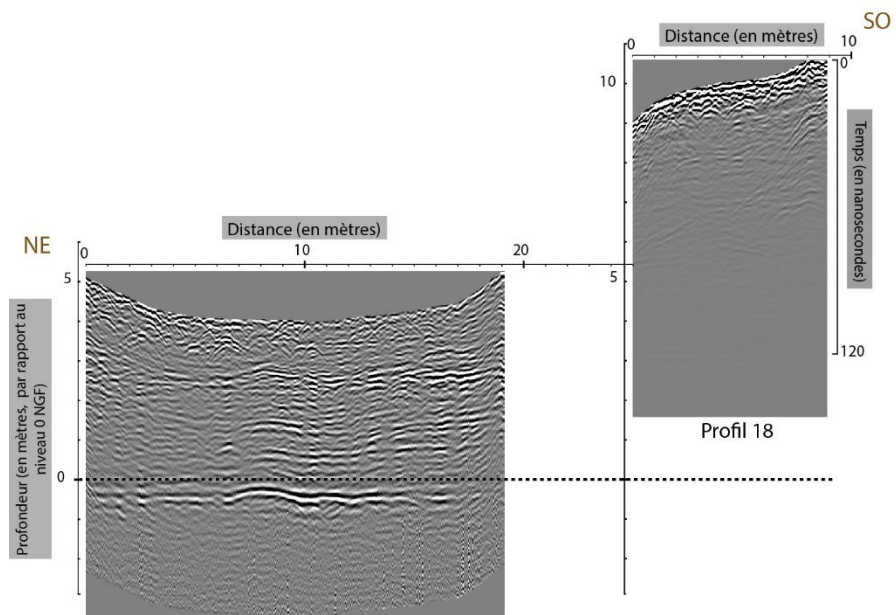
2.3 Pointe de la petite Conche





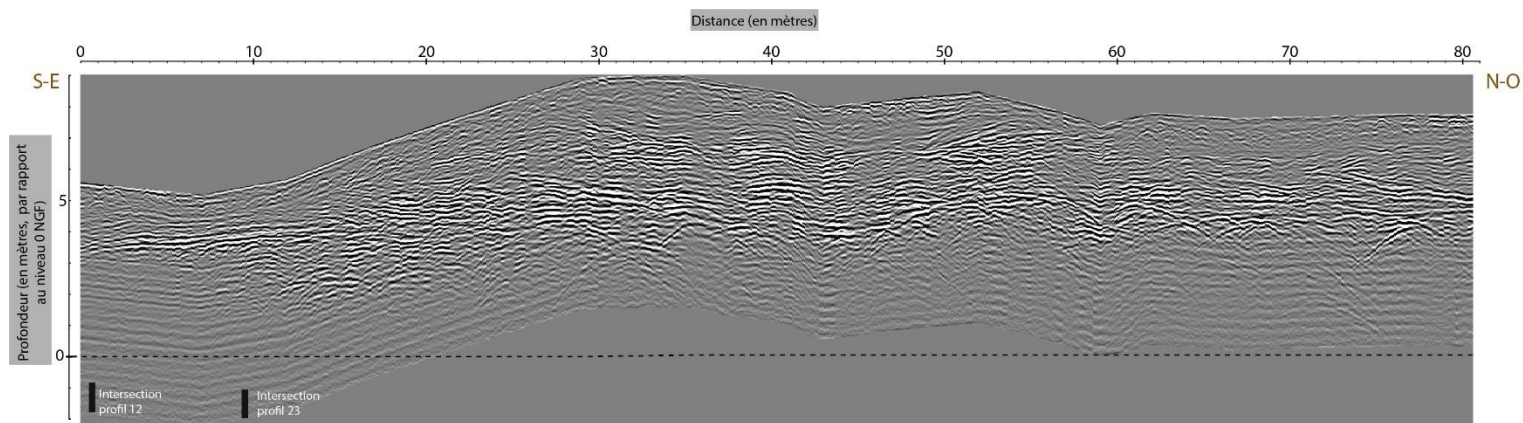
Plan de position du profil



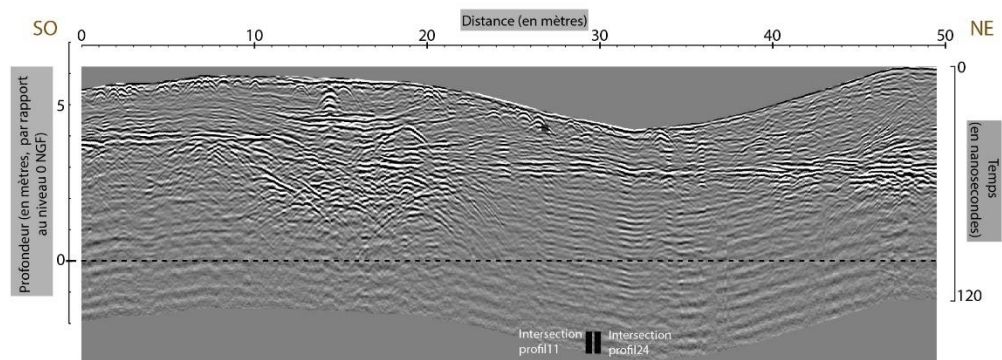


Plan de position du profil





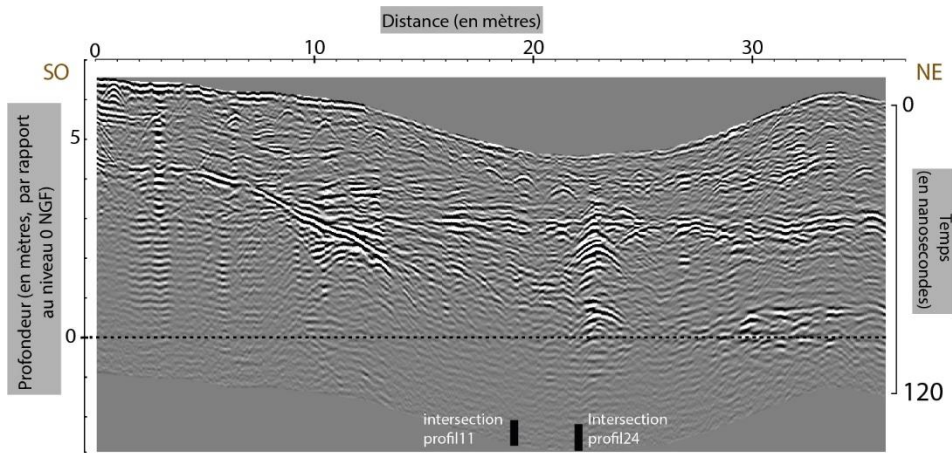
Profil 11



Profil 12

Plan de position du profil





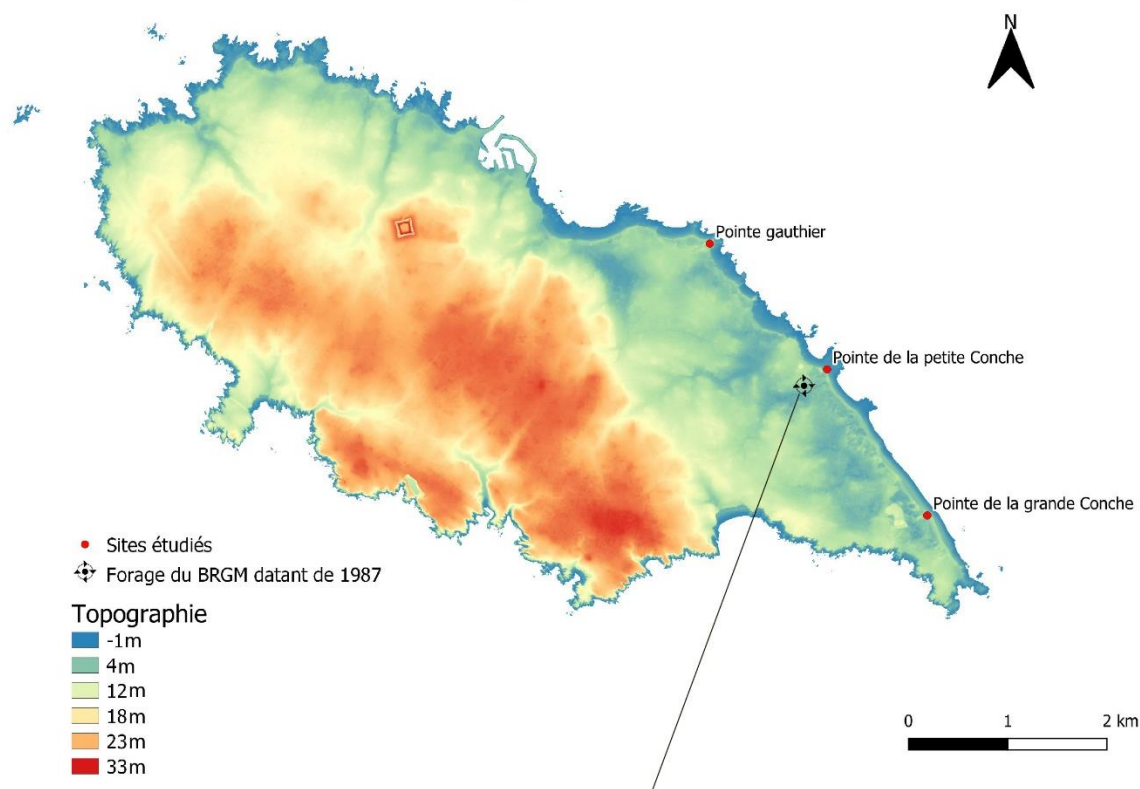
profil 23

Plan de position du profil



3. Données du BRGM

Situation du point de forage réalisé par le BRGM en 1987.



Source : Modèle numérique de terrain de 2013, OSUNA. Date : 08/07/2021. Auteur : Robin PIEL

Profondeur	Lithologie	Stratigraphie
De 0 à 3 m	SABLE DUNAIRE	QUATERNAIRE
De 3 à 6 m	ARGILES BRUNES SABLEUSES	IMPRECIS
De 6 à 8 m	GNEISS BEIGES ALTERES	ANTE-SECONDAIRE
De 8 à 9 m	GNEISS GRIS CLAIRS	ANTE-SECONDAIRE
De 9 à 32 m	GNEISS GRIS AVEC BEAUCOUP DE MICAS NOIRS	ANTE-SECONDAIRE
De 32 à 39 m	GNEISS ALTERES VIOLACES	ANTE-SECONDAIRE
De 39 à 60 m	GNEISS GRIS AVEC PLUS GROS GRAINS PUIS BEAUCOUP DE QUARTZ	ANTE-SECONDAIRE

Table des illustrations

Figure 1 : Carte géologique de la Vendée, réalisée par le BRGM, 2018.	8
Figure 2 : Topographie et localisation des 3 sites étudiés. Les photos aériennes sont issues de GoogleEarth.	10
Figure 3 : Représentation du Pont d'Yeu, reliant l'île au continent durant des périodes d'abaissement du niveau marin. Cette distance pouvait être réalisée à pied par les hommes de l'époque jusqu'à la transgression d'il y a environ 7000 ans. Carte réalisée par S. CHARRIER, 2018.	11
Figure 4 : Représentation de la diffraction des houles lors de la rencontre avec les deux pointes nord-ouest et sud-est de l'île. Ici, le modèle WaeMatch-3 indique des conditions océanographiques moyennes durant une journée hivernale, le 23/11/2017. Figure reprise et non modifiée de Cariou et al 2017.	12
Figure 5 : Évolution du trait de côte de 1950 à 2011 de la côte nord-est de l'île d'Yeu. Carte reprise de l'étude de K.Giraud (2020), réalisée à partir des données de M.Juigner (2017).	14
Figure 6 : Situation des premières fortifications côtières mises en place par Mme Pélagie de Rieux sous les conseils de Nicolas Fouquet. Les premiers travaux de fortifications à la Pointe Gauthier ne sont pas commencés. Réalisation Robin PIEL.	16
Figure 7 : Exemple d'un parapet en terre d'époque Napoléonienne à la Bastille de Grenoble. Photo tirée du site internet de l'association « 1846 ».	18
Figure 8 : Coupe d'une batterie côtière d'époque Napoléonienne : une plateforme en terre-plein est aménagée d'une artillerie d'obusier. Dessin réalisé par Lionel Duigou.	19
Figure 09 : Défenses militaires allemandes à l'île d'Yeu. Carte provenant du rapport Delpeuch entre 1952 et 1956. Modifiée et tirée de Coutureau et Maheux (1994).	20
Figure 10 : Mise en place de l'artillerie sur le site de l'ancien réduit de la Pointe Gauthier par les allemands en 1943. Photo extraite du Mur de l'Atlantique en Vendée. Tirée de Chazette, 2008.	20
Figure 11 : Resistivimètre déployé par Pascal LUTZ (Université de Beauvais) sur la plage des Roses à l'île d'Yeu, dans le cadre du projet APPISMILE. Photo prise par Pascale LUTZ.	23
Figure 12 : Schéma décrivant les deux systèmes de propagation de l'onde sismique en milieu marin. Illustration tirée du site de l'IFREMER.	24
Figure 13 : Profil électrique (a et b), sismique (c) et géoradar(d) réalisés sur le site de la Parée à Notre Dame de Monts. Modifiée et tirée de l'étude de Baudouin et al., 2018.	25
Figure 14 : Synthèse des archives historiques d'époque Napoléonienne.	28
Figure 15 : Archive "SHDAT_1VH2037" représentant les projets de constructions de batteries côtières en 1848. Modifié et tirée du Service Historique de la Défense, Vincennes.	29
Figure 16 : Plans de la commission de déclassement des ouvrages anciens datant de 1946/1947 et photographie du réduit de la grande Conche après le départ des Allemands.	30

Figure 17 : Exemple de valeurs d'atténuation, de conductivité et de permittivité relative de quelques matériaux géologiques. Tableau tiré de Bano et Loeffler., 2005.	32
Figure 18 : Antenne de type dipôle. Le pôle inférieur est subdivisée en 3 "sous-pôles" indiquant des directions différentes. Tirée de Annan, 2009.....	34
Figure 19 : Directions et interactions du signal pour un système d'antenne bi-statique (émetteur séparé du récepteur). Tiré de Fisher et al., 1996.....	35
Figure 20 : Représentation graphique du phénomène de diffraction générant une hyperbole sur l'image radar lors de l'interaction d'un objet avec le passage du signal électromagnétique. Ferhoune.M, 2020.....	36
Figure 21 : Valeurs théoriques des résolutions sur profils géoradar des milieux sableux saturés, humides et secs, selon plusieurs fréquences de l'antenne géoradar. Tiré de Bristow, 2008, modifié de Jol et Bristow., 2003)	37
Figure 22 : Description des composantes d'un géoradar GSSI SIR-300.	39
Figure 23 : Démonstration d'acquisition de données géoradar sur une surface abrupte. Réalisé par Robin PIEL.....	41
Figure 24 : Gamme de fréquence pour une antenne de 500Mhz. Schéma Tiré et modifié de Bristow, 2009.	42
Figure 25 : « Temps0 » appliqué aux profils radar.	43
Figure 26 : Schéma représentant l'effet de "gain" sur un signal électromagnétique. Schéma inspire de Annan, 2009.	43
Figure 27 : Exemple de profil avant et après migration des hyperboles. Réalisé par Robin PIEL.....	44
Figure 28 : Plage des Sapins à marée basse (photographie Elsa Cariou, 2020)	45
Figure 29 : Dépôts de tourbe découverts en 2020 sur la plage des Sapins, lors des opérations de prélèvements (photographie Agnès Baltzer, 2020).	46
Figure 30 : Secteur nord de la Pointe Gauthier (photographie Godefroy Belhomme, 2015).	46
Figure 31 : Organisation interne de trois types classiques de dunes éoliennes. Figure extraite de Sedimentary Structures, Collinson, Mountney and Thompson, third edition, 2006).....	47
Figure 32 : Terminologie des relations géométriques observables dans les stratifications discordantes. Figure extraite de Sedimentary Structures, Collinson, Mountney and Thompson, third edition, 2006.	48
Figure 33 : Historique des tempêtes de l'île d'Yeu réalisé à partir d'une frise chronologique interactive.	51
Figure 34 : Aperçu (en capture d'écran) de la frise chronologique retraçant l'historique de la batterie du fort Gauthier	53
Figure 35 : "L" inscrit sur l'un des abris casematés de la pointe Gauthier. Les lignes en pointillés ont été rajoutées afin de bien distinguer le lettrage. Photo prise par Robin PIEL.	54
Figure 36 : Tableau classant des faciès géoradar identifiés sur les 17 profils interprétés.	56

Figure 37 : Les profils 03 et 04 suivent une direction sud-est. Ils ont été réalisés du haut de la dune jusqu'à la crête du talus extérieur du parapet.	57
Figure 38 : Le profil n°05 réalisé à partir de la crête du talus intérieur du parapet situé à l'est de la batterie. Le profil suit une trajectoire d'est en ouest et le géoradar coupe l'enregistrement de données à partir d'un escarpement (à 20m de distance) marquant la limite de la plateforme en arrière du parapet.	58
Figure 39 : Coupe transversale du projet de construction du parapet de la batterie de la pointe Gauthier et de son réduit en 1859 -1860. Archive provenant du Service Historique de la Défense, Vincennes.	60
Figure 40 : Aperçu (en capture d'écran) de la frise chronologique retraçant l'histoire de la batterie du fort Neuf.	62
Figure 41 : Casemate allemande construite sur le talus intérieur du parapet napoléonien, au fort Neuf. Photo prise par Robin PIEL.	62
Figure 42 : Les profils 05 et 07 ont été réalisés à l'est de la batterie du Fort Neuf. Le transect 05 suit une trajectoire transversale au trait de côte et offre une coupe verticale de la dune grise jusqu'au haut de la dune blanche. Le profil 07 intersecte le profil 05 en partant de la crête du parapet à l'est de la batterie et traverse longitudinalement la dune grise.	63
Figure 43 : Les profils 8-9-10 ont été réalisés à partir d'un seul enregistrement. Le profil suit la crête du parapet de l'entrée du fort Neuf jusqu'aux anciennes plateformes où étaient installés des canons anti-aériens allemands.	64
Figure 44 : Les profils 12 et 13 ont été réalisés au sein du périmètre de la batterie de la grande Conche. Le profil 12 a été effectué sur le sol des douves de la façade orientale du Fort Neuf. Le profil 13 a été réalisé du début des douves jusqu'à la ganivelle délimitant une propriété au sud.	65
Figure 45 : Le profil 15 traverse transversalement le linéaire de dune qui se situe au nord-ouest de la batterie de la grande Conche. Le géoradar parcourt l'arrière-pays dunaire et stoppe l'acquisition des données une fois arrivé sur l'estran.	66
Figure 46 : Aperçu (en capture d'écran) de la frise chronologique retraçant l'histoire de la batterie de la pointe de la petite Conche.	69
Figure 47 : Tranchée creusée au sein du parapet napoléonien par les allemands. Photographie : Robin PIEL.	69
Figure 48 : Les profils 02 à 08 longent le versant oriental de la pointe de la petite Conche.. Le profil 03 suit une direction transversale et coupe le profil 04 à 22m. Les faciès superficiels traduisent un environnement remanié qui se superposeraient au massif dunaire originel. De 70m à 98 (profil06 à 08), la coupe verticale démontrerait un remaniement du sable réalisé en plusieurs phases qui serait dû à l'aménagement de l'exutoire de la Gorelle.	71
Figure 49 : Les profil 13 et 14 s'intersectent perpendiculairement sur une levée de terre qui marque le toit de la casemate enterrée. Les deux coupes verticales sont situées à quelques mètres en arrière-pays des profils 18 et 19.	73
Figure 50 : Les profil 18 et 19 mettent en évidence un transect partant du haut de dune jusqu'à la crête du talus extérieur du parapet. Ce talus extérieur n'a pas été prospecté au géoradar en raison de sa pente trop escarpée.	74

Figure 51 : Les profils 11 et 12 ont été réalisés en arrière du cordon dunaire, à l'ouest de la pointe de la petite Conche. Le profil 11 suit une direction nord-ouest, longitudinale au linéaire dunaire, tandis que le profil 12 établit un transect du sud-ouest au nord-est, et intersecte le profil 11 au centre d'une dépression puis monte jusqu'au haut de dune.	77
Figure 52 : Le profil 23 est réalisé à l'ouest du profil 12 en gardant une trajectoire similaire à ce dernier. Il permet d'obtenir un second profil transversal à la dépression jusqu'au haut de dune.	78
Figure 53 : Résumé des données stratigraphiques acquises lors d'un forage dans le marais de la Gorelle, au sud de la pointe de la Petite Conche, à l'île d'Yeu (annexe 3).....	80
Figure 54 : Profil de la batterie de la Grande Conche en 1848. Document provenant du Service historique de la Défense.	81
Figure 55 : Évolution du trait de côte entre 1950 et 2010 sur le secteur nord-ouest de la grande Conche.	84

Table des matières

Remerciements	2
Sommaire.....	3
Introduction	4
1. Contexte général de l'étude.....	7
1.1 Le littoral de l'île d'Yeu, un objet d'étude d'intérêt scientifique	7
1.1.1 Alimenter un observatoire de la dynamique sédimentaire en construction	7
1.1.2 Présentation de l'île d'Yeu.....	8
1.1.2.1 Aspects géologiques et géomorphologiques de l'île.....	8
1.1.2.2 Contexte hydrodynamique et météorologique	12
1.1.2.3 Les risques côtiers à l'île d'Yeu	13
1.2 Une île marquée par des aménagements militaires côtiers depuis le XVIIème	15
1.2.1 Premières redoutes sous le règne de Louis XIV (1643-1715)	15
1.2.2 Défense côtière durant la Restauration (1715-1830)	16
1.2.3 Époque napoléonienne (1841-1885).....	17
1.2.4 Occupation allemande (1940-1945)	19
1.3 La géophysique appliquée aux risques côtiers.....	21
1.3.1 La prospection géophysique.....	21
1.3.1.1 Définition et origine	21
1.3.1.2 Matériels déployés pour les études en géophysique appliquée	22
1.3.2 Contribution à l'étude des systèmes dunaires côtiers des Pays de Monts et de l'île d'Yeu par méthode géophysique.....	24
2. Matériels et Méthodes.....	26
2.1 Constitution d'une base de données de l'historique des tempêtes de l'île d'Yeu	26
2.2 Recherche d'archives historiques identifiant une chronologie des aménagements sur les trois sites fortifiés	27
2.2.1 Archives historiques concernant les fortifications napoléoniennes	27
2.2.2 Les archives historiques concernant l'occupation allemande	30
2.3 La prospection géoradar.....	31
2.3.1 Le radar géologique	31
2.3.1.1 Origine du géoradar.....	31
2.3.1.2 Principe physique	31

2.3.1.3 Visualisation des données	34
2.3.2 Le géoradar en milieu dunaire littoral	36
2.3.2.1 Auscultation des dunes au géoradar : lien entre structures observées et genèse du système dunaire	37
2.3.2.2 Résolution verticale en milieu sableux	37
2.3.3 - Application du géoradar sur le terrain d'étude	39
2.3.3.1 Installation du matériel	39
2.3.3.2 Contraintes liées au terrain dans l'acquisition des profils géophysiques	41
2.3.4 Traitements des données géoradar	42
2.3.4.1 Application sur logiciel	42
2.3.4.2 Traitements des données brutes	42
2.4 Stratigraphie et structures sédimentaires	45
2.4.1 Le socle	45
2.4.2. La tourbe	46
2.4.2 Paléosol argileux	46
2.4.3 Les dunes	47
2.4.4 Les dépôts anthropiques	48
3. Résultats	49
3.1 Chronologie des aléas météo-marins recensés depuis IV siècle	49
3.2 Le fort Gauthier	52
3.2.1 Chronologie des aménagements réalisés à la Pointe Gauthier	52
3.2.1.1 Fortifications napoléoniennes	52
3.2.1.2 Fortifications allemandes	54
3.2.2 Synthèse des faciès radars obtenus	56
3.2.3 Interprétation des profils géoradar réalisés à la pointe Gauthier	57
3.3 Le fort Neuf	61
3.3.1 Chronologie des aménagements et modifications réalisés au Fort Neuf	61
3.3.1.1 Fortifications napoléoniennes	61
3.3.1.2 Fortifications allemandes	62
3.3.2 Interprétation des profils géoradar réalisé au fort Neuf	63
3.4 La pointe de la petite Conche	68
3.4.1 Chronologie des aménagements réalisés à la Pointe de la Petite Conche	68
3.4.1.1 Fortifications napoléoniennes	68
3.4.1.2 Fortifications allemandes	69
3.4.2 Interprétation des profils géoradar réalisés à la pointe de la petite Conche	71

4. Discussion.....	80
4.1 Interprétation et analyse de la géométrie des unités géologiques	80
4.1.1 Géométrie du toit du socle	81
4.1.2 Tourbe, argiles ou salinité	81
4.1.3 Dunes et surfaces d'érosion majeures	82
4.1.4 Dépôts anthropiques.....	83
4.2 Dynamique littoral de la côte du nord-est	84
4.2.1 Détection d'une phase d'érosion majeure au secteur nord-ouest du fort Neuf.....	84
4.2.2 Dynamique des massifs côtiers de l'île d'Yeu sur une période de 400 ans.....	85
Conclusion et perspectives.....	86
Bibliographie	88
Annexes	92
1. Archives historiques Napoléoniennes	92
1.1 Projet de construction 1848.....	92
1.2 Projet de construction 1859-1860.....	93
2. Résultats des profils géoradar	94
2.1 Pointe Gauthier	94
2.2 Fort Neuf.....	96
2.3 Pointe de la petite Conche.....	100
3. Données du BRGM.....	105
Table des illustrations	106
Table des matières	110
Résumé	113
Abstract.....	113

Résumé

Du XVII^{ème} siècle au XX^{ème} siècle, le littoral de l'île d'Yeu a été marqué des périodes de fortifications côtières, induisant des aménagements militaires réalisés sur les dunes, reposant sur un socle géologique proche de la limite du niveau marin actuel. Dans le contexte de réchauffement climatique induisant la recrudescence des aléas météo-marins, l'île d'Yeu, en particulier sa côte basse urbanisée et localisée au nord-est, est un espace fortement soumis à la problématique des risques côtiers en milieu insulaire.

Cette étude propose une méthodologie transdisciplinaire alliant la recherche historique à l'auscultation du sous-sol par radar géologique (géoradar), afin d'étudier les relations entre les dunes, les fortifications côtières et le socle géologique de la côte nord-est de l'île d'Yeu.

Trois sites fortifiés, situés de part et d'autre de la côte nord-est de l'île seront investigués au géoradar. Les résultats obtenus permettront de corréler l'interprétation des faciès radar avec les phases de constructions en identifiant la géométrie de l'interface entre le milieu naturel et le milieu remanié. Enfin, l'interprétation des faciès sera discutée au regard d'études antérieures qui permettra d'établir une première analyse de la capacité de résilience de certaines unités dunaires.

Mots-clefs : géoradar – faciès radar - archives historiques – fortifications – dunes – socle géologique – île d'Yeu - risques côtiers insulaires – recul du trait de côte – aléa météo-marin.

Abstract

From the XVII to the XX century, numerous fortifications were built in sand dunes of Island of Yeu. These dunes are set on the bedrock which is near the current sea level. The global warming context begets a storm activity resurgence and impacts the lower topography of the Nord-east coastline of Yeu, so, this area is, nowadays, more and more involved.

This study suggests a transdisciplinary method based on historical research and a subsurface investigation by ground penetrating radar. It permits to study the relation between dune, fortifications, and bedrock interfaces in the Nord-east area of island of Yeu. Three historical sites were selected. The results will beget to correlate radar facies interpretation and historical constructions in order to identify natural environment from anthropic medium.

Finally, radar facies interpretation will be discussed according to previous studies, and this will permit to establish a first analysis of coastal resilience from several dunes unities.

Mots-clefs : Ground penetrating radar – radar facies – historical archives – breastwork – dune – bedrock – Island of Yeu – insular coastal hazard – shoreline erosion – marine occurrence.