



HAL
open science

L'évolution du trait de côte et les submersions marines dans les communes de Sainte-Marguerite-sur-Mer et Quiberville. Étude diachronique du risque généré par le recul du trait de côte et des submersions marines

Grégoire Delsigne

► To cite this version:

Grégoire Delsigne. L'évolution du trait de côte et les submersions marines dans les communes de Sainte-Marguerite-sur-Mer et Quiberville. Étude diachronique du risque généré par le recul du trait de côte et des submersions marines. Géographie. 2023. dumas-04214806

HAL Id: dumas-04214806

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04214806v1>

Submitted on 22 Sep 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

L'évolution du trait de côte et les submersions marines dans les communes de Sainte-Marguerite-sur-Mer et Quiberville.

Étude diachronique du risque généré par le recul du trait de côte et des submersions marines.



Fig. 1 : Le blockhaus effondré de Sainte-Marguerite-sur-Mer, G. DELSIGNE, 2023.

Mémoire réalisé sous la direction de Stéphane Costa.

Juillet 2023

Grégoire DELSIGNE, Master 1 GAED

Parcours Environnement, risques et diagnostic territoriaux



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE

ideas

REMERCIEMENTS

Tout d'abord j'adresse mes remerciements à Stéphane Costa pour avoir accepté d'encadrer mon travail, sa réactivité et ses suggestions tout au long de ce travail.

À Robert Davidson pour son accompagnement sur le terrain et son aide pour la photogrammétrie.

A Mohand Medjkane pour sa disponibilité et ses conseils sur les SIG et en photogrammétrie.

A Maxime Demange pour m'avoir aiguillé sur les traitements pour le recul des falaises, et ses nombreux conseils de fond et de forme pour le rendu de mon travail.

Merci au ROL, au Syndicat mixte bassin des bassins versants Saône, Vienne et Scie et la DDTM76 de m'avoir fourni les documents dont j'avais besoin et pour leur gentillesse.

À mes camarades de la table du fond de la BU pour leurs avis, mais aussi pour les moments passés à parler du mémoire... ou pas.

Enfin, merci à ma famille pour leur confiance et leurs encouragements tout le long de ces 6 mois de travail.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
INTRODUCTION.....	5
PARTIE 1 : CONTEXTE DU MÉMOIRE.....	8
PARTIE 2 : EVOLUTION DU TRAIT DE COTE.....	47
PARTIE 3 : LES SUBMERSIONS MARINES.....	74
CONCLUSION.....	103
BIBLIOGRAPHIE ET SITES WEB CONSULTES	106
ANNEXES	114
TABLE DES FIGURES.....	127
TABLE DES MATIERES.....	131

INTRODUCTION.

CADRE, PROBLEMATIQUES ET CONTENU DU MÉMOIRE

Avec les progrès technologiques et la recherche de l'amélioration des conditions de vie, le littoral est un espace d'interface, aménagé par l'Homme et recherché pour le cadre de vie qu'il procure tout en faisant l'objet de perpétuels changements. La frange côtière et ses différents habitats subissent des évolutions à différentes échelles de temps et d'espaces avec l'interaction de l'Homme, de la mer, du climat et les phénomènes créés par ces derniers.

Avec l'accélération du changement climatique, le littoral est de plus en plus touché par des événements exceptionnels de grande intensité, la tempête Xynthia, survenue en février 2010, témoigne de la violence des effets provoqués par une mer déchaînée sur notre trait de côte.

Pour développer des stratégies d'aménagement efficaces, la connaissance du mode d'évolution du trait de côte est indispensable. Cela passe par l'observation et le suivi du littoral, dans le passé, le présent, mais aussi par l'évaluation des potentielles évolutions futures, pour comprendre, s'adapter et anticiper l'érosion et les prochaines occurrences dommageables pour les milieux côtiers avec le changement climatique.

L'objectif de ce mémoire consiste en la quantification du recul des falaises crayeuses de la commune de Sainte-Marguerite-sur-Mer à différents pas de temps et à réaliser un inventaire et une cartographie des submersions marines de la zone d'étude pour observer si les conditions de franchissement de la mer évoluent. Le travail rendra compte également d'une cartographie du terrain d'étude en lien avec l'élévation du niveau marin.

Ces démarches s'inscrivent dans le champ de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, mais aussi de la gestion du risque littoral et du défi de l'adaptation nécessaire au changement climatique annoncé par la communauté scientifique depuis près de 50 ans.

Le présent mémoire va tenter de répondre à plusieurs questions qui forment les problématiques de ce travail sur les communes à l'étude, en se penchant sur les processus qui interagissent sur le terrain : l'érosion du trait de côte, les zones submersibles et vulnérables, les processus géomorphologiques, climatiques, hydrodynamiques... qui impactent et modifient le paysage local à court, moyen et long terme.

- **Quel est le rythme d'érosion des falaises à Sainte-Marguerite-sur-Mer à pas de temps long et à pas de temps court ?**
- **Combien de submersions marines ont eu lieu et quand sont-elles survenues sur la commune de Quiberville depuis 2011 ?**
- **Quelles sont les forces des facteurs ayant causé ces événements exceptionnels ?**
- **Quels ont été les espaces envahis par les submersions marines et quels sont leurs impacts ?**
- **Quelles sont les zones potentiellement inondables par submersion marine et par tempête dans un futur proche ?**

Ce travail va entreprendre de répondre à ces questions à travers différentes méthodes qui ont déjà fait leurs preuves, notamment informatiques, historiques et prospectives, bilans statistiques. Le plan de ce mémoire va se découper en trois axes principaux, détaillés en page suivante. Il va suivre une logique temporelle tout en étudiant les spécificités locales à pas de temps différents. De ce fait, après avoir présenté les caractéristiques locales du terrain et ses aléas, nous verrons l'évolution passée du trait de côte à pas de temps long, à pas de temps court (évolution actuelle sur environ une année), et enfin les submersions marines et leurs zones submersibles à l'horizon 2050 et 2100.

PARTIE 1 : CONTEXTE DU MÉMOIRE.

LES ELEMENTS ABORDES, LEURS ENJEUX, LE TERRAIN D'ETUDE

Cette première partie va se concentrer sur la présentation des éléments qui caractérisent et interagissent avec la zone d'étude. Elle rendra d'abord compte d'un contexte général sur le littoral français, les éléments de langage employés le long de ce mémoire et les différents aléas qui seront étudiés. Nous verrons ensuite les enjeux du recul du trait de côte et des submersions marines, leurs caractéristiques générales et spécifiques à la zone d'étude que sont les communes de Sainte-Marguerite-sur-Mer pour les falaises et de Quiberville pour les submersions marines.

La partie a pour but de présenter les bases du mémoire pour mieux appréhender et comprendre le travail qui en suit et les facteurs qui affectent et provoquent une érosion et une inondation par la mer.

1.1 - Définitions préalables des principales notions et des termes utilisés

1.1.1 - La notion de risque

À toutes les échelles spatiales et temporelles, la population peut être frappée par des événements d'origine naturelle ou humaine, dont la population française et son territoire. Le risque se traduit par la combinaison d'un aléa et d'un ou plusieurs enjeux, plus ou moins vulnérables aux aléas.

1.1.2 - L'Aléa

On appelle "aléa" un phénomène potentiellement dangereux et plus ou moins probable susceptible de provoquer des dommages à des personnes, des biens ou à l'environnement. L'aléa dépend de plusieurs facteurs tels que l'intensité du phénomène et de son apparition, mais aussi sa durée et l'espace qu'il affecte. L'action de l'Homme peut amplifier un aléa naturel comme l'urbanisation qui imperméabilise les sols et accélère l'écoulement de l'eau (Y. VEYRET, 2004).

1.1.3 - Les enjeux

Les enjeux sont tous les éléments factuels (des personnes, leurs biens, des équipements, l'environnement...) qui peuvent être affectés par un phénomène naturel ou anthropique et subir des dommages (géoconfluences.ens-lyon.fr, Enjeux).

1.1.4 - La vulnérabilité

La vulnérabilité désigne la mesure dans laquelle une population, un équipement ou l'environnement est susceptible de subir des pertes ou des dommages en cas de réalisation d'un risque donné. La vulnérabilité peut être influencée par divers facteurs comme la localisation géographique, les infrastructures de défense disponibles, la capacité de réponse en cas d'urgence, le niveau de préparation et de sensibilisation aux risques des populations, la qualité des systèmes d'alerte...

Par exemple, si une entreprise est située dans un secteur sujet aux séismes et qu'elle n'a pas mis en place des mesures de prévention et de préparation adéquates, elle peut être considérée comme vulnérable face aux dommages provoqués par un tremblement de terre.

Le risque est donc un danger, un inconvénient plus ou moins probable auquel un élément est exposé. Quand il se produit à forte intensité, on parle de catastrophe. Le premier d'entre eux en France est l'inondation.

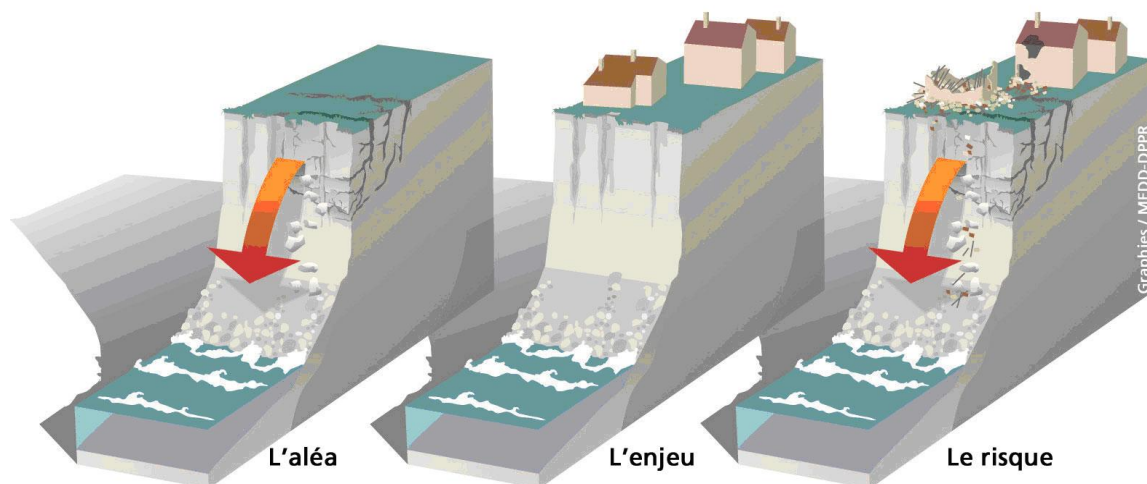


Fig. 2 : Schéma du risque, IRMA.

1.1.5 – La manifestation du risque

Tout risque se manifeste par des crises, risque qui commence par une phase de latence. Ensuite, le degré de la crise augmente jusqu'à atteindre une phase critique. Enfin, il y a une phase d'apaisement au fur et à mesure que le temps passe.

Plus le risque est grave, plus sa fréquence diminue : pour qu'un risque soit grave il doit se produire à très grande échelle spatiale, il y a donc moins de chances qu'il se produise à un tel niveau d'intensité. Il existe 3 grands domaines :

- Domaine 1 : Fréquence élevée, risque individuel de vie quotidienne ;
- Domaine 2 : De gravité et fréquence moyenne ;
- Domaine 3 : Collectif, majeur, forte gravité et fréquence faible.

Il existe aussi des risques technologiques (générés par l'Homme) tels que les ruptures de barrage, transport de matières dangereuses, accident nucléaire ou industriel... Mais le sujet qui nous intéresse traite des risques naturels, plus précisément de ceux littoraux. C'est pourquoi nous ne développerons plus les risques technologiques.

Avec ses presque 20 000 km de côtes, les risques littoraux en France sont un sujet de préoccupation majeur, d'autant plus que le changement climatique a tendance à intensifier les aléas côtiers et marins et à augmenter leur fréquence. Actuellement, plus de 8 communes littorales sur 10 sont sujettes aux risques naturels majeurs (l'observation du trait de côte, Réseau national des observatoires du trait de côte).

Bien sûr, le littoral n'est pas homogène. Il n'y a pas un, mais des littoraux, composés de plages, d'estuaires, de falaises... Il convient donc de développer une stratégie de suivi adaptée pour chacune de ces typologies d'espace.

1.2 - Le recul du trait de côte et les submersions marines

Avant de présenter nos recherches ciblées sur une zone du littoral normand, faisons le point sur ces aléas qui cadrent ce mémoire.

1.2.1 – L'aléa recul du trait de côte

D'après le Réseau d'Observation du Littoral (ROL), le trait de côte peut être défini par la limite, la zone de contact entre la terre et la mer. Celui-ci est soumis à des variations temporelles et spatiales en permanence, sous l'effet de processus naturels tels que des houles, marées et courants associés, vent, niveau marin extrême induit par les tempêtes ou bien sous l'effet de phénomènes anthropiques (aménagements, exploitation des sédiments).

Sur un temps plus long, la position du trait de côte change sous l'effet du changement climatique. L'augmentation du niveau marin, les effets de gonflement/retrait d'argile, l'alternance gel/dégel et les effets de soulèvement et de subsidence poussent les terres à avancer dans une moindre mesure, ou à reculer, on parle alors de recul du trait de côte.

Le recul du trait de côte peut se définir par le déplacement, vers l'intérieur des terres, de la limite entre le domaine marin et le domaine continental (institut des risques majeurs). Il a de nombreuses conséquences concernant l'aménagement du territoire (adaptation, défense, retrait).

Cependant, les phénomènes qui affectent le littoral et le recul du trait de côte n'empêchent par la croissance des populations sur cet espace. Les nombreux avantages du littoral, à la fois lieu de récréation, de villégiature et de développement économique, attirent toujours plus. Il est alors nécessaire de connaître du mieux possible le littoral pour mieux le gérer et pouvoir anticiper les évolutions de celui-ci, notamment par le suivi du trait de côte (Réseau national des observatoires du trait de côte).

En 2014, le littoral français métropolitain héberge près de 8 millions de personnes sur 5 853 km de côtes avec une densité 2.5 fois plus élevée que la moyenne nationale, et la tendance est que cette population augmente : entre 1962 et 2014, le littoral français s'est peuplé de 1.8 millions de résidents supplémentaires, et les projections de l'INSEE estiment à un gain de population sur le littoral de 4.5 millions de personnes supplémentaires d'ici 2040. Ainsi, malgré la connaissance des risques et une large communication, il est constaté que le processus d'aménagement en zone littorale continue de cristalliser des enjeux toujours croissants.

En termes d'aléas, le littoral subit également les effets des tempêtes. Certaines peuvent être particulièrement intenses et provoquer l'invasion des terres par la mer. Ce sont les submersions marines.

1.2.2 – L'aléa submersion marine

Cette forme d'inondation est le fait de l'élévation du niveau de la mer qui peut augmenter de plusieurs mètres lors des tempêtes. Les vagues vont alors pénétrer dans les terres, provoquant des inondations côtières. Parfois, la violence de ces tempêtes font que la mer envahit les espaces protégés par des digues. Ces inondations peuvent durer de quelques heures à plusieurs jours selon la perméabilité des sols et les possibilités d'évacuation naturelle de l'eau (IRMA Grenoble, 2021).

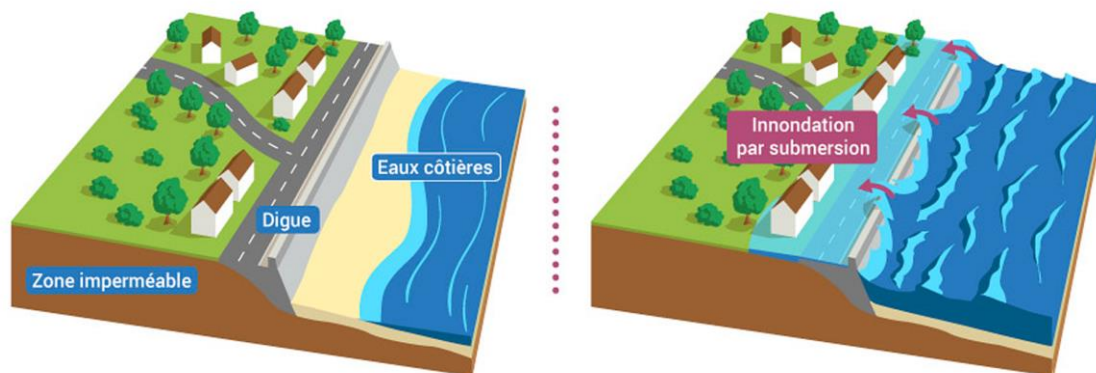


Fig. 3 : Schéma d'un phénomène de submersion marine, EauFrance.

Ce phénomène est provoqué par la combinaison de plusieurs facteurs (Porter à connaissance du Plan de Prévention des Risques Littoraux PPRLi du bassin versant Saône-Vienne). Tout d'abord un **niveau marin important** (intensité de la marée liée à un fort coefficient) : la marée est une oscillation verticale périodique du niveau de la mer. L'attraction de la lune et du soleil sur la Terre a pour effet de créer une onde de marée qui crée en se propageant le phénomène de marée (CIEAU.com).

Il existe deux facteurs qui expliquent le phénomène de marée :

- Premièrement, l'attraction gravitationnelle comme cité plus tôt, qui déforme la surface des océans et provoque un soulèvement des eaux. Son amplitude varie en suivant la position des astres par rapport à l'axe de la Terre (CIEAU.com) ;
- Deuxièmement, la force centrifuge liée à la rotation de la Terre, ce qui explique la présence de deux marées par jour.

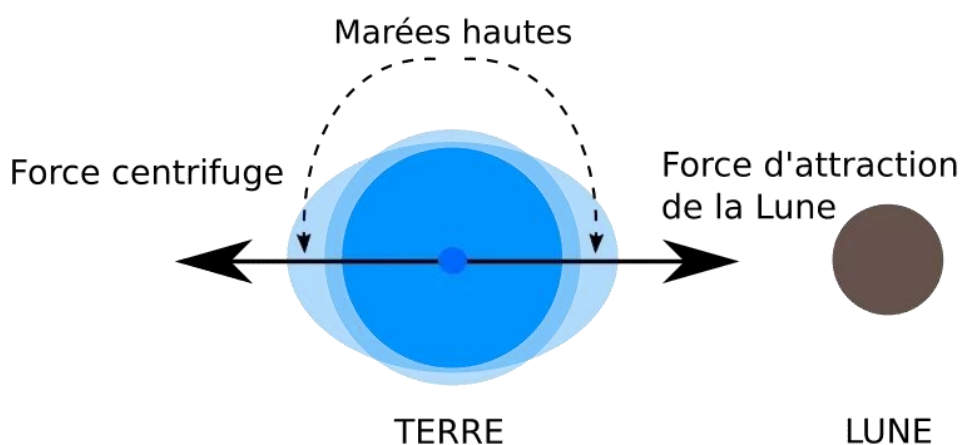


Fig. 4 : Schéma expliquant le fonctionnement des marées, js2-sciences.com, 2021.

En France, l'importance d'une marée est mesurée par son coefficient. Celui-ci est faible quand le coefficient de marée est de 20, on parle alors des "mortes eaux". A l'inverse, le coefficient de marée est fort quand il est de 120, on parle alors des "vives-eaux". Dans la Manche, le régime de marée macrotidal génère de forts courants de marée la plupart du temps alternatifs (COSTA, 1997).

Le deuxième facteur est constitué par **la houle et les vagues**, qui peuvent être définies par des mouvements horizontaux de l'eau marine qui apparaissent de manière régulière et qui peut se déplacer sur de longues distances. Ces oscillations périodiques du niveau de la mer, qui se manifestent de façon épisodique en fonction d'inégalités des pressions agissant sur la surface, ont une période généralement inférieure à 30 secondes. Ces oscillations sont initiées au large, le plus souvent par les vents qui créent des rides à la surface de l'eau, on parle de "mer du vent". Dans la Manche, ces mers de vents sont parfois violentes, elles sont générées par les tempêtes, ce qui provoque un fort impact sur la dynamique littorale (COSTA, 1997). Les houles et les vagues se distinguent entre elles par leur longueur d'onde (distance entre deux crêtes successives), leur amplitude : (différence entre la crête et le creux) et leur célérité (PERES, 2017). Plus les vents seront forts, plus les oscillations des vagues pourront s'étendre et générer des ondes de houles et de vagues d'une plus grande amplitude sur une période plus grande. De ce fait, les dégâts provoqués par la mer sur le rivage seront plus importants. Le relief sous-marin joue également un rôle sur la houle. En effet, si le fond est plat, les vagues vont déferler en s'affaiblissant loin des côtes. Si le fond est en pente forte, les vagues vont déferler à leur pleine puissance (METEOCONTACT). Le fond de la Manche étant peu profond et peu accidenté, le littoral est soumis à des houles atténuées et déformées (COSTA, 1997). Un jet de rive est la translation de l'eau vers le haut de la plage au moment de l'arrivée de la vague, et le retrait, est l'eau retournant à la mer selon la plus grande pente (PINOT). On distingue donc les houles courtes, qui vont générer des jets de rive plus violents que la vague de retrait, et les houles longues, qui vont à l'inverse avoir un jet de rive faible mais une vague de retrait très active, raclant beaucoup de sédiments et favorisant l'érosion.

Les deux phénomènes sont compliqués à distinguer, ce sont les vagues qui provoqueront les franchissements et donc les inondations sur les terres, mais ce seront les données de houles qui seront prises comme référence pour évaluer les facteurs de franchissement ;

Troisième facteur, la surélévation du niveau marin appelée **surcote** due en majeure partie à des conditions météorologiques :

- Lors du passage de dépressions, le poids de l'air décroît à la surface de l'eau et le niveau de la mer monte ;
- Ou bien par les vents (initiés par la dépression également), qui par ses frottements va provoquer une accumulation d'eau à proximité du littoral, accentuant la surcote.

La surcote peut, dans une moindre mesure, avoir d'autres origines : vagues, seiches, tsunamis... (Refmar SHOM). Elle est calculée par la différence entre la hauteur d'eau observée et la hauteur d'eau prédite. C'est un phénomène important à prendre en compte car une baisse d'un hectoPascal entraîne une augmentation de 1 cm du niveau de la mer, ce qui est conséquent.

Lorsque les vents se combinent à une dépression atmosphérique, le risque d'inondation côtière est très important, on parle alors de "marée de tempête" (MÉTÉO-FRANCE).

Au niveau de la fréquence, les surcotes ont lieu la plupart du temps en hiver, lorsque les dépressions venant de l'Atlantique traversent l'Europe.

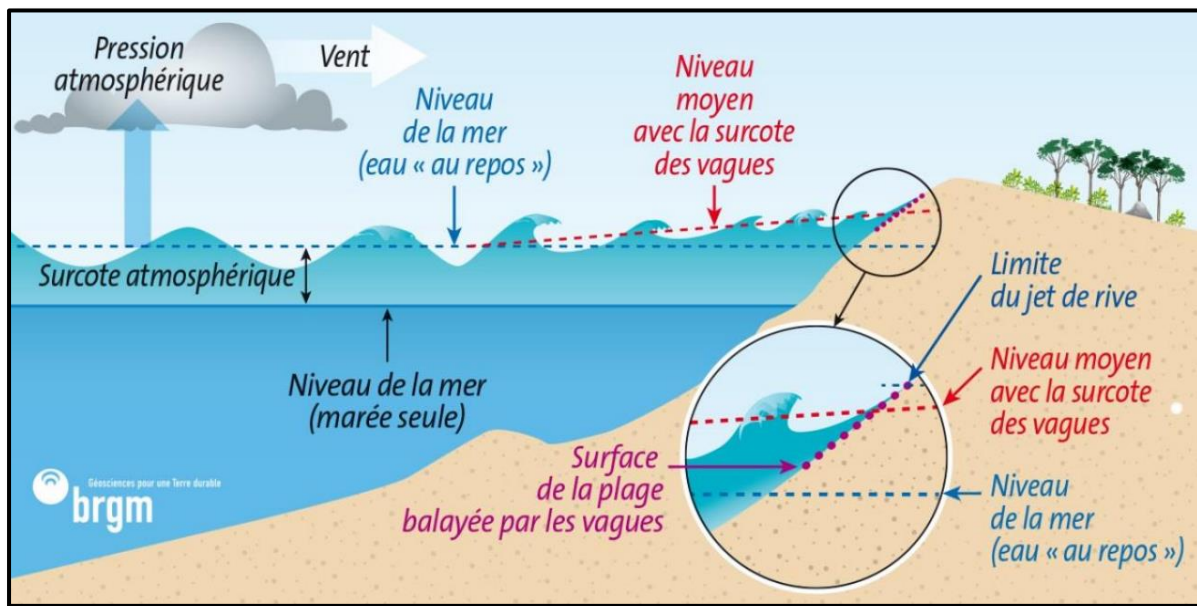


Fig. 5 : Schéma des facteurs de submersion marine, BRGM.

Enfin, d'autres facteurs, responsables dans une plus moindre mesure, contribuent à favoriser une submersion marine. La quantité de galets présente sur les plages favorise ou défavorise un franchissement des paquets d'eau : un déficit de galets entraîne une incapacité à absorber l'énergie des vagues déferlantes, risquant de fragiliser les structures côtières (DDRM 76, 2021). Enfin, la topographie du littoral va aussi jouer un rôle dans le conditionnement des submersions. Les zones basses, situées en dessous du niveau des plus hautes mers sont très vulnérables à la submersion, mais des zones situées plus hautes ne sont pas hors de danger (MESNAGE, 2021).

On distingue 3 formes de submersion :

- La submersion par **franchissement**, où les vagues passent au-dessus les défenses côtières (naturelles ou artificielles). L'eau s'accumule derrière ces défenses, inondant la zone ;
- La submersion par **débordement**, où l'eau statique s'élève et passe par-dessus les ouvrages de défense côtières ;
- La submersion par **rupture d'ouvrages de protection**, sous l'action répétée des vagues, provoquant le passage de l'eau à travers l'ouvrage de défense.

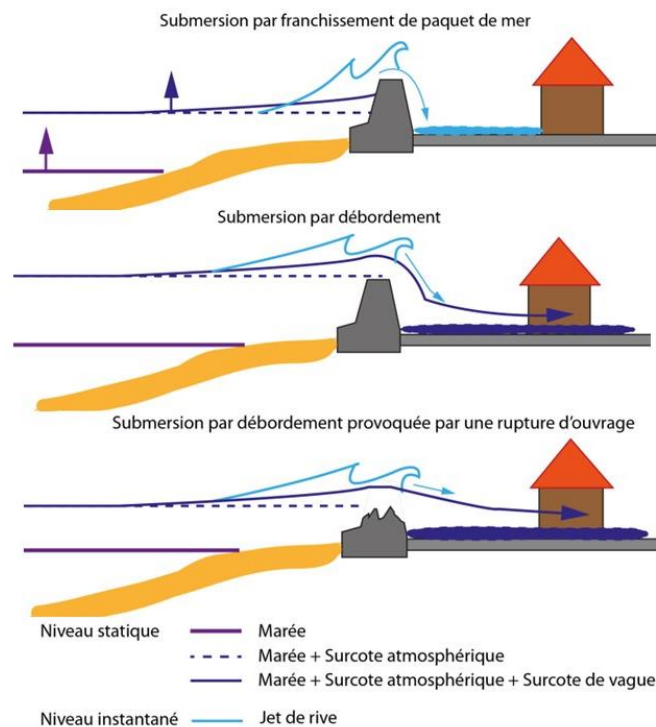


Fig. 6 : Schéma des 3 types de submersions marines, modifié par G. DELSIGNE, BRGM.

La submersion marine est d'autant plus importante à étudier compte tenu du changement climatique et la montée du niveau de la mer qui découle de ce phénomène, rendant le littoral plus sensible aux inondations marines, et entraînant des aménagements coûteux et de grande envergure.

1.3 - Des enjeux coûteux à différentes échelles

L'anthropisation croissante du littoral a accentué sa vulnérabilité face au recul du trait de côte et aux phénomènes de submersions marines.

1.3.1 - Les enjeux du recul du trait de côte :

Le recul des terres et l'avancée de la mer amènent des terrains à être "rongés" par le recul du trait de côte, le CEREMA estime que 22% des zones côtières françaises subissent une érosion et 20% du trait de côte est en recul, avec 270 km qui reculent à une moyenne de 0,5 m/an. Des infrastructures telles que des routes ou des bâtiments se retrouvent touchés par ce phénomène, rendant ces espaces difficiles à pratiquer (effondrements, dégradation des voiries...). La loi Climat et résilience adoptée en 2021 oblige les communes exposées à l'érosion du littoral à cartographier le risque d'érosion dans leur PLU sur une perspective de 30 et 100 ans, qui serviront à adapter l'aménagement de la commune, jusqu'à interdire certaines zones à la construction.



Fig. 7 : L'érosion des falaises, phénomène visible depuis plusieurs décennies, Quiberville, G. DELSIGNE, Janvier 2023.

“Le ministère en charge de l'Environnement estime que les terrains situés à moins de 250 m des côtes métropolitaines en érosion sont pour un quart des sols urbanisés et artificialisés, pour un autre quart des terres agricoles ou arables et pour la moitié restante des zones naturelles, parfois de grande importance écologique ou/et touristique.”

(Irma Grenoble, 2021).

1.3.2 - Les submersions marines, un évènement ponctuel à fort enjeux

Les submersions marines exposent 1.5 millions d'habitants, 850 000 emplois à l'inondation par la mer et 35 000 à 50 000 logements sont menacés à l'horizon 2100 selon les services de l'Etat sur tout le territoire français. En effet, 700 000 hectares sont situés en zone basse dans les départements littoraux. Les secteurs tels que les basses vallées, à l'exutoire des fleuves côtiers sont particulièrement vulnérables (SML76). Les submersions peuvent envahir les espaces bâtis et des terrains agricoles, avec des eaux salées qui affectent les terrains.

Si les eaux franchissent les ouvrages de protection tels qu'une digue, les paquets de mer projettent des sables et des galets aux effets dommageables sur les fronts de mer urbanisés (Irma Grenoble, 2021).

En termes de biodiversité, ces phénomènes exposent les zones naturelles et les zones protégées (ZNIEFF, Natura 2000, ...) à une perturbation et une altération de ces sites, pouvant mener à leur disparition. De plus, ces milieux côtiers contribuent à la protection contre les risques naturels, notamment les submersions marines ou l'érosion du littoral, d'où l'intérêt de protéger et restaurer ces espaces. En effet, la France dispose d'une très grande diversité d'espaces naturels côtiers, sources d'une importante richesse paysagère et écologique (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires).

Ces données reflètent l'importance de la gestion du littoral. Les conséquences du changement climatique se faisant déjà ressentir, il est "nécessaire de connaître l'évolution du trait de côte (avancée, recul, stabilité) en fonction des échelles temporelles associées (événementielle, saisonnière, annuelle, etc...)" (Réseau national des observatoires du trait de côte).

Ces deux phénomènes marins sont présents et posent des complications dans les actions de gestion et d'aménagement dans les communes de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer. En effet, des inondations ont lieu régulièrement au sein de la commune de Quiberville dans sa vallée malgré l'ouvrage de protection installé. De plus, l'habitat et les parcelles agricoles proches des falaises constituent un enjeu important face au recul du trait de côte.

Ces éléments ont permis de replacer notre sujet dans le cadre de la problématique nationale et régionale de la gestion du risque et du changement climatique. Les caractéristiques du site sont les suivantes : la basse vallée de la Saône à Quiberville permet d'observer des inondations par la mer, puisque la vallée est très proche de celle-ci. Cette même commune, mais aussi Sainte-Marguerite-sur-Mer, ont toutes deux des falaises qui sont soumises à l'érosion rapide. De plus, la manche est une mer à marées, l'intensité de celles-ci couplées à d'autres facteurs provoque des submersions marines, et participe à l'érosion des falaises, qui sont des phénomènes impossibles à stopper, quitte à les ralentir au prix de grosses installations, coûteuses de surcroît.

1.4 - Le terrain d'étude

Pour introduire notre terrain d'étude, nous allons d'abord justifier notre choix, puis il conviendra de présenter ses caractéristiques locales.

1.4.1 - Justificatif du terrain d'étude

La sélection du site d'étude a d'abord été guidée par la volonté de travailler sur les risques naturels, et plus particulièrement littoraux. Ce choix a été guidé par la proximité du territoire permettant de faciliter les déplacements sur le terrain pour recueillir les données nécessaires à la réalisation de ce travail et se rendre compte de la réalité du terrain. Enfin, ce territoire dispose de caractéristiques répondant parfaitement aux besoins du sujet de recherche : il est connu pour sa forte érosion au fil des années menaçant l'habitat actuel proche des falaises. Il fait l'objet d'une stratégie de retrait des habitants, et présente une vulnérabilité face aux inondations par la mer engendrant des dégâts récurrents dans la commune de Quiberville. Différents travaux ont été réalisés ces dernières années sur la commune, que ce soient des travaux universitaires ou d'organismes nationaux. Il est donc nécessaire de poursuivre et de compléter les travaux déjà réalisés pour affiner l'analyse locale face à ces risques qui deviennent de plus en plus menaçants pour les habitants et les élus locaux, contraints à adopter toujours de nouvelles stratégies de développement.

1.4.2 - Localisation de l'espace étudié

Le terrain d'étude choisi pour ce mémoire s'étend sur deux communes : Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer. Elles se situent sur le littoral normand dans le département de la Seine-Maritime. Plus précisément, ce littoral fait partie de la zone côtière de la Côte d'Albâtre dans la région naturelle du Pays de Caux, appartenant aux formations sédimentaires du Bassin parisien.

Les plateaux du Pays de Caux, qui marquent la fin nord-ouest du bassin de Paris, s'arrêtent soudainement en prenant la forme de falaises abruptes composées de craie d'une hauteur moyenne de 70 m, parfois interrompues par des vallées ou valleuses souvent urbanisées. Ces falaises de craie blanche de la côte d'Albâtre s'étendent sur environ 130 km face à la Manche orientale.

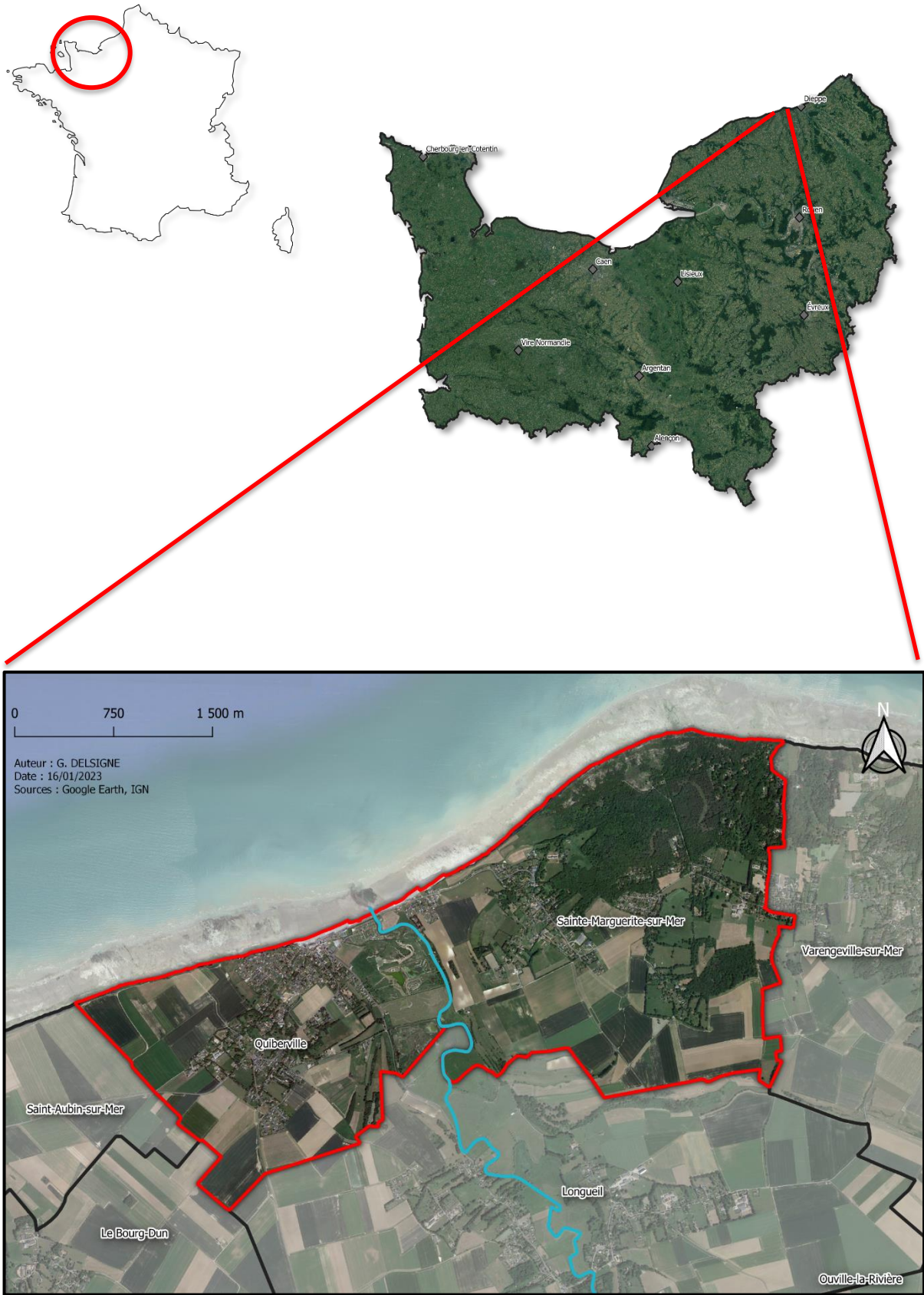


Fig. 8 : Localisation des communes étudiées

1.4.3 - Topographie générale

La topographie du terrain d'étude est assez hétérogène et marquée par la vallée de la Saône à Quiberville, partie la plus exposée aux aléas marins. Cette basse vallée est bordée :

- À l'ouest par un plateau où se situe Quiberville, autour des 40 mètres d'altitude avec une altitude maximale à 59 mètres ;
- À l'est par un coteau où se trouve Sainte-Marguerite-sur-Mer, avec des altitudes plus élevées entre 50 m et plus de 80 m, avec le point le plus haut de trouvant à 88 m.

La présence de falaises abruptes et hautes de 22 à 50 m environ constituent la limite naturelle à proximité avec la mer.

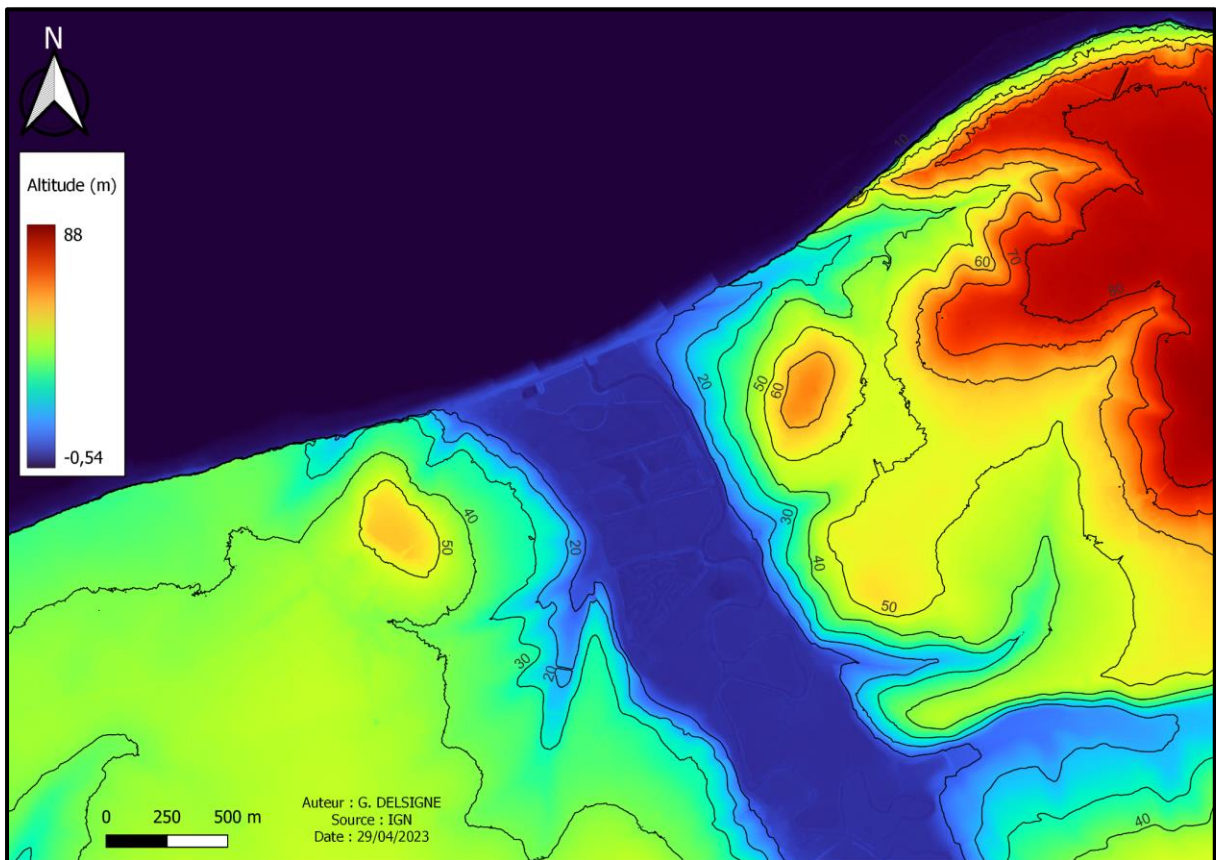


Fig. 9 : Carte topographique de la zone d'étude.

Le relief est fortement lié à la composition géologique locale, si bien qu'on distingue 3 zones principales : les formations de la vallée de la Saône, celles de Quiberville et celles de Sainte-Marguerite-sur-Mer.

1.4.4 - Contexte géologique :

Le secteur d'étude est marqué par des formations appartenant à l'ensemble géologique du Bassin parisien. Ces formations sédimentaires, datant du crétacé supérieur (99,6 à 65,5 millions d'années), forment le socle des deux communes. A une échelle plus fine, ce terrain crayeux est composé d'autres éléments géologiques que nous allons préciser.

La vallée de la Saône est composée d'alluvions fluviales datant de l'Holocène (12 Ka à aujourd'hui) et quelques cailloutis au niveau du versant Est. Ces dépôts sont dûs au fleuve de la Saône, et forment le fond de vallée.

Au niveau de la partie haute de Quiberville et son plateau, on retrouve principalement des sables à silex verdis, grès et calcaires et des limons de plateau. Sur le versant menant à la vallée à l'est, le sol est composé de sables fauves, d'argiles et de sablons (Yprésien inférieur) et dans une moindre mesure de craie blanche. On retrouve aussi cette craie blanche au niveau des falaises, face à la Manche.

Enfin, au niveau du coteau est de la vallée de la Saône et au-delà dans la commune de Sainte-Marguerite-sur-Mer, on retrouve dans ce sens de la craie blanche du Santonien (85,8 à 83,5 millions d'années) présente aussi au niveau des falaises face à la mer. Plus haut, des formations de sables à silex verdis, grès et calcaires et des limons de plateau, mais aussi de sable et argiles datant du sparnacien sont présentes. Des sables fauves, d'argiles et de sablons (yprésien inférieur) entourent des cailloutis.

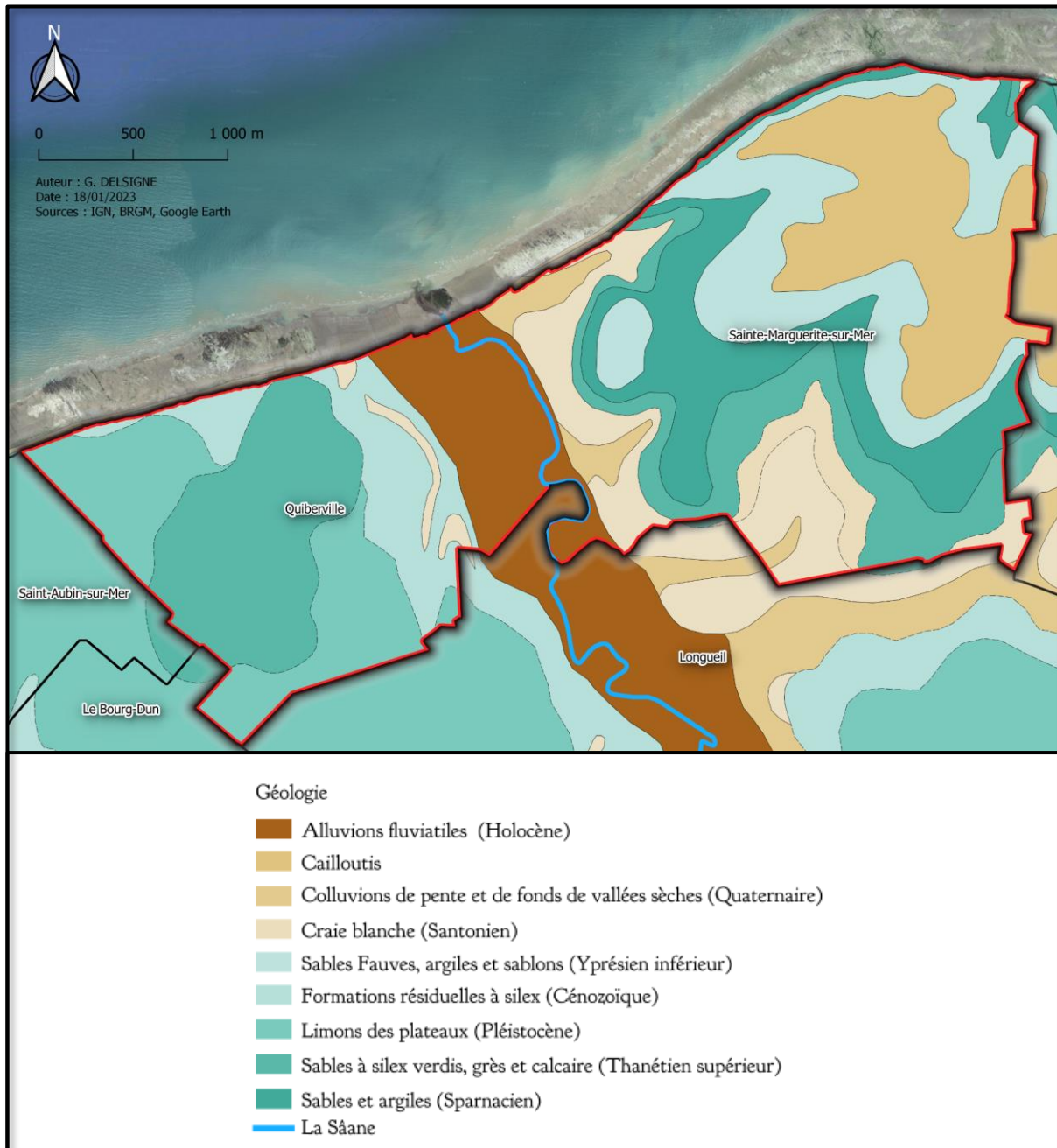


Fig. 10 : Carte géologique de la zone d'étude.

Ces formations géologiques sont typiques du Bassin parisien, composées de dépôts sédimentaires. Les craies blanches qui composent les falaises à étudier subissent l'action de la mer et de vagues. Ces falaises sont particulièrement sensibles à l'érosion par l'action de l'eau.

1.4.5 - Contexte climatique et paramètres hydrodynamiques :

De manière générale, le littoral de la Seine-Maritime est caractérisé par des eaux peu profondes et un régime de marée macrotidal, ce qui entraîne des mouvements de sédiments dans la zone intertidale et des courants de marée importants. En effet, le marnage (différence de hauteur d'eau entre la marée haute et la marée basse) au niveau de Sainte-Marguerite-sur-Mer est en moyenne de 9 mètres. De plus, les vents forts peuvent provoquer de fortes vagues, affectant de ce fait le trait de côte. Les houles provenant de la mer du vent se dirigent vers la côte de Seine-Maritime depuis les directions Ouest, Nord-Ouest, Nord et Nord-Est. L'Europe occidentale subit un flux d'ouest venant de l'Atlantique, avec quelques perturbations plus ou moins actives selon la saison de l'année (LETORTU, 2013).

Au-delà des forçages internes et externes, les conditions climatiques locales sont essentielles dans l'érosion des falaises. Le gel et la houle taillant la roche sont du fait de températures froides et de vents plus ou moins puissants.

Pour analyser les conditions climatiques du secteur d'étude, la station de Dieppe sera notre référence puisqu'elle est au plus près du secteur d'intérêt (environ 9 km à vol d'oiseau).

Le littoral de la Seine-Maritime appartient au domaine tempéré océanique. Climat doux, humide et pluvieux, les précipitations annuelles s'élèvent à 805.2 mm à Dieppe de manière assez régulière (130 jours de pluie/an), et sont les plus abondantes à l'automne et au début du printemps. Les variations de températures annuelles varient peu, sur la période 1990-2020, la température moyenne annuelle à Dieppe est de 11,3°C dont 5,6°C en janvier et 17,4°C en juillet, avec pour minimum une moyenne de 8,4°C et une moyenne maximale de 14,3°C (METEO-FRANCE).

Dans le cadre de ce mémoire, le vent est l'élément climatique principal. En effet, il est générateur de la houle au large, qui est à l'origine des vagues pouvant provoquer des submersions marines et altérer la roche crayeuse des falaises, particulièrement sensible à l'eau.

Sur la carte ci-dessus, on observe un contraste de vents entre le littoral où ceux-ci sont les plus forts dues à l'absence d'obstacles et l'intérieur des terres, plus abrité, avec des vents modérés (DREAL Normandie, 2018).

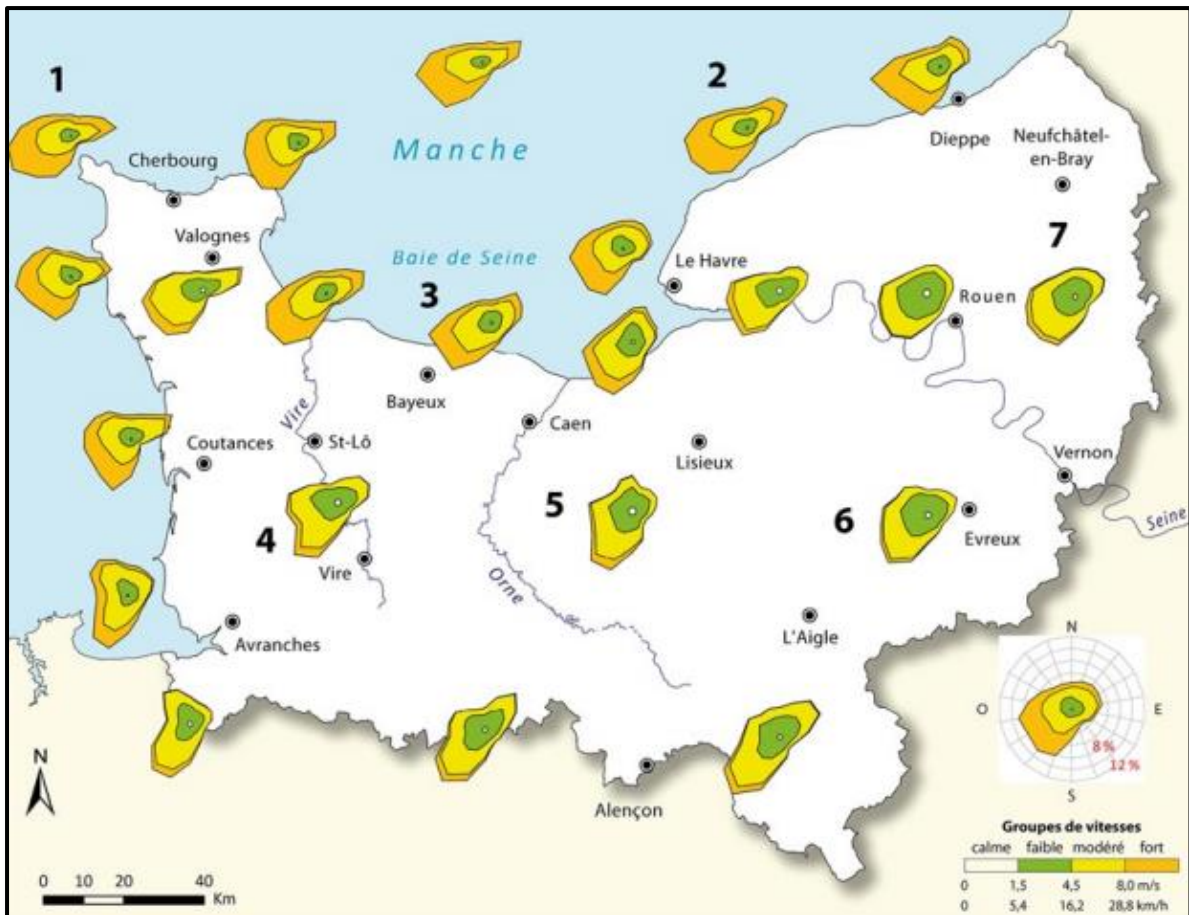


Fig. 11 : Carte de synthèse établie à partir des vents tri-horaires modélisés du modèle « Aladin » de Météo-France sur la période 1999 - 2009, O. CANTAT, 2018, DREAL Normandie.

Les vents dominants de la côte d'albâtre sont les vents de nord-ouest à sud-ouest, et sont forts (allant jusqu'à plus 45 km/h). Le flux d'ouest perturbé se produit toute l'année mais plus rarement en saison estivale (DUGUET, 2019).

Bien sûr, des vents exceptionnels ont pu être enregistrés lors de tempêtes : celle de 1997 a vu des rafales de vent cumuler à près de 158 km/h à Dieppe. La station de Dieppe a enregistré 79 jours de vents de plus de 58 km/h et 3 jours de plus de 100 km/h.

À une échelle plus locale, le vent moyen annuel à Dieppe est de 17,3 km/h sur la période 1991-2020.

1.4.6 - Informations générales des communes à l'étude :

Quiberville est une commune littorale de 541 habitants (en 2019, INSEE). Station balnéaire depuis 1895, la commune à la plage de galets et sable est traversée par le chemin de Grande Randonnée GR21.

Cette commune comprend une basse vallée (celle de la Saône) de 20,5 km² qui fait régulièrement l'objet d'inondations : à titre d'exemple, un camping a été construit dans cette vallée à proximité de la plage et se trouve régulièrement inondé. Actuellement, ce camping est en cours de démantèlement pour être relocalisé. Une partie de la commune se trouve plus en hauteur sur le plateau à l'ouest, qui concentre la majorité des habitations ; certaines d'entre elles sont proches du bord de la falaise ce qui constitue un enjeu local très fort en raison de l'érosion dont elles font l'objet. Douze arrêtés de catastrophes naturelles sont inscrits à Quiberville, dont quatre sont liés à la mer (ROL).



Fig. 12 : Image satellite de Quiberville.

La commune est soumise à la loi littorale, qui a pour objectifs notamment de mettre en place une protection graduée en fonction de la proximité avec le rivage, de préserver les espaces naturels, les sites, les paysages et l'équilibre écologique du littoral et de développer les activités économiques liées à la proximité de l'eau.

1.4.6.1 – La basse vallée

La vallée basse urbanisée accueille la Saâne, un fleuve long de 40 km qui se jette dans la Manche. La vallée se trouve à environ 4 m (+/- 1 m) au-dessus du niveau de la mer.

Selon le conservatoire du littoral, le débouché de la vallée de la Saâne comprend deux types de paysages :

- Le fond de vallée large et plat, essentiellement agricole et composée de prairies humides ;
- Les plateaux et les coteaux asymétriques avec des pentes marquées à l'ouest et des pentes plus douces à l'est et plateaux.

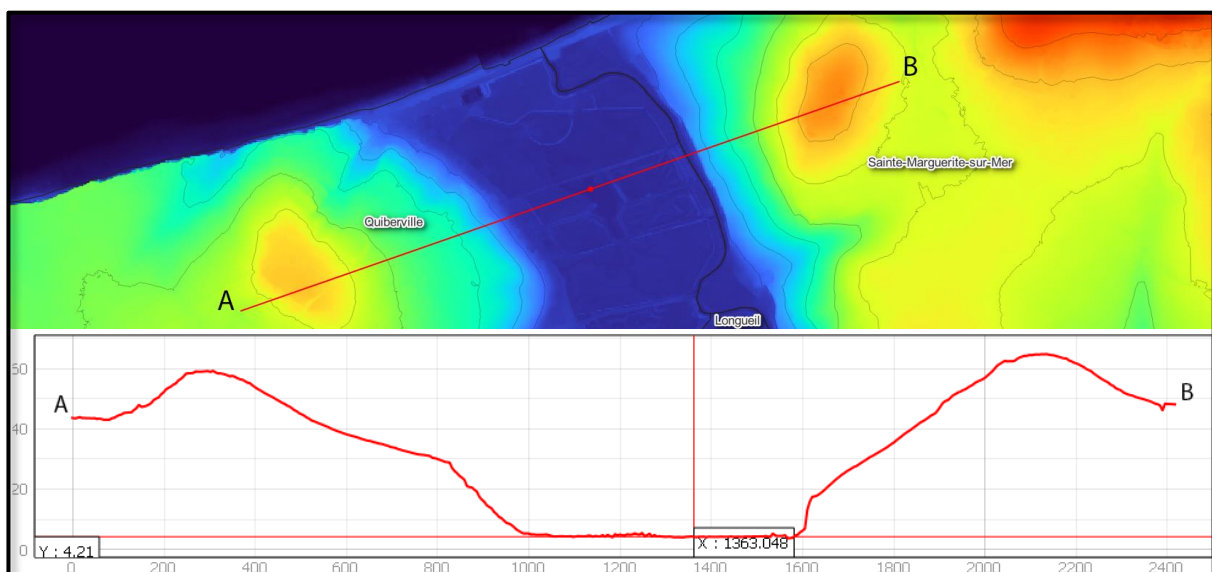


Figure 13 : Profil topographique en travers du terrain et de sa vallée, G. DELSIGNE.

Les données topographiques permettent de mettre en évidence les zones basses de notre terrain d'étude avec le niveau marin actuel. Grâce aux données du shom au port de référence de Dieppe, il est possible de rectifier le 0 marin sur le MNT. Le 0 de l'IGN sur le MNT se trouve en fait à 4,45 m au-dessus du 0 hydrographique. Le niveau des plus hautes mers astronomiques à Dieppe est de **10,11** m. Pour obtenir le niveau marin voulu, il faut ajouter aux données SIG **10,11-4,45 = 5,66** m au 0 de l'IGN pour obtenir le bon 0 marin. À partir de cette correction, nous sommes en mesure d'obtenir une cartographie des zones basses de la commune de Quiberville en affichant tout ce qui se trouve en dessous de 5,66 m sur le MNT.

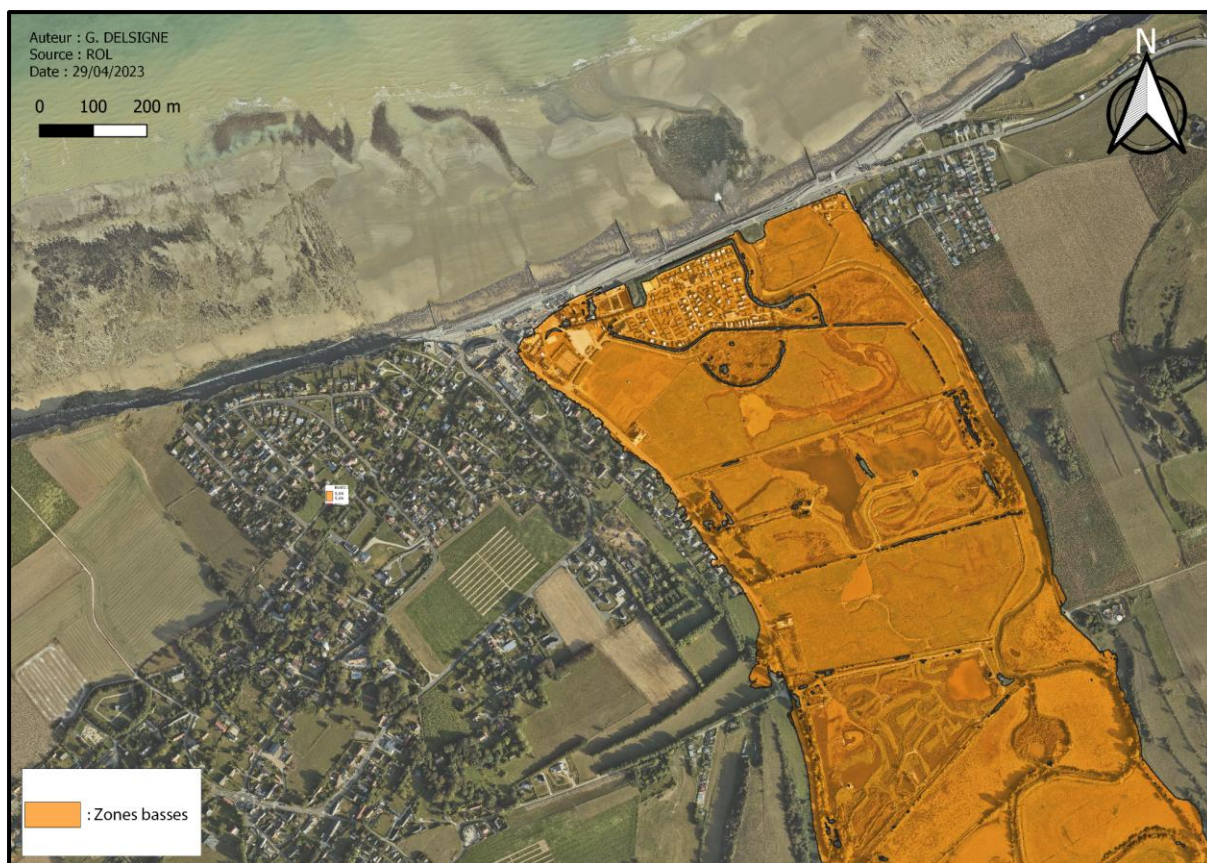
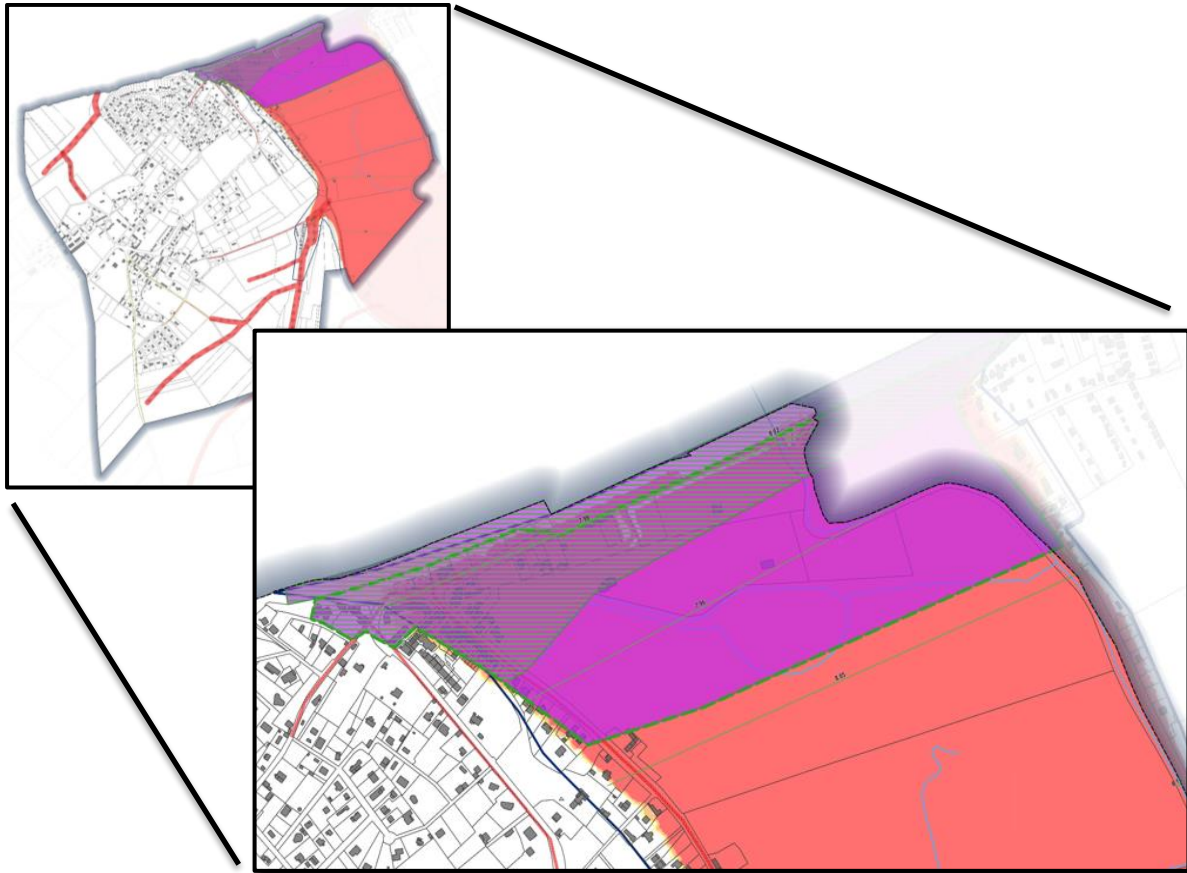


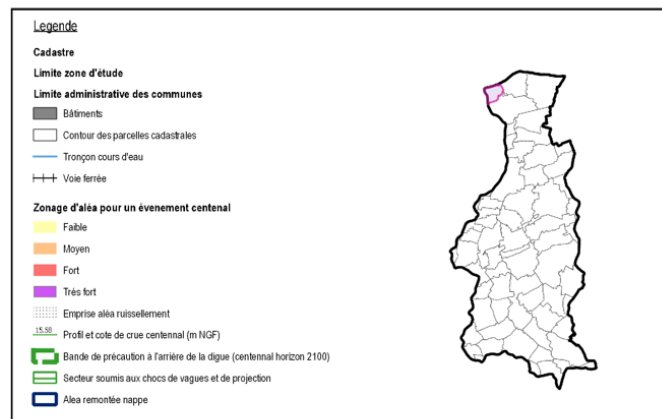
Fig. 14 : Carte des zones basses dans la commune de Quiberville.

Les zones basses sont très vulnérables aux phénomènes d'invasion de paquets d'eau par la mer. Le DDRM 76 classe le risque de submersion marine parmi les risques de la commune. Cette portion de la vallée fait régulièrement l'objet d'inondations : crues, ruissellements (fortes précipitations), remontées de nappes et submersions marines.

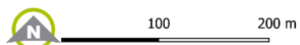
La carte ci-après présente la vulnérabilité de la commune face aux inondations. C'est le premier document du PPRLi en ligne, le reste du dossier est toujours en cours d'élaboration.



Commune de Quiberville



Echelle : 1/ 3000 (Format A0)



© IGN BD PARCELLAIRE 2013

egis LBP 32745 L

Mise à jour le : 2/11/2021
PPRI_SAANE-Cartes_zonage.ggz

Fig. 15 : Carte des aléas d'inondation de la commune de Quiberville, PPRI Saône, 2021.

La carte des risques d'inondation de la commune de Quiberville montre que de nombreuses habitations et bâtiments sont vulnérables à ces inondations par la mer. Le risque est principalement fort (en rouge) à très fort (en violet) dans la vallée. Plus loin dans les terres, les bâtiments longeant la vallée sont aussi soumis à un fort risque d'inondation. La zone violette hachurée en vert correspond à l'espace vulnérable aux submersions marines actuellement. Il s'est révélé que la seule route reliant Quiberville à Sainte-Marguerite-sur-Mer en raison de la présence de la vallée, est un espace à fort enjeu et est en première ligne face aux assauts de la mer.

1.4.6.2 – Un ouvrage protecteur : la digue

Face aux inondations marines récurrentes, Quiberville a construit une digue entre la vallée et la mer en plus d'un talus végétalisé derrière la route, mais la digue se fragilise face à la violence de certaines vagues.



Fig. 16 : La digue de Quiberville et ses fissures, G. DELSIGNE, 2023.



Fig. 17 : Des galets ont franchi la Digue, preuve de l'efficacité relative de la digue, G. DELSIGNE, 2023.

Les dégâts causés par les vagues violentes lors de périodes de forts coefficients de marée des tempêtes font régulièrement l'objet de réparations : colmatages, réparations et nettoyage des voies envahies par les eaux et les galets projetés, entraînant des coûts d'entretiens réguliers.

Face à la récurrence des épisodes de submersions marines, un projet de construction d'un pont sans digue laissant entrer la mer dans la vallée est en cours dans le cadre du projet territorial de la basse vallée de la Saône. Il doit remplacer la buse qui permet au fleuve de se déverser dans la Manche d'ici 2025 en passant sous la digue.

Sainte-Marguerite-sur-Mer est une commune balnéaire et littorale de 468 habitants (2019, INSEE). Cette commune rurale de 541 hectares fait partie de l'unité urbaine de Hautot-sur-Mer. Sa principale activité économique est touristique et est traversée par deux chemins de Grande Randonnée : le GR21 et GR212.

Bordée par la manche, Sainte-Marguerite-sur-Mer est délimitée dans sa partie littorale par environ 3 km de falaises, protégées par un épi limitant l'érosion sur la partie habitée proche du haut de l'abrupt crayeux. Les plages sont composées de galets, de sable et de rochers, qui témoignent du recul des falaises avec la présence d'une plateforme d'érosion marine.

1.5 - Présentation et caractéristiques des falaises de Sainte-Marguerite-sur-Mer

La carte ci-dessous montre la portion de falaise faisant l'objet du présent mémoire. Elle débute de l'épi près du blockhaus effondré jusqu'au début de la végétation buissonnière de la falaise, soit environ 800 m (transect indiqué par le trait jaune sur la carte).

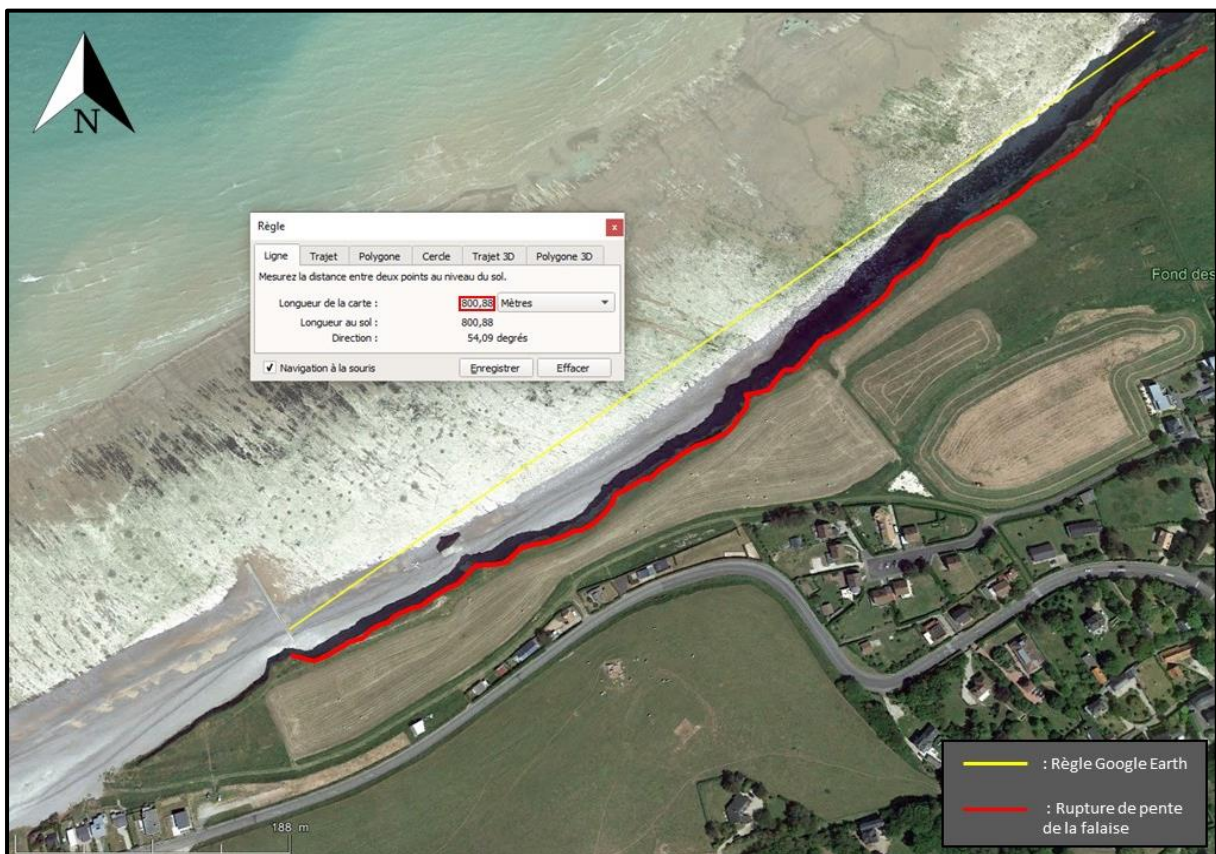


Fig. 18 : La portion de falaise à l'étude avec l'usage de l'imagerie aérienne, G. DELSIGNE, 2023.



Fig. 19 : La falaise à l'étude, G. DELSIGNE, 2023.

1.5.1 – Composition de la falaise à l'étude

La falaise de Sainte-Marguerite-sur-Mer est une falaise crayeuse (roche sédimentaire d'origine marine) datant du crétacé supérieur (100 à 66 millions d'années). Ces falaises datent du Santonien et du Campanien (83,5 à 70,6 millions d'années). Ces deux types de craies qui composent les falaises de la commune sont parmi les plus sensibles. En effet, selon Laignel et al., en 2006, la porosité des craies selon les temps géologiques a été mesurée, celle des craies du Santonien varie de 40,2% à 45,6% avec une perméabilité allant de 3,5 à 6,5 millidarcy (indice de perméabilité géologique). La porosité des craies du Campanien varie de 43,4% à 45% accompagnée d'une perméabilité de 3,8 à 6,5 millidarcy.

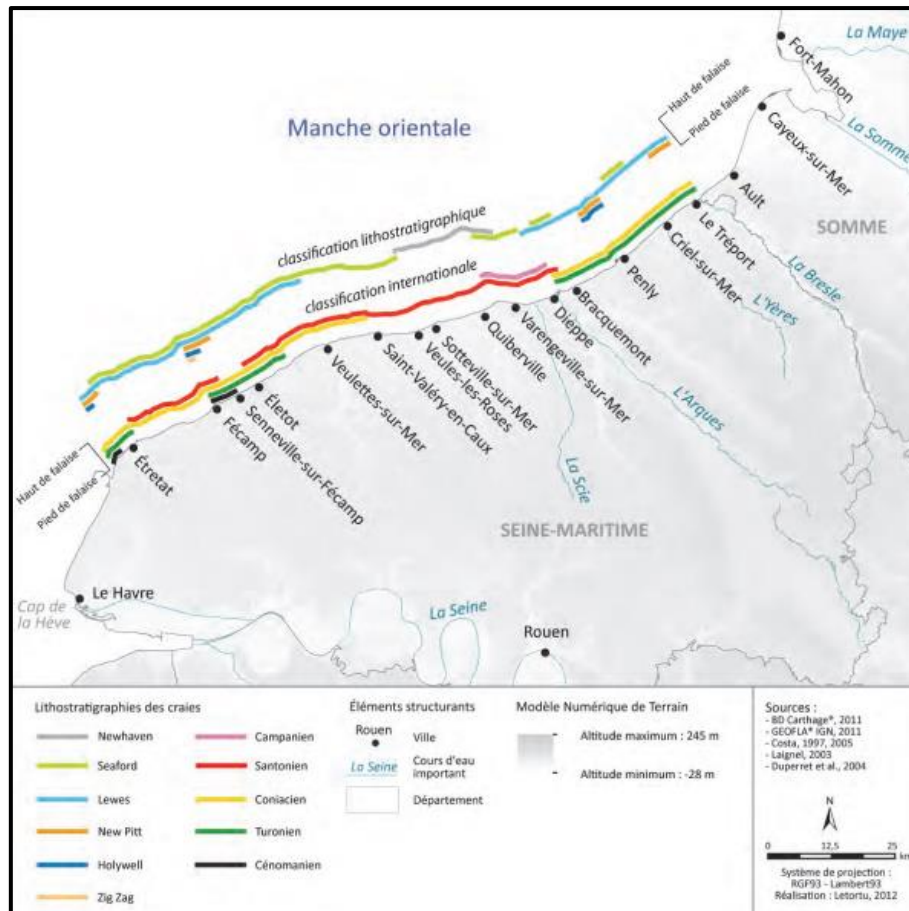


Fig. 20 : Types de craie sur le littoral de la Seine-Maritime selon Costa, 1997,2005 ; Laignel, 2003 ; Duperret et al., 2004, P. LETORTU, 2012.

De ce fait, la fragilité de la structure des falaises engendre un phénomène d'érosion irréversible ; les enjeux associés localement rendent ce terrain pertinent pour l'étude diachronique que nous menons. De plus, le recul de ces falaises a déjà consommé les espaces agricoles en bord de littoral et même certaines structures (Cf. Blockhaus effondré qui se trouvait auparavant en haut de la falaise).

Selon une étude du CEREMA de 2018, d'ici 20 ans les effondrements de falaises vont entraîner la disparition de 230 hectares en Seine-Maritime, ce qui concerne soit 37 habitations, 113 ha de surface agricole, des espaces naturels sensibles, des équipements, des bâtiments remarquables et des campings (SML76).

“S’agissant de l’érosion côtière, du fait d’un potentiel structural favorable à la météorisation, les craies du Crétacé supérieur (friables et poreuses) sont particulièrement sensibles aux processus qui ont pour vecteurs l’eau et les variations de températures (alternance gel/dégel).”

(P. LETORTU. 2013).

1.5.2 - Typologie liée à l'âge et à l'activité des falaises :

D'après T. DUGUET (2019), Emery et Kuhn (1982) classifient les falaises en 3 familles :

- Les falaises **actives**, dont la roche du pied de falaise est à nue, exposée aux agents érosifs marins et aériens ;
- Les falaises **mortes**, qui sont protégées des processus érosifs marins par un talus d'éboulis végétalisé au niveau du pied de falaise ;
- Les falaises **anciennes**, qui ne subissent plus l'influence des processus érosifs marins mais subissent une érosion subaérienne.

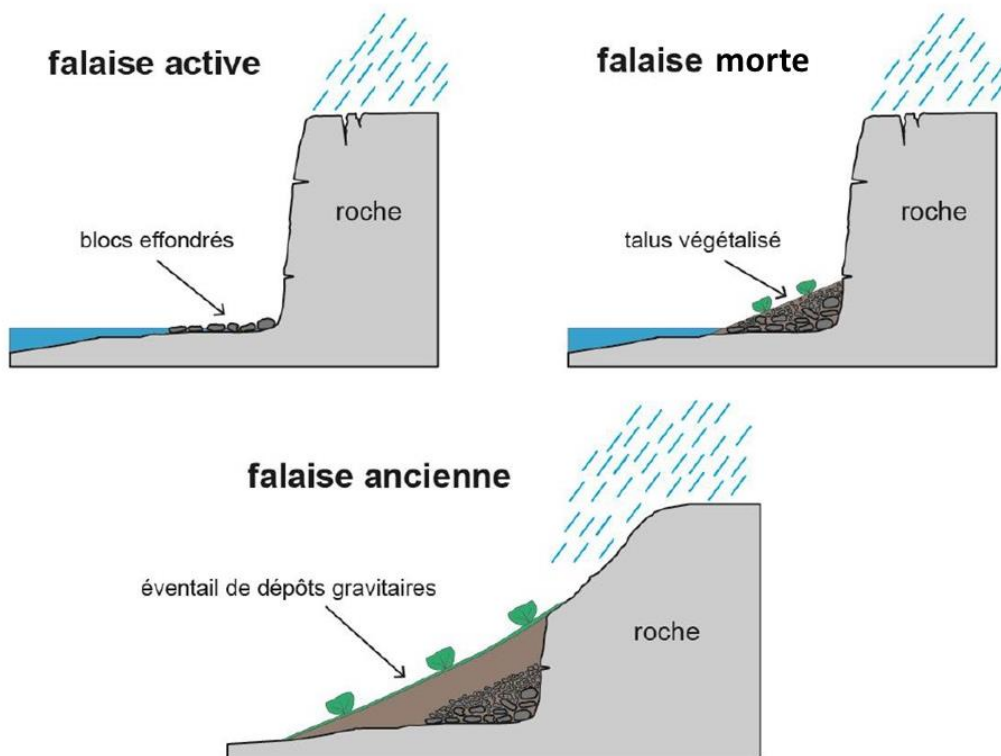


Fig. 21 : Les catégories de falaises selon Emery & Kuhn (1982) d'après T. DUGUET, 2019, modifié par G. DELSIGNE, 2023.

La falaise à l'étude est une falaise vive, elle en présente toutes les caractéristiques : soumise à l'eau (alternance gel/dégel, précipitations...) et aux processus érosifs marins, les falaises ont à leur pied des blocs effondrés témoignant de leur érosion, et aucune végétation n'est présente au pied des falaises.



Fig. 22 : Mise en évidence du type de falaise "vive" sur la zone d'étude, G. DELSIGNE, 2023.

1.5.3 - Typologie liée à la morphologies des falaises

Il existe 4 grands types de morphologie de falaises, démarquées selon leur différenciation lithologique, la forme de l'abrupt, du pied et du haut de falaise.

Les falaises **simples** sont caractérisées par leur homogénéité lithologique et une morphologie d'abrupts subverticaux dominant la mer d'un seul jet. On les distingue également par des sous-cavages ou des formes karstiques, telles que des paléo conduits, piliers, isolés, pinacles... (COSTA, 1997).

Les falaises à **talus** ont un profil plutôt concave avec un sommet vertical et une base à faible pente. Le haut de falaise est plus résistant à l'érosion que son pied, composé d'argiles et de sables (DUGUET, 2019).

Les falaises à **piédestal résistant** sont constituées d'un ressaut basal où la craie est plus marneuse, souvent datant du turonien ou du cénomaniens. Il se peut qu'il y ait un hard-ground plus résistant qui engage le pied de la falaise, permettant de distinguer les types de modelés. Ce type de falaise représente environ 25 km du linéaire côtier sur la côte d'Albâtre (COSTA, 1997) ;

Les falaises **complexes** sont quant à elles constituées d'une alternance entre des roches meubles et cohérentes. Il y a deux catégories de falaises complexes : celles où la base est composée de matériaux meubles et de roches plus résistantes aux sommets, et celles à base crayeuse surmontées de matériaux meubles (COSTA, 1997).

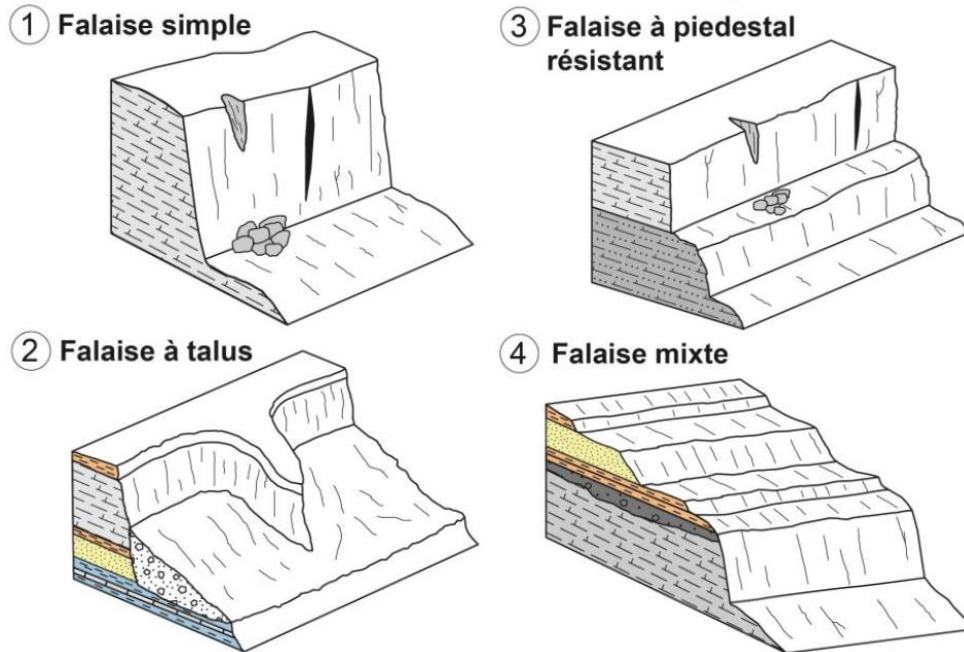


Fig. 23 : Les morphologies de falaises, T. DUGUET, 2019.

La falaise à l'étude est composée d'une lithologie homogène formée de craies. Son apparence est abrupte, surmontée de quelques mètres d'une couverture sédimentaire et sableuse à sa crête et présente des sous cavages à son pied. Ces caractéristiques sont typiques d'une falaise simple (Cf. p. 32 et 35).

1.5.4 - Les plateformes d'érosion marine : caractéristiques générales et de la zone d'étude

Des plateformes d'érosion marines s'étendent à partir des falaises, témoignant de leur recul et de l'espace perdu, elles sont de 2 types :

- Les plateformes à **pente régulière**, où le sol décroît progressivement ;
- Les plateformes **subhorizontales**, où le sol chute brusquement en un certain point.

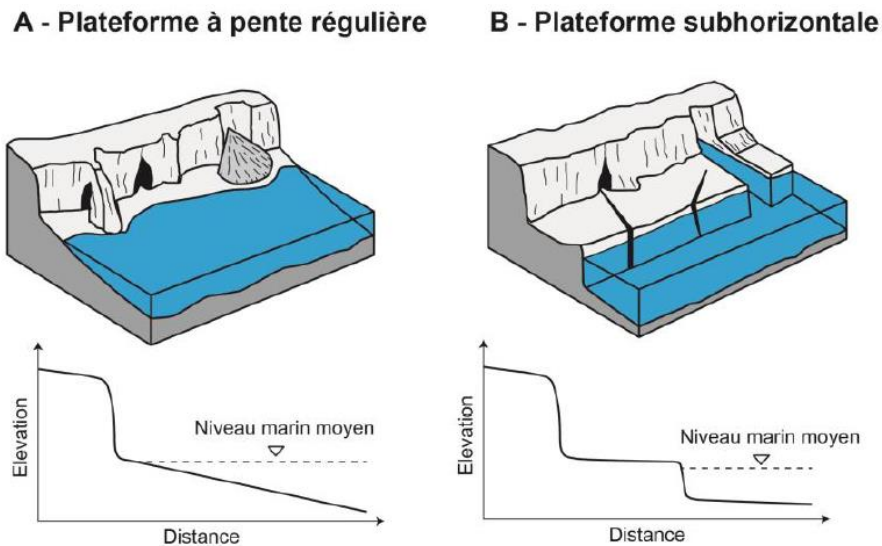


Fig. 24 : Les types de plateforme d'érosion marine d'après Sunamara, 1992. DUGUET, 2019.

Au pied des falaises de Sainte-Marguerite-sur-Mer se développe une grande plateforme d'érosion marine à faible pente (1.1% en moyenne), et une largeur moyenne de 350 m (Peuziat et al., 2021). Cette faible pente est due en partie à une plateforme sous-marine peu profonde dans la Manche et sur ce secteur où les profondeurs ne dépassent pas 50 m en Manche orientale (COSTA, 1997).

La partie supérieure de l'estran, au niveau du pied de falaise et à proximité, est recouverte par un cordon de galets de silex, alimenté par l'érosion des falaises crayeuses (Peuziat et al., 2021) large d'une trentaine de mètres. Pour limiter la dynamique d'érosion côtière et les transferts de sédiments, un épi de 35 m a été installé au début de la zone d'étude en 1964 et étendu pour atteindre 70 m environ en 1994, qui bloque le transit de galets se faisant d'ouest en est (la dérive littorale se faisant parallèlement au rivage). Ceux-ci participent au ralentissement et à la limitation de l'érosion côtière en absorbant l'énergie des vagues déferlantes.

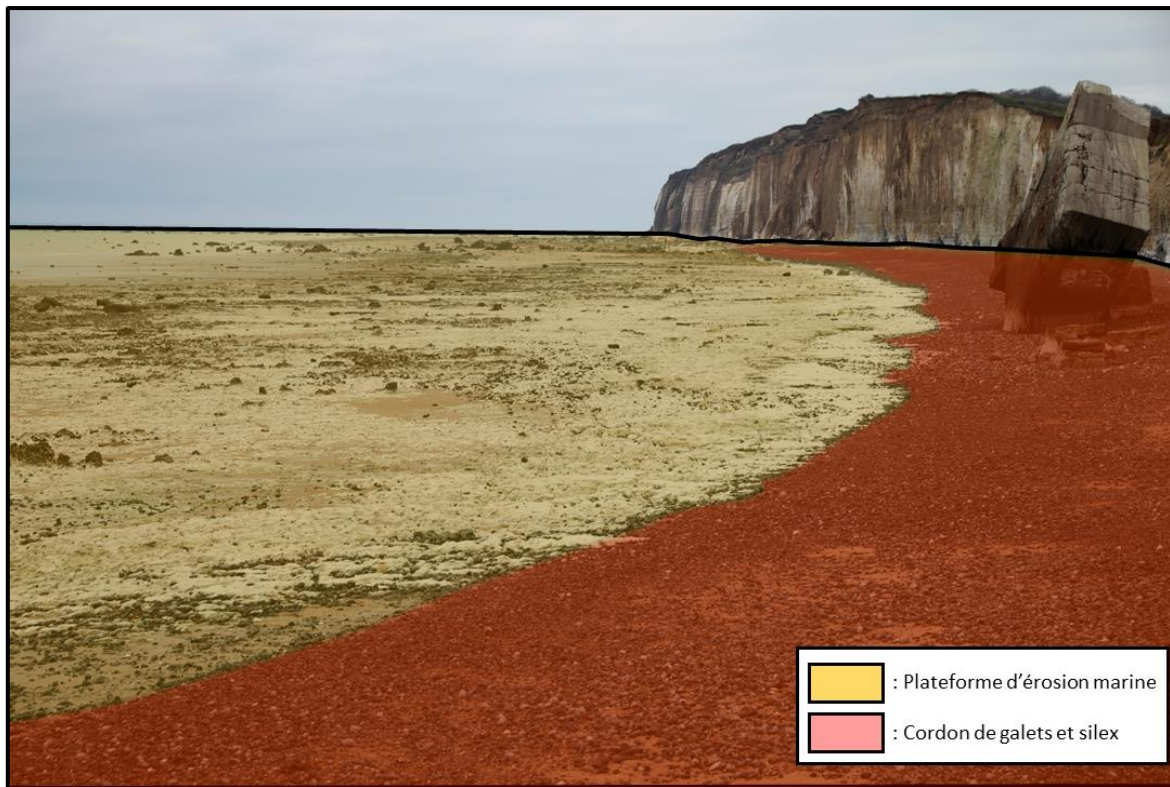


Fig. 25 : La plateforme à pente régulière des falaises de Sainte-Marguerite-sur-Mer, G. DELSIGNE, 2023.

1.5.5 - Les processus d'érosion des falaises

L'érosion responsable du recul du trait de côte est contrôlée par un mixte entre des forçages internes (résistance du massif rocheux) et des forçages externes (d'origine marine et subaérienne) (T. DUGUET, 2019).

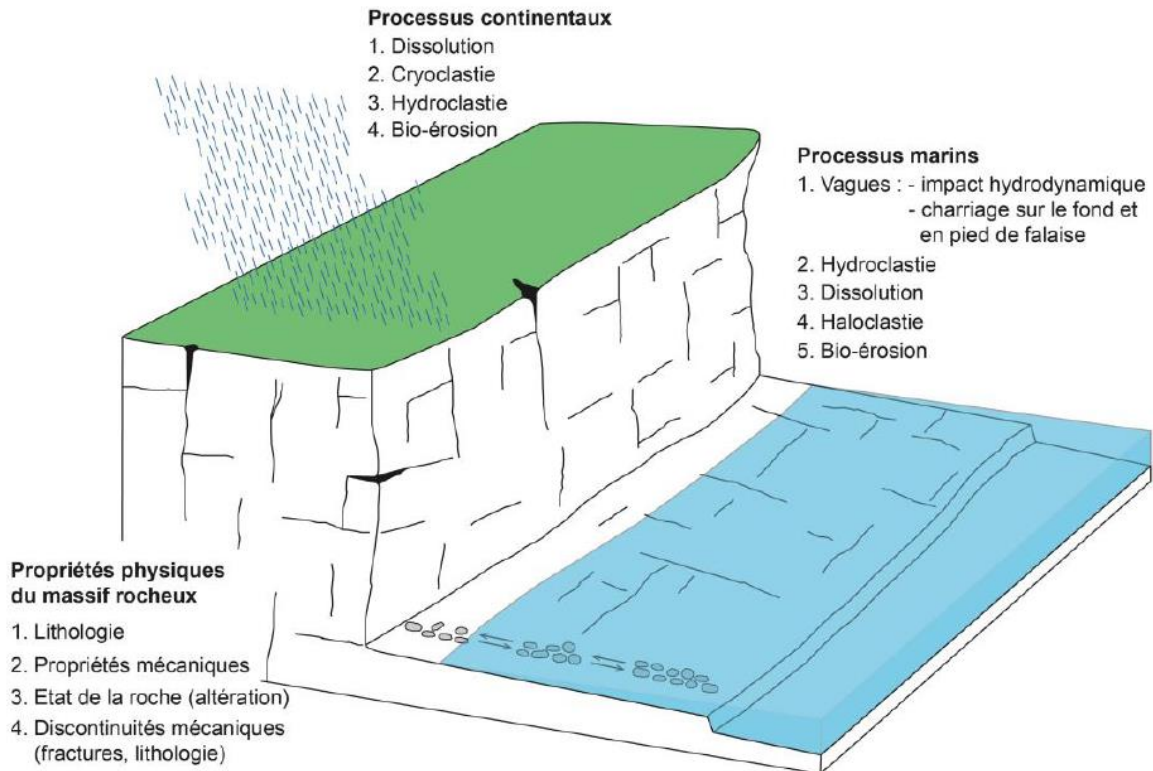


Fig. 26 : Schéma des processus d'érosion des falaises, DUGUET, 2019 (d'après PREMAILLON, 2018).

1.5.5.1 - Les processus érosifs d'origine marine des falaises :

La mer joue un rôle principal de sapement du pied de la falaise. En effet, la mer a un double rôle d'agression sur le pied de falaise et de déblais des débris issus de l'érosion, rendant la stabilisation impossible. Le phénomène répété du choc des vagues sur le pied de falaise provoque une fracturation de la roche, fragilisant la falaise et peut même dans certains cas arracher et déplacer de gros blocs. Ces chocs provoquent également une compression de l'air coincée dans les interstices de la roche : la décompression rapide qui s'ensuit lors du retrait des vagues entraîne un arrachement de morceaux de la falaise. Enfin, les assauts continus de la mer sur la falaise peuvent créer des sous-cavages en pied de falaise qui mettent en surplomb l'ensemble de la falaise, et peuvent entraîner une érosion volumineuse importante sur un temps très court.

Les eaux marines provoquent également une succession de cycles d'humidification et de séchage (hydroclastie) après le passage des vagues sur la falaise, mais aussi et surtout avec le passage des marées. Ces cycles fragilisent la roche, ce qui peut diminuer la résistance de la craie de 40 à 50% et accentuer l'érosion (DUPERRET et al., 2005).

L'haloclastie (érosion par le sel), couplée aux cycles d'humidification/dessiccation désagrège la roche par le sel ; la craie y est particulièrement sensible (DUGUET, 2019). L'haloclastie peut aussi être couplée aux cycles d'humidification et de séchage selon deux principes (Cooke & Smalley, 1968 ; Duperret et al., 2005) :

- Une augmentation de la pression à cause de la cristallisation du sel avec la chaleur ;
- Une augmentation de la pression à cause de la dilatation des cristaux de sel avec la chaleur.

En dehors de l'action marine sur la résistance et le recul des falaises, les processus aériens contribuent à l'érosion de celles-ci : ils réduisent la résistance des roches et peuvent devenir des processus dominants d'érosion (D'après T. DUGUET, 2019 selon Duperret et al. 2002, 2004 ; Stephenson et al., 2013). C'est le cas entre autres pour la cryoclastie et/ou la dissolution, affectant plus ou moins fortement la roche.

1.5.5.2 - Les processus aériens

Il existe deux facteurs principaux des processus aériens : les précipitations et la température (PREMAILLON, 2018). Les variations de température, plus précisément les alternances gel/dégel, créent des microfractures et accroissent les fractures existantes dans la roche. De plus, les variations de températures provoquent une dilatation/rétractation de la roche, pouvant provoquer également des fractures aboutissant à une érosion de la falaise. La fin de l'année dans la zone d'étude est la période qui concentre le plus de précipitations, ce qui, avec les périodes de gel, augmente la sensibilité des falaises à la gélifraction (COSTA, 1997).



Fig. 27 : Phénomène de gélifraction sur les falaises de Sainte-Marguerite-sur-Mer, G. DELSIGNE, février 2023.

Les précipitations provoquent une dissolution chimique et de transport de particules (PREMAILLON, 2018). Toutefois, son rôle principal est la mise en charge des aquifères, augmentant la pression interstitielle au sein de la falaise. (D'après M. PREMAILLON, 2018, selon Duperret et al., 2002 ; Hénaff et al., 2002 ; Costa et al., 2004 ; Young et al., 2009). Comme nous sommes en normandie et que les précipitations sont abondantes, l'eau joue un rôle important dans l'érosion des falaises crayeuses, déjà naturellement sensibles à l'eau, pouvant créer des réseaux karstiques au sein de la falaise.

Le diaclasage joue un rôle sur le rythme d'évolution des falaises. D'une part, il perturbe les caractéristiques de résistance des craies et d'une seconde part, il détermine par son orientation, son intensité et sa fréquence le volume des écroulements de falaise et la vitesse de recul des falaises (COSTA, 1997).



Fig. 28 : Exemple de diaclases et de sous-cavaques sur la falaise à l'étude, G. DELSIGNÉ, 2023.

Le vent joue aussi un rôle, mais bien moindre, dans le transport de sel et de sable comme force sur la paroi sous forme de pression ou par effet Venturi (PREMAILLON, 2018).

Les processus biologiques peuvent favoriser ou au contraire jouer un rôle protecteur face à l'érosion (DUGUET, 2019). Les oursins, cyanobactéries, algues peuvent par exemple participer à l'érosion en creusant la roche.



Fig. 29 : Exemple de bio-érosion à Sainte-Marguerite-sur-Mer, G. DELSIGNE, 2023.

Tous ces processus participent conjointement à l'érosion des falaises et à leur recul. La vitesse d'érosion dépend donc de l'intensité de ces processus, leur combinaison mais aussi de la fragilité des matériaux qui composent les falaises.

1.5.6 - Les mouvements gravitaires :

Les mouvements gravitaires sur les falaises se produisent lorsque les forces de gravité qui agissent sur les roches ou le sol de la falaise sont plus fortes que les forces qui les maintiennent en place.

Il existe en existe 4 types :

- Les **chutes de blocs** : détachement de blocs ou de pierres le long des discontinuités (fractures, plans de stratification...). C'est un type de mouvement d'échelle particulière, ce type de mouvement gravitaire est ponctuel (DUGUET, 2019) ;
- Les **effondrements** : basculement vers l'avant d'un pan de la falaise autour d'un point de pivot (à la base de la falaise) sous l'action de la gravité (VARNES, 1978). Le pan de falaise effondré est délimité par les plans de fragilité comme les joints orthogonaux par exemple (DUGUET, 2019) ;

- Les **glissements** : déformation cisailante puis déplacement de la masse le long d'une surface plus ou moins pentue. Il y a deux types de glissement, l'un est en plan et l'autre est rotationnel (VARNES, 1978). Les glissements plans sont un mouvement où la masse longe une surface de rupture plane ou pentue. Ils sont contrôlés par des plans de faiblesse comme des failles, des joints, des plans de stratification ou par le contact entre la roche et une couverture sédimentaire. Lors de nombreux glissements plans, la masse peut être très déformée ou cassée en plusieurs unités (DUGUET, 2019). Les glissements rotationnels sont peu déformés, le déplacement se fait le long d'une surface concave (VARNES, 1978), la surface de rupture a une forme de cuillère ;
- Les **écoulements** : C'est un type de mouvement gravitaire rare, puisqu'ils ont lieu lorsque les falaises à pente sont taillées dans des matériaux meubles. L'eau va liquéfier les matériaux meubles et rendre la roche instable, provoquant l'écoulement, qui le plus souvent est très lent et constant (DUGUET, 2019).

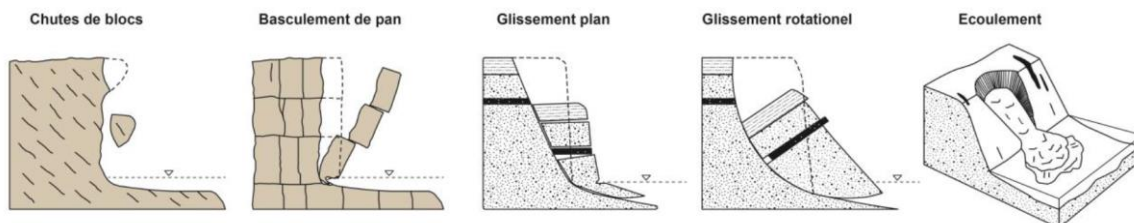


Fig. 30 : Les principaux types de mouvements gravitaires (d'après Varnes, 1978 ; Sunamura, 1992), T. DUGUET, 2019.

Comme le montre la carte des inondations plus haut dans ce mémoire, divers travaux ont été réalisés sur ce secteur. Par exemple, le CEREMA a réalisé une projection en 2018 du recul des falaises de Quiberville à l'horizon 2100, de même que le calcul des vitesses moyennes de la portion de falaise que je vais étudier, mais sur un temps plus court, et selon la mise en place et l'extension de l'épi. De même, un Plan de Prévention des Risques Naturels a été établi dans les deux communes (où la carte des inondations a été tirée), montrant déjà la réalisation de nombreux travaux sur le secteur, en plus de travaux universitaires comme la thèse de Stéphane COSTA en 1997 ou celle de Pauline LETORTU soutenue en 2013.

L'objectif de mon travail de recherche est ici de compléter, préciser, actualiser les données déjà collectées sur le secteur.

1.6 - Conclusion de la partie

Nous avons vu dans cette partie tous les éléments qui posent les bases de ce travail de mémoire à travers divers recherches bibliographiques. Nous avons pu en apprendre plus sur le climat local, ses caractéristiques physiques et les deux aléas qui vont être étudiés à l'échelle des deux communes tout au long de ce mémoire. Ce terrain est parfaitement adapté à l'étude de l'évolution du trait de côte et aux submersions marines puisque ces aléas constituent un risque fort lié à la vulnérabilité du terrain pour ses enjeux à la fois matériels et humains.

PARTIE 2 : EVOLUTION DU TRAIT DE COTE.

VITESSES D'EROSION DES FALAISES DE SAINTE MARGUERITE

Après avoir présenté les caractéristiques du site, puis les éléments généraux liés à la géologie, au climat et à la géomorphologie dynamique, nous allons évaluer la vitesse de recul des falaises de Sainte-Marguerite-sur-Mer sur un pas de temps long.

Cette partie est basée sur les photographies aériennes exploitables de 1947 à 2020. Les étapes mises en œuvre successivement pour cette analyse chronologique peut être résumées ainsi :

- L'acquisition et le traitement ;
- Le choix du trait de côte ;
- La méthode utilisée pour calculer le rythme d'érosion ;
- Une cartographie des vitesses d'érosion de la falaise à l'étude, ainsi que les effets des ouvrages mis en place par l'Homme pour limiter l'érosion de cette partie de la côte d'Albâtre.

2.1 - Choix et paramètres des images

Comme je compte travailler sur le temps long (plus de 70 ans), j'ai réalisé le suivi par télédétection. Pour réaliser ce suivi, je me suis appuyé sur les images aériennes de l'IGN et de Google Earth, qui sont aussi pertinentes pour combler les manques entre deux dates de prises de vues aériennes. À partir de ces photographies aériennes, le géoréférencement permet d'aligner et de redresser correctement les photos.

J'ai utilisé les orthophotographies du Réseau d'Observation du Littoral (ROL) de 2020 comme image de référence pour réaliser le géoréférencement. Ce sont des photographies aériennes déjà corrigées et géoréférencées. L'analyse du recul des falaises sur cette longue période historique s'arrête en 2020 pour la partie de la falaise à l'étude.

Le redressement des photographies aériennes est la correction de la déformation géométrique de la photo causée par l'objectif. La meilleure solution consiste à corriger cette distorsion grâce à des logiciels qui le font automatiquement (Adobe Lightroom par exemple), mais le redressement automatique implique la connaissance des caractéristiques de l'objectif utilisé lors de la prise de vue (angle de prise de vue, focale, etc.). Dans mon cas, les images aériennes anciennes (1947) ne comportent pas de telles informations. Il faut donc appliquer une solution manuelle.

2.1.1 - Le géoréférencement

Le géoréférencement est l'attribution de coordonnées géographiques à une image. Dans notre cas, il s'agit de donner aux photographies aériennes historiques qui nous intéressent leur position la plus exacte possible dans l'espace géographique à partir d'une image de référence, de préférence une orthophotographie (une image rectifiée géométriquement) tout en réduisant au maximum les décalages entre l'orthophotographie et l'image à géoréférencer.

Pour attribuer des coordonnées à une image aérienne qui n'a pas de carroyage comme repère, il faut utiliser une image/couche déjà géoréférencée qui possède une zone commune avec l'image à géoréférencer (par exemple pointer une intersection présente sur les deux photos). C'est une opération manuelle minutieuse qui vise à réduire les erreurs de distorsion de l'objectif pour obtenir les résultats les plus précis possibles.

Le travail a été réalisé avec le système de coordonnées Lambert 93 (EPSG:2154), dédié à la France.

Concernant les paramètres du géoréférencement, je vais utiliser la transformation polynomiale d'ordre 2 sur QGIS. Il faut attribuer 6 points communs minimum, cette transformation permet une distorsion de l'image, ce qui permet de corriger au mieux la distorsion. Cette transformation calcule un facteur de correction pour ajuster un ensemble de points d'amer sur leur position véritable, et corrige simultanément les déformations des photographies.

Pour une bonne rectification de l'image, les points doivent être répartis de manière homogène sur la photo. Toutefois, comme le terrain se trouve dans un espace rural, les points sont plus concentrés sur la photo au niveau des habitations. J'ai donc fait le choix de travailler sur les photographies où on voit le plus d'éléments reconnaissables (tels que des intersections de routes, coins de bâtiments bas, éléments au sol comme des terrasses, limites de parking...) et bien répartis sur l'image. Bien sûr, la précision de la correction finale dépend de la qualité des points placés et de leur disponibilité (LETORTU, 2013).

Les photographies sont destinées au calcul des vitesses d'évolution du trait de côte et sa distance. P. Durand estime qu'un modèle polynomial est de qualité lorsque tous les points de géoréférencement ont une erreur RMS (Root Mean Square Error ou erreur quadratique moyenne) inférieure à 1 pixel (DURAND, 2000).

L'erreur RMS est également disponible en mètres, mais la différence de la résolution d'un pixel d'une image à l'autre rend l'information peu pertinente. C'est pour cela que j'ai choisi de me référer uniquement à l'erreur RMS en pixel, pour rendre le géoréférencement le plus précis possible.

Le géoréférencement a été effectué à partir d'une dizaine de points de référence, dont l'erreur moyenne RMS varie entre **0.4 et 0.98 pixels**, donnée par le logiciel, qui correspond à la moyenne au carré de la différence de positionnement d'un point entre l'image de référence et celle géoréférencée. Malgré tout, cette erreur moyenne RMS proche de 0 ne signifie pas forcément un géoréférencement parfait de l'image. En effet, la transformation peut contenir des erreurs importantes si un point de contrôle a été saisi incorrectement. Il a été nécessaire de veiller à ce que l'erreur de chaque point soit le plus bas possible.

Pour limiter les erreurs et réduire l'espace occupé par la mer où il est impossible de placer de points, j'ai rogné les photographies pour faire en sorte de pouvoir placer des points de manière homogène sur l'image, pour que l'image corresponde au mieux aux orthophotos que j'ai à disposition (certaines images aériennes débordent des orthophotos, ce qui provoquait plus d'erreur et donc de distorsion lors du traitement de l'image après avoir placé les points).

Il restera toujours une erreur face à la difficulté à localiser avec précision chaque point sur une photographie. En effet, l'emplacement d'un angle d'une intersection de route peut être connu, mais la précision avec laquelle on identifie ce coin d'intersection peut être imprécise. De plus, il se peut que ces routes soient refaites, élargies, les bâtiments peuvent être rénovés, reconstruits (D'après LETORTU, 2013, selon Moore, 2000), augmentant l'imprécision sur l'emplacement d'un point.

2.1.2 - Choix des images

Plusieurs photographies aériennes sont disponibles à une même date. J'ai sélectionné celles où la zone d'étude est la moins coupée pour éviter les erreurs lors de la digitalisation du trait de côte, et où les éléments de repère (bâtiments, routes, trait de côte) sont les plus visibles/nets. Certains traitements ou développement photos ne permettent pas non plus de distinguer avec certitude le haut du pied de falaise. Les images en couleur permettent de mieux apercevoir les éléments au sol et de repérer avec plus de précision la rupture de pente de la falaise.



Fig. 31 : Comparaison de deux photographies aériennes de Juin 1994 avec un traitement couleur différent, IGN.

Certains clichés aériens, notamment les plus vieux, limitent la perception des détails en raison de la résolution et de la qualité de certaines photos. Les différentes échelles de prises de vues peuvent également dégrader la précision lorsqu'il faut zoomer/dézoomer dans l'image.



Fig. 32 : Exemple du géoréférencement de la photographie aérienne de 1966.

2.2 - Digitalisation de la falaise

Quel trait de côte choisir ? Il existe deux méthodes principalement utilisées de suivi de l'évolution du trait de côte dans le cas des falaises :

- Le pied de falaise ;
- Le haut de falaise, ou la rupture de pente.

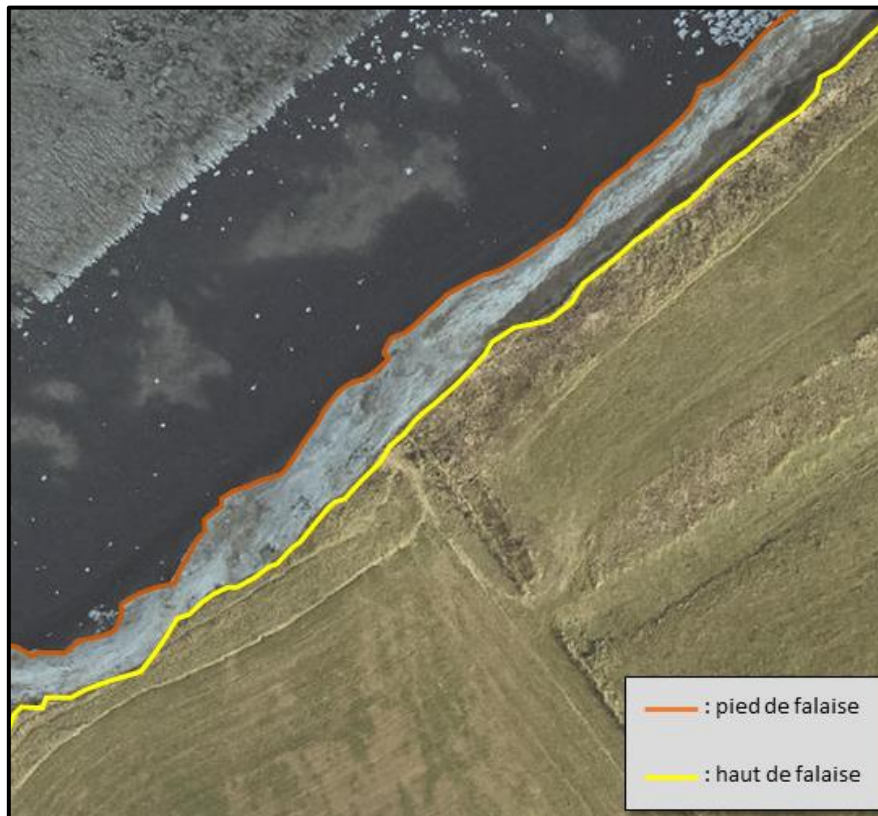


Fig. 33 : Distinction entre le pied de falaise et le haut de falaise comme repère de suivi, G. DELSIGNE, 2023.

C'est le haut de falaise qui sera utilisé pour évaluer les vitesses de recul des falaises de Sainte-Marguerite-sur-Mer. J'ai choisi de digitaliser le trait de côte à l'échelle 1:1 000. Ceux-ci ont été digitalisés grâce au logiciel QGIS.

Le but est de mesurer l'érosion à une échelle fine et d'observer la vitesse d'évolution de ce pan de falaise.

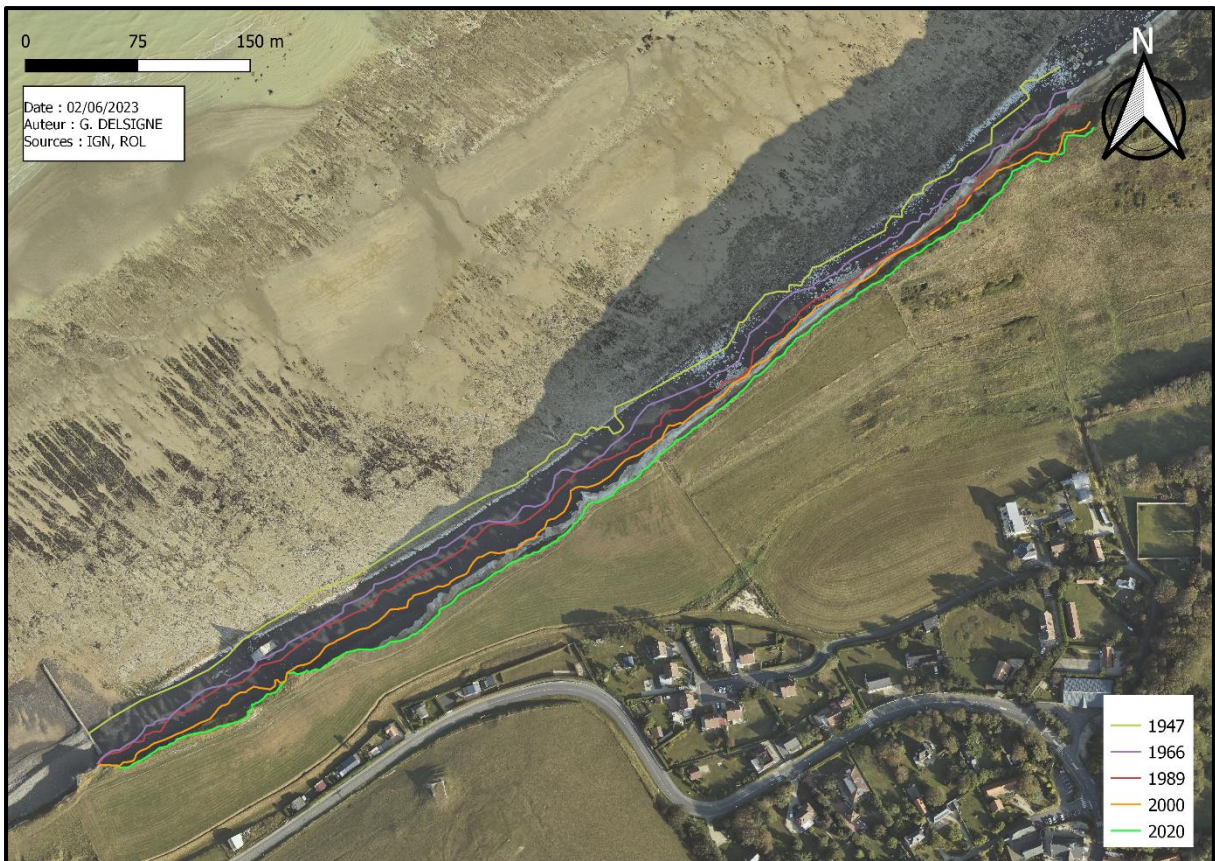


Fig. 34 : Positionnement des traits de côte à Sainte-Marguerite-sur-Mer.

La photographie ci-contre représente tous les traits de côte digitalisés et qui seront exploités pour les calculs des aires, puis des vitesses d'érosion. On remarque déjà un recul significatif depuis 1947 de 35 à 50 m environ. Il s'agit donc d'établir avec précision les taux d'érosion de la falaise, en lien avec l'aménagement du terrain.

Toutefois lors de la digitalisation, il apparaît que certains traits de côtes plus récents sont plus avancés que ceux anciens. Dans le cas où les traits de côte se croisent, j'ai ramené au même niveau que le trait de côte récent le trait de côte plus vieux, pour éviter des aberrations et minimiser l'erreur lors des calculs. En revanche, certains traits de côtes présentent trop d'aberrations ou sont trop avancés, il a donc fallu trier les traits de côte non exploitables pour éviter des aberrations lors des traitements SIG et des calculs des vitesses d'érosion.

Pour obtenir les vitesses moyennes de recul sur cette section de falaise de Sainte-Marguerite-sur-Mer, je vais utiliser la méthode de calcul de recul des falaises basée sur l'air. Selon P. Letortu, cette méthode est la plus adaptée au dessin irrégulier (comme une falaise). Cette approche évalue la vitesse de recul du trait de côte en calculant l'aire perdue entre deux dates.

Cette analyse du recul des falaises consiste à observer plusieurs choses, entraînant plusieurs questions.

Tout d'abord, est-ce que la construction de l'épi en 1964 a provoqué un ralentissement du recul de la falaise ? Il convient donc d'analyser le recul moyen depuis 1947 jusqu'en 1966, puis d'analyser ce même recul jusqu'à aujourd'hui pour voir si le rythme d'érosion a évolué depuis.

Comment évolue la falaise d'Ouest en Est ? l'épi affecte-t-il toute la portion étudiée de la même façon ?

Enfin, quel est le rythme de recul global de la falaise depuis 1947 ? Ces traitements SIG permettront d'éclaircir l'évolution du rythme d'érosion de ce pan de falaise.

2.3 - Calcul des vitesses de recul de la falaise à pas de temps long

La méthode employée consiste à quantifier l'aire perdue de la falaise entre deux dates et en déduire son rythme de recul par l'intermédiaire de transects tracés tout au long du trait de côte étudié. Pour ce mémoire, les transects seront tracés tous les 50m. Ces transects réalisés sous le plugin DSAS sur Arcgis, lorsqu'ils sont combinés au trait de côte digitalisé, forment des boîtes, correspondant aux surfaces perdues par la falaise. Grâce à cette méthode, nous pourrons ainsi constater si les falaises reculent à un rythme plutôt homogène ou non, et quantifier la vitesse de recul.

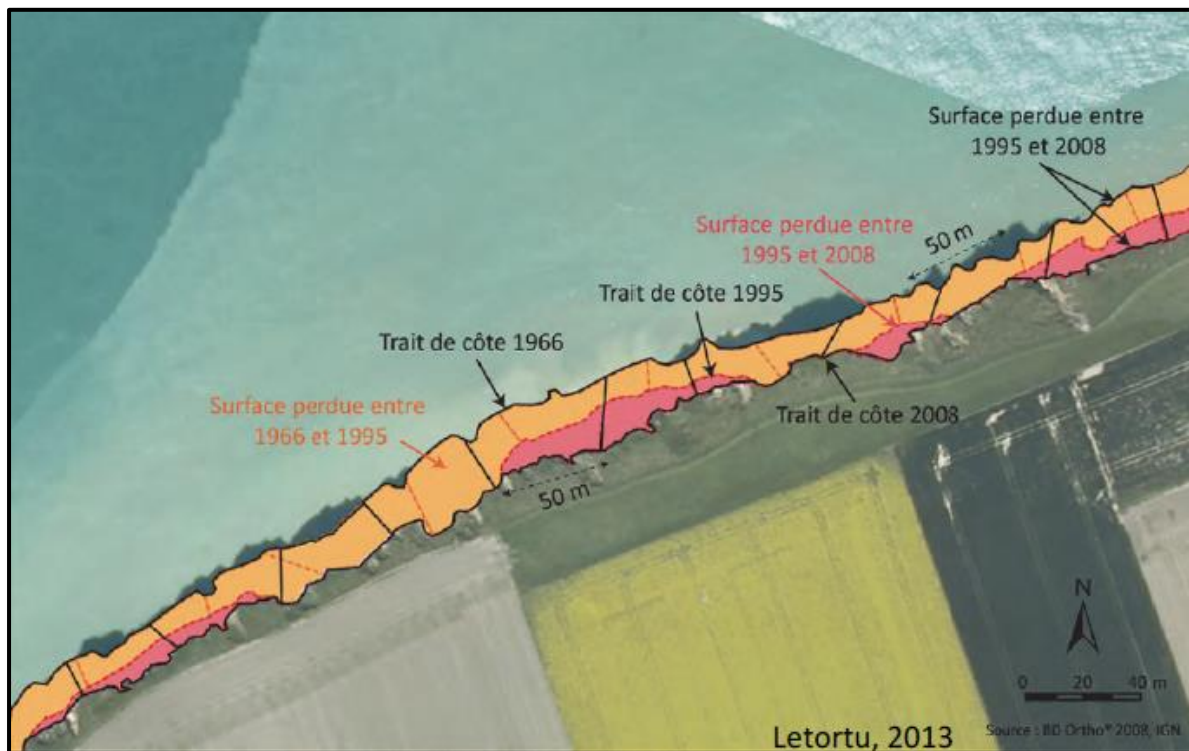


Fig. 35 : Exemple de mesure du recul des falaises avec la méthode basée sur l'air à Sotteville-sur-Mer, Letortu, 2013.

Plusieurs étapes sont nécessaires pour réaliser ce travail :

- Tout d'abord créer une zone tampon derrière le trait de côte le plus récent (**ici 10m**) qui va servir de repère pour la ligne de base.
- Créer la ligne de départ des transects (la baseline) : tracer la ligne de base en arrière des traits de côte en suivant la ligne de la zone tampon ;
- Créer les transects de découpage tous les 50 mètres le long du trait de côte. Lors du traçage des transects, j'ai paramétré un smoothing de 100 sur le plugin DSAS pour éviter les croisements des transects sur les traits de côte ;
- Créer les boîtes pour sectoriser les surfaces perdues en créant une nouvelle zone tampon de part et d'autre du trait de côte en fonction des transects. Cette zone tampon a été fixée à 60 m car c'est l'écart maximum entre les deux traits de côtes extrêmes ;
- Créer les polygones correspondant aux surfaces entre le trait de côte ancien et le plus récent par intersection ;
- Ranger les surfaces perdues dans les boîtes pour estimer l'érosion ;
- Obtenir une seule entité par boîte pour estimer la surface perdue tous les 50 mètres ;
- Calculer les moyennes de recul annuelles.

Sur tous ces traits de côte, nous allons nous concentrer sur 3 périodes repère :

- La période totale **1947-2020** : pour connaître le recul global moyen actuel du trait de côte.
- La période **1947-1966** : de la plus ancienne date à la construction de l'épi (construit en 1964 mais 1966 est la date du trait de côte disponible et le plus proche) ;
- La période **1966-2020** : de la construction de l'épi à la date la plus récente digitalisée (l'orthophotographie de 2020) ;

Les traits de côte plus nombreux après 1966 permettent d'avoir un recul moyen plus précis sur la période 1966-2020 puisqu'on peut calculer les moyennes de recul à pas de temps plus court (une vingtaine d'années entre chaque trait de côte).

Quand on parle de taux d'érosion, on les mesure en **mètre par an**. Pour obtenir le recul moyen en m/an depuis l'aire obtenue entre deux traits de côte, on divise l'aire d'une boîte par la largeur de celle-ci (ici 50m). On divise ensuite ce résultat par le nombre d'années qui s'est déroulé entre les deux traits de côte.

2.3.1 - De manière générale, quel recul ?

Avant d'analyser en détails les résultats, dans le cas de cette falaise, l'érosion est dans tous les cas importante pour les raisons citées plus tôt dans la mémoire. A l'échelle de l'étude, j'ai quand même réalisé une classification de faible à forte pour mieux observer les différences d'érosion le long de la falaise. Ces classes se répartissent en seuils :

- Érosion faible : moins de 50 cm ;
- Érosion moyenne : entre 50 et 60 cm ;
- Érosion forte : plus de 60 cm.

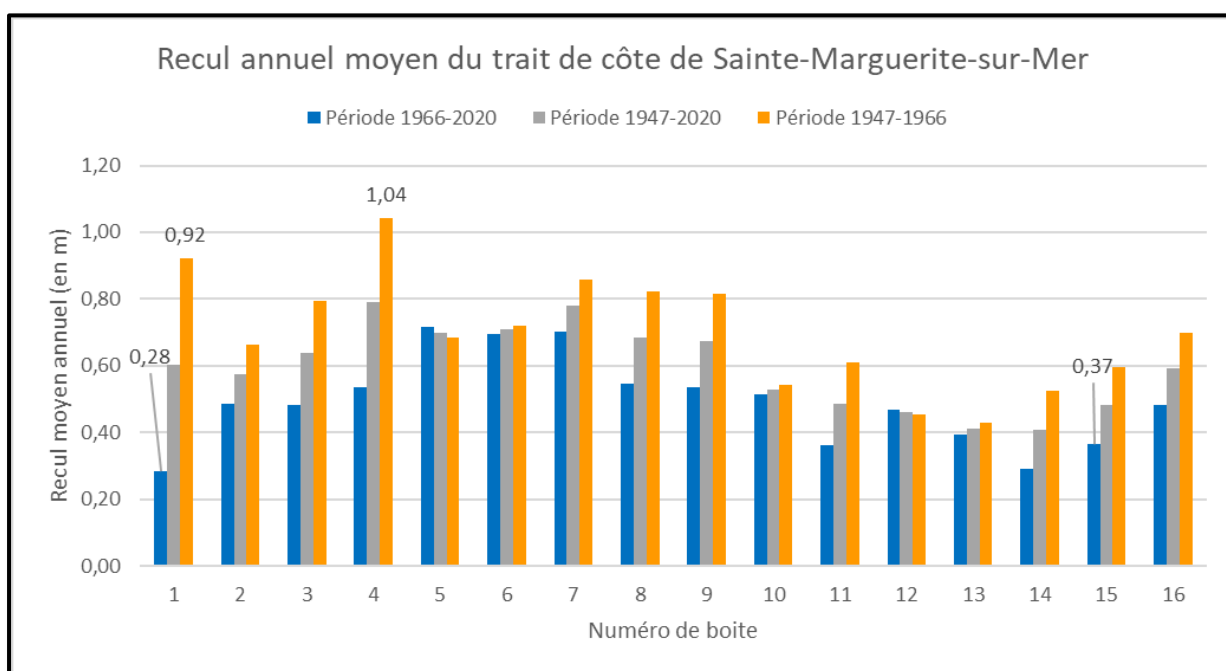


Fig. 36 : Histogramme du recul moyen annuel de la falaise à l'étude, G. DELSIGNE, 2023.

Quelle que soit la période, on remarque que l'ouest s'érode plus rapidement que l'est (dans l'ordre des boîtes).

Sur la période 1947-2020, on constate un recul moyen de 0,6 m/an. Les calculs réalisés entrent en accord avec l'indicateur national d'érosion côtière, qui évalue le recul de la zone à plus de 0,5 m/an. Depuis 1966, on constate un recul plus faible voire bien plus faible de manière générale, avec quelques exceptions pour les boîtes 5, 6 et 12 sur le graphique ci-dessus.

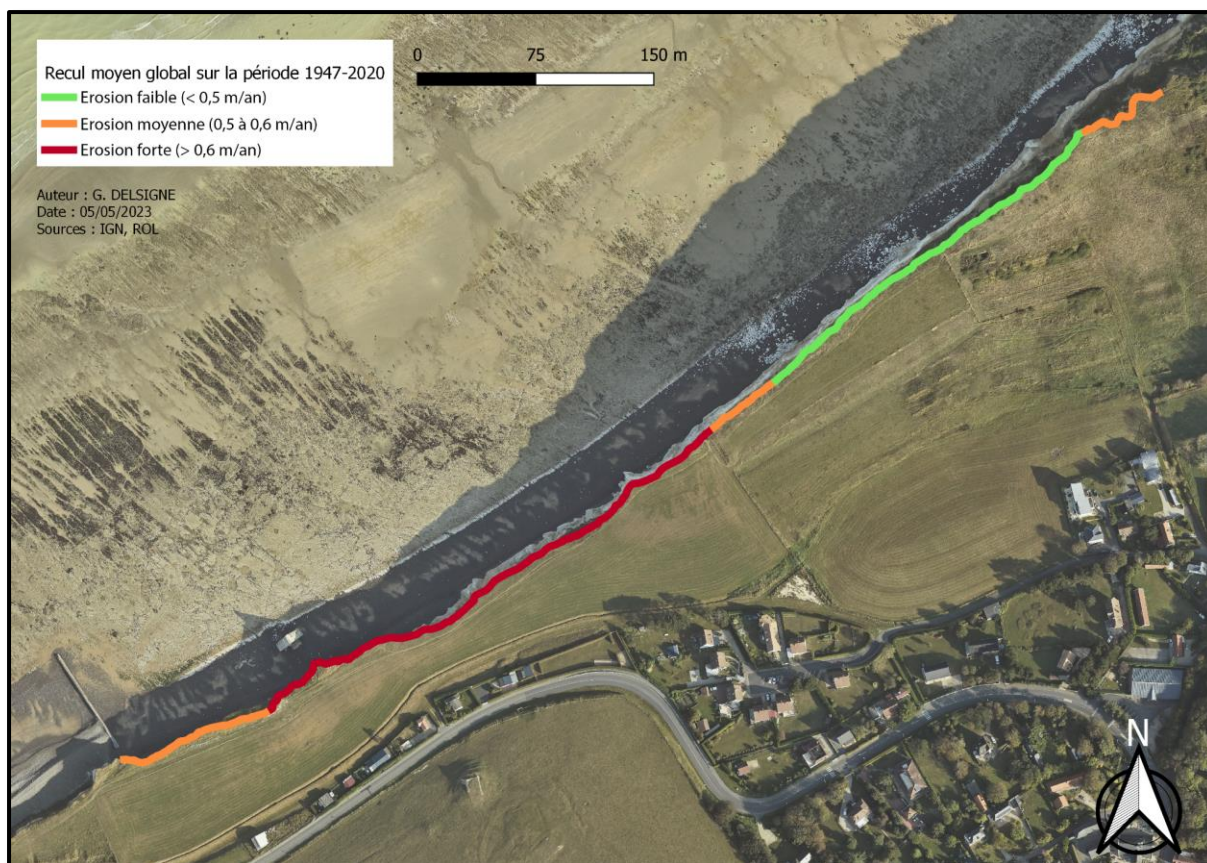


Fig. 37 : Carte représentant le recul moyen global annuel sur la période 1947-2020.

Sur toute la période étudiée, on observe un gradient d'érosion deux tiers/un tiers d'ouest en est : la partie ouest est celle qui recule le plus, tandis que la partie est est celle qui s'érode le moins, avec une érosion moyenne à l'extrême est. La dangerosité de ce recul hétérogène est que la partie qui s'érode la plus vite est celle qui est la plus proche des habitations et de la voirie, menacés dans les prochaines décennies par l'abandon et la perte des terrains. En revanche, comme cette carte présente l'évolution globale depuis 1947, la mise en place de l'épi et ses effets n'est pas mise en valeur. Voyons de plus près l'évolution spatiale de l'érosion avant et après l'installation de l'ouvrage de défense.

2.3.2 - Avant la construction de l'épi

Sur la période 1947-1966, on remarque d'emblée sur les calculs une érosion plus importante le long de la falaise dans sa majorité. Le recul moyen de la période atteint 0,7 m/an d'érosion, avec un recul de plus d'un mètre (1,04m) par an au maximum d'érosion.

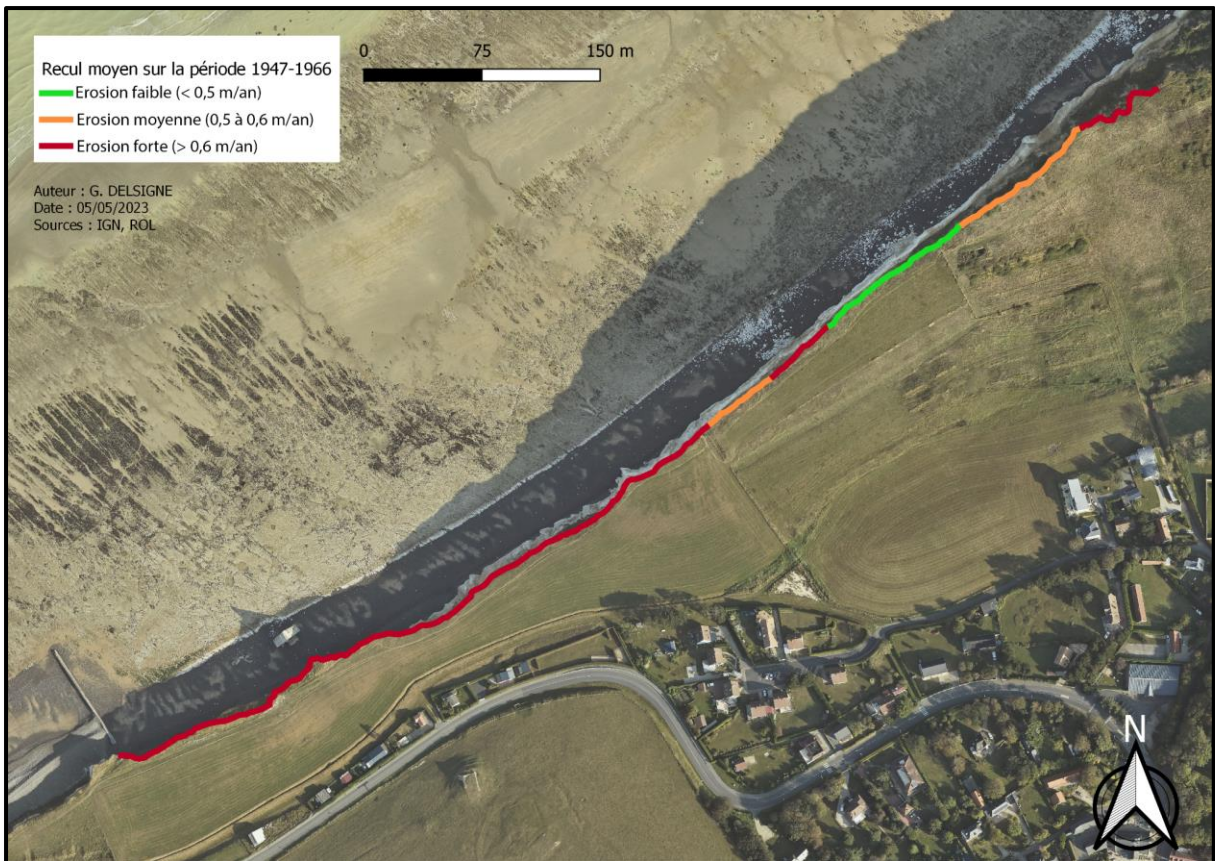


Fig. 38 : Carte représentant le recul moyen annuel sur la période 1947-1966.

La zone la plus érodée reste celle la plus proche de la voirie et des habitations, l'érosion est forte sur plus de la moitié du tracé, avec une portion d'environ 100m d'érosion faible à l'est de la falaise. Sur la carte ci-dessus, l'orthophotographie montre l'épi pour un bon rendu visuel, mais celui-ci n'était pas encore construit.

2.3.3 - Après construction de l'épi

On gagne plus de 0,2 m/an d'érosion moyenne globale grâce à la construction de l'épi entre 1966 et 2020 par rapport à la période 1947-1966. La construction de l'épi, retenant les galets qui dissipent l'énergie des vagues, a été efficace sur la falaise puisque le recul moyen annuel a baissé, passant de 0,7 m/an à 0,49 m/an.

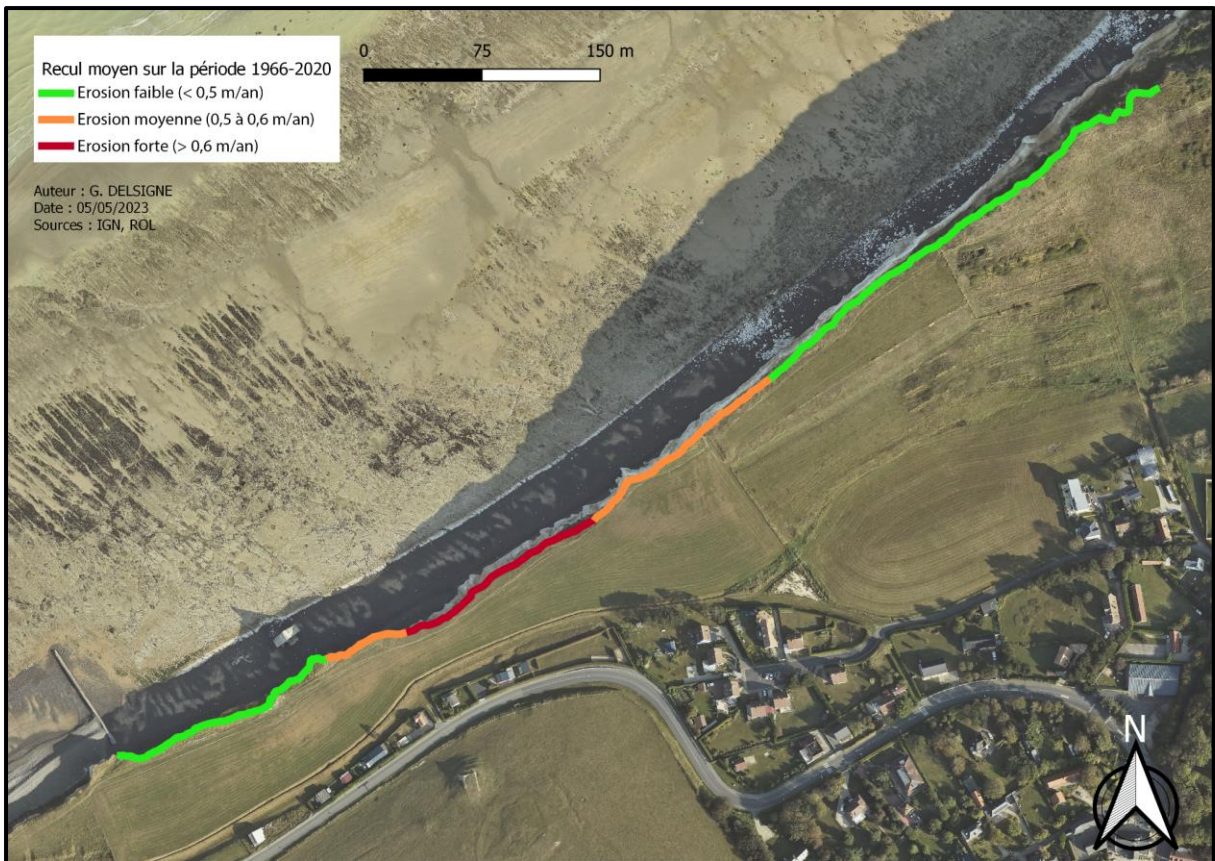


Fig. 39 : Carte représentant le recul moyen annuel sur la période 1966-2020.

La carte ci-dessus permet de mieux visualiser l'efficacité de l'épi au-delà des chiffres. Sa mise en place a provoqué une réelle protection ralentissant le recul du trait de côte dans sa majorité. Il reste toujours une érosion forte, mais sur un tracé beaucoup plus faible (environ 150m sur les 800m analysés), menaçant toujours les espaces anthropisés. La majorité du tracé présente sur la période 1966-2020 un recul faible, avec un secteur d'érosion modérée à forte en son centre, représentant environ un tiers du tracé.

La différence d'érosion malgré le fait que la falaise ait la même composition géologique peut avoir plusieurs raisons. D'abord l'ouvrage de défense qui ne protège qu'une partie de la portion de falaise. Ensuite la fracturation de la roche qui diffère le long du tracé, rendant certaines zones plus facilement érodables puisque la sensibilité de la roche est différente. Enfin, les différences d'exposition/de force des facteurs qui touchent la falaise à différents endroits (vent, vagues, infiltration d'eau...).

Ces résultats peuvent être mis en comparaison avec les travaux du CEREMA réalisés en juin 2018. La date de départ de leur analyse de cette portion de la falaise diffère de la mienne, puisque leur travail se concentre sur la construction de l'épi et de son extension en 1995 jusqu'en 2014. Malgré tout, leur analyse permet de conforter la conformité des résultats que j'ai obtenus. La longueur de leur étude de la falaise à Sainte-Marguerite-sur-Mer est pratiquement identique à la mienne, puisque je n'ai qu'une boîte supplémentaire.

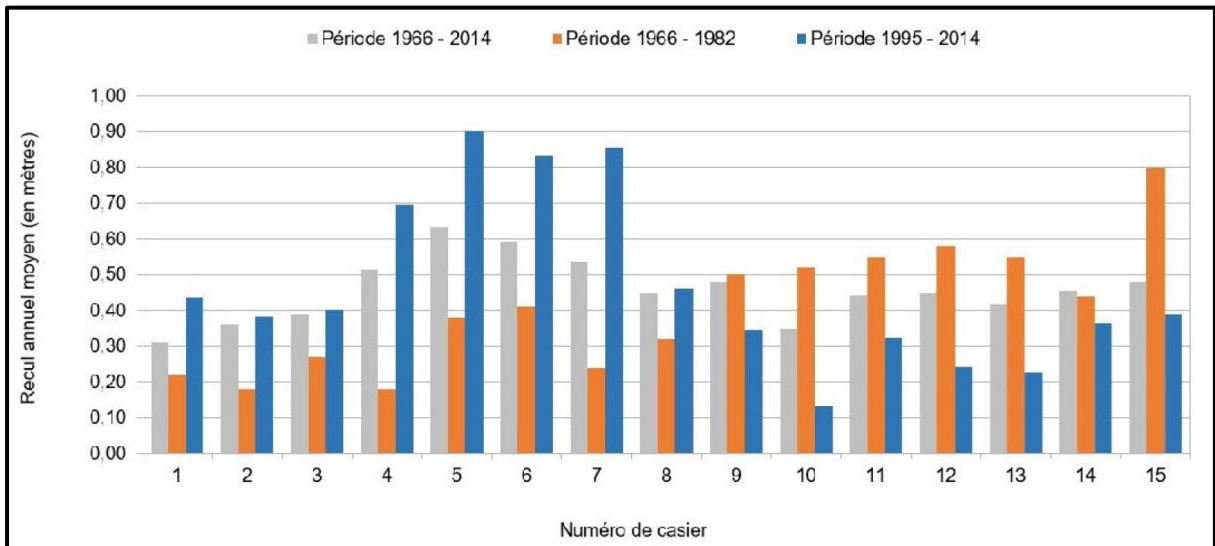


Figure 40 : Recul annuel moyen du trait de côte à Sainte-Marguerite-sur-Mer, 2018, CEREMA.

Le graphique ci-dessous montre que les vitesses sur la période 1966-2014, les résultats que j'ai obtenus sont supérieurs, de l'ordre d'une dizaine de centimètres. De manière générale, on remarque que les zones qui s'érodent le plus sont les mêmes (Cf. cartes érosion) et inversement. On observe une très forte érosion depuis 1995, qui correspond probablement à un élément particulier et un événement particulier que nous allons développer : l'effondrement du blockhaus.

2.3.4 - Un élément particulier : le blockhaus

Le blockhaus de Sainte-Marguerite-sur-Mer fait partie intégrante du tourisme local : la manière dont il est tombé de la falaise en fait un édifice populaire auprès des photographes. En 1995 le blockhaus menace de s'effondrer au pied de la falaise en raison de l'érosion qui sape son terrain d'assise. Pour anticiper une chute non maîtrisée, les pompiers mènent une opération de génie civil qui provoque son effondrement.

Depuis cet événement, on observe une forme bien particulière de la falaise. Derrière la position du blockhaus désormais sur la plage, elle fait une avancée qui ne semble plus être affectée par la même vitesse d'érosion.



Fig. 41 : Le blockhaus et l'excroissance qui pose question, G. DELSIGNE, 2023.

Le blockhaus pourrait donc jouer un rôle protecteur de cette petite partie de la falaise depuis sa chute. Pour vérifier cela, j'ai réalisé une boîte mesurant la longueur du blockhaus (18,5 m avec une variabilité de cette valeur le long du transect de +/- 50 cm) en intégrant le trait de côte de 1995, année de sa chute ce qui permettra d'obtenir une différence de recul avant/après très précis de son rôle protecteur... ou non. D'autres traits de côte ont été également ajoutés pour augmenter la précision du recul sur cette échelle fine : 1978, 2003 et 2012.

Après calcul du recul, on constate une anomalie : la période 1995-2000 montre un très fort recul de presque 9 m en 5 ans, soit environ 1,7 m/an. Cela est dû à la manœuvre pour faire tomber le blockhaus : les pompiers ont creusé la falaise, ce qui explique ce fort recul. Les résultats pris en compte seront donc ceux après 2000, pour éviter de fausser les taux d'érosion basés sur des facteurs naturels jusqu'à maintenant.

Sur la période 1947-1995, on observe un recul moyen 0,53 m/an. Avant la mise en place de l'épi, ce recul était de 0,98 m/an. Après la chute de l'édifice, le recul moyen réduit fortement et passe à 0,27 m/an. Le pic, élément qui nous intéresse, ne recule pratiquement plus, montrant l'effet protecteur de l'ouvrage de défense allemand au sol.

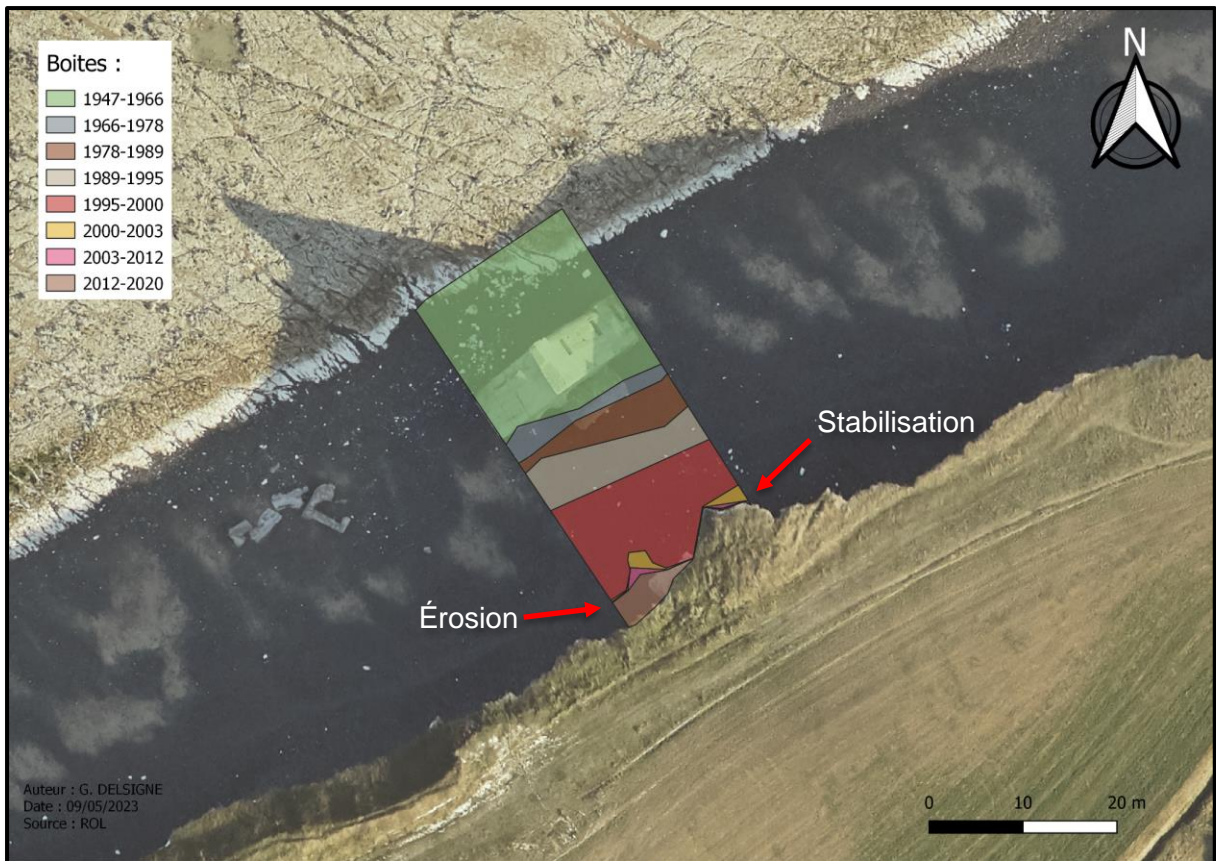


Fig. 42 : Boîtes mettant en évidence l'arrêt du recul de l'excroissance après la chute du blockhaus.

Cette carte montre mieux l'arrêt quasi total du processus d'érosion de la falaise sur le pic. Le trait de côte se resserre fortement et n'évolue plus sur une période de 20 ans. On remarque cependant à l'ouest du pic un phénomène érosif : le blockhaus ne protège pas totalement de toute sa largeur du fait de son inclinaison et du sens des vagues.

2.3.5 - Limites et perspectives d'amélioration

Même si les traitements et les calculs ont été réalisés avec le plus de précision possible, ils présentent des biais, marges d'erreurs et limites. Premièrement, la longueur des boîtes peut différer selon les transects : la séparation à la Baseline est de 50 m, mais étirés en longueur selon la forme de la ligne de base ils peuvent s'écarter ou au contraire se rapprocher légèrement. La longueur des boîtes a une variabilité de longueur de +/- 2 m. La limite des calculs dépend de la disponibilité et de la qualité des images aériennes, si bien qu'il est difficile d'évaluer les vitesses de recul avant les années 1940 : les photographies aériennes de l'IGN pour la commune débutent à partir de 1936, de qualité médiocre. De même, la précision des calculs des taux de recul dépend de la qualité de géoréférencement, il devient plus délicat d'évaluer les vitesses avec une bonne fiabilité, de surcroît avec toutes les dates disponibles sans qu'il y ait une superposition ou trop de réajustement du trait de côte à réaliser pour éviter les croisements de polygones, augmentant l'incertitude lors des calculs.

Tous les traits de côtes digitalisés n'ont pas pu être exploitables. J'ai écarté leur utilisation en raison des causes suivantes :

- Un géoréférencement incorrect à cause d'une image trop distordue lors de la prise photo, étirant le trait de côte et rendant un rattrapage trop délicat lors du géoréférencement, même si ce dernier est bon. Il est utile d'ajouter que globalement, les deux tiers du contenu des photographies aériennes sont de l'eau et en milieu campagnard, ce qui rend difficile une répartition homogène des points de repère ;
- Une erreur d'interprétation de la rupture de pente due à la qualité de l'image.

Plusieurs pistes pourraient permettre d'améliorer le travail de quantification des vitesses de recul des falaises, en déployant plus de moyens. Tout d'abord, on pourrait ajouter plus de traits de côtes pour affiner les calculs des vitesses, mais cela dépend de la qualité des images et de leur disponibilité sur le terrain étudié et de la précision du géoréférencement, des points de repères disponibles. Ensuite, augmenter le nombre de missions photographiques (annuelle, bi-annuelle) permettrait d'obtenir un recul précis sur l'évolution de la falaise (un événement exceptionnel comme un très gros effondrement peut être noyé dans un pas de temps de 20 ans). Enfin, réduire l'écart des transects pour affiner l'analyse pourrait mettre en lumière d'autres particularités de la falaise étudiée.

2.4 Évolution du trait de côte à pas de temps court

Nous avons vu et évalué les vitesses de recul des falaises de Sainte-Marguerite sur un pas de temps long grâce à la photographie aérienne. En revanche, il se peut qu'un recul rapide de la falaise ou d'une partie de celle-ci s'effectue lors d'un événement important (écroulement, éboulement...). De manière générale, la photogrammétrie va pouvoir mettre en évidence les zones de la falaise qui ont perdu de la matière et la distance qui a été affectée.

Cette deuxième partie et la dernière étude des falaises de Sainte-Marguerite-sur-Mer rendra compte de l'érosion d'un pan de falaise sur un pas de temps court, d'ordre saisonnier. Nous verrons d'abord le principe de la photogrammétrie, le protocole d'acquisition et de modélisation du nuage de points.

Enfin, ces modèles 3D de la falaise à l'étude permettront d'observer le recul de la falaise de manière précise sur une période de quelques mois.

L'hiver est la période privilégiée de l'année pour observer une érosion importante sur les falaises crayeuses. En effet, la cryoclastie provoque une fracturation de la roche et de ce fait son érosion. De plus, les tempêtes hivernales peuvent provoquer des tempêtes plus puissantes que le reste de l'année, attaquant la roche. Cette période est le moment le plus propice pour observer une érosion de la falaise, le pas de temps choisi pour l'observation rentre dans cette période, puisque les analyses effectuées ont été réalisées pour une comparaison allant de septembre 2022 à avril 2023.

2.4.1 - La photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique de mesure qui consiste à déterminer la forme, les dimensions et la situation d'un objet dans l'espace à partir de plusieurs prises de vues photographiques de cet objet. Elle permet tout simplement de restituer géométriquement des objets en trois dimensions, à la manière de la vision humaine (IGN.fr). Ces images peuvent être prises par des caméras au sol, par voie aérienne ou spatiale. Elle est souvent utilisée pour effectuer des analyses environnementales, comme par exemple surveiller l'état de la végétation ou l'érosion.

L'objectif de l'utilisation de la photogrammétrie dans ce travail de recherche est de quantifier l'érosion d'un pan de falaise de Sainte-Marguerite-sur-Mer sur un pas de temps court (sur un an), en comparant deux nuages de points. Cette technique permet de calculer la distance perdue lors d'un effondrement (par exemple). Pour cela, il convient de prendre plusieurs photographies géoréférencées de la falaise pour effectuer une superposition des deux pas de temps et permettre au logiciel de traitement de comparer les nuages de point.

Plusieurs logiciels existent pour réaliser de la photogrammétrie, mais je vais en utiliser deux principalement : **Agisoft Photoscan** et **CloudCompare**.

- Agisoft Photoscan permet de compiler différentes images prises en photo et réaliser un nuage de points en 3 dimensions.
- Le logiciel CloudCompare quant à lui, permet d'analyser ces nuages de points et les comparer. Dans ce logiciel, le plugin **M3C2** (Multiscale Model to Model Cloud Comparison) permet de calculer la distance entre 2 nuages de points d'un même pan de falaise (dans notre cas). Ce traitement permettra de mettre en évidence les zones "perdues" à cause de l'érosion.

Pour réaliser des enregistrements photogrammétriques, il convient de suivre plusieurs étapes rigoureusement. Le protocole d'acquisition a été réalisé par M. Jaud fin 2020, c'est celui qui sera utilisé pour modéliser notre falaise. Ce protocole utilise des photographies pour modéliser la falaise sur l'ordinateur, et non un enregistrement TLS (Terrestrial Laser Scanning), également utilisé pour modéliser le nuage de points.

Pour bien géoréférencer la photographie, il faut connaître la distance D entre l'appareil photo et le centre de l'antenne GPS située au-dessus. On a fixé un temps de mesure de 5s pour le D-GPS.

On fixe la marge d'incertitude à environ 5cm, qui englobe l'erreur de positionnement GPS, les incertitudes de mesures de l'offset en Z et les déplacements du centre optique de la caméra lors des pivotements haut-bas.

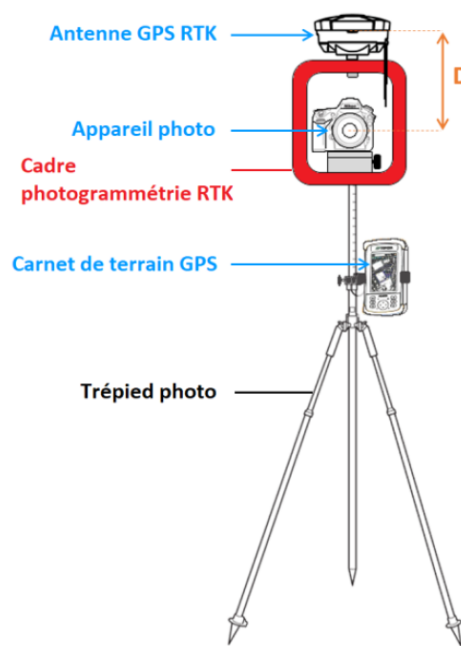


Fig. 43 : Schéma de prise de vue photogrammétrique RTK, M. Jaud, 2020.

Avant chaque prise de vue, on enregistre la position GPS RTK, puis on prend une photo de la position de prise de vue pour réaliser les photographies de ce point. Prises de vue de haut en bas en faisant attention à ce qu'il y ait environ 80% de recouvrement entre les images, pour que le logiciel de modélisation du nuage de points puisse connecter les photographies entre elles en reconnaissant des points remarquables, ce qui représente 5 photographies par prise. Le tout en minimisant la surface du ciel sur les photographies, pour éviter l'ajout de surfaces inutiles. L'appareil photo est un Nikon D810, utilisé en mode automatique.

Type	Résolution	Longueur focale	Taille de pixel
Cadre	7360 x 4912	35 mm	4,89 x 4,89 μm

Fig. 44 : Paramètres de l'appareil photo utilisés pour les prises de vues photogrammétriques.

On considère d'après le protocole qu'il faut environ 15m de distance entre les positions de prises de vue pour une acquisition à environ 50m du front de falaise, puis on répète l'opération autant de fois que nécessaire sur la portion à étudier.



Fig. 45 : Prise photographique des falaises, avril 2023, R. DAVIDSON, 2023.

2.4.2 - Modélisation et nettoyage du nuage de point

Après l'acquisition des images, celles-ci sont ensuite importées dans le logiciel Agisoft Photoscan avec les coordonnées GPS des photographies.

Le premier traitement consiste à attribuer les coordonnées GPS des photographies. Pour cela, on corrige d'abord la distance D entre l'appareil photo et l'antenne GPS RTK. Ensuite, on repère les changements de position de prise de vue, qu'on remplace par les positions GPS RTK corrigées. Il y a donc plusieurs photographies avec une même coordonnée pour une seule position de prise de vue.

On procède ensuite au traitement et à la génération du nuage de points, ce qui donne ceci sur le logiciel CloudCompare :



Fig. 46 : Modélisation de la falaise à l'étude du 19 septembre 2022.



Fig. 47 : Modélisation de la falaise à l'étude du 11 avril 2023.

Sur la version de septembre, la marge d'erreur est de 3,2 cm environ et sur celle du 11 avril, la marge d'erreur est de 5,6 cm environ.

2.4.3 - Présentation du plugin M3C2

Ce plugin du logiciel CloudCompare développé par Rennes Géosciences permet de calculer la distance entre deux nuages de points, ce qui est exactement ce que l'on cherche à faire. Ce plugin est avantageux puisqu'il n'y a pas besoin de prétraiter le nuage de point, à l'exception des points isolés comme de la végétation pour éviter de générer trop de bruit, ce qui pourrait fausser les calculs ou générer une trop forte marge d'erreur (A. THOMAS, 2016).

Dans notre cas, le Blockhaus n'a pas été pris en compte pour éviter de générer trop de bruit, d'autant plus que c'est un ouvrage artificiel, qui ne rentre pas en compte dans l'érosion de la falaise.

Le plugin M3C2 crée des points principaux, appelés "cores points", qui peuvent être directement issus d'un nuage de points existant ou obtenus par rééchantillonnage. Ces points sont représentatifs de la morphologie du terrain modélisé. Pour chaque point principal, l'algorithme attribue un vecteur appelé "normals", qui est basé sur les points voisins, pour obtenir une surface de référence spécifique à chaque point. Ensuite, un cercle est généré à partir de la surface de référence pour servir de base à la création d'un cylindre. Ce cylindre est utilisé pour mesurer la distance entre les vecteurs du nuage de points en comparaison. (A. THOMAS, 2019).

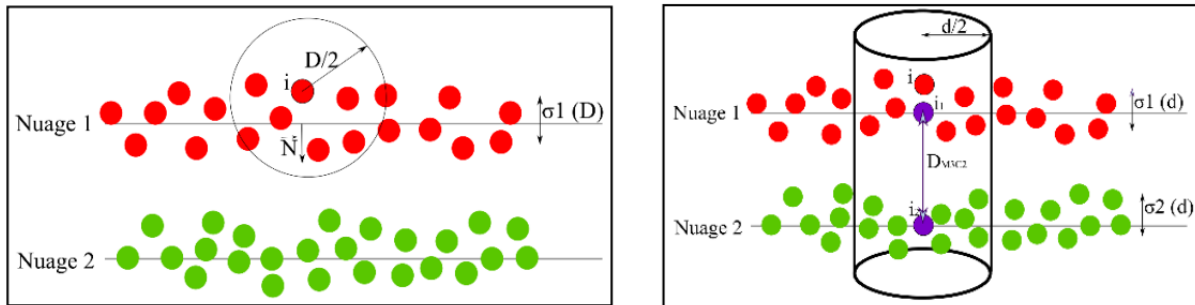


Fig. 48 : Les deux étapes du fonctionnement du plugin M3C2.

Plusieurs paramètres sont à définir avant de calculer la distance M3C2, tels que la longueur des vecteurs, le rayon du cylindre et sa profondeur. Les cores points sont aussi réglables. Les normales ont été calculées pour chaque nuage de points préalablement, ce sont ceux-ci qui ont été utilisés dans les paramètres principaux du plugin. La marge d'erreur a été fixée à 10 cm en raison de l'erreur globale des deux nuages de points de 8,8 cm. Les autres paramètres du plugin n'ont pas été retouchés.

Normals diameter	Projection diameter	Max depth	Registration error	Core points
0,100147 m	0,100147 m	22,79 m	0,1 m	Use cloud 1

Fig. 49 : Paramètres utilisés lors de l'application du plugin M3C2.

2.4.3 - Présentation des résultats comparatifs

Avant d'évaluer et de mesurer à échelle fine les zones de recul (plus ou moins forts) et les zones d'accumulation, il convient d'observer les changements significatifs durant la période :

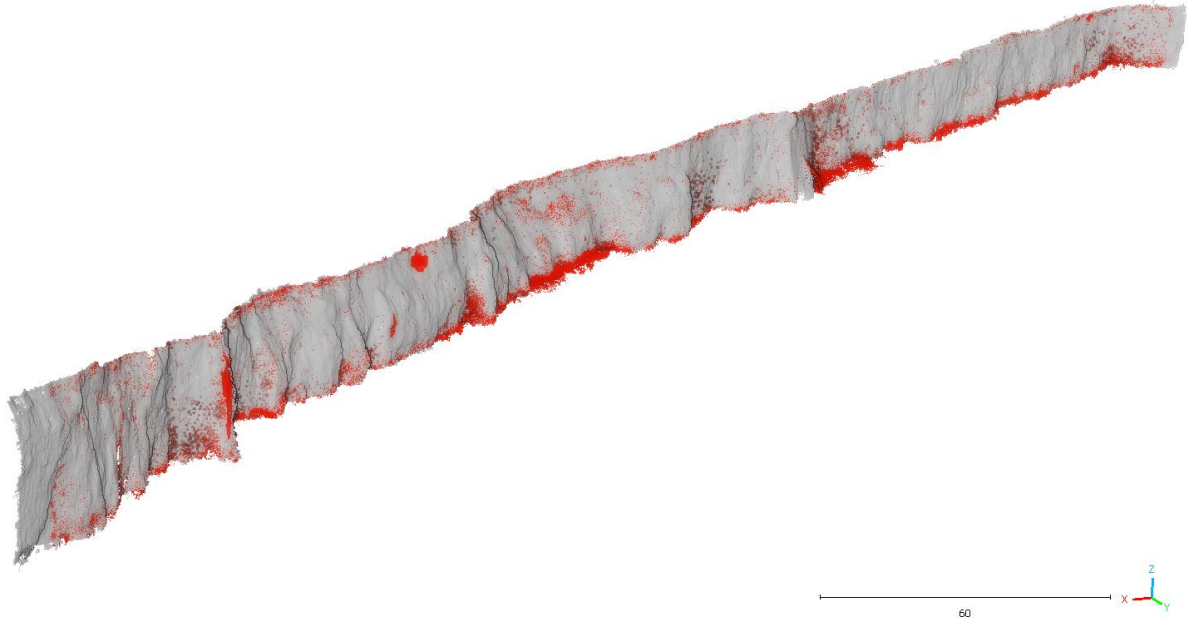


Fig. 50 : Modèle présentant les changements significatifs entre septembre 2022 et avril 2023.

La majorité des changements se trouvent au pied des édifices crayeux. On peut distinguer deux zones concernant l'évolution du pan de falaise :

- Le pied des falaises où la plupart des changements correspondent à des dépôts de débris de la falaise et/ou d'accumulation de galets ;
- Les changements épars sur la façade de la falaise montrant une érosion de celle-ci, avec des zones plus marquées.

2.4.3.1 – Changements métriques de la falaise

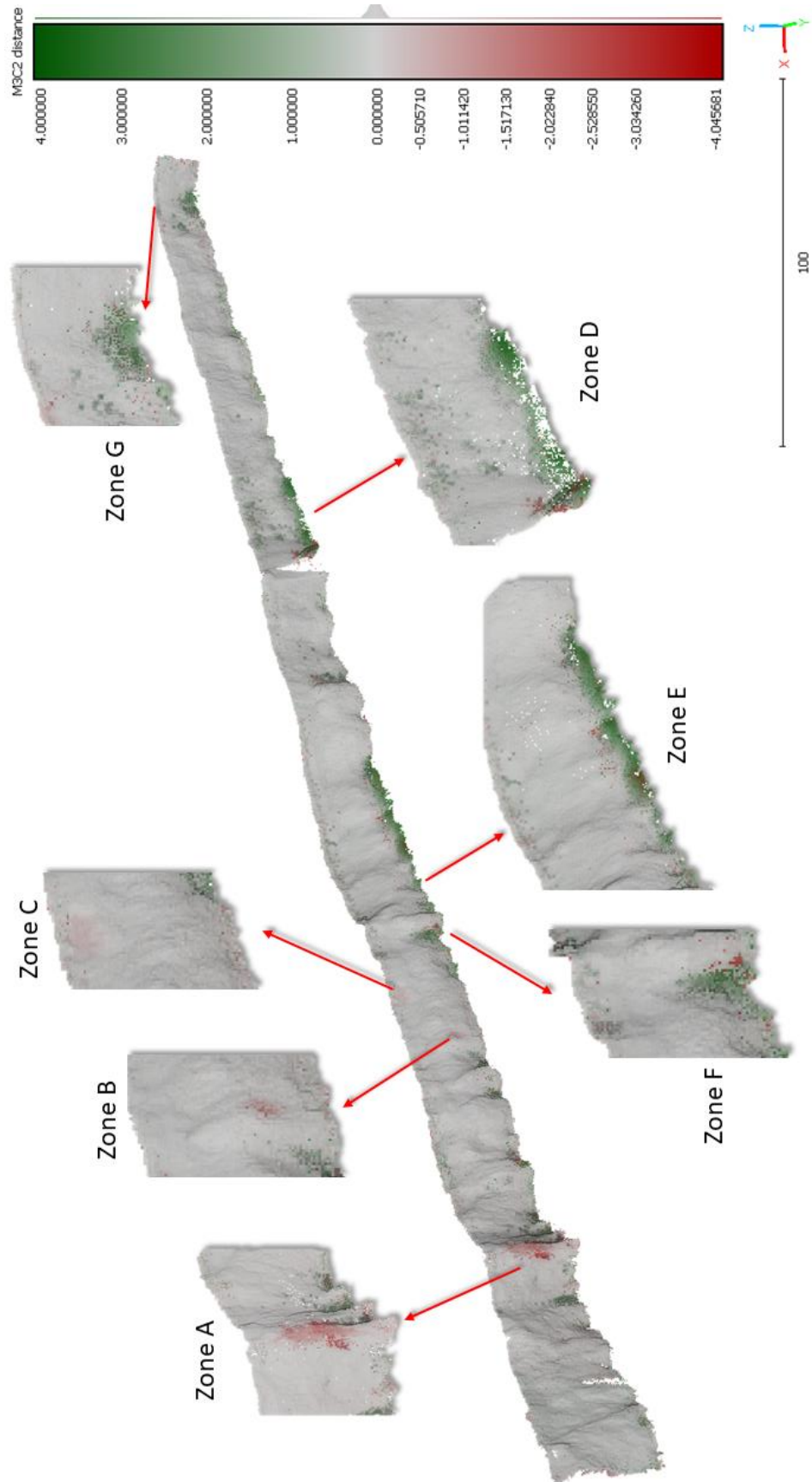


Fig. 51 : Zones d'accumulation et d'érosion sur la falaise à l'étude sur la saison hiver/printemps 2022-2023.

Cette visualisation confirme la sectorisation des changements significatifs. On observe une accumulation de dépôts de débris à la base des falaises au centre et à l'ouest, sinon on observe peu de mouvements lors de la saison. La forme d'érosion la plus importante se trouve à l'extrémité est du secteur, et on observe un peu d'érosion au niveau du blockhaus.

La partie est de la falaise présente plus de traces d'érosion que la partie est, au-dessous, une grande partie de la surface de la falaise a reculé, de l'ordre de 0,5-0,6 m, et parfois beaucoup plus comme le montre l'effondrement à l'ouest de l'image ci-dessus. Sur la partie ouest de la falaise, on retrouve beaucoup d'accumulation et une érosion globale de la façade de la falaise, mais avec un recul légèrement plus faible. Globalement, le taux d'érosion sur l'année écoulée entre dans les calculs réalisés précédemment sur le temps long, mais ce qui va nous intéresser ici, ce sont aussi les effondrements ponctuels ayant engendré une forte perte de volume sur la falaise, ce qui a été le cas. Le volume perdu a été évalué grâce à l'outil 2.5D volume sur CloudCompare.

2.4.3.2 – Changements volumiques de la falaise

L'outil **Compute 2.5D volume** du logiciel CloudCompare permet de calculer les gains et pertes de volume perdus en comparant deux nuages de points. Il va créer une grille composée de mailles (ici fixées à 20cm de côté) puis calculer les gains et pertes de volume dans cette maille en fonction des deux dates comparées (différence de hauteur moyenne dans une maille en fonction de la hauteur de l'axe, puis en fonction de la grille déduire un volume). J'ai choisi de laisser les cellules vides, en effet l'interpolation comble les grilles où il y a peu voire aucun point ce qui peut surestimer le calcul final.

Pour calculer les volumes perdus, j'ai réalisé des tests avec la hauteur minimale et maximale. Les résultats étant très proches les uns des autres, j'ai privilégié la hauteur moyenne. Enfin, **la direction de la projection a été fixée sur Y** : axe d'érosion de la falaise.

A proximité du blockhaus, on remarque une grosse zone érodée. Malgré tout, il n'a pas été possible de calculer le volume proche du blockhaus car trop de cellules vides sont présentes et les points sont trop dispersés.

L'effondrement A a engendré une perte d'environ 26,8 m³ de craie. On retrouve des pertes plus faibles, mais plus importantes que la moyenne à deux autres endroits. L'effondrement B avec environ 6,6 m³ de volume perdu, et l'effondrement C à gauche de l'effondrement précédent où on évalue le volume perdu à environ 4 m³, correspondant à de l'érosion particulière.

Au niveau des volume accumulés majoritairement en pied de falaise, on note une accumulation le long du pied de falaise (zone D) avant le blockhaus d'environ 64 m³, une accumulation après le blockhaus (zone E) d'environ 103 m³ et un peu plus loin (zone F) d'environ 17 m³.

Le rendu du plugin M3C2 montre que la zone G est un espace d'accumulation intéressant à analyser. En réalité, il ne s'agit que d'une petite zone, le rendu est dû à la compression liée au dézoom, qui représente un volume de 2 m³ environ.

On retrouve aussi des zones d'accumulation éparses très faibles en haut de falaise dues aux dépôts aériens.

2.4.4 – Limites et perspectives d'amélioration

Plusieurs éléments de cette partie montrent des faiblesses dans la construction des nuages de points, rendant certaines parties à analyser incomplètes. En effet, certains espaces en hauteur sont lacunaires en raison de l'angle de prise de vue en pied de falaise : il aurait été possible de les combler grâce à l'utilisation d'un drone, mais qui aurait rendu compliqué le respect du protocole de photogrammétrie, comme le stockage des photos et la précision de la position GPS en raison de l'instabilité du drone avec le vent.

Les nuages de points ont une erreur de géoréférencement acceptable, mais qui aurait pu être améliorée avec un temps d'enregistrement du point plus long. Cela aurait allongé grandement la session de prise de vue, jusqu'à la rendre incompatible avec la marée montante.

Comme constaté, la falaise est en recul, mais on observe une grosse accumulation à son pied, plus importante que le volume perdu au-dessus de ces zones. Cette accumulation peut être due à un important stock de galets et/ou de débris de falaise, mais aussi, lorsqu'on compare les nuages de points, le modèle de 2023 ne s'arrête pas parfaitement au pied des falaises comme le nuage de points de 2022, laissant place à un stock plus important, ce qui explique cette accumulation importante.

Malgré ces limites, les résultats demeurent intéressants, puisqu'ils tendent à confirmer la moyenne de recul annuel depuis la construction de l'épi. De plus, cette analyse a permis de calculer le volume perdu de quelques effondrements.

Enfin pour gagner en précision, il pourrait être intéressant d'améliorer la qualité de la caméra : avec une résolution spatiale accrue, cela pourrait permettre de détecter des changements subtils dans la morphologie des falaises et obtenir des mesures plus précises du recul.

De même, la photogrammétrie étant utilisée dans ce mémoire sur un pas de temps court, il serait pertinent de développer des systèmes de surveillance à long terme qui permettent de suivre les changements sur plusieurs années voire sur plusieurs décennies pour compléter la télédétection, ce qui fournirait une meilleure précision dans l'appréciation des vitesses d'érosion.

2.5 - Conclusion de la partie

À travers les différents traitements réalisés et les observations faites par télédétection, nous avons vu dans cette partie le recul de la falaise menace toujours l'espace public et privé. Malgré tout, la construction de l'épi en 1964 a permis de ralentir l'érosion de cette portion de la falaise, mais elle reste toujours importante et ronge chaque année un peu plus les terres côtières. Le recul n'est pas homogène tout le long du tracé et a évolué au fil du temps, si bien que l'effondrement du blockhaus a permis de figer une infime partie de la falaise. Sur un temps plus court grâce à la photogrammétrie, nous avons pu observer un effondrement qui a provoqué un recul non négligeable d'une partie du pan de la falaise et les résultats de recul tendent à confirmer les calculs réalisés sur le temps long.

PARTIE 3 : LES SUBMERSIONS MARINES.
INVENTAIRE, ANALYSE DES FACTEURS ET ZONAGE DANS LA COMMUNE DE
QUIBERVILLE

Cette partie va rendre compte de l'inventaire des submersions marines survenues depuis 2011 dans la commune de Quiberville, dans l'optique de poursuivre le travail de S. COSTA et P. LETORTU sur l'inventaire des submersions marines en Normandie depuis 1950, et permettra de suivre l'évolution de leur fréquence et de leur intensité.

En effet, les submersions marines sont un enjeu important compte tenu de la vulnérabilité des ouvrages construits au bord de la plage, et le contexte de changement climatique a tendance à augmenter la fréquence, l'intensité et la surface des zones touchées des événements climatiques exceptionnels comme les tempêtes.

3 grandes questions vont axer cette partie :

- Quelles sont les zones touchées par une submersion marine dans la commune ?
- Quelle est l'intensité des facteurs ayant contribué à une inondation à une date donnée ?
- Quelles sont les zones vulnérables à l'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2050 et 2100 ?

Cette partie verra d'abord un inventaire des submersions marines ainsi que les facteurs ayant provoqués cette submersion. L'intensité des tempêtes ayant provoqué les inondations permettra de sélectionner une tempête de référence pour la seconde partie de ce thème.

La seconde partie sera dédiée à la cartographie des zones submergées dans le futur dans la commune de Quiberville. Ce genre d'étude prospective est essentielle pour anticiper les différents espaces vulnérables dans la dynamique du changement climatique, et aider les acteurs d'aménagement à protéger les activités humaines sur le territoire et la population littorale.

3.1 - Les submersions marines à Quiberville : un phénomène familier

Les derniers travaux universitaires d'inventaire des submersions marines dans la commune de Quiberville datent d'une dizaine d'années (1950-2010). D'après les recherches de S. COSTA et P. LETORTU, les phénomènes de submersion marine sur la période 1960-2010 ont montré une évolution croissante des submersions dans la commune de Quiberville, l'objectif est de compléter les données depuis 2011 pour constater si cette tendance continue, stagne ou régresse. Toutefois, compte tenu de la tendance générale, on suppose que les submersions marines seront de plus en plus fréquentes.

Dans la commune de Quiberville, au moins 10 submersions marines, dont 8 sévères ont eu lieu sur la période 1950-2010, soit en moyenne 1,7 submersion marine environ dans la commune tous les 10 ans.

3.1.1 – Gravité des submersions marines

Les submersions marines ont de nombreuses conséquences sur le littoral. Celles-ci sont classées en trois degrés de gravité selon R. CASPAR (ROL) :

- Submersion marine **faible** : L'ensemble de la plage de la digue promenade est envahie par la mer ;
- Submersion marine **modérée** : Lorsque les eaux atteignent la voie publique la plus proche d'un perré ou d'un quai portuaire ;
- Submersion marine **sévère** : Lorsque celle-ci pousse les eaux à l'intérieur d'une commune et y provoque des dégâts relevant de la catastrophe naturelle.

Ces indicateurs de gravité seront pris en compte dans l'analyse des facteurs des submersions. Pour rappel, les facteurs principaux causant une submersion de tempête sont un niveau de marée extrême (qui comprend la surcote), la hauteur de houle et le vent (sa force et la pression atmosphérique). Plusieurs sources ont été utilisées pour récupérer les données relatives aux tempêtes entraînant une submersion marine sur la zone d'étude. Les données sur les marées viennent du shom, celles de vent ont été récupérées sur météoiel, et les chiffres de houle ont été téléchargés sur candhis (Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ).

3.1.2 - Inventaire des submersions marines sur la période 2011-2023

Plusieurs sources ont été consultées pour croiser les données et vérifier la véracité des submersions marines ayant eu lieu à Quiberville :

- **Les informations dieppoises** (bihebdomadaire), qui couvrent les nouvelles concernant Quiberville. J'ai consulté les archives de 2011 à 2023. Sur les environ 1400 journaux consultés, j'ai trouvé 2 submersions marines dans la commune concernée. L'avantage des journaux locaux est d'une part, l'atout des médias locaux est l'immédiateté de l'information, et d'autre part, la bonne vision de l'inondation que la population locale a vue au moment de l'événement. Des données qualitatives et quantitatives sur le niveau d'eau atteint peuvent ainsi être obtenues. Souvent d'autres secteurs touchés sont évoqués, comme dans un événement récent de même intensité (P. LETORTU, 2013) ;
- **Le syndicat mixte des bassins versants Saône Vienne et scie**, qui m'ont fourni des photographies des submersions, donnant une bonne idée des zones inondées.
- **Le ROL**, qui m'a permis de vérifier s'il y a eu submersion lors d'une tempête sur la rubrique "suivit tempête".

Depuis 2011, il y a eu 7 tempêtes majeures en France. Celles-ci ont touché le littoral à différentes intensités, occasionnant des dégâts plus ou moins importants sur le territoire. **3 d'entre elles ont été responsables de submersions marines** dans la zone d'étude sur la période 2011-2023. Celles-ci se concentrent sur les 5 dernières années entre 2017 et 2023, augmentant significativement la fréquence d'apparition de phénomènes exceptionnels. Reportée à toute la période étudiée, la fréquence moyenne décennale passe de 1,7 submersion tous les 10 ans à 1,8. Toutefois, il faut nuancer ce résultat. Ce n'est pas parce que la fréquence a beaucoup augmenté cette dernière décennie (presque le double) que le nombre de submersions à l'avenir augmentera ou stagnera vers ces résultats. Il se peut très bien que le nombre de submersions marines dans la commune baisse ces prochaines années/décennies pour plusieurs raisons (augmentation/amélioration des ouvrages de défense, conditions météo-marines insuffisantes à une submersion...). De plus, l'évolution de cette tendance à l'augmentation peut correspondre à des phénomènes de résonance journalistique produite par la sensibilité des sociétés aux problématiques environnementales, et l'urbanisation côtière peut augmenter artificiellement la tendance (Costa et al. 2012). Malgré tout, la politique de la commune vis à vis des submersions marines et la tendance faite sur l'inventaire des inondations par la mer et les prédictions sur le changement climatique font que ces phénomènes pour l'instant s'intensifient et laissent supposer une augmentation de ces phénomènes à l'avenir d'après la tendance observée.

Date	Espace envahit	Nom tempête	Source(s)	Type franchissement
12-janv-17	Digue route St-marguerite	Egon	Infos diep/ROL/Syndic	modéré
03-janv-18	Rue du Front de mer	Eleanor	Infos diep/ROL/Syndic	sévère
09-févr-20	Inondation sur la route de la mer	Ciara	Infos diep/ROL/Syndic	modéré

Fig. 52 : Inventaire des submersions marines dans la commune de Quiberville depuis 2011.

Avant d'analyser les facteurs ayant provoqué une submersion, il est important de signaler que pour des seuils de marée et de vent équivalents, on peut observer des submersions de tempête sévères, mais aussi modérées et faibles. On suppose donc que d'autres facteurs que la hauteur de marée et la force du vent peuvent faire varier l'intensité des inondations par la mer (Costa et al., 2012). À noter également que la dernière submersion du 9 février 2020 relevée par la DDTM n'a pas été signalée dans les journaux. Par déduction inverse, il se peut donc que d'autres submersions sur la période 2011-2023 n'aient pas été signalées ou recensées.

3.2 - Analyse des tempêtes et cartographie des zones inondées

3.2.1 - Tempête Egon

La première tempête recensée est la tempête Egon, survenue du 12 au 13 janvier 2017. Les données du shom montrent que nous étions dans une période de grande marée, atteignant un coefficient de 101 et une hauteur de marée extrême de 10,13 m observée durant cet évènement avec une surcote de 0,72m (Dépression moyenne de 1007,7 hPa). A noter, les hauteurs présentes sur les captures d'écran de l'annuaire de marées du shom sont les marées prédites.

Jeudi 12 janvier 2017				Vendredi 13 janvier 2017			
	Heure	Hauteur	Coefficient		Heure	Hauteur	Coefficient
BM	05:59	0.96	---	BM	06:51	0.80	---
PM	11:24	9.40	96	PM	12:13	9.58	101
BM	18:30	0.66	---	BM	19:20	0.53	---
PM	23:52	9.41	99	---	--:--	---	---

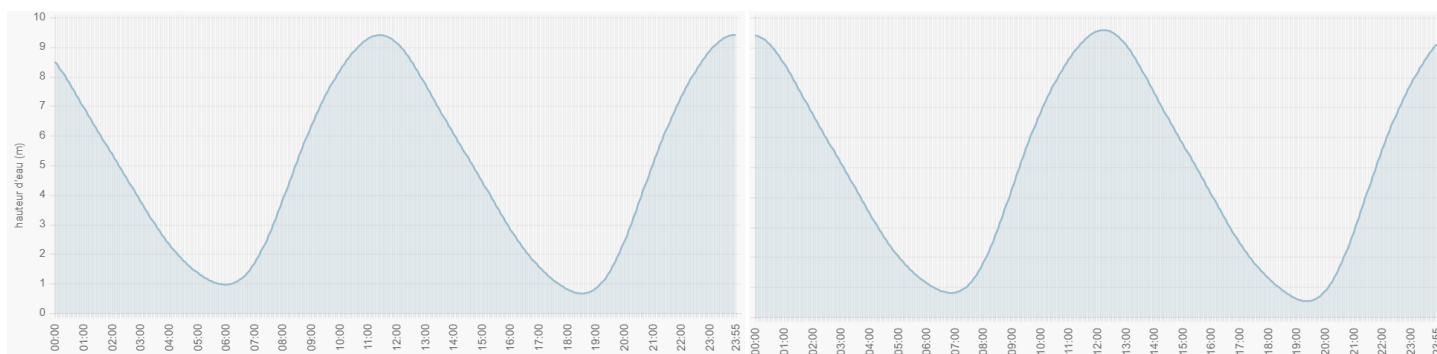


Fig. 53 : Hauteurs de marées lors de la tempête Egon de 2017 (Shom).

Deux périodes sont à prendre en compte sur cet intervalle de temps : la journée du 12 janvier, où la période de marée haute se trouve entre 8h20 et 14h50 environ, et la marée haute suivante dans la nuit du 12 et 13 janvier de 20h50 à 3h15 environ. Le franchissement modéré de la submersion a provoqué des projections de galets sur la route de la mer et inondant la digue.

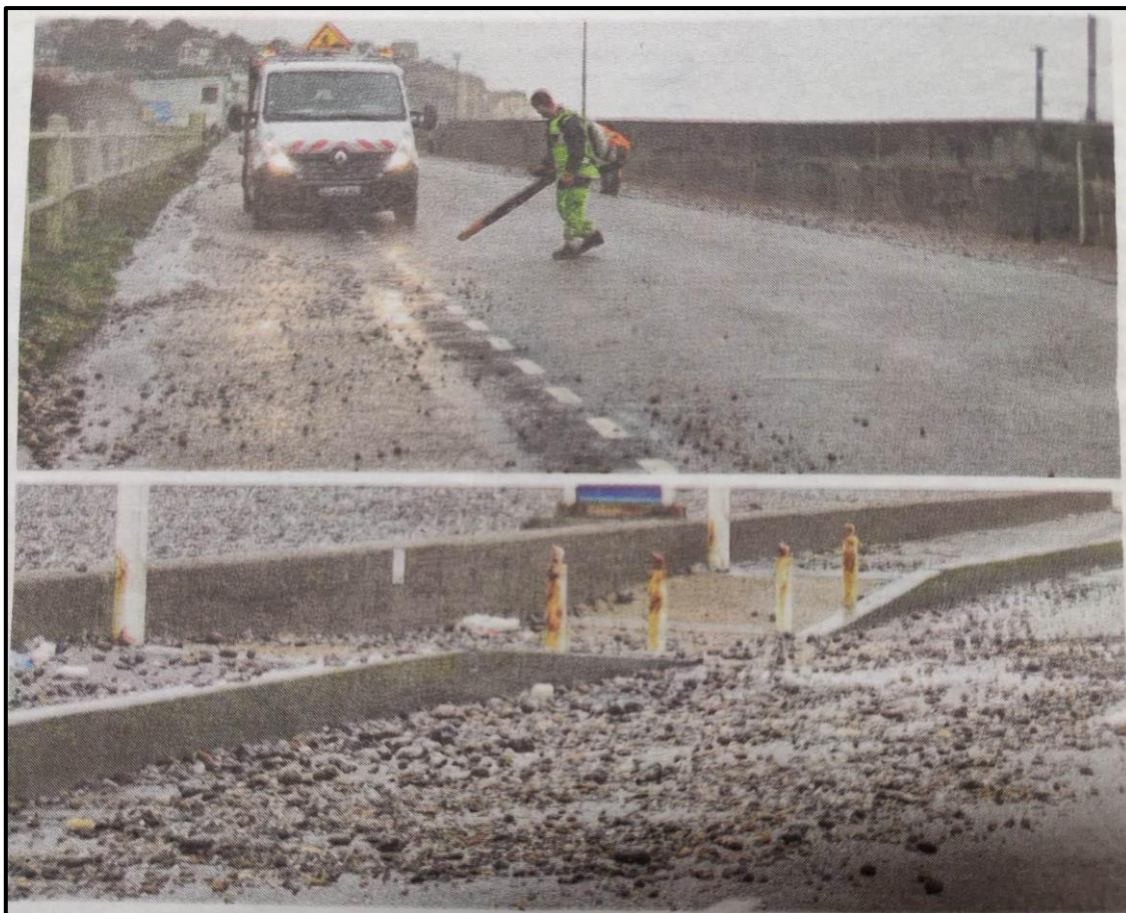


Fig. 54 : Photographie des projections de galets à Quiberville-sur-Mer, rue du front de mer, Les Informations Dieppoises, 2017.

Malheureusement, **les données de houle dans le secteur ne sont pas disponibles**, d  e à la maintenance des appareils de mesure lors de cette période. Les mesures disponibles à cette date sont beaucoup trop   loign  es de Quiberville, rendant peu pertinent l'analyse de celles-ci. Je ne prendrai pas en compte ces données pour cette tempête pour ne pas fausser l'analyse.

Les données de vent pr  sent  es lors des 3 tempêtes seront class  es selon les seuils établis par O. CANTAT dans ses travaux sur le climat en Normandie, publiés par la DREAL Normandie, que j'ai convertis en km/h pour réaliser les traitements (**rose des vents, moyennes des vents lors des périodes de pleine mer, rafales maximales**). On considère donc :

- Un vent calme inférieur à 5,4 km/h ;
- Un vent faible compris entre 5,4 et 16,2 km/h ;
- Un vent modéré compris entre 16,2 et 28,8 km/h ;
- Un vent fort supérieur à 28,8 km/h.

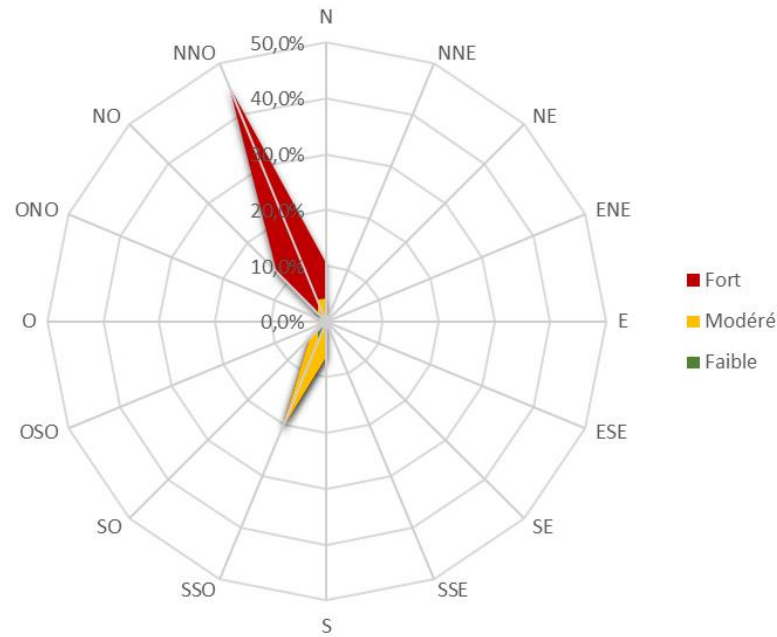


Fig. 55 : Rose des vents horaire de la tempête Egon (données Météo France), G. DELSIGNE, 2023

Pour rappel, avant d'analyser la sévérité des mouvements d'air des tempêtes, on note une moyenne annuelle de vent de 17.3 km/h sur la période 1991-2020.

La sévérité de la tempête Egon dans le secteur de Quiberville s'explique aussi par ses vents forts, qui ont permis de générer la houle au large, mais aussi le passage des paquets de mer sur le littoral et contre la digue. Ce sont les vents du Nord-nord-ouest qui furent les plus violents, et en plus moindre mesure les vents modérés venant du Sud-sud-ouest. Cela rend pour la période des moyennes entre 47 et 48 km/h pour les influences Nord-nord-ouest et des moyennes entre 16 et 22 km/h pour les influences Sud-sud-ouest.

Lors de la tempête, la force globale des vents augmente grandement puisque la moyenne est d'environ 45km/h avec des rafales atteignant 146 km/h dans la nuit du 12 au 13 janvier.

3.2.2 - Tempête Eleanor

La deuxième tempête qui vient envahir la commune a eu lieu du 2 au 4 janvier 2018. L'invasion de la mer à Quiberville s'est passée le 3 janvier. Comme le montre les données du Shom, nous étions dans une période de grands coefficients de marée, atteignant 107 le 3 janvier 2018. Le niveau marin extrême a été enregistré à 10,2 m observé avec une surcote de 0,42 m puisque nous étions dans une période dépressionnaire (1003,7 hPa). Les vagues ont provoqué l'inondation de la rue du Front de mer (Les informations dieppoises) et des habitations longeant la rue. Le choc des vagues associé à des projections de galets a fissuré la digue, laissant l'eau circuler à travers et au-dessus de la digue à cause des fortes conditions météorologiques.

L'évolution du trait de côte et les submersions marines dans les communes de Sainte-Marguerite-sur-Mer et Quiberville.

Mardi 2 janvier 2018				Mercredi 3 janvier 2018				Jeudi 4 janvier 2018				Vendredi 5 janvier 2018			
Heure	Hauteur	Coefficient		Heure	Hauteur	Coefficient		Heure	Hauteur	Coefficient		Heure	Hauteur	Coefficient	
BM 06:13	0.81	---		PM 00:05	9.60	105		PM 00:54	9.70	107		PM 01:43	9.63	105	
PM 11:36	9.59	102		BM 07:06	0.66	---		BM 07:56	0.62	---		BM 08:44	0.73	---	
BM 18:44	0.54	---		PM 12:26	9.75	107		PM 13:15	9.76	107		PM 14:03	9.60	101	
---	---	---		BM 19:36	0.39	---		BM 20:25	0.39	---		BM 21:11	0.56	---	

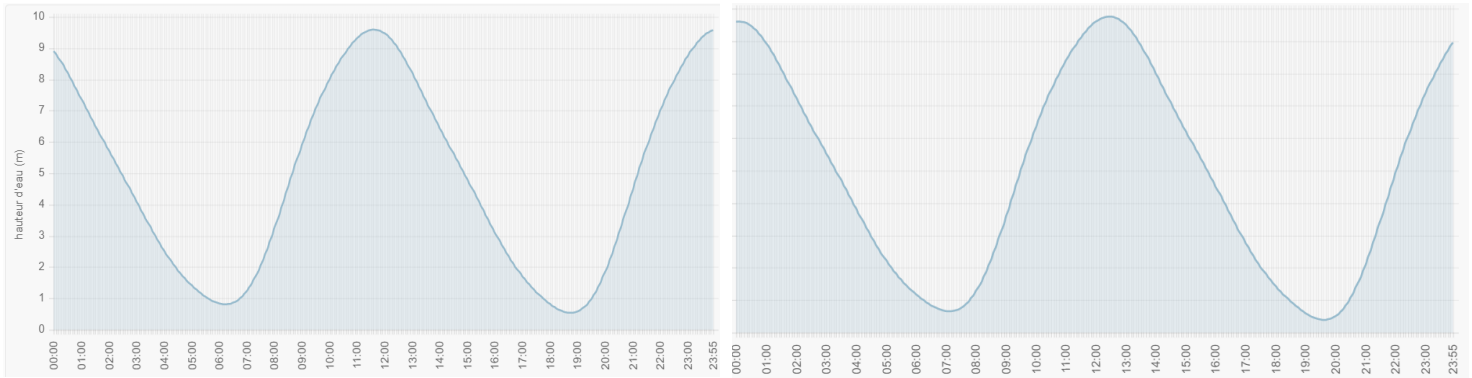


Fig. 56 : Hauteurs de marées lors de la tempête Eleanr de 2018 (Shom).

L'évènement de submersion a eu lieu le 3 janvier. Nous nous concentrerons donc sur les marées hautes du 2 et du 3 janvier 2018, où la première marée haute de la période a eu lieu la nuit du 2 janvier d'environ 21h30 à 3h00. La seconde marée haute a eu lieu le 3 janvier d'environ 9h30 à 15h25.

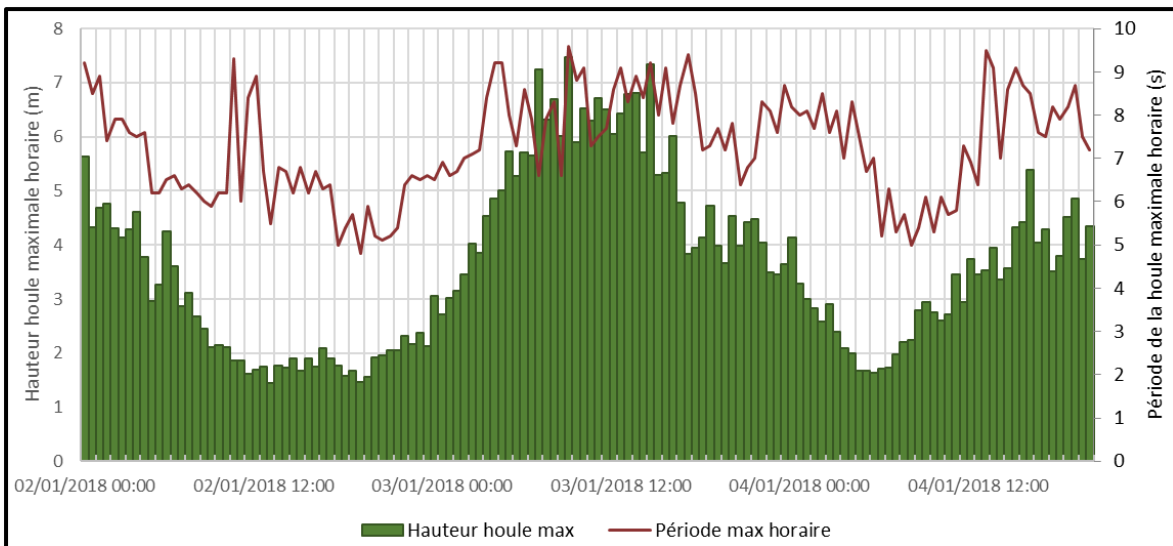


Fig. 57 : Histogramme représentant la houle et sa période durant la tempête Eleanor, 2023.

Comme le montre le graphique ci-dessus, les périodes de marées hautes coïncident avec les hauteurs de houle au large importantes. L'houlologue de Paluel a enregistré une moyenne de houle maximale de 3,07 m avec le passage d'une houle à 4,53 m pour la première marée haute qui nous intéresse. La deuxième marée haute voit une moyenne de houle maximale très élevée, avec une moyenne de 6,29 m avec le passage d'une houle de 7,33 m, ce qui est considérable. Après le passage de ces deux marées à fort coefficient, le niveau de la houle baisse mais reste assez élevé par rapport au niveau habituel puisque la tempête est toujours présente. A partir du 5 mars, la houle baisse fortement pour revenir à des valeurs en dessous de 2 m, voire 1 m.

Les houles de période longue sont celles qui occasionnent le plus de dégâts sur le littoral. En effet, elles génèrent des vagues épaisses qui se projettent violemment sur le littoral. Ici en l'occurrence, les périodes pour une houle sont assez élevées, indicateur de la violence de la tempête, surtout lors des deux phases de marée hautes. La première enregistre une période moyenne de houle maximale horaire de 6,88s et la deuxième enregistre une valeur de 8,38s. Ces périodes sont plus longues que la normale puisque la période moyenne annuelle est de 5,66s en 2018.

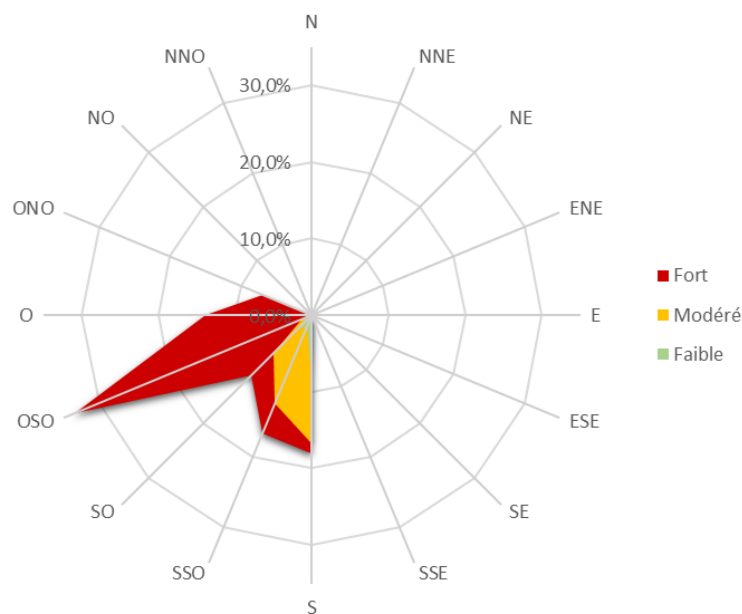


Fig. 58 : Rose des vents horaire de la tempête Eleanor, 2023.

Eleanor s'accompagne de vents forts provenant en majorité d'Ouest-sud-ouest et du Sud-sud-ouest, avec des moyennes allant de 41,6 à 46,6 km/h. Des vents plus modérés ont aussi frappé le littoral, avec des moyennes allant de 18,7 à 25,7 km/h. Le vent moyen est d'environ 33 km/h lors des 4 jours de tempête. Le jour de la submersion dans la commune, le vent passe à environ 47km/h de moyenne de vent lors de la pleine mer du 3 janvier, avec des rafales atteignant 137 km/h lors de la journée de submersion.

Toutes ces statistiques montrent l'ampleur de la tempête Eleanor et sont importants à prendre en compte pour comprendre la violence de cet événement sur le littoral.



Fig. 59 : Inondation de la rue du front de mer, J. Favrel, 2018.



Fig. 60 : Blocage de la rue du front de mer, Les Informations dieppoises, 2018.



Fig. 61 : Fissures de la digue route de Quiberville, J. FAVREL, 2018.

3.2.3 - Tempête Ciara

La dernière tempête recensée ayant provoqué une inondation par la mer dans la commune, nommée Ciara, s'est passée le 9 février 2020, avec un délai total de 3 jours du 9 au 11 février 2020. Encore une fois, c'est la route de la mer qui a été inondée (ROL).

Cette tempête de 3 jours a atteint son plus haut coefficient de marée le 11 février à 108. Lors de l'événement de submersion à Quiberville le 9 février 2020, le coefficient de marée était de 93, lors de la première marée haute de 8h30 à 15h30 environ. La deuxième marée haute a eu lieu le lendemain dans la nuit de 21h à 3h30 environ. Le niveau marin extrême s'est élevé à 9,12m observé. Lors de cet événement, la mer a subi une décote de 0,09 m.

Dimanche 9 février 2020				Lundi 10 février 2020			Mardi 11 février 2020				
	Heure	Hauteur	Coefficient		Heure	Hauteur	Coefficient		Heure	Hauteur	Coefficient
BM	06:22	1.09	---	PM	00:15	9.33	98	PM	01:00	9.58	106
PM	11:47	9.23	93	BM	07:13	0.78	---	BM	08:01	0.57	---
BM	18:53	0.70	---	PM	12:34	9.55	103	PM	13:19	9.73	108
---	---	---	---	BM	19:42	0.41	---	BM	20:28	0.26	---

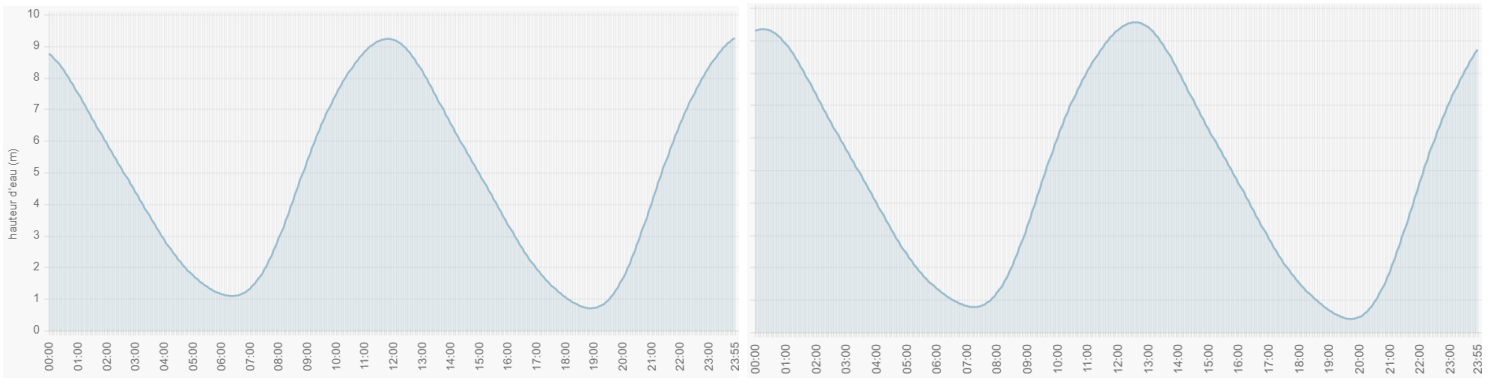


Fig. 62 : Hauteurs de marées lors de la tempête Ciara de 2020.

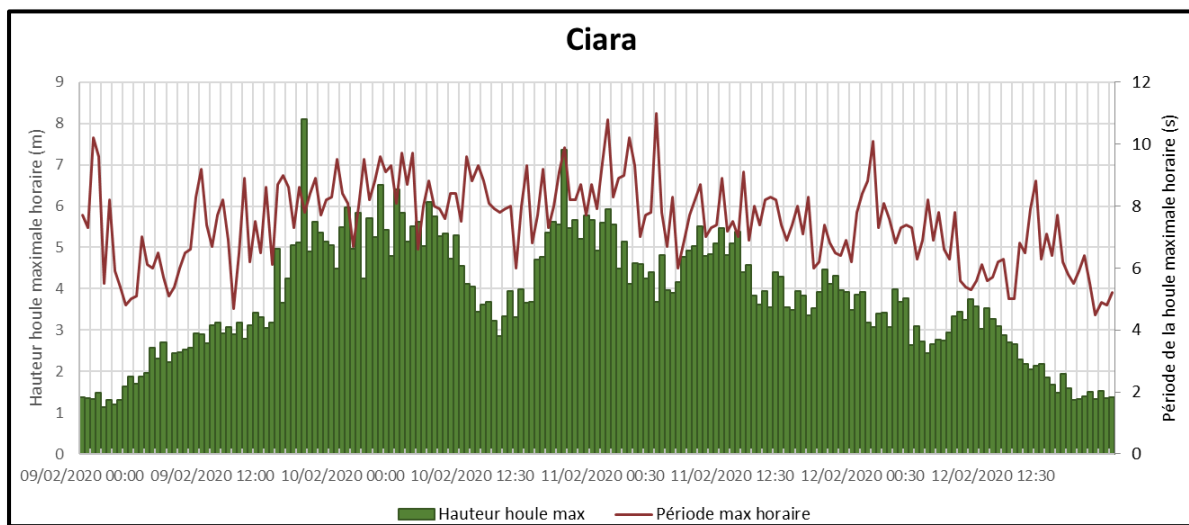


Fig. 63 : Histogramme représentant la houle et sa période durant la tempête Ciara, 2023.

Durant toute la période de la tempête, la houle au large est en moyenne de 3,76 m. Lors de la première période de marée haute, la moyenne de la houle baisse de pratiquement 1 m au large, atteignant en moyenne 2,85 m avec le passage d'une houle à 3,2 m. La deuxième phase de marée haute voit une moyenne de houle plus élevée que la moyenne générale, avec 5,39 m de houle et le paysage d'une houle à 7,37 m.

Concernant la période sur ces deux marées hautes, celle-ci est élevée. En effet, la première marée haute enregistre une période moyenne de houle maximale horaire de 7,01s et la deuxième de 8,94s au large, avec une période maximale respectivement de 9,2s et 10,8s. Ces périodes sont bien plus élevées que la période moyenne de houle maximale horaire annuelle qui s'élève à 5,77s.

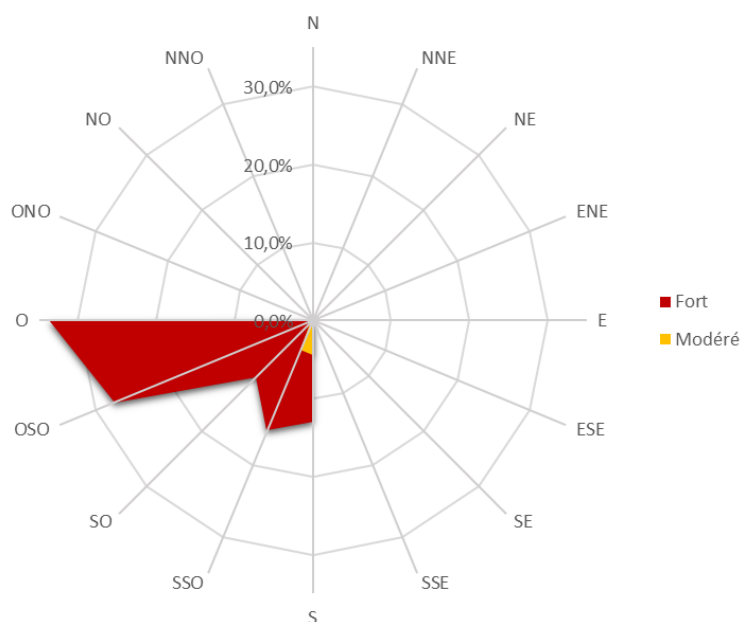


Fig. 64 : Rose des vents de la tempête Ciara, 2023

Ici, Ciara a généré des vents forts venant d'Ouest et Ouest-sud-ouest, avec des moyennes allant de 41 à 48,7 km/h. On retrouve très peu de vents modérés venant du Sud et du Sud-sud-ouest, montrant la force des vents lors de cet évènement, avec une pression moyenne durant la tempête de 1004,7 hPa. Concernant la force du vent, la tempête a été en partie initiée par des vents d'environ 41 km/h de moyenne avec des rafales soudaines et violentes atteignant 106 km/h le jour de la submersion ayant provoqué l'inondation de la digue-route de Quiberville.



Fig. 65 : Inondation de la route de la mer lors de la submersion du 9 février 2020, DDTM76.

Grâce aux photographies, vidéos et commentaires journalistiques réalisés sur place au moment des tempêtes, il est possible de cartographier les zones qui ont été inondées au cours de ces 13 dernières années, rendant l'ampleur des inondations plus compréhensibles.

3.2.4 - Cartographie des zones inondées

La carte ci-après présente le zonage des inondations initiées par les submersions marines ayant eu lieu entre 2011 et 2023.



Fig. 66 : Carte représentant les espaces inondés par les submersions marines à Quiberville survenues entre 2011 et 2023.

En accord avec la carte du zonage des inondations de Quiberville, les espaces inondés entre 2011 et 2023 via des submersions marines concernent le front de mer. C'est la route de la mer et la rue du front de mer qui ont été les plus envahies, provoquant l'interdiction de circuler sur ces voies en raison des fortes vagues et des projections de galets lors des tempêtes. Au total, c'est environ 2,9 hectares inondés sur cet espace, fracturant les ouvrages de défense, abîmant les bâtiments, détériorant le matériel de plage et empêchant la circulation le long de la plage, obligeant un long détour pour franchir la vallée. De plus, le parking du camping et le chemin d'accès au complexe ont été inondés. La rue de la Saône a également été affectée. Ces différentes inondations montrent l'efficacité relative de la digue.

Le talus de terre protégeant le camping a pu empêcher les eaux de progresser plus loin vers la vallée et les bâtiments. La topographie en pente montante dépassé la rue de la mer a su empêcher le parcours de l'eau projetée par les vagues.

3.2.5 - Limites et perspectives d'amélioration

La cartographie est limitée par les constats faits sur place : il y a peu de traces conservées dans la mémoire collective et les quelques photographies ne montrent peut-être pas toutes les zones inondées, il est donc difficile de jauger précisément l'extension spatiale des inondations par submersion, mais cela donne déjà une bonne idée des zones envahies par la mer lors des submersions. Il se peut donc qu'il y ait des photographies supplémentaires.

On repère sur les vidéos la limite des inondations. Toutefois, les photographies/vidéos ne montrent que la route, on remarque rapidement que certaines cours de maisons ont été envahies, mais on ne voit pas tout. La cartographie suivante s'appuie donc sur les informations visuelles et écrites enregistrées lors de ces événements mais peut ne pas afficher certaines zones qui ont été inondées par manque d'informations et/ou d'observation lors de la tempête.

Afin d'améliorer l'inventaire des submersions et avoir une meilleure idée de l'extension spatiale de l'envahissement des paquets de mer, il pourrait être intéressant de recueillir des témoignages auprès des habitants. On pourrait alors obtenir également de nombreuses photos auprès de ces personnes pour délimiter plus finement les espaces inondés, et développer une stratégie d'aménagement adaptée.

3.3 - Cartographie des submersions futures

Le but de cette dernière partie est de localiser les zones qui sont susceptibles d'être atteintes en cas de submersion et de tempête en tenant compte de l'évolution du niveau marin provoqué par le changement climatique. Il convient pour cela de déterminer les facteurs contribuant à l'élévation du niveau marin, et de choisir une tempête de référence pour appliquer les éléments statistiques de celle-ci pour évaluer un événement futur. La donnée LIDAR permettra d'obtenir une carte précise des zones inondables en tenant compte du relief et des ouvrages de défense de la vallée de la Saône.

3.3.1 - Les facteurs contribuant à l'élévation du niveau marin mondial

Du fait de l'élévation du niveau de la mer, les phénomènes exceptionnels tels que les submersions marines seront de plus en plus fréquents et de plus en plus intenses. Deux facteurs principaux, liés à l'augmentation de la température moyenne globale sont responsables de l'augmentation du niveau de la mer :

- **La fonte des glaces** : Les formations glaciaires telles que les inlandsis, la calotte polaire et les glaciers fondent un peu plus chaque année. Ces réserves d'eau immenses se déversent dans l'océan sans que la fonte soit compensée par la venue de l'hiver. Le déséquilibre créé entre écoulement et évaporation entraîne une élévation du niveau marin à long terme. Avec la fonte totale des glaces polaires, le niveau marin pourrait augmenter de 1 à 2m d'ici 2100.
- **La dilatation thermique** : Avec la chaleur, l'eau augmente de volume. A cause de l'augmentation moyenne globale de la température mondiale, l'eau des océans prend plus de place. Ce phénomène est responsable à moitié de l'élévation du niveau marin sur la période 1993-2018, et a contribué à l'élévation de 7cm de l'océan mondial sur cette même période. La partie supérieure de l'océan se réchauffe environ 24 % plus rapidement qu'il y a quelques décennies, et ce taux devrait augmenter à l'avenir (A. BORUNDA, 2022).

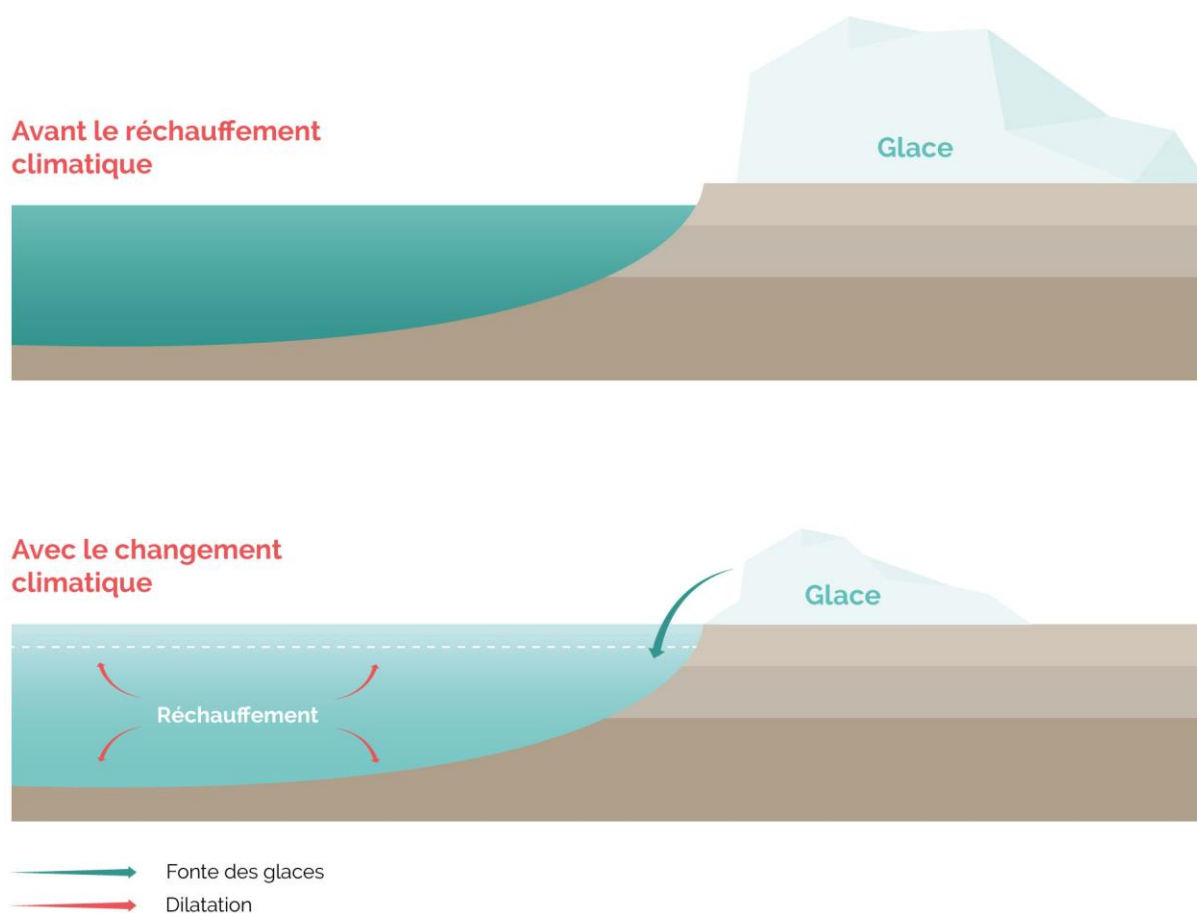


Fig. 67 : Schéma des deux facteurs principaux de l'élévation du niveau marin mondial, *Oceancampus*.

3.3.2 - La donnée LIDAR

Le LIDAR (pour Light Detection And Ranging), est une technique de télédétection utilisant le laser pour modéliser la surface terrestre. C'est un système de projection laser aéroporté qui permet de distinguer les anomalies topographiques. Ce télémètre laser est composé d'un émetteur (laser) et d'un récepteur.

Embarqué par avion, le LIDAR est privilégié sur les espaces végétalisés, pour distinguer les structures sous la canopée, invisibles en vision directe depuis le ciel. Le LIDAR balaie la zone d'étude sous forme d'impulsions laser. Lorsque le laser touche un élément physique (le sol, un arbre, une plante...), la lumière remonte jusqu'au récepteur, qui calcule le temps qui s'est écoulé depuis l'émission du laser et crée un point géoréférencé. A la fin du balayage, le nuage de points obtenu est traité : on retire les points en hauteur (qui ont touchés la végétation) pour n'obtenir que le relief, avec une précision de 5 à 10 cm. Enfin, il ne reste qu'à distinguer les éléments naturels de ceux de l'activité humaine, comme des chemins ou des constructions.

Le LIDAR permet de créer des modèles numériques de terrain (MNT) du relief avec une grande précision. Il est important de ne garder que les "derniers retours" pour créer le nuage de points pour avoir le minimum d'éléments qui recouvrent le sol (voitures, végétation, ...), ce qui fausserait le MNT (DEMANGE, 2021).

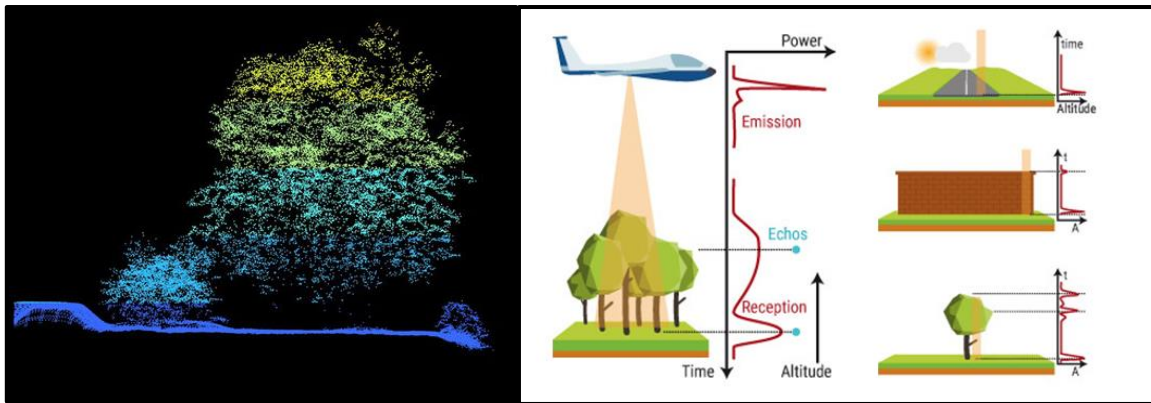


Fig. 68 : Exemple d'un nuage de points obtenu par le LIDAR, nicolas-blanchatrd.fr, O. GILLET (à gauche) et un schéma de fonctionnement du système LIDAR, Yellow Scan (à droite).

La donnée LIDAR utilisée dans ce mémoire, celle du ROL, est traitée, on peut donc directement utiliser le MNT tel quel. L'avantage de cette donnée est qu'elle est très précise, ce qui va permettre aux traitements effectués ultérieurement d'avoir une base solide et fiable pour cartographier les zones inondables dans le futur.



Fig. 69 : MNT de la zone de travail des submersions marines (ROL), utilisation de l'ombrage, G. DELSIGNE, 2023.

Ce MNT va être utilisé pour la réalisation de la carte des zones inondables par submersion marine d'ici 2050 et 2100 selon les scénarios du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) : les RCP (Representative Concentration Pathway) 2.6 et RCP 8.5. Pour simuler l'évolution du climat, on émet des hypothèses sur l'évolution de la concentration des gaz à effet de serre (METEO-FRANCE, 2020) via des scénarios plus ou moins graves. Les scénarios RCP sont traduits en forçage radiatif : c'est la modification du bilan radiatif de la Terre (énergie reçue et perdue de la planète) exprimé en watts par m^2 (W/m^2), plus la valeur du forçage est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe (METEO-FRANCE, 2020).

3.3.3 - Les scénarios du GIEC comme référence

Le rapport spécial du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat sur l'océan et la cryosphère dans un climat en évolution a présenté des estimations de l'élévation du niveau marin en fonction de ces scénarios. Deux scénarios sont possibles pour évaluer l'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2100 :

- **RCP 2.6** : Il correspond à un forçage de $2,6 \text{ W/m}^2$, c'est le scénario le plus optimiste. En effet, il intègre les effets d'une politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre susceptible de limiter le réchauffement planétaire à 2°C en 2100. Ce scénario estime l'élévation du niveau marin à $+0,43 \text{ m}$ d'ici 2050 et $+0,84 \text{ m}$ d'ici 2100 ;
- **RCP 8.5** : Il correspond à un forçage de $8,5 \text{ W/m}^2$, c'est le scénario le plus pessimiste, sans politique climatique mise en place, les émissions de gaz à effet de serre continueront d'augmenter au rythme actuel (ONERC, 2015). Ce scénario estime l'élévation du niveau marin à $+0,59 \text{ m}$ d'ici 2050 et $+1,10 \text{ m}$ d'ici 2100.

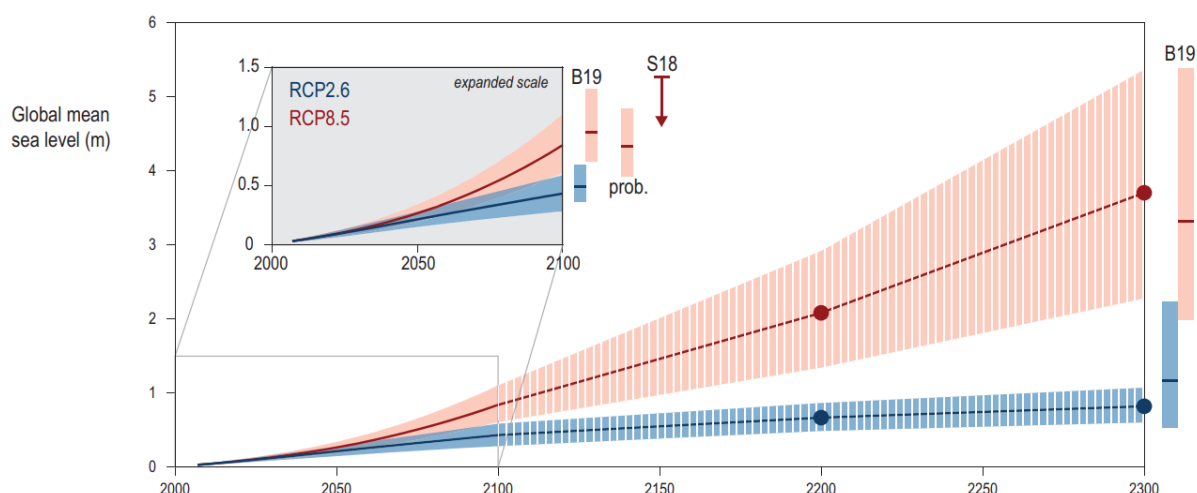


Fig. 70 : Courbe issue du SROCC, IPCC 2019.

On remarque sur cette courbe que le phénomène d'élévation du niveau marin est déjà lancé et que ce phénomène va s'accélérer dans les prochaines décennies, mais la distinction des deux scénarios se fera dans quelques années. L'immense masse d'eau que représente l'océan lui confère une dilatation thermique lente, et le processus de fonte des glaces, même s'il est toujours trop rapide, n'est pas terminé. Ainsi, le réchauffement déjà lancé depuis la révolution industrielle, se répercute des années plus tard, c'est pour cela qu'on remarque une séparation nette de l'élévation du niveau marin selon les deux scénarios RCP à partir de 2050. À titre d'exemple, sur la période 1880-2021, le niveau marin s'est élevé de plus de 20 cm, et cette tendance ne semble pas ralentir.

Le choix de la tempête de référence a été la tempête Eleanor ayant eu lieu du 2 au 4 janvier 2018 (METEO-FRANCE). En effet, cette violente tempête a occasionné une inondation par la mer et des dégâts sur la digue de Quiberville, notamment des fissurations, entraînant des fuites. Des galets ont été également projetés en quantité au-dessus de la digue atteignant la route. Cette dernière a été fermée pour prévenir d'éventuels dommages humains le temps de la tempête.

Pour réaliser une carte des zones susceptibles d'être inondées avec l'élévation du niveau marin d'ici 2050 et 2100, il faut tout d'abord calculer le bon niveau du bon 0 de l'eau. En effet, les données marines du SHOM sont données par rapport au zéro hydrographique, mais le MNT LIDAR se réfère au 0 de l'IGN, situé à **4,45 m** au-dessus du zéro hydrographique pour le port de Dieppe, situé le plus proche de la zone d'étude, ce sera donc cette référence qui sera utilisée pour ajuster les données du SHOM et de l'IGN.

Voici un récapitulatif des données utilisées et pour la carte et le détail des calculs :

- Corriger le 0 hydrographique de l'IGN : **4.45 m**
- La hauteur de marée : le franchissement a eu lieu le 3 janvier donc on sélectionne le plus fort coefficient de marée évalué à 107 avec 10,2 m de niveau extrême observé en données validées en temps différé. À cela, on soustrait au 0 corrigé donc $10.201 - 4.45 = +5.751$ m ;
- Les valeurs établies par le GIEC : RCP 2.6.

On obtient les hauteurs de référence suivantes :

- RCP 2.6 (optimiste) :
 - 2050 : $5,751 + 0,43 = 6,181$ m ;
 - 2100 : $5,751 + 0,84 = 6,591$ m.
- RCP 8.5 (pessimiste) :
 - 2050 : $5,751 + 0,59 = 6,341$ m ;
 - 2100 : $5,751 + 1,10 = 6,851$ m.

3.3.4 - Le sous dimensionnement de la digue à prendre en compte

La carte va se baser sur le rapport entre la topographie et les hauteurs d'eau, la simulation des zones inondables peut être compromise par les ouvrages de défenses (ici la digue). Toutefois, ce serait le cas si l'ouvrage de défense est à 100% efficace, c'est-à-dire qu'il ne laisse passer aucun paquet d'eau. Or, nous avons vu par le recensement des submersions dans la commune de Quiberville que ces ouvrages ne sont pas toujours efficaces, inondant les zones habitées. La cartographie est donc possible, et même nécessaire pour pouvoir anticiper les submersions marines qui tendront à être plus envahissantes et plus fréquentes avec l'augmentation du niveau marin global. Bien sûr, cette cartographie se base sur la situation actuelle, donc dans l'optique qu'aucun ouvrage de défense ne sera mis en place d'ici 2050 et 2100 pour prévenir ce phénomène.

3.3.5 - Cartographie prospective

Les cartes ci-après montrent les estimations des zones susceptibles d'être inondées lors d'un épisode de tempête ou de submersion marine aux échéances 2050 et 2100 selon les deux scénarios du GIEC choisis.

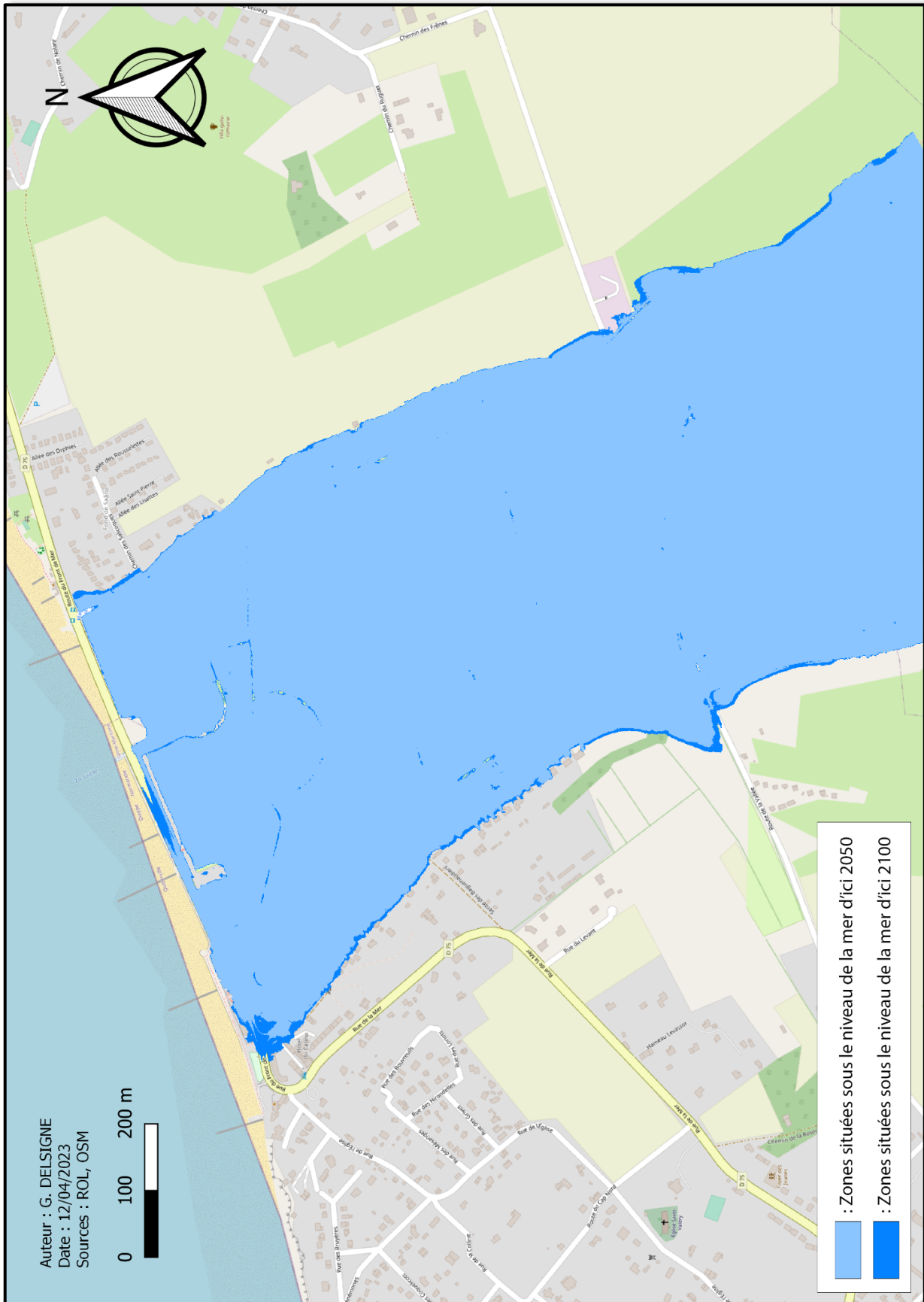


Fig. 71 : Zones situées sous le niveau de la mer en 2050 et en 2100 selon le scénario RCP 2.6 du GIEC.



Fig. 72 : Zones situées sous le niveau de la mer en 2050 et en 2100 selon le scénario RCP 8.5 du GIEC.

Ces cartes montrent que la vallée de la Saône est en position défavorable par rapport à la montée du niveau marin et au risque de submersion marine : dans tous les scénarios, la vallée de la Saône sera inondée avec la montée des eaux, entraînant un recul du fleuve. Cet espace, zone de pâturage et agricole, ne sera plus exploitable. Les espaces qui diffèrent sont les bords de la vallée, qui seront plus ou moins envahis. Globalement, on retrouve des zones déjà inondées par le passé par des submersions marines telles que la route longeant le littoral, le camping et une partie de la vallée au niveau de l'exutoire du fleuve. Le domaine public tel que la voirie, les espaces de parking sont menacés, mais les conséquences pourraient être d'autant plus graves puisque de l'immobilier se trouve dans les zones à risque, où se trouvent des activités économiques et humaines.

Le reste de la commune, plus en hauteur sur les versants de la vallée, ne sont pas vulnérables à la montée du niveau marin.

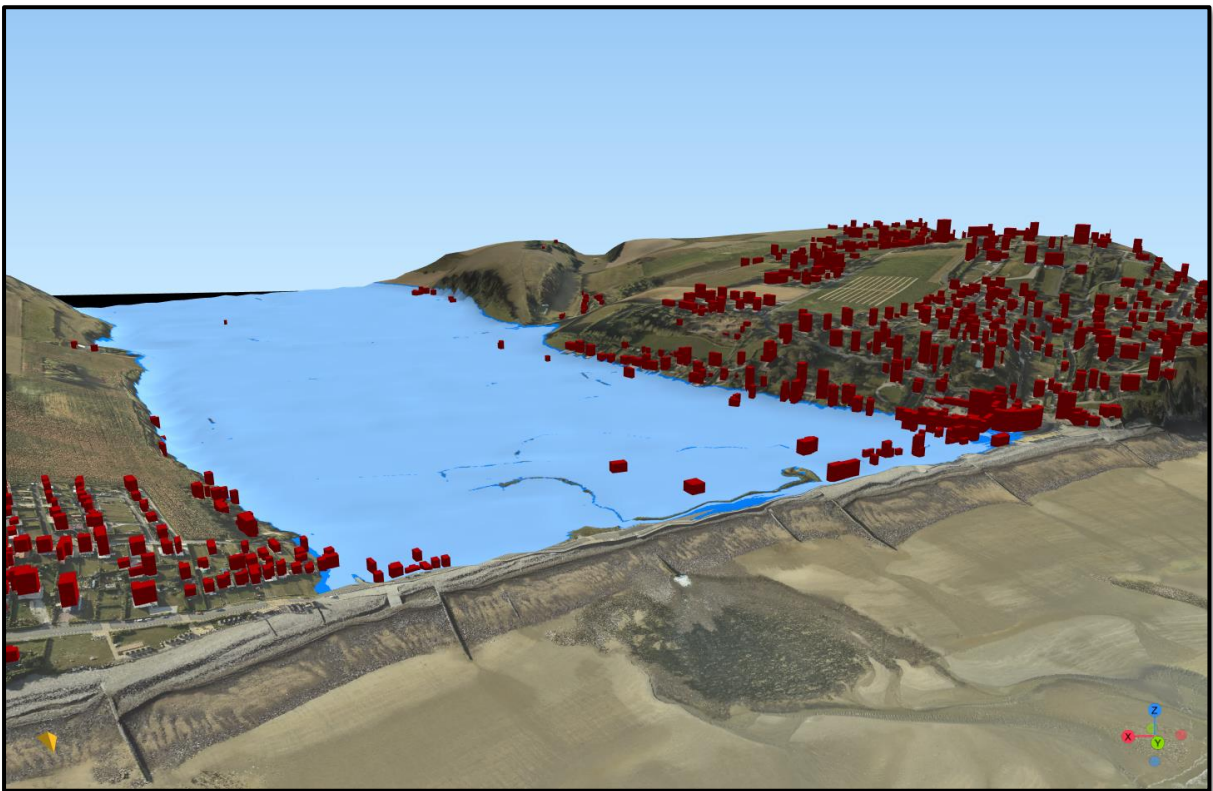


Fig. 73 : Modèle 3D mettant en évidence les zones sensibles inondées selon le scénario 8.5 avec exagération des hauteurs pour un meilleur rendu visuel, G. DELSIGNE, 2023.

Pour faciliter l'analyse de ces cartes, les secteurs les plus sensibles ont été séparés en 3 blocs : A à l'ouest, B le long du front de mer et C à l'est.

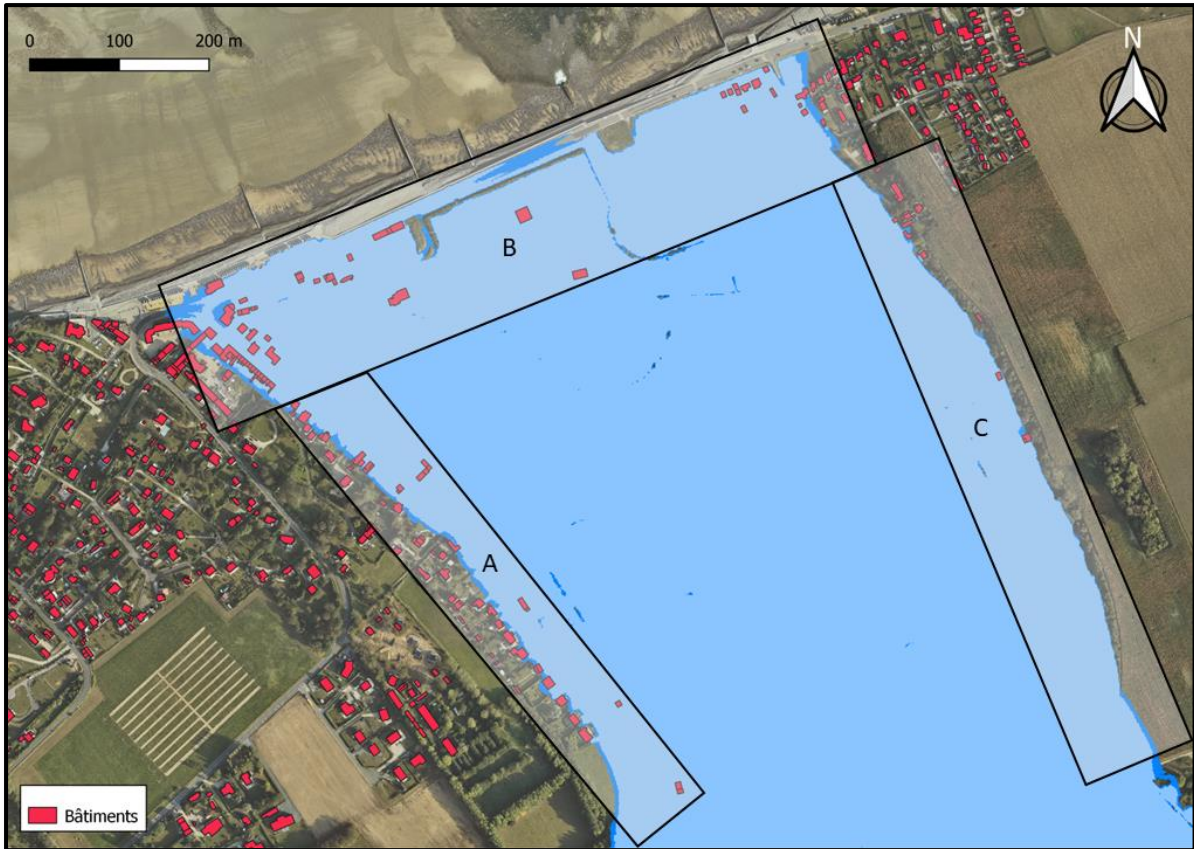


Fig. 74 : Carte mettant en évidence les zones sensibles inondées selon le scénario 8.5, G. DELSIGNE, 2023.

L'espace le plus vulnérable est celui à proximité immédiate de la mer. Zone la plus touristique de la commune, la montée des eaux menace des espaces de loisirs comme le terrain de tennis ou ceux de pétanque, laissant peu de plage à l'activité touristique ou la pratique de la plage face aux falaises bloquant le passage. De même, les maisons de vacances le long de la route de la mer seront envahies.

L'élévation du niveau marin menace de nombreux commerces comme des restaurants et boutiques de souvenirs, mais aussi des bâtiments publics comme les cabines de plage et l'office du tourisme (Zone B) situé rue de la Saâne, qui ne sera plus praticable, laissant de nombreuses habitations **les pieds dans l'eau** sur la **rive** ouest de la rue. Sur la **rive** est, certaines habitations ne seront plus accessibles (Zone A).

Enfin, la partie est de la vallée (Zone C), sera touchée par les eaux. Le chemin de la Saâne sera impraticable, rendant l'accès aux quelques habitations impossible, et menaçant la station d'épuration plus au sud.

Dans l'ensemble, l'élévation du niveau de la mer touchera l'ensemble du fond de vallée, essentiellement agricole. Les bords de versants seront affectés par l'élévation du niveau marin, submergeant les routes et habitations les plus au bord de la vallée.

Toute la partie du front de mer va disparaître, affectant les activités touristiques et économiques de la commune car le reste son espace est dédié à de l'habitation.

Face aux inondations récurrentes, la commune a décidé de réaliser des aménagements pour laisser entrer la mer dans la vallée : suppression de la digue, agrandissement de l'exutoire de la Saône sur 10 m, délocalisation du camping.

3.3.6 – Limites et biais de cette recherche

Ce travail comporte plusieurs biais et limites. En effet, cette cartographie reste une projection et non une vérité absolue. Malgré tous les paramètres de la tempête de référence étudiée, il n'a pas été possible de prendre en compte la houle et le vent puisque que la carte réalisée est statique. De ce fait, la carte présentée est une carte des espaces situés sous le niveau marin à un instant T (en cas de renouvellement de la tempête Eleanor) en prenant en compte les scénarios du GIEC.

Toutefois sur le long terme, c'est toute la vallée qui risque d'être submergée définitivement, et la commune s'y prépare : le camping a été déménagé plus loin à 700 m de la mer entre la rue de la Saône et la rue du Levant. De plus, l'objectif actuel de la commune est de laisser entrer la mer dans la vallée en supprimant les ouvrages de défense, mais uniquement pour les cas de grandes marées et tempêtes. Cette méthode part du principe que la mer va se retirer pour replacer la vallée en tant qu'espace naturel et d'interaction terre/mer.

3.4 - Conclusion de la partie

Malgré les limites, cette étude a permis de compléter les données relatives à la commune de Quiberville, et de réaliser une projection de ce que pourrait être le territoire de demain. Nous avons vu dans cette partie que la fréquence du nombre de submersions marines dans la commune de Quiberville a un peu augmentée depuis le dernier inventaire. Les zones inondées sont toujours les mêmes espaces, fragilisant les ouvrages de défense côtière, bloquant la voirie et représentant un danger humain avec la projection de galets derrière la digue-route. De même, nous avons vu qu'il ne faut pas nécessairement les mêmes paramètres de tempêtes pour qu'il y ait submersion : l'inondation par la mer dépend donc de l'intensité des différents facteurs et de la proportionnalité de ceux-ci.

Le territoire de Quiberville est vulnérable à l'élévation du niveau de la mer et est voué à voir sa vallée être envahie par les submersions futures, causant une perte de terres agricoles et de terrains publics et privés. Au-delà du risque matériel, l'envahissement des eaux dans la commune représente un danger plus important et majeur : l'enjeu humain...

CONCLUSION.

Comme vu tout au long de ce mémoire, le littoral représente un enjeu majeur pour le territoire national. Espace attractif pour différentes activités, qu'elles soient économiques, touristiques ou tout simplement pour son cadre de vie, la combinaison du changement climatique et les dynamiques physiques locales menacent ce territoire riche en biodiversité, en qualité paysagère et à fort enjeu humain. L'étude approfondie du recul des falaises et des submersions marines dans les communes de Sainte-Marguerite-sur-Mer et Quiberville met en lumière le besoin de continuer d'agir et de prévenir face à ces phénomènes préoccupants. L'analyse de ceux-ci souligne l'importance de comprendre les spécificités locales pour une gestion efficace des zones côtières.

Par ailleurs, la présence de la vallée de la Saône ajoute une dimension supplémentaire aux enjeux des submersions marines. Les phénomènes de submersion, liés à l'élévation du niveau de la mer et aux conditions météorologiques extrêmes, peuvent entraîner des inondations endommageant cet espace agricole et touristique. Il est donc important de prendre en compte cette réalité locale dans la planification de mesures de prévention, de protection et d'adaptation, ce qui est déjà le cas dans le cadre de l'élaboration du PPRLi et les stratégies de développement de la commune.

Le déroulé de ce travail a permis de développer des compétences à travers plusieurs outils informatiques qui ont été utilisés tout au long de ce mémoire, que ce soit dans le traitement de nuages de points ou d'approfondissement d'outils de SIG à partir de plusieurs types de données (LIDAR, MNT, IGN, DSAS, GPS...), et ce dans les trois parties.

Après avoir vu en première partie le cadre local de la zone d'étude, l'intérêt d'étudier ce secteur, et les différents facteurs qui interagissent avec la zone d'étude, nous avons pu quantifier les vitesses d'érosion d'un pan de falaise de Sainte-Marguerite-sur-Mer sur un pas de temps long, et constaté que cette partie de la falaise recule rapidement, et représente un enjeu important pour les communautés locales. L'épi construit dans les années 1960 a toutefois permis de ralentir le processus d'érosion en passant d'une moyenne de 0,7 m/an à 0,49 m/an, mais ce recul reste toujours important et une menace pour la commune avec des habitations très proches de la falaise. L'étude à pas de temps court a permis d'observer des effondrements, le recul de la falaise et de quantifier son volume perdu par traitement photogrammétrique. Cela a permis d'ajouter une donnée supplémentaire pour confirmer la vitesse de recul moyenne à pas de temps long.

Enfin, s'en est suivi un inventaire des submersions marines à Quiberville et l'analyse de leurs facteurs. Le phénomène n'est pas nouveau sur le territoire et le travail d'archive réalisé a permis de compléter les données déjà récoltées pour, plus tard, poursuivre l'analyse tendancielle de la fréquence et de l'intensité de ces inondations par la mer.

Cette dernière décennie a vu passer 3 submersions marines, augmentant la fréquence décennale jusqu'alors d'environ 1,7 submersion par décennie. Une zone sujette aux inondations s'est révélée après la spatialisation des inondations : la route littorale de la commune.

Ce travail a permis de servir de base à l'élaboration d'une carte des zones submersibles dans le futur car le changement climatique, provoquant l'élévation du niveau marin et l'augmentation de la fréquence des tempêtes, menace directement un grand espace de Quiberville.

Les différents résultats de ce mémoire peuvent être interprétés comme une mise en garde de la fragilité des littoraux et de sa vulnérabilité face à l'érosion et aux submersions, mais aussi et surtout face au changement climatique, initiateur d'évènements de plus en plus violents et réguliers causant de nombreux dommages à l'écosystème local et aux activités humaines.

La recherche scientifique continue et, combinée aux avancées technologiques, permettra d'améliorer notre compréhension des dynamiques côtières et de développer des modèles prédictifs plus précis. Cela permettra de mieux anticiper les impacts futurs du recul des falaises et des submersions marines, et d'élaborer des stratégies d'adaptation appropriées pour s'adapter à ces changements et prendre des décisions le plus tôt possible, tant pour l'adaptation des activités littorales que pour la préservation de nos milieux côtiers, voués petit à petit à perdre du terrain et de sa valeur paysagère actuelle.

En bref, la gestion du recul des falaises et la prévention des submersions marines requièrent une collaboration multidisciplinaire, des politiques cohérentes et une prise de conscience collective.

BIBLIOGRAPHIE ET SITES WEB CONSULTÉS

Articles scientifiques et rapports

- COOKE, R. U. et SMALLEY, I. J., 1968. *Salt Weathering in Deserts*. Nature, 220, (p. 1226-1227).
- COSTA, S., DELAHAYE, D., FREIRE-DIAZ, S., DI NOCERA, L., DAVIDSON, R. et PLESSIS, E., 2004. *Quantification of the Normandy and Picardy chalk cliff retreat by photogrammetric analysis*. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 20, (p. 139-148).
- DEMANGEOT, J., 2009. 16. *L'océan mondial*. Les milieux « naturels » du globe (p. 195-208). Armand Colin.
- DUPERRET, A., GENTER, A., MARTINEZ, A. et MORTIMORE, R. N., 2004. *Coastal chalk cliff instability in NW France: role of lithology, fracture pattern and rainfall*. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 20, (p. 33-55).
- DUPERRET, A., GENTER, A., MORTIMORE, R. N., DELACOURT, B. et POMERAI, M. R. D., 2002. *Coastal Rock Cliff Erosion by Collapse at Puys, France: The Role of Impervious Marl Seams within Chalk of NW Europe*. Journal of Coastal Research, 18, (p. 52-61).
- DUPERRET, A., TAIBI, S., MORTIMORE, R. N. et DAIGNEAULT, M., 2005. *Effect of groundwater and sea weathering cycles on the strength of chalk rock from unstable coastal cliffs of NW France*. Engineering Geology, 78, (p. 321-343).
- DURAND, P., 2000. *Approche méthodologique pour l'analyse des littoraux sableux par photo - interprétation. Exemple des plages situées entre l'Aude et l'Hérault (Languedoc, France)*. Photo-Interprétation, n°1-2, (p.3-18).
- EMERY, K. O. et KUHN, G., 1982. *Sea cliffs: Their processes, profiles, and classification*. GSA Bulletin, 93, (p. 644-654).
- GILHAM, J., BARLOW, J. et MOORE, R., 2019. *Detection and analysis of mass wasting events in chalk sea cliffs using UAV photogrammetry*. Engineering Geology, 250, (p. 101-112).
- HENAFF, A., LAGEAT, Y., COSTA, S. et PLESSIS, E., 2002. *Le recul des falaises crayeuses du Pays de Caux : détermination des processus d'érosion et quantification des rythmes d'évolution*. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 8, (p. 107-118).
- LAGUE, D., BRODU, N. et LEROUX, J., 2013. *Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 82, (p. 10-26).

- LETORTU, P., COSTA, S., BENSASIS, A., CADOR, J.-M. et QUENOL, H., 2014. *Vitesses et modalités de recul des falaises crayeuses de Haute-Normandie (France) : méthodologie et variabilité du recul*. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 20, (p. 133-144).
- LETORTU, P., COSTA, S., CANTAT, O. et PLANCHON, O., 2012. *Conditions météo-marines responsables des inondations par la mer en Manche orientale française*. Journées de l'hydraulique, 34, (p. 1-8).
- MOORE, L. J., 2000. *Shoreline Mapping Techniques*. Journal of Coastal Research, 16, (p. 111-124).
- PÉRÈS, J.-M. *Océan et Mers (Eaux marines) - Mouvements*. Encyclopædia Universalis.
- PINOT, J.-P. *ACCUMULATIONS (géologie) - Accumulations marines*. Encyclopædia Universalis.
- PEUZIAT, B., COSTA, S. et TESSIER, B., 2021. *Évolution historique contemporaine de l'ensablement de la plateforme d'érosion du littoral à falaises de Seine-Maritime*. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 27, (p. 189-204).
- STEPHENSON, W.J., DICKSON, M.E., et TRENHAILE, A.S., 2013. Rock Coasts. Dans *Treatise on Geomorphology*, vol. 10 (p. 289-307).
- TELLEZ-ARENAS, A., Quique, R., BOULAHYA, F., Le COZANNET, G., PARIS, F., LE ROY, S., DUPROS, F. et ROBIDA, F., 2018. Scalable Interactive Platform for Geographic Evaluation of Sea-Level Rise Impact Combining High-Performance Computing and WebGIS Client. Dans S. Serrao-Neumann, A. Coudrain et L. Coulter (dir.), *Communicating Climate Change Information for Decision-Making* (p. 163-175). Springer International Publishing.
- THOMAS, A., 2016. *L'évolution des falaises crayeuses de Haute Normandie, Analyse sous CloudCompare des nuages de points issus de photogrammétrie sur deux secteurs : Le Petit-Ailly et Le Puy*.
- VEYRET, Y., 2004. *Géographie des risques naturels en France, de l'aléa à la gestion*, Hatier.
- YOUNG, A. P., FLICK, R. E., GUTIERREZ, R. et GUZA, R. T., 2009. *Comparison of short-term seacliff retreat measurement methods in Del Mar, California*. Geomorphology, 112, (p. 318-323).

Thèses

BRUNEL, C., 2010. *Évolution séculaire de l'avant côte de la méditerranée Française, impact de l'élévation du niveau de la mer et des tempêtes*, Université de Provence - Aix-Marseille I. 471p.

COSTA, S., 1997. *Dynamique littorale et risques naturels, L'impact des aménagements, des variations du niveau marin et des modifications climatiques entre la baie de Seine et la baie de Somme*, Université Paris-Sorbonne. 343p.

DUGUET, T., 2019. *Le recul des falaises de craie de Normandie à l'échelle du Quaternaire, par approche terre-mer*, Université Normandie. 241p.

LETORTU, P., 2013. *Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits*, Université Caen Normandie. 415p.

PREMAILLON, M., 2018. *Hiérarchisation des facteurs d'érosion des falaises côtières du site au globe*, Université Toulouse III Paul Sabatier. 261p.

Mémoires de recherche

DEMANGE, M., 2021. *Dynamique et évolution du trait de côte de la baie de Saint-Vaast-La-Hougue entre 1947 et 2100. Étude diachronique, contemporaine et prospective ; utilisation des outils SIG – informatiques et de laboratoire*, Université Caen Normandie, 185p.

MESNAGE, C., 2021. *Étude de la vulnérabilité de l'agriculture manchoise face aux risques de débordement de nappe et de submersion marine dans un contexte de changement climatique*, Université Caen Normandie, 198p.

Organismes nationaux et internationaux

CANDHIS. *Détail des paramètres d'états de mer*.

CANTAT, O., LAIGNEL, B., NOUCAEUR, Z. et COSTA, S. *Changement climatique et Aléas météorologiques*. GIEC Normand.

CEREMA. *Adapter les territoires littoraux au changement climatique : un Petit Essentiel du Cerema*.

CENTRE D'INFORMATION SUR L'EAU., 2020. *Tout savoir sur les marées*.

CEREMA., 2018 *Etude sur l'érosion côtière en aval des ouvrages majeurs en Seine Maritime*.

CONSERVATOIRE DU LITTORAL., 2022 *Projet territorial de la basse vallée de la Saône (Seine-Maritime).*

DREAL NORMANDIE., 2022. *Les caractéristiques du climat en Normandie.*

GLOBALCHANGE.GOV. *USGCRP Indicator Details.*

INSEE., 2023. *Dossier complet – Commune de Sainte-Marguerite-sur-Mer (76605).*

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC)., 2022. *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (1^{re} éd.).* Cambridge University Press.

IPCC, 2019: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.* Summary for Policymakers.

LYNCH, K. W. and P. *New study finds sea level rise accelerating.* Climate Change: Vital Signs of the Planet.

METEO-FRANCE. *Changement climatique : les scénarios du Giec.*

METEO-FRANCE. *Le climat en France métropolitaine.*

MINISTERES ÉCOLOGIE ÉNERGIE TERRITOIRES. *Adaptation des territoires aux évolutions du littoral.*

MINISTERES ÉCOLOGIE ÉNERGIE TERRITOIRES. *Loi relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral.*

NOTRE-ENVIRONNEMENT.GOUV.FR., 2019. *Densité de population des communes littorales en 2014 et évolution depuis 1962.*

NOVOTNÝ, J., 2013. *Varnes landslide classification.* Addis Ababa University, Ethiopia.

PORTAIL DU RESEAU NATIONAL DES OBSERVATOIRES DU TRAIT DE COTE., 2022. *Chiffres clés.*

PORTAIL DU RESEAU NATIONAL DES OBSERVATOIRES DU TRAIT DE COTE., 2019. *Qu'est-ce que le trait de côte ?*

SANDRE., 2017. *La saane - Cours d'eau selon la version Carthage 2017.*

SHOM. *Formation et certification des hydrographes.*

SHOM., 2022. *Références Altimétriques Maritimes, Ports de France métropolitaine et d'outre-mer.*

Articles de revue scientifiques

IRMA GRENOBLE., 2021. *RN 4 – Risques littoraux : recul du trait de côte, submersion marine, avancée dunaire – Mémento du maire et des élus locaux.*

NATGEOFRANCE., 2022. *Élévation du niveau de la mer : les chiffres clefs.* National Geographic Environnement.

NATGEOFRANCE., 2022. *Tout comprendre sur : le réchauffement des océans.* National Geographic Environnement.

Presse et données

FRANCE 24. *Montée des eaux : à Quiberville, en Normandie, le pari de laisser entrer la mer.,* 29 octobre 2021.

METEOCIEL. *Observations Dieppe (76) - données météo de la station - Tableaux horaires en temps réel.*

METEOCIEL. *Normales et records pour Dieppe (76).*

Sites web consultés

BRGM.fr
Cambridge.org
Cairn.info
Candhis.cerema.fr
Cerema.fr
Cieau.com
Conservatoire-du-littoral.fr
Climate.nasa.gov
Cloudcompare.org
Data.shom.fr
DREAL Normandie
Dynalit.fr
Ecologie.gouv.fr
Eaufrance.fr
France24.com
Geoconfluences.ens-lyon.fr
Geolittoral.developpement-durable.gouv.fr
Georisques.gouv.fr
Geoscienceworld.org
Globalchange.gov
IGN.fr
Insee.fr
Infoterre.brgm.fr
Irma-grenoble.com
Journals.openedition.org
Jstor.org
Lyllcollection.org
Meteociel.fr
Meteocontact.fr
Meteo-France.fr
Nature.com
Nationalgeographic.fr
Notre-environnement.gouv.fr
Normandie.developpement-durable.gouv.fr
Observatoires-littoral.developpement-durable.gouv.fr
Persee.fr
Quiberville.stationverte.com
Refmar.shom.fr
Rolnp.fr

Sandre.eaufrance.fr

Sciencedirect.com

Seine-maritime.gouv.fr

Shom.fr

Sml76.fr

Ste-marguerite-sur-mer.fr

Theses.fr

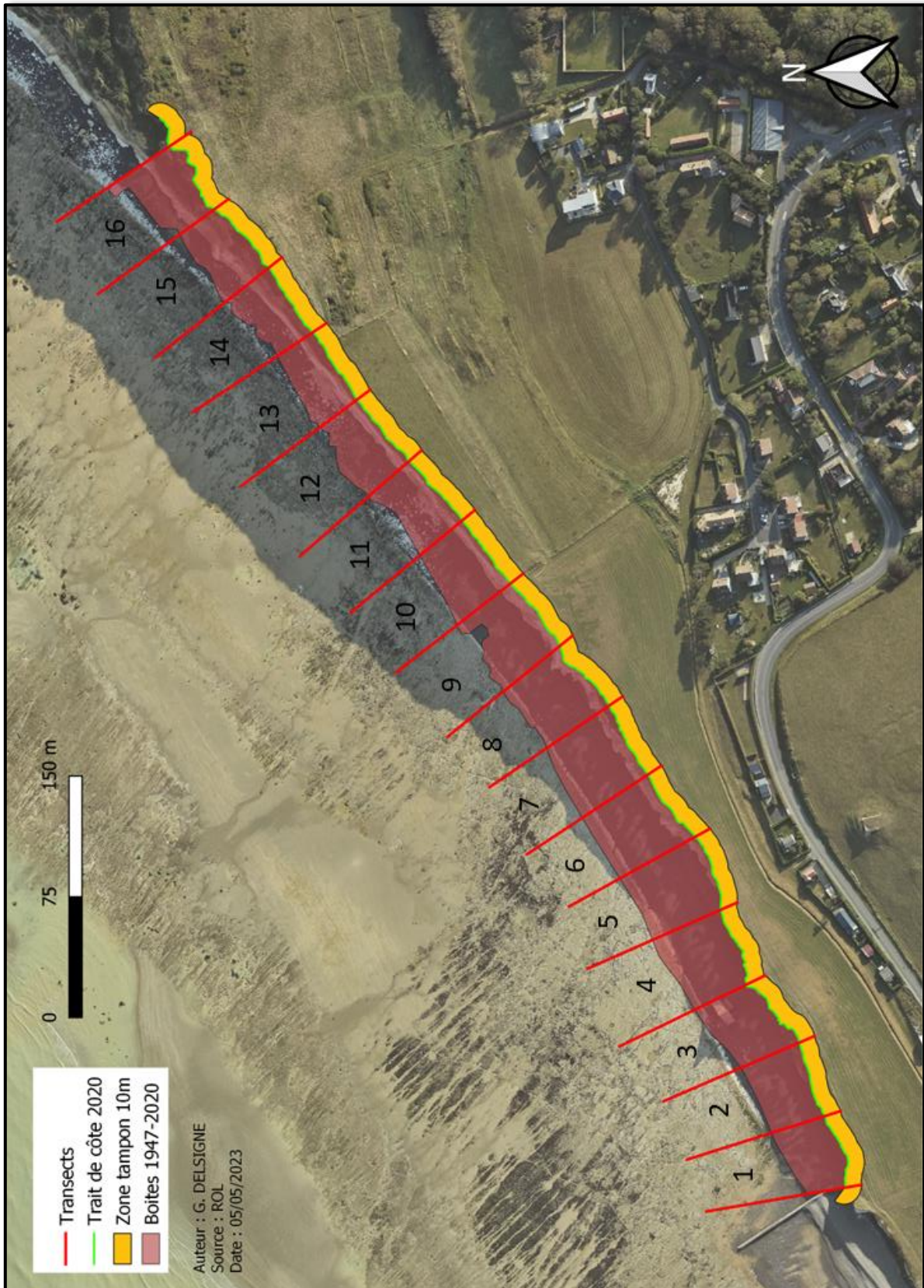
Tutoqgis.cnrs.fr

Universalis-edu.com

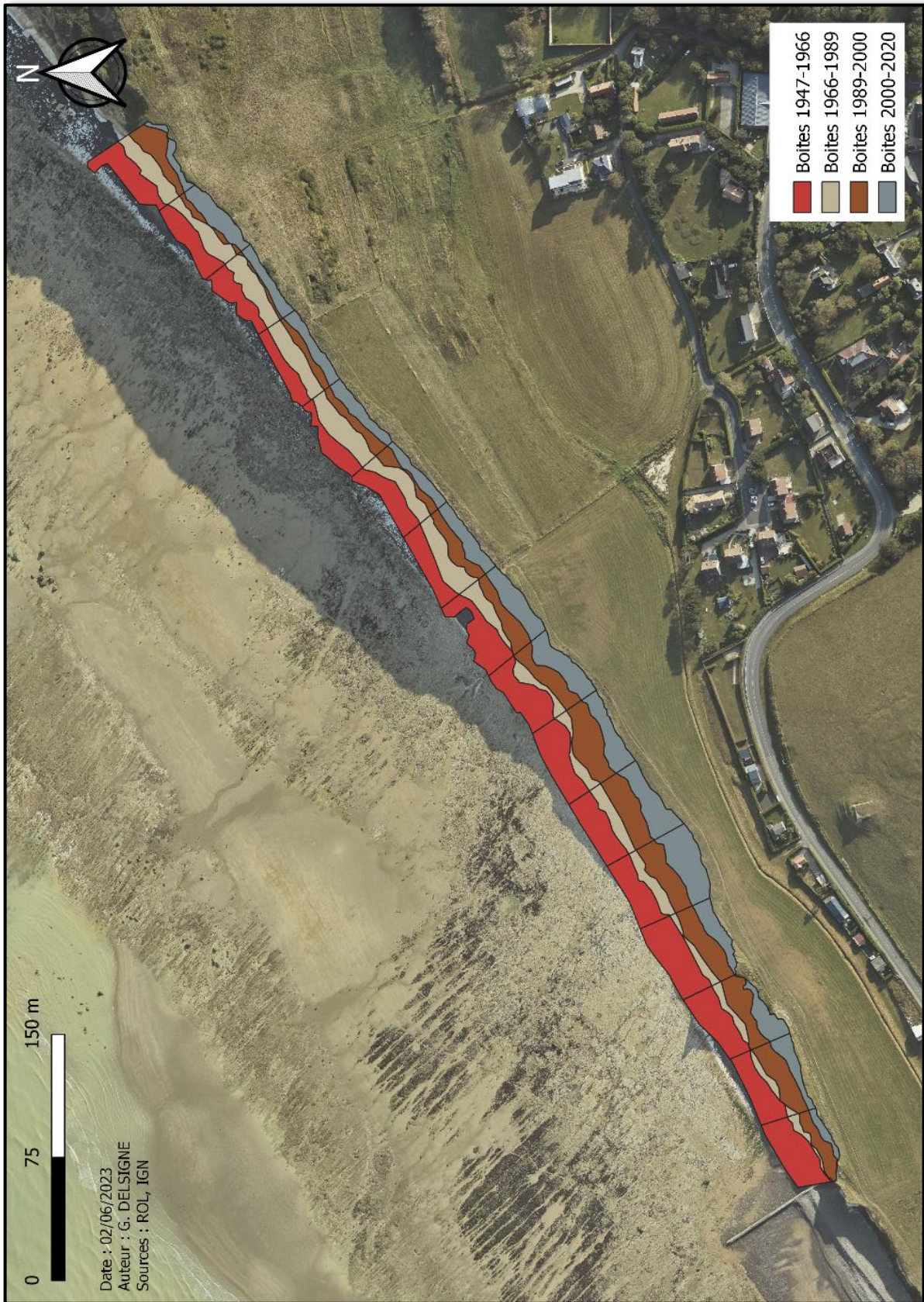
Usgs.gov

Yellowscan-lidar.com

ANNEXES



Carte mettant en évidence la sectorisation de la falaise à l'étude.



Carte mettant en évidence les boites de chaque période étudiée de la falaise à l'étude.

Boîtes	Aire 1947-1966	Air/larg	m/an
1	875,0	17,50	0,92
2	629,4	12,59	0,66
3	753,6	15,07	0,79
4	990,2	19,80	1,04
5	649,1	12,98	0,68
6	685,2	13,70	0,72
7	816,7	16,33	0,86
8	779,9	15,60	0,82
9	775,3	15,51	0,82
10	515,7	10,31	0,54
11	580,8	11,62	0,61
12	431,3	8,63	0,45
13	408,4	8,17	0,43
14	499,8	10,00	0,53
15	566,4	11,33	0,60
16	664,8	13,30	0,70
Moyenne générale			0,70

Boîtes	Aire 1966-1989	Air/larg	m/an
1	119,06	2,38	0,10
2	148,52	2,97	0,13
3	177,69	3,55	0,15
4	186,39	3,73	0,16
5	294,70	5,89	0,26
6	319,88	6,40	0,28
7	230,76	4,62	0,20
8	230,49	4,61	0,20
9	310,52	6,21	0,27
10	539,18	10,78	0,47
11	436,47	8,73	0,38
12	605,69	12,11	0,53
13	510,17	10,20	0,44
14	511,27	10,23	0,44
15	413,61	8,27	0,36
16	475,55	9,51	0,41
Moyenne générale			0,30

Boîtes	Aire 1989-2000	Air/larg	m/an
1	333,28	6,67	0,61
2	557,61	11,15	1,01
3	503,33	10,07	0,92
4	588,31	11,77	1,07
5	588,04	11,76	1,07
6	632,54	12,65	1,15
7	759,19	15,18	1,38
8	463,01	9,26	0,84
9	432,42	8,65	0,79
10	361,72	7,23	0,66
11	221,51	4,43	0,40
12	284,15	5,68	0,52
13	216,09	4,32	0,39
14	65,60	1,31	0,12
15	129,45	2,59	0,24
16	462,46	9,25	0,84
Moyenne générale			0,75

Boîtes	Aire 2000-2020	Air/larg	m/an
1	142,55	2,85	0,14
2	319,46	6,39	0,32
3	375,60	7,51	0,38
4	379,10	7,58	0,38
5	825,58	16,51	0,83
6	656,83	13,14	0,66
7	526,83	10,54	0,53
8	599,75	11,99	0,60
9	548,05	10,96	0,55
10	415,72	8,31	0,42
11	300,49	6,01	0,30
12	360,08	7,20	0,36
13	345,86	6,92	0,35
14	309,70	6,19	0,31
15	506,78	10,14	0,51
16	193,70	3,87	0,19
Moyenne générale			0,43

Boîtes	Période 1966-2020	Période 1947-1966	Période 1947-2020
1	0,28	0,92	0,60
2	0,49	0,66	0,58
3	0,48	0,79	0,64
4	0,54	1,04	0,79
5	0,72	0,68	0,70
6	0,70	0,72	0,71
7	0,70	0,86	0,78
8	0,55	0,82	0,68
9	0,53	0,82	0,68
10	0,51	0,54	0,53
11	0,36	0,61	0,49
12	0,47	0,45	0,46
13	0,39	0,43	0,41
14	0,29	0,53	0,41
15	0,37	0,60	0,48
16	0,48	0,70	0,59
Moyenne générale	0,49	0,70	0,60

Données, calculs et résultats des vitesses de recul moyennes annuelles de la falaise de Sainte-Marguerite-sur-Mer étudiée.

1947-1966	342,76
Air/larg	18,53
M/an	0,98

1995-2000	159,69
Air/larg	8,63
M/an	1,73

1966-1978	34,17
Air/larg	1,85
M/an	0,15

2000-2003	10,17
Air/larg	0,55
M/an	0,18

Moyenne avant effondrement (m/an)
0,53

1978-1989	56,41
Air/larg	3,05
M/an	0,28

2003-2012	4,21
Air/larg	0,23
M/an	0,03

Moyenne après effondrement (m/an)
0,27

1989-1995	80,27
Air/larg	4,34
M/an	0,72

2012-2020	23,12
Air/larg	1,25
M/an	0,16

Moyenne globale (m/an)
0,58

Données, calculs et résultats des vitesses de recul moyennes annuelles de la falaise derrière le blockhaus.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
1.82032	2.35032	1.11376	2.97281	3.17459

Marges d'erreur du nuage de points du 19 septembre 2022.

Erreur X (cm)	Erreur Y (cm)	Erreur Z (cm)	Erreur XY (cm)	Erreur totale (cm)
1.82762	1.95423	4.87145	2.67567	5.5579

Marges d'erreur du nuage de points du 11 avril 2023.



Inondation du chemin du camping lors de la tempête Eleanor, DDTM76, 2018.



Inondation de la rue de la Saône lors de la tempête Eleanor, DDTM76, 2018.



Inondation de la rue du front de mer lors de la tempête Eleanor 1, DDTM76, 2018.



Inondation de la rue du front de mer lors de la tempête Eleanor 2, DDTM76, 2018.



Projections de galets sur le chemin bétonné longeant la rue du front de mer 1, syndicat mixte des bassins versants de Saône, Vienne et Scie, février 2020.



Projections de galets sur le chemin bétonné longeant la rue du front de mer 2, syndicat mixte des bassins versants de Saône, Vienne et Scie, février 2020.

Nombre de cellules par direction			
Direction	Faible	Modéré	Fort
N		2	3
NNE			
NE			
ENE			
E			
ESE			
SE			
SSE			
S		3	
SSO	2	8	
SO	1	1	
OSO			
ONO			
O			
NO		1	5
NNO		2	20

% par direction			
Direction	Faible	Modéré	Fort
N	0,0%	4,2%	6,3%
NNE	0,0%	0,0%	0,0%
NE	0,0%	0,0%	0,0%
ENE	0,0%	0,0%	0,0%
E	0,0%	0,0%	0,0%
ESE	0,0%	0,0%	0,0%
SE	0,0%	0,0%	0,0%
SSE	0,0%	0,0%	0,0%
S	0,0%	6,3%	0,0%
SSO	4,2%	16,7%	0,0%
SO	2,1%	2,1%	0,0%
OSO	0,0%	0,0%	0,0%
ONO	0,0%	0,0%	0,0%
O	0,0%	0,0%	0,0%
NO	0,0%	2,1%	10,4%
NNO	0,0%	4,2%	41,7%

Pourcentages cumulés			
Direction	Fort	Modéré	Faible
N	10,4%	4,2%	0,0%
NNE	0,0%	0,0%	0,0%
NE	0,0%	0,0%	0,0%
ENE	0,0%	0,0%	0,0%
E	0,0%	0,0%	0,0%
ESE	0,0%	0,0%	0,0%
SE	0,0%	0,0%	0,0%
SSE	0,0%	0,0%	0,0%
S	6,3%	6,3%	0,0%
SSO	20,8%	20,8%	4,2%
SO	4,2%	4,2%	2,1%
OSO	0,0%	0,0%	0,0%
O	0,0%	0,0%	0,0%
ONO	0,0%	0,0%	0,0%
NO	12,5%	2,1%	0,0%
NNO	45,8%	4,2%	0,0%
Part :	100,0%	41,7%	6,3%

Tableaux de calcul des vents de la tempête Egon de 2017.

Nombre de cellules par direction			
Direction	Faible	Modéré	Fort
N			
NNE			
NE			
ENE			
E			
ESE			
SE			
SSE			
S	6	6	1
SSO	1	8	3
SO	2	3	3
OSO		1	23
O			10
ONO	1	1	3
NO			
NNO			

% par direction			
Direction	Faible	Modéré	Fort
N	0,0%	0,0%	0,0%
NNE	0,0%	0,0%	0,0%
NE	0,0%	0,0%	0,0%
ENE	0,0%	0,0%	0,0%
E	0,0%	0,0%	0,0%
ESE	0,0%	0,0%	0,0%
SE	0,0%	0,0%	0,0%
SSE	0,0%	0,0%	0,0%
S	8,3%	8,3%	1,4%
SSO	1,4%	11,1%	4,2%
SO	2,8%	4,2%	4,2%
OSO	0,0%	1,4%	31,9%
O	0,0%	0,0%	13,9%
ONO	1,4%	1,4%	4,2%
NO	0,0%	0,0%	0,0%
NNO	0,0%	0,0%	0,0%

Pourcentages cumulés			
Direction	Fort	Modéré	Faible
N	0,0%	0,0%	0,0%
NNE	0,0%	0,0%	0,0%
NE	0,0%	0,0%	0,0%
ENE	0,0%	0,0%	0,0%
E	0,0%	0,0%	0,0%
ESE	0,0%	0,0%	0,0%
SE	0,0%	0,0%	0,0%
SSE	0,0%	0,0%	0,0%
S	18,1%	16,7%	8,3%
SSO	16,7%	12,5%	1,4%
SO	11,1%	6,9%	2,8%
OSO	33,3%	1,4%	0,0%
O	13,9%	0,0%	0,0%
ONO	6,9%	2,8%	1,4%
NO	0,0%	0,0%	0,0%
NNO	0,0%	0,0%	0,0%
Part :	100,0%	40,3%	13,9%

Tableaux de calcul des vents de la tempête Eleanor de 2018.

Nombre de cellules par direction		
Direction	Modéré	Fort
N		
NNE		
NE		
ENE		
E		
ESE		
SE		
SSE		
S	32	61
SSO	29	81
SO	4	70
OSO	3	194
O	1	242
ONO		3
NO		
NNO		

% par direction		
Direction	Modéré	Fort
N	0,0%	0,0%
NNE	0,0%	0,0%
NE	0,0%	0,0%
ENE	0,0%	0,0%
E	0,0%	0,0%
ESE	0,0%	0,0%
SE	0,0%	0,0%
SSE	0,0%	0,0%
S	4,4%	8,5%
SSO	4,0%	11,3%
SO	0,6%	9,7%
OSO	0,4%	26,9%
O	0,1%	33,6%
ONO	0,0%	0,4%
NO	0,0%	0,0%
NNO	0,0%	0,0%

Pourcentages cumulés		
Direction	Fort	Modéré
N	0,0%	0,0%
NNE	0,0%	0,0%
NE	0,0%	0,0%
ENE	0,0%	0,0%
E	0,0%	0,0%
ESE	0,0%	0,0%
SE	0,0%	0,0%
SSE	0,0%	0,0%
S	12,9%	4,4%
SSO	15,3%	4,0%
SO	10,3%	0,6%
OSO	27,4%	0,4%
O	33,8%	0,1%
ONO	0,4%	0,0%
NO	0,0%	0,0%
NNO	0,0%	0,0%
Part :	100,0%	9,6%

Tableaux de calcul des vents de la tempête Ciara de 2020.

Tempête Eleanor (2018)				
	Houle au large (m)	Période (s)	Max houle	Max période
Maximum	7,48	9,6		
Moyenne	3,63	7,28		
Moyenne MH1	3,07	6,88	4,53	8,4
Moyenne MH2	6,29	8,38	7,33	9,2
Moyenne 2 marées	4,68	7,63		

Tableau de calculs de la houle lors de la tempête Eleanor.

Tempête Ciara (2020)				
	Houle au large (m)	Période (s)	Max houle	Max période
Maximum	8,1	11		
Moyenne	3,76	7,48		
Moyenne MH1	2,85	7,01	3,19	9,2
Moyenne MH2	5,39	8,94	7,37	10,8
Moyenne 2 marées	4,12	7,98		

Tableau de calculs de la houle lors de la tempête Ciara.

TABLE DES FIGURES

Fig. 1 : Le blockhaus effondré de Sainte-Marguerite-sur-Mer, G. DELSIGNE, 2023.....	1
Fig. 2 : Schéma du risque, IRMA.	10
Fig. 3 : Schéma d'un phénomène de submersion marine, EauFrance.	13
Fig. 4 : Schéma expliquant le fonctionnement des marées, js2-sciences.com, 2021.	13
Fig. 5 : Schéma des facteurs de submersion marine, BRGM.	15
Fig. 6 : Schéma des 3 types de submersions marines, modifié par G. DELSIGNE, BRGM.	16
Fig. 7 : L'érosion des falaises, phénomène visible depuis plusieurs décennies, Quiberville, G. DELSIGNE, Janvier 2023.	17
Fig. 8 : Localisation des communes étudiées.....	20
Fig. 9 : Carte topographique de la zone d'étude.	21
Fig. 10 : Carte géologique de la zone d'étude.	23
Fig. 11 : Carte de synthèse établie à partir des vents tri-horaires modélisés du modèle « Aladin » de Météo-France sur la période 1999 - 2009, O. CANTAT, 2018, DREAL Normandie.	25
Fig. 12 : Image satellite de Quiberville.....	26
Figure 13 : Profil topographique en travers du terrain et de sa vallée, G. DELSIGNE.	27
Fig. 14 : Carte des zones basses dans la commune de Quiberville.....	28
Fig. 15 : Carte des aléas d'inondation de la commune de Quiberville, PPRI Saône, 2021.	29
Fig. 16 : La digue de Quiberville et ses fissures, G. DELSIGNE, 2023.	30
Fig. 17 : Des galets ont franchi la Digue, preuve de l'efficacité relative de la digue, G. DELSIGNE, 2023.	31
Fig. 18 : La portion de falaise à l'étude avec l'usage de l'imagerie aérienne, G. DELSIGNE, 2023.	32
Fig. 19 : La falaise à l'étude, G. DELSIGNE, 2023.....	33
Fig. 20 : Types de craie sur le littoral de la Seine-Maritime selon Costa, 1997,2005 ; Laignel, 2003 ; Duperret et al., 2004, P. LETORTU, 2012.	34
Fig. 21 : Les catégories de falaises selon Emery & Kuhn (1982) d'après T. DUGUET, 2019, modifié par G. DELSIGNE, 2023.	35
Fig. 22 : Mise en évidence du type de falaise "vive" sur la zone d'étude, G. DELSIGNE, 2023.	36
Fig. 23 : Les morphologies de falaises, T. DUGUET, 2019.....	37
Fig. 24 : Les types de plateforme d'érosion marine d'après Sunamara, 1992. DUGUET, 2019.	38
Fig. 25 : La plateforme à pente régulière des falaises de Sainte-Marguerite-sur-Mer, G. DELSIGNE, 2023.	39
Fig. 26 : Schéma des processus d'érosion des falaises, DUGUET, 2019 (d'après PREMAILLON, 2018).	40
Fig. 27 : Phénomène de gélifraction sur les falaises de Sainte-Marguerite-sur-Mer, G. DELSIGNE, février 2023.....	42
Fig. 28 : Exemple de diaclases et de sous-cavages sur la falaise à l'étude, G. DELSIGNE, 2023.	43

Fig. 29 : Exemple de bio-érosion à Sainte-Marguerite-sur-Mer, G. DELSIGNE, 2023.....	44
Fig. 30 : Les principaux types de mouvements gravitaires (d'après Varnes, 1978 ; Sunamura, 1992), T. DUGUET, 2019.	45
Fig. 31 : Comparaison de deux photographies aériennes de Juin 1994 avec un traitement couleur différent, IGN.	51
Fig. 32 : Exemple du géoréférencement de la photographie aérienne de 1966.....	51
Fig. 33 : Distinction entre le pied de falaise et le haut de falaise comme repère de suivi, G. DELSIGNE, 2023.	52
Fig. 34 : Positionnement des traits de côte à Sainte-Marguerite-sur-Mer.	53
Fig. 35 : Exemple de mesure du recul des falaises avec la méthode basée sur l'air à Sotteville-sur-Mer, Letortu, 2013.	54
Fig. 36 : Histogramme du recul moyen annuel de la falaise à l'étude, G. DELSIGNE, 2023. ...	56
Fig. 37 : Carte représentant le recul moyen global annuel sur la période 1947-2020.....	57
Fig. 38 : Carte représentant le recul moyen annuel sur la période 1947-1966.....	58
Fig. 39 : Carte représentant le recul moyen annuel sur la période 1966-2020.....	59
Figure 40 : Recul annuel moyen du trait de côte à Sainte-Marguerite-sur-Mer, 2018, CEREMA.....	60
Fig. 41 : Le blockhaus et l'excroissance qui pose question, G. DELSIGNE, 2023.	61
Fig. 42 : Boîtes mettant en évidence l'arrêt du recul de l'excroissance après la chute du blockhaus.	62
Fig. 43 : Schéma de prise de vue photogrammétrique RTK, M. Jaud, 2020.....	65
Fig. 44 : Paramètres de l'appareil photo utilisés pour les prises de vues photogrammétriques.....	66
Fig. 45 : Prise photographique des falaises, avril 2023, R. DAVIDSON, 2023.....	66
Fig. 46 : Modélisation de la falaise à l'étude du 19 septembre 2022.....	67
Fig. 47 : Modélisation de la falaise à l'étude du 11 avril 2023.	67
Fig. 48 : Les deux étapes du fonctionnement du plugin M3C2.	68
Fig. 49 : Paramètres utilisés lors de l'application du plugin M3C2.....	68
Fig. 50 : Modèle présentant les changements significatifs entre septembre 2022 et avril 2023.	69
Fig. 51 : Zones d'accumulation et d'érosion sur la falaise à l'étude sur la saison hiver/printemps 2022-2023.....	70
Fig. 52 : Inventaire des submersions marines dans la commune de Quiberville depuis 2011.	77
Fig. 53 : Hauteurs de marées lors de la tempête Egon de 2017 (Shom).	78
Fig. 54 : Photographie des projections de galets à Quiberville-sur-Mer, rue du front de mer, Les Informations Dieppoises, 2017.....	79
Fig. 55 : Rose des vents horaire de la tempête Egon (données Météo France), G. DELSIGNE, 2023	80
Fig. 56 : Hauteurs de marées lors de la tempête Eleanr de 2018 (Shom).	81

Fig. 57 : Histogramme représentant la houle et sa période durant la tempête Eleanor, 2023.	81
Fig. 58 : Rose des vents horaire de la tempête Eleanor, 2023.	82
Fig. 59 : Inondation de la rue du front de mer, J. Favrel, 2018.	83
Fig. 60 : Blocage de la rue du front de mer, Les Informations dieppoises, 2018.	83
Fig. 61 : Fissures de la digue route de Quiberville, J. FAVREL, 2018.	84
Fig. 62 : Hauteurs de marées lors de la tempête Ciara de 2020.	85
Fig. 63 : Histogramme représentant la houle et sa période durant la tempête Ciara, 2023.	85
Fig. 64 : Rose des vents de la tempête Ciara, 2023	86
Fig. 65 : Inondation de la route de la mer lors de la submersion du 9 février 2020, DDTM76.	87
Fig. 66 : Carte représentant les espaces inondés par les submersions marines à Quiberville survenues entre 2011 et 2023.	88
Fig. 67 : Schéma des deux facteurs principaux de l'élévation du niveau marin mondial, Oceancampus.	91
Fig. 68 : Exemple d'un nuage de points obtenu par le LIDAR, nicolas-blanchatrd.fr, O. GILLET (à gauche) et un schéma de fonctionnement du système LIDAR, Yellow Scan (à droite).	92
Fig. 69 : MNT de la zone de travail des submersions marines (ROL), utilisation de l'ombrage, G. DELSIGNE, 2023.	93
Fig. 70 : Courbe issue du SROCC, IPCC 2019.	94
Fig. 71 : Zones situées sous le niveau de la mer en 2050 et en 2100 selon le scénario RCP 2.6 du GIEC.	97
Fig. 72 : Zones situées sous le niveau de la mer en 2050 et en 2100 selon le scénario RCP 8.5 du GIEC.	98
Fig. 73 : Modèle 3D mettant en évidence les zones sensibles inondées selon le scénario 8.5 avec exagération des hauteurs pour un meilleur rendu visuel, G. DELSIGNE, 2023.	99
Fig. 74 : Carte mettant en évidence les zones sensibles inondées selon le scénario 8.5, G. DELSIGNE, 2023.	100

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	2
INTRODUCTION.....	5
PARTIE 1 : CONTEXTE DU MÉMOIRE.....	8
1.1 - Définitions préalables des principales notions et des termes utilisés.....	9
1.1.1 - La notion de risque	9
1.1.2 - L'Aléa	9
1.1.3 - Les enjeux	9
1.1.4 - La vulnérabilité	10
1.1.5 – La manifestation du risque	10
1.2 - Le recul du trait de côte et les submersions marines	11
1.2.1 – L'aléa recul du trait de côte	11
1.2.2 – L'aléa submersion marine.....	12
1.3 - Des enjeux coûteux à différentes échelles	16
1.3.1 - Les enjeux du recul du trait de côte :	17
1.3.2 - Les submersions marines, un évènement ponctuel à fort enjeu	17
1.4 - Le terrain d'étude	18
1.4.1 - Justificatif du terrain d'étude	19
1.4.2 - Localisation de l'espace étudié	19
1.4.3 - Topographie générale	21
1.4.4 - Contexte géologique :	22
1.4.5 - Contexte climatique et paramètres hydrodynamiques :	24
1.4.6 - Informations générales des communes à l'étude :	26
1.4.6.1 – La basse vallée	27
1.4.6.2 – Un ouvrage protecteur : la digue.....	30
1.5 - Présentation et caractéristiques des falaises de Sainte-Marguerite-sur-Mer	32
1.5.1 – Composition de la falaise à l'étude	33
1.5.2 - Typologie liée à l'âge et à l'activité des falaises :	35
1.5.3 - Typologie liée à la morphologies des falaises	36
1.5.4 - Les plateformes d'érosion marine : caractéristiques générales et de la zone d'étude.....	37
1.5.5 - Les processus d'érosion des falaises	39
1.5.5.1 - Les processus érosifs d'origine marine des falaises :	40

1.5.5.2 - Les processus aériens	41
1.5.6 - Les mouvements gravitaires :.....	44
1.6 - Conclusion de la partie	46
PARTIE 2 : EVOLUTION DU TRAIT DE COTE.	47
2.1 - Choix et paramètres des images	48
2.1.1 - Le géoréférencement	49
2.1.2 - Choix des images	50
2.2 - Digitalisation de la falaise	52
2.3 - Calcul des vitesses de recul de la falaise à pas de temps long	54
2.3.1 - De manière générale, quel recul ?	56
2.3.2 - Avant la construction de l'épi.....	57
2.3.3 - Après construction de l'épi.....	58
2.3.4 - Un élément particulier : le blockhaus	60
2.3.5 - Limites et perspectives d'amélioration	62
2.4 Evolution du trait de côte à pas de temps court	63
2.4.1 - La photogrammétrie.....	64
2.4.2 - Modélisation et nettoyage du nuage de point.....	66
2.4.3 - Présentation du plugin M3C2.....	67
2.4.3 - Présentation des résultats comparatifs	69
2.4.3.1 – Changements métriques de la falaise.....	69
2.4.3.2 – Changements volumiques de la falaise	71
2.4.4 – Limites et perspectives d'amélioration	72
2.5 - Conclusion de la partie	73
PARTIE 3 : LES SUBMERSIONS MARINES.....	74
3.1 - Les submersions marines à Quiberville : un phénomène familier	75
3.1.1 – Gravité des submersions marines	76
3.1.2 - Inventaire des submersions marines sur la période 2011-2023.....	76
3.2 - Analyse des tempêtes et cartographie des zones inondées.....	78
3.2.1 - Tempête Egon.....	78
3.2.2 - Tempête Eleanor	80
3.2.3 - Tempête Ciara	84
3.2.4 - Cartographie des zones inondées	87

3.2.5 - Limites et perspectives d'amélioration	89
3.3 - Cartographie des submersions futures.....	90
3.3.1 - Les facteurs contribuant à l'élévation du niveau marin mondial	90
3.3.2 - La donnée LIDAR.....	91
3.3.3 - Les scénarios du GIEC comme référence	94
3.3.4 - Le sous dimensionnement de la digue à prendre en compte.....	96
3.3.5 - Cartographie prospective	96
3.3.6 – Limites et biais de cette recherche.....	101
3.4 - Conclusion de la partie	102
CONCLUSION.....	103
BIBLIOGRAPHIE ET SITES WEB CONSULTÉS	106
ANNEXES.....	114
TABLE DES FIGURES	127
TABLE DES MATIÈRES	131