

Synthèse du fonctionnement du littoral

Quiberville – Sainte-Marguerite-sur-Mer

PARTIE 1 - RAPPORT INTERMEDIAIRE

Juillet 2024

Le Cerema est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique, présent partout en métropole et dans les Outre-mer grâce à ses 26 implantations et ses 2 400 agents. Détenteur d'une expertise nationale mutualisée, le Cerema accompagne l'État et les collectivités territoriales pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires par l'élaboration coopérative, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport. Doté d'un fort potentiel d'innovation et de recherche incarné notamment par son institut Carnot Clim'adapt, le Cerema agit dans 6 domaines d'activités : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

Site web : www.cerema.fr

Cartographie locale d'exposition au recul du trait de côte des communes de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer

Commanditaire : EPCI terroir de Caux et la commune de Sainte-Marguerite-sur-Mer

Auteur :

Responsable du rapport

Pauline DUPONT – DLAB - MEL

Tél. : +33(0)6 58 64 34 10

Courrier : pauline.dupont@cerema.fr

Direction territoriale Normandie-Centre - 10 chemin de la Poudrière - CS 90245 - 76121 Le Grand-Quevilly cedex

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
V1	01/07/2023	Version initiale

Références

N° d'affaire : 22-NC-0168

Partenaires : xxxx

Devis n°xxxxx

Nom	Service	Rôle	Date	Visa
Pauline DUPONT	DLAB/MEL	Auteur principal		
Noémie MIDY	DLAB/MEL	Auteur principal		
Anthony AUGER	DLAB/MEL	Contributeur		
Cécile DELAFENETRE	DLAB/MEL	Contributeur		
Pierre VIGNE	DLAB/MEL	Relecteur		

Contexte et objet de l'étude

Conformément à la loi « Climat et résilience », les communes de Quiberville-sur-Mer et Sainte-Marguerite-sur-Mer sont désignées, par décret du 30 avril 2022 en application de l'article L. 321-15 du code de l'environnement, comme faisant parties des communes dont l'action en matière d'urbanisme et la politique l'aménagement doivent être adaptées aux phénomènes hydro-sédimentaires entraînant l'érosion du littoral.

Cette inscription dans ce décret fait suite aux délibérations favorables des collectivités datées du 18 février 2022 (commune de Sainte-Marguerite-sur-Mer) et du 22 février 2022 (commune de Quiberville-sur-Mer).

L'autorité compétente en matière d'urbanisme a alors la charge d'établir cette carte locale d'exposition au recul du trait de côte.

Ce type de carte permet de délimiter dans les documents d'urbanisme de ces communes, la zone exposée au recul du trait de côte à l'horizon 30 ans et celle exposée au recul du trait de côte à un horizon compris entre 30 et 100 ans et d'en transposer le résultat dans le document graphique du document d'urbanisme (art. L. 121-22-2 du code de l'urbanisme). Les éléments techniques ayant prévalu à la délimitation de ces deux zones doivent être justifiés.

Par décision du 14 avril 2023 (commune de Sainte-Marguerite-sur-Mer) et du 18 avril 2023 (commune de Quiberville-sur-Mer), les collectivités ont engagé la procédure d'évolution des documents d'urbanisme, respectivement, PLU et PLUi pour y intégrer les zones exposées au recul du trait de côte.

Actuellement, les territoires des communes de Quiberville-sur-Mer et Sainte-Marguerite-sur-Mer sont couverts par un plan de prévention des naturels prévisibles (PPRn) du bassin versant de la Saône et de la Vienne, prescrit le 23 mai 2001, comportant des dispositions relatives aux risques littoraux et d'inondation (submersion marine).

Ce présent rapport constitue donc la finalité de la première phase, résultat du recueil d'informations et synthèse du fonctionnement du littoral.

Points forts à retenir pour le lecteur

Géomorphologie de la zone d'étude

- Située dans la cellule hydrosédimentaire comprise entre la jetée du port de Saint-Valéry-en-Caux et la jetée du port de Dieppe
- Les formations géologiques en présence sur les communes de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer appartenant au Bassin parisien sont constituées majoritairement de falaises de craie du Sénonien
- Les falaises ayant pour orientation une direction SO-NE sont formées de craie blanche à lit de silex.
- 2 nappes d'eau souterraines sont présentes au Cap d'Ailly et contribuent aux mouvements de terrain. Plus à l'Ouest, des résurgences d'eau sont visibles sur la falaise mais aussi sur le platier. A noter également l'intrusion d'eau salée en pied de falaise qui se mélange aux eaux souterraines, ce qui accentue l'instabilité de la falaise.
- La falaise est simple et d'une trentaine de mètres au niveau de Quiberville. Elle est complexe à Sainte-Marguerite-sur-Mer avec la présence des frettes et atteint des hauteurs comprises entre 60 et 80m.
- L'Estran composé d'un cordon de galets reposant sur un platier d'une largeur comprise entre 200 et 400m selon l'importance des marées. Le platier est de nature calcaire recouvert d'un banc de sable au niveau de la basse vallée.
- La basse vallée est composée en rétro littoral d'un marais avec la Saâne, fleuve côtier qui débouche sur le platier grâce à un épi buse. Son débit varie entre un max à $40\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ et $1\text{m}^3.\text{s}^{-1}$.
- La basse vallée est artificialisée par des ouvrages longitudinaux (digues et perrés ainsi que murs de soutènement) et transversaux (épis). Sur cette partie, le littoral est ainsi fixé.
- Le cordon de galet a une largeur de 10 à 20 m en pied de falaise pour une épaisseur de l'ordre de 2m. Il est beaucoup plus conséquent au niveau de la plage avec une largeur de l'ordre de 60m et une épaisseur pouvant atteindre 9m. Par ailleurs, le cordon de galets est plus volumineux en amont des ouvrages du fait du blocage du transit par ceux-ci. Sa morphologie évolue au fil des saisons et des événements météo.
- Le transit sédimentaire se fait selon trois modalités : échanges transversaux, érosion des falaises, apports fluviaux de manière plus réduite. Les galets et placages sableux transitent vers le large, ainsi que du Sud-Ouest au Nord -Est sous l'effet de la dérive littorale.
- Les échanges ont lieu principalement lors de la période hivernale, lors de tempêtes et pendant les marées à forts coefficients.
- La zone d'étude constituée de falaises est sujette à de forts mouvements verticaux provoqués par une combinaison de facteurs : températures, précipitations, houle, état de la falaise. Le secteur du Cap d'Ailly est le plus sensible à la dynamique érosive. Les éboulements sont fréquents provoquant des vitesses de recul rapides mais ils sont peu volumineux en général.
- Les mouvements gravitaires sont plus fréquents en aval de la dérive sédimentaire des ouvrages transversaux. La vitesse de recul peut y être multipliée par 4.
- Les secteurs les plus prédestinés à connaître des éboulements de type événement historique sont situés au droit des habitations de Quiberville et à l'Est du blockhaus de Sainte-Marguerite.

Conditions climatiques, météorologiques et hydrodynamiques

- Le site est situé dans un secteur géographique avec des moyennes de températures de l'ordre de 17°C l'été et 4°C l'hiver. Les « extrêmes » avec des températures supérieures à 24°C ne concernent que 7 jours par an. A l'inverse les températures négatives concernent 32 jours.

L'alternance gel-dégel accentue la déstabilisation des falaises. Il y a eu 28 cycles de gel-dégel entre 1981 et 2010.

- La pluviométrie est maximale entre octobre et janvier pouvant atteindre 90mm de cumul mensuel. Un jour sur trois est pluvieux avec des périodes consécutives de 7 jours de pluie régulières. Il s'agit d'un facteur qui accentue la déstabilisation des falaises.
- Le vent est plus fort en hiver et orienté plutôt au Sud-Ouest avec 8% de l'année des vitesses supérieures à 16m/s. Les tempêtes impactent fortement la dynamique sédimentaire et sont de direction Sud-Ouest à Nord-Est
- Les événements exceptionnels ont été recensés sur la zone étudiée. Ils se produisent très majoritairement en automne, hiver et ont des conséquences qui peuvent être fortes : budget sédimentaire fortement impacté avec réduction du cordon de galets en haut de plage. Le pied des falaises est alors fortement impacté par la houle.
- La submersion marine peut survenir en cas de surcotes ou de niveaux extrêmes comme ce fut le cas en 2010 lors de Xynthia.

Impacts sur le littoral

- Concernant les méthodes appliquées, plusieurs études à différentes échelles ont été menées couvrant la zone d'étude. Elles sont à différentes échelles depuis le national avec l'indicateur national d'érosion côtière, jusqu'au très local avec des levés drone en passant par des échelles intermédiaire comme l'étude régionale sur la stratégie de gestion de la bande côtière ou encore départementale avec l'étude menée pour la DDTM. Il résulte de ces études et des références bibliographiques les éléments suivants :
- La dynamique d'évolution n'est pas considérée
- C'est toujours la période la plus longue qui est analysée. Dans le cas présent 1947 – 2019 sans tenir compte des ouvrages construits pendant la période.
- La méthode la plus pertinente pour analyser le recul des falaises est celle basée sur la surface perdue.
- 14 traits de côte sont disponibles et produits avec les mêmes marqueurs. Ils couvrent la période 1947 - 2019
- Concernant les reculs :
 - Sur la falaise complexe du Cap d'Ailly, c'est le recul des frettes qui est à considérer principalement puisque situé plus proche des enjeux. Sur ce secteur le recul selon les études peut atteindre 1m/an et jusqu'à 2m/an pour certains casiers. La partie des frettes qui recule le plus est celle à l'Ouest du Cap d'Ailly.
 - Les reculs les plus importants sur les falaises simples sont constatés à l'Est du blockhaus de Sainte-Marguerite avec des reculs selon les études variant de 0.5 à 0.9 m/an. L'ouvrage transversal semble jouer un rôle avec un recul plus fort sur environ 400m lié pour partie en déficit en galets à cet endroit.
 - Sur les falaises à l'Ouest à Quiberville, le recul est de l'ordre de 0.5m/an.
- Le littoral des communes de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer est sensible aux inondations par la mer, du fait de son ouverture aux flux d'ouest et de ses caractéristiques morphologiques et altimétriques.
- Les inondations par la mer surviennent lors de faibles pressions atmosphériques, un fort vent d'afflux au moment d'une pleine mer de vive-eau. Elles sont classées selon 3 niveaux de gravité. 78 ont été identifiées en Manche parmi lesquelles 48 dites sévères. L'analyse dans le temps ne montre pas d'augmentation du nombre. En revanche les inondations avec le niveau sévère ont tendance à augmenter depuis les années 1980. Concernant la basse vallée de la Saône, 10

submersions ont été recensées entre 1949 et 2010 avec notamment l'événement marquant de 1999 avec les tempêtes Lothar et Martin.

- De manière générale, on estime que lorsque le budget sédimentaire est en équilibre, les sédiments emportés par les tempêtes sont restitués progressivement au niveau des plages sous l'effet de la houle ou des marées. Contrairement aux éboulements de falaises qui sont irréversibles mais qui peuvent contribuer à engraissement de l'estran grâce à la mise en circulation d'un nouveau volume de sédiment.
- Le littoral de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer peut être défini par 5 secteurs dont deux prédominants : S6 et S5.
S5 correspond à des falaises simples avec une couche argileuse au sommet surmonté de végétation.
S6 correspond à des falaises simples sans présence d'argile ni de végétation.
- Les falaises de manière générale subissent un recul moyen constant et sont plus temporairement sujettes à des reculs événementiels. Au droit de la zone d'étude, par analogie avec des événements ayant eu lieu sur des secteurs similaires, les mouvements gravitaires auront plus de risques de survenir pendant les mois de décembre, janvier et février. Les volumes remaniés quant à eux sont hétérogènes. Deux secteurs couvrent la zone d'étude. Sur le premier, la moyenne des volumes recensés est de 5 600m³ contre près de 25 000m³ sur le second secteur.

Changement climatique

- Au marégraphe de Dieppe, le niveau marin est passé de 4.74m en 1954 à 5.16m en 2024. Les scénarios du GIEC envisagent une élévation du niveau de 0.5m en 2100 selon le niveau le plus optimiste et de 0.88 selon le scénario le plus pessimiste. En 2150, l'élévation serait de 0,74 m suivant le scénario le plus optimiste et de 1,42 m pour le plus pessimiste.

Sommaire

1	Préambule – Projet de reconnexion de la Saône à la mer	10
2	Géomorphologie du Littoral	11
2.1	Caractéristiques géologiques.....	11
2.1.1	Formations géologiques.....	11
2.1.2	Cordon de galets.....	11
2.1.3	Platier rocheux.....	12
2.2	Caractéristiques hydrogéologiques.....	12
2.3	Évaluation des stocks sédimentaires et de leur dynamique	13
2.4	Mouvements verticaux	14
2.4.1	Généralités	14
2.4.2	Répartition spatiale	15
2.4.3	Répartition temporelle	16
2.5	Caractéristiques de l'estran et des petits fonds	19
2.6	Caractéristiques topo-bathymétriques	19
2.7	Caractéristique morpho-sédimentaire et bathymétrique des fonds et de l'estran 20	
3	Conditions climatiques, météorologiques et hydrodynamiques	21
3.1	Contextes météorologiques et climatiques.....	21
3.1.1	Climatologie générale	21
3.1.2	Température	21
3.1.3	Pluviométrie	22
3.1.4	Vent	22
3.2	Conditions hydrodynamiques	23
3.2.1	Température de la mer.....	23
3.2.2	Niveau marin.....	23
3.2.3	Etats de mer	24
3.2.4	Courants marins	24
3.3	Analyse du fonctionnement hydraulique du site permettant de comprendre les interactions entre la mer et le littoral	25
4	Mobilité du trait de côte	26
4.1	Méthodes d'analyse des traits de côte à falaise	26
4.1.1	Indicateur national de l'érosion côtière – Cerema 2018.....	26
4.1.2	Littoraux normands 2027 – Cerema 2023	27
4.1.3	Etude sur le recul du trait de côte sur le littoral de Seine-Maritime – Cerema 2018.....	28
4.1.4	Suivi du trait de côte entre Sainte-Marguerite-sur-Mer et l'Église de Varengueville – Cerema 2018 à 2022	29

4.1.5	L'évolution du trait de côte et les submersions marines dans les communes de Sainte-Marguerite-sur-Mer et Quiberville. – G.Delsigne 2023	31
4.1.6	Étude sur l'érosion côtière en aval des ouvrages majeurs en Seine-Maritime – Secteur de Sainte-Marguerite-sur-Mer – Cerema 2018	33
4.1.7	Limites des méthodes présentées.....	34
4.2	Analyse historique de l'évolution du trait de côte.....	34
4.2.1	Analyse diachronique des falaises simples de Quiberville et de Sainte-Marguerite-sur-Mer 35	
4.2.2	Analyse diachronique des falaises complexes du Cap d'Ailly.....	38
5	Evenements exceptionnels	41
5.1	Inventaire des évènements exceptionnels (historique).....	41
5.2	Impacts sur le littoral.....	42
5.2.1	Érosion du trait de côte	42
5.2.2	Inondation par la mer	44
5.3	Réaction et résilience du milieu	47
6	Ouvrages presents sur le littoral.....	48
6.1	Recensement et caractéristiques des ouvrages	49
6.1.1	Ouvrages longitudinaux	49
6.1.2	Ouvrages transversaux.....	50
6.2	Caractérisation de l'impact des ouvrages sur le transit littoral	52
6.2.1	Impact des ouvrages longitudinaux sur le transit littoral	52
6.2.2	Impact des ouvrages transversaux sur le transit littoral.....	52
7	Changement climatique	54
7.1	Scénarios proposés par le GIEC et les impacts sur le littoral : échelle globale et nationale	54
7.2	Déclinaison à l'échelle régionale - Giec normand	55
7.3	Observations et prospections à l'échelle locale	57
8	Annexes	59
9	Bibliographie	59
9.1	Table des illustrations.....	61
9.2	Glossaire	64

1 PREAMBULE – PROJET DE RECONNEXION DE LA SAANE A LA MER

Le présent rapport bibliographique fait état de la connaissance actuelle de la zone d'étude qui s'étend sur les deux communes de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer. Par ailleurs, un projet de reconnexion de la Saône à la mer est en cours sur cette même emprise mené par le syndicat des bassins versants Saône, Vienne et Scie.

La reconnexion de la Saône est un projet ayant 4 objectifs majeurs qui sont les suivants :

- La réalisation d'aménagements hydrauliques en vue de retrouver une reconnexion historique directe à la mer ;
- De rétablir la continuité piscicole et sédimentaire et de retrouver la fonctionnalité estuarienne sur le tiers aval de la basse vallée ;
- D'intégrer les effets du changement climatique sur le recul du trait de côte ;
- De garantir les usages socio-économiques et d'intégrer d'éventuelles nouvelles activités.

(Pour plus d'information vous pouvez consulter le site suivant : <https://www.sbvsvs.fr/projets-territoriaux/basse-vallée-de-la-saône/>)

Il est admis que tout au long de la réalisation de la carte d'exposition au recul du trait de côte les différents scénarii étudiés, associés aux modélisations et à la somme de connaissances acquises par l'étude de reconnexion seront intégrés à nos résultats.

2 GEOMORPHOLOGIE DU LITTORAL

2.1 Caractéristiques géologiques

2.1.1 Formations géologiques

Les formations géologiques en présence sur les communes de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer appartiennent à la terminaison nord-occidentale du Bassin sédimentaire parisien (Figure 1).

Du cap d'Antifer à Ault, les falaises sont taillées principalement dans la craie du Crétacé supérieur (du Cénomanien au Campanien) avec différents faciès plus ou moins riches en lits de silex. Les déformations locales (ondulations à grand rayon de courbure et failles) expliquent la conservation de terrains sableux et argileux d'âge tertiaire (BRGM 1970).

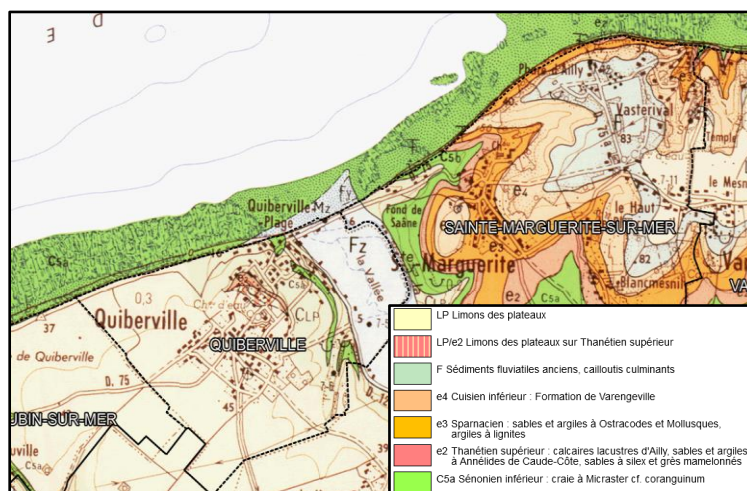


Figure 1 Carte géologique de la zone d'étude (BRGM)

Les côtes sont marquées par l'orientation de direction SO-NE pour la section le cap d'Antifer/Ault.

Les falaises sont formées de craie blanche à lit de silex. Des lits subhorizontaux de craie conglomératique peuvent apparaître. Cet ensemble crayeux pouvant atteindre 20 à 30 m est visible entre Pourville et Saint-Aubin-sur-Mer. A l'ouest de Quiberville, la craie est profondément altérée et karstifiée dans sa masse et à son toit, où des poches d'altération sont remplies d'une argile rouge très chargée en silex blanchâtres, mélangée aux limons des plateaux, et vraisemblablement aux dépôts tertiaires du Thanétien sablo-gréseux (BRGM 1995).

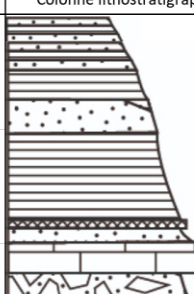
Période	Étage	Colonne lithostratigraphique	Lithologie	Épaisseur	
Eocène	Cuisien		Argiles glauconieuses	10 m	
			Argile sableuse		
			Sables fauves	7 m	
	Sparnacien		Argile noire à ostracodes	8 m	
Paléocène	Thanécien		Lignite et sable roux	2 m	
			Calcaire lacustre	3 m	
			Sable jaune avec blocs de grès mammelonnés	4 m	

Figure 2 Colonne litho stratigraphique des dépôts Éocène du Cap d'Ailly

A l'est, au niveau du Cap d'Ailly, ces falaises calcaires sont surplombées de dépôts Tertiaire (Figure 2).

Le Thanétien est formé un sable jaune à silex et grès. Au niveau du Petit-Ailly, le sable est aggloméré en gros blocs de grès métriques à décimétriques. Les rochers au large du Cap d'Ailly sont

des blocs de grès tombés du haut de la falaise. Un calcaire lacustre repose sous cette formation.

Le Sparnacien est formé d'argiles à lignites et de sable roux, rarement visible à l'affleurement. Par-dessus repose les sables et argiles à Ostracodes et Mollusques.

Enfin, le Cuisien est formé en sa base de sables fauves quartzeux et pyriteux, se terminant vers le haut par des sables ferrugineux. Par-dessus, des argiles sableuses riche en concrétions ferrugineuses se sont formées. La série se termine par une formation d'argiles glauconieuses calcaires.

Ces formations Éocènes ont été conservées grâce au synclinal de la Scie dont l'axe se situe aux environs du Cap d'Ailly.

2.1.2 Cordon de galets

Le cordon de galets borde le pied de l'ensemble des falaises du secteur. Il s'agit d'une étroite bande de galets de silex issus des falaises. Celles-ci sont composées de couches de rognons de silex, alternées entre les couches de craie, qui se détachent sous l'effet de l'érosion, puis sont pris en charge par les

marées. Les courants marins les roulent, entrechoquent, les usent pour former, à terme, des galets arrondis. Les cordons de galets reposent en haut du platier rocheux, en pied de falaise. Localement un estran sableux est visible en pied de cordon.

Les cordons de galets sont composés d'éléments de différentes granulométries (dont une fraction sableuse) plus ou moins mobiles. En pied de falaise ils jouent un rôle protecteur de celui-ci face à l'action de sape des vagues à marée haute, en absorbant leur énergie. En zone de vallée et valleuse, le cordon de galets, retenu par les ouvrages littoraux, protège la plage en luttant contre les submersions marines. Le cordon de galets y représente la limite entre le haut de l'estran et la zone rétro-littorale.

2.1.3 Platier rocheux

En pied de falaise, le platier rocheux correspond à une plateforme d'érosion marine, qui se déplace vers la terre à mesure du recul de la falaise : ce recul élargit le platier, mais celui-ci s'abaisse en même temps sous l'effet de son érosion.

La largeur des estrans associés à ces platiers est de l'ordre de 200 à 400 m selon les marées, excepté au voisinage de pointes rocheuses, où il est bien plus étroit, leur pente pouvant dépasser 2 %.

En dehors de certaines plages situées entre Le Havre et Antifer, la présence de sable est plus rare sur ces platiers : on le rencontre sous forme de placage dans les creux des platiers, ou occasionnellement en haut d'estran. C'est notamment le cas au droit de la basse vallée de la Saône, mais aussi au niveau des deux valleuses qui entourent la zone d'étude que sont Pourville et Saint-Aubin-sur-Mer. Sa présence limitée sous forme statique ne signifie pas l'absence de transit significatif : l'interruption de ce transit par des ouvrages de grande emprise sur l'estran que sont les digues de la centrale nucléaire de Penly a ainsi provoqué, à l'Ouest, la formation d'une plage de sable de bonne dimension, avec un exhaussement pouvant dépasser, localement, 2 mètres.

Le platier rocheux est interrompu au niveau du débouché en mer des vallées : l'estran y est alors formé, à la suite du cordon de galets, de sables et de graviers, en dépression par rapport au platier environnant.

2.2 Caractéristiques hydrogéologiques

Au Cap d'Ailly, la succession lithologique datant de l'Éocène détermine la formation de deux niveaux d'eau :

- Une nappe superficielle au sommet des argiles glauconieuses du Cuisien, visible autour du Phare d'Ailly sous forme de mares et de trous d'eau,
- Une nappe plus profonde, concentrée dans les sables fauves du Cuisien, d'une superficie n'excédant pas 15 km², assurant la saturation de la craie par capillarité

L'eau bloquée par la présence des argiles dans la composition de la falaise participe à la formation de deux nappes superposées et distinctes. La nappe plus profonde juste au-dessus des argiles noires provoque en majeure partie des glissements de terrain de grande envergure. La nappe supérieure quant à elle qui trouve ses limites entre les argiles vertes et une succession d'argile et de sablons, est à l'origine de mouvement de terrain moins importants.

Sur le secteur de Sainte Marguerite-sur-Mer, près du bunker, des résurgences d'eau douce, caractéristiques des zones karstiques, sont visibles le long de la paroi verticale de la falaise. De plus, la présence d'une intrusion d'eau salée en son pied induite par les marées et se mélangeant aux eaux souterraines intérieures participe également à l'instabilité de la falaise (Junique et al. 2024).

Des résurgences d'eau douce sont également présentes sur le platier rocheux. L'eau s'écoule selon des canaux orientés NO-SE. À certains endroits, la plate-forme côtière retient les eaux de surface et donne naissance à des étangs.

La roche calcaire des falaises est localement saturée d'eau par capillarité, particulièrement sur les zones où sont présentes les nappes, ce qui contribue encore à sa fragilisation.

2.3 Évaluation des stocks sédimentaires et de leur dynamique

La zone d'étude se trouve dans la cellule hydro-sédimentaire située entre la jetée du port de Saint-Valéry-en-Caux et la jetée du port de Dieppe. La gestion des stocks sédimentaire peut s'entendre au sein de cette cellule. Les plages les plus fournies sont celles en amont des jetées car ces ouvrages littoraux interrompent le transit de galets. Des études locales fournissent des estimations des volumes de sédiments des plages de cette cellule, notamment à Quiberville (Cerema 2023b).

L'estran sur les communes de Sainte-Marguerite-sur-Mer et Quiberville se compose d'un cordon de galets plus ou moins large et épais, reposant sur le platier rocheux calcaire. Localement des zones sableuses sont présentes en pied de cordon de galets. Les stocks sédimentaires mobilisés sont donc composés de galets et de sable.

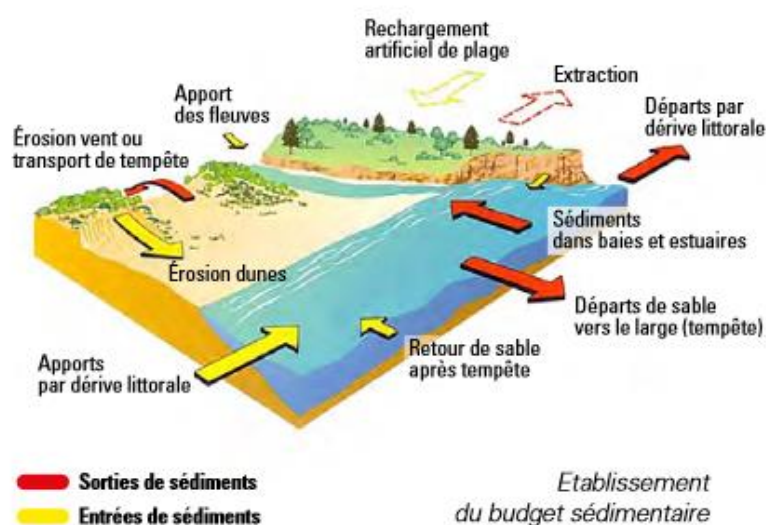


Figure 3 Schéma explicatif de l'établissement du budget sédimentaire

Les échanges entre le continent et la mer sont nombreux. Le budget sédimentaire de la plage varie selon si celle-ci présente un engraissement ou un déficit de sédiments. Ces situations sont visibles avant et après tempêtes et périodes hivernales. Les apports et départs de matériaux se font par la dérive littorale (du Sud-Ouest vers le Nord-Est), les échanges transversaux, l'érosion du continent et les apports fluviaux (Figure 3 ci-contre). Dans sa configuration actuelle à la suite des travaux de réestuarisation effectués, la Saône a repris son rôle de dépôts de sédiments en période d'étiage ou de charriage en période de crues. Cependant sa

fonction pourrait ne pas être significative car la charge solide actuelle des fleuves n'est constituée que de matières en suspension argilo-silto-sableuses, ne représentant qu'un volume moyen annuel de 500.103 tonnes.an-1 pour la source majeure qu'est la Seine (Costa et al. 2005).

Contrairement aux cordons en pied de falaise, plus fins (largeur de 10 à 20m pour une épaisseur de 2 à 2,5m), ceux présents le long des perrés sont bien plus conséquents. En effet, le cordon de galets de la plage de Quiberville-Sainte Marguerite présente une largeur de 30 mètres en moyenne à l'Ouest, jusque plus de 60 mètres à l'Est et une hauteur pouvant atteindre 9 mètres.

La zone sableuse en pied de cordon est présente sur l'ensemble de la plage de Quiberville-Sainte Marguerite-sur-Mer et atteint au plus 1 mètre d'épaisseur environ. Des échanges sédimentaires sableux ont lieu au sein du cordon, entre le cordon et l'estran sableux, ainsi qu'avec le large en période d'agitation, lors de fortes houles ou de tempêtes (Costa 1999). Il semblerait qu'en période calme ces échanges ne soient pas significatifs (Letortu 2013). Les matériaux en petits fonds ne sortent pas du système mais sont plutôt remaniés vers l'estran en période d'agitation.

En période de fort coup de vent, les échanges sédimentaires dans le sens du profil se font vers la basse plage et le domaine infratidale conformément aux courants de retour de type « undertow » existant dans la zone de déferlement (Costa et Delahaye 2005).

Les galets et placages sableux transitent vers le large, ainsi que du Sud-Ouest au Nord -Est sous l'effet de la dérive littorale.

2.4 Mouvements verticaux

2.4.1 Généralités

Le littoral à falaise est sujet à de forts mouvements verticaux impactant l'évolution du trait de côte. Les phénomènes d'éboulements sont bien souvent les plus documentés mais il existe aussi des mouvements hydrogravitaires d'une grande diversité. Ces derniers pouvant se manifester sous forme de chutes de blocs, de glissements mais aussi de basculements ou bien de coulées de boues.

La dégradation progressive de la falaise sous l'action des agents climatiques couplés au phénomène de gravité provoque des éboulements rocheux des falaises littorales. De plus, certaines discontinuités naturelles comme des diaclases, des fissures ou fractures, provoquent des instabilités potentielles. Ces dernières provoquent des pertes de cohésion au sein du massif rocheux et donc d'éventuelles ruptures.

Les effondrements ne dépendent pas d'un facteur unique mais bien une combinaison de plusieurs facteurs. C'est la conjonction des conditions défavorables permanentes (facteurs morphologiques, géologiques...) et des facteurs d'érosion (Letortu 2013). Le massif rocheux va accumuler les sollicitations et agressions des agents météo marins le rendant plus fragile. Puis, l'éboulement survient lorsque les seuils critiques de stabilité sont atteints voire dépassés et que la gravité qui s'applique est plus importante que la résistance mécanique de la roche (Prémaillon 2018).

La prédisposition aux mouvements gravitaires des falaises va donc dépendre de plusieurs caractéristiques du milieu :

- Les facteurs continentaux :
 - Les variations de température : Les périodes de gel ou dégel ainsi que les dilatations et rétractions thermiques de la roche remettent en mouvement des discontinuités du massif rocheux et aussi à la dissolution des carbonates.
 - Les précipitations : L'apport d'eau par les pluies ou les ruissellements de surface participent à la mise en charge des aquifères et des masses d'eau ce qui engendre l'augmentation de la pression interstitielle et favorise la dissolution chimique de l'encaissant.
- Les facteurs marins :
 - La houle et les marnages : Les actions répétées du choc des vagues sur le pied de falaise dans un premier temps catalyse la fracturation et donc diminue la stabilité. Dans un second temps, le vas-et-viens des vagues emporte les débris issus de l'érosion qui peuvent avoir un rôle de protection du pied de falaise.
- L'état du massif rocheux :
 - La lithologie de la falaise ainsi que sa structure vont définir les forces de résistance de cette dernière qui s'opposent aux agressions. C'est ces facteurs qui vont définir la vitesse d'érosion, le comportement hydrogéologique et la forme d'instabilité du massif (Prémaillon 2018).

Les éboulements connaissent une typologie variée (**Figure 4**) qui dépend des critères lithologiques, géomorphologiques, morphologiques des falaises. Quatre principaux types d'instabilités sont identifiables sur le littoral à falaise (Prémaillon 2018).

- Les chutes de blocs : les discontinuités favorisent le détachement de blocs ou de pierres. Ce mouvement gravitaire est très ponctuel.
- Les effondrements : Ce sont les basculements d'un pan de falaise parfois délimité par les plans de fragilité.
- Les glissements : ce sont des déplacements de masse, causés par des déformations cisailantes, le long d'une surface pentue. Le glissement peut être rotationnel ou plan

- Les écoulements : Ce sont des mouvements plus rares. Ils apparaissent dans un contexte de falaises à pente dans des matériaux meubles où l'infiltration d'eau va liquéfier les matériaux. Ce mouvement peut être d'une envergure importante et concerner une grande zone de la falaise.

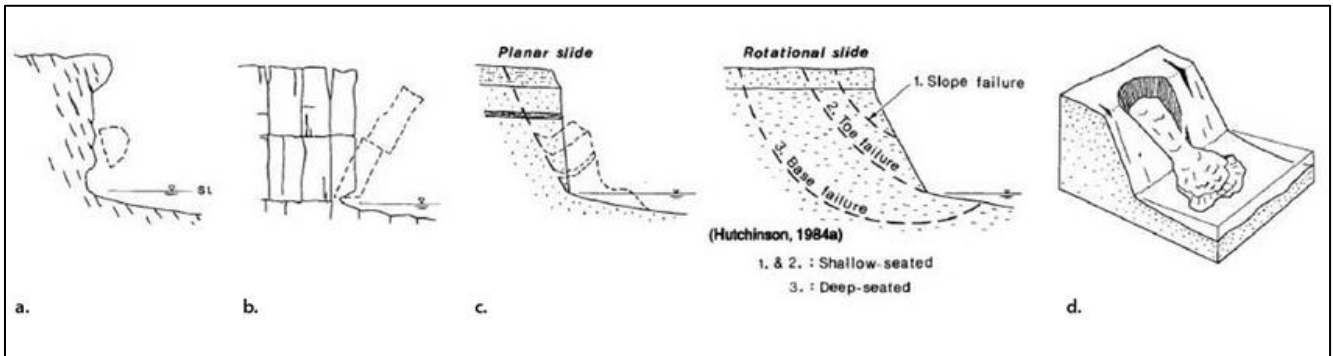


Figure 4 Quatre principaux type d'instabilités gravitaires des falaises littorales (Sunamura, 1992 in Prémaillon, 2018) (a- Chutes de blocs, b-Effondrement de pan, c-Glislements, d-Ecoulements)

Les mouvements gravitaires peuvent connaître des volumes très variables allant de quelques centimètres cubes à plusieurs millions. Même s'il est complexe d'estimer quand aura lieu un écoulement, il est tout de même possible d'admettre que plus l'événement est de grandes dimensions plus son occurrence est rare (Prémaillon 2018).

Même si leur occurrence reste rare, elle est marquée depuis 2000 par une augmentation de leur survenue. Cette tendance est à mettre en relation avec les forts épisodes météorologiques, comme les abats d'eau et les périodes de gel entre 2010 et 2013.

2.4.2 Répartition spatiale

D'après Pauline Letortu dans son travail sur les effondrements des falaises crayeuses en Haute-Normandie, avec près de 331 effondrements recensés sur la période 2002 à 2009, le secteur le plus sensible à la dynamique érosive semble être le secteur du Cap d'Ailly (Figure 5 et Figure 6). La raison première de cette sensibilité s'explique par les caractéristiques géologiques des falaises au droit du cap (voir partie 2.1.1) ainsi que la présence forte des deux nappes aquifères perchées.

Dans le cas de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer, l'orientation de la falaise est prépondérante quant à l'exposition aux houles, aux tempêtes et tous autres facteurs de forçage. Le littoral d'étude est marqué par des événements plus fréquents avec des vitesses de recul (entre 1966 et 2008) (Prémaillon 2018) plus rapides, mais peu volumineux (Cerema 2021).

Par ailleurs, les mouvements gravitaires connaissent une plus grande densité en aval-dérive des ouvrages transversaux majeurs. La vitesse de recul peut y être multipliée par quatre.

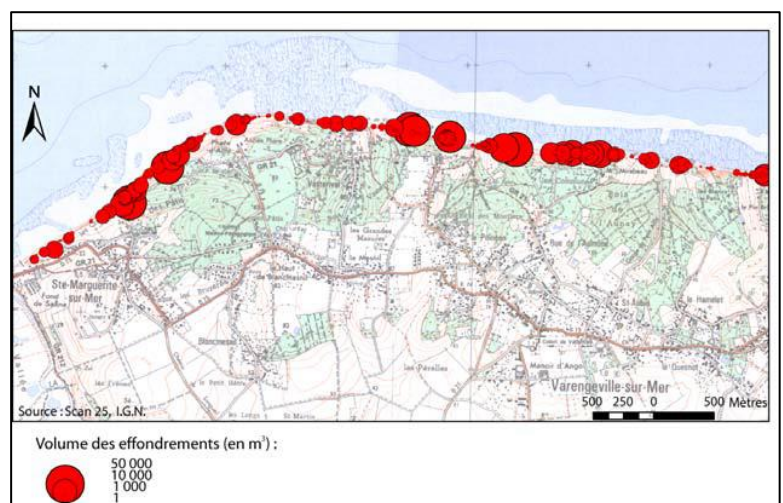


Figure 5 Répartition des effondrements recensés en haute-Normandie entre 2002 et 2009. (Letortu, 2012)

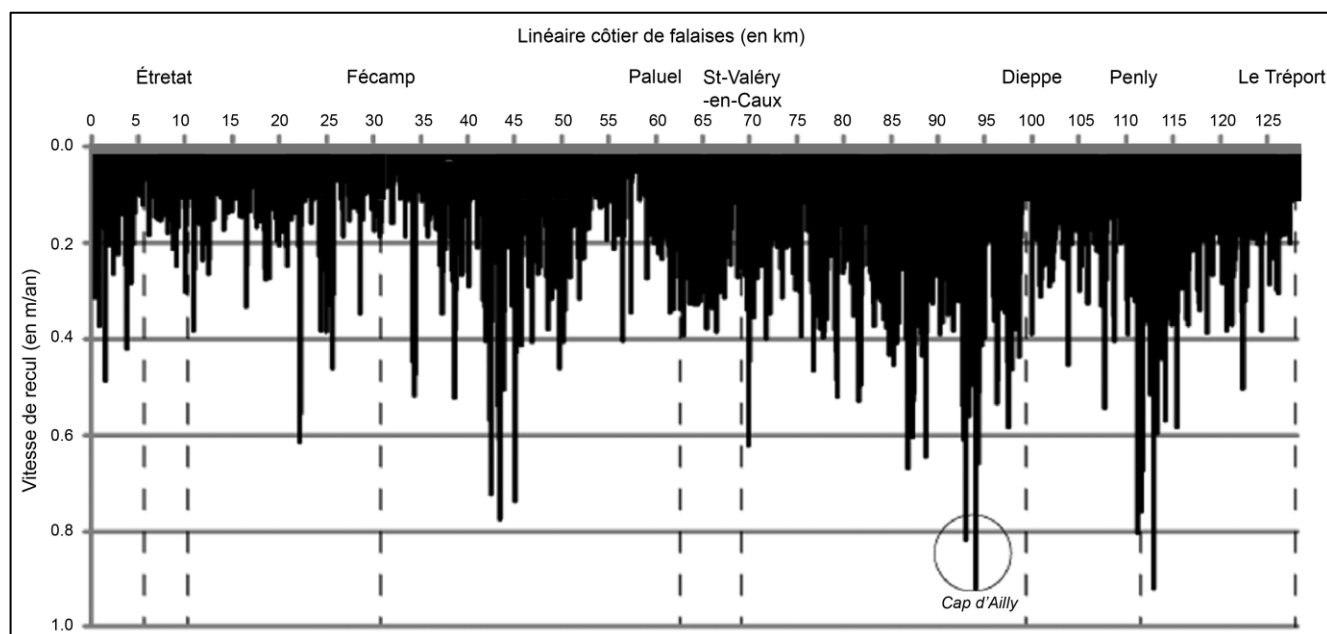


Figure 6 Variation du taux d'érosion le long du littoral haut Normand (modifié d'après Letortu et al. (2014a) in Prémaillon (2018))

2.4.3 Répartition temporelle

Il existe une réelle opposition entre les facteurs marins et continentaux qui suivent une répartition saisonnière marquée. En effet, les facteurs marins semblent intervenir majoritairement en hiver alors que les facteurs continentaux ont plus d'influence en été. Par ailleurs, les mouvements verticaux surviennent en grande partie en automne et hiver. Toujours d'après les travaux de Letortu, Costa, et Cantat 2012 sur la période 2002-2009, sur 331 effondrements, plus de 120 soit 40% ont lieu en hivers et environ 80 soit 25% en automne (Figure 7). C'est aussi en hiver que les volumes des effondrements sont les plus importants. En hiver le volume total effondré représente plus de 400 000m³ contre moins de 100 000m³ en été.

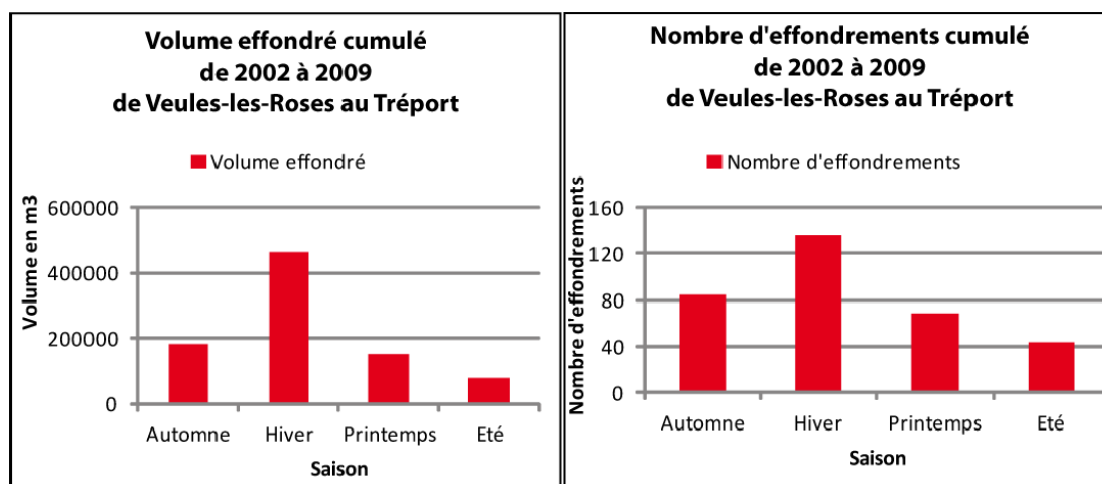


Figure 7 Répartition saisonnière des effondrements en volume cumulé et en nombre. (Letortu, 2012)

En réalité, c'est la somme de petits événements polyphasés qui permet l'observation d'un écroulement. L'individualisation des éboulements notamment en ce qui concerne les volumes unitaires dépend donc du pas de temps d'observation (Prémaillon 2018).



Figure 8 : Cartographie des secteurs homogènes au droit de la zone d'étude d'après l'étude Cerema 2018

Conformément à l'étude menée, à la demande de la DDTM, par le Cerema en 2018 sur le recul du trait de côte en Seine Maritime, le littoral seinomarin a été découpé en secteurs homogènes (Figure 8).

Ainsi, le linéaire de la zone d'étude est défini par cinq types de secteurs dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Tableau des différents secteurs et leurs caractéristiques associées. (Cerema, 2018)

Secteur	Caractéristiques	Recul (m)
S1	<ul style="list-style-type: none"> - falaise complexe - variation hauteur falaise - sommet de la craie peu accidenté - présence fine couche argileuse au sommet de la craie - lessivage des argiles sur la craie - présence de végétation sur la couche argileuse 	Semblable au S2
S2	<ul style="list-style-type: none"> - falaise complexe - sommet de la falaise très accidenté - présence couche argileuse au sommet - lessivage des argiles sur la craie visible sur la quasi-totalité de la craie 	-1 (Varengueville-sur-Mer - 2007)
S5	<ul style="list-style-type: none"> - falaise simple - sommet de la craie un peu dentelée - présence couche argileuse au sommet de la craie - présence de végétation sur les matériaux argileux - lessivage des argiles sur la craie parfois important 	-20 (Senneville-sur-Fécamp)
S6	<ul style="list-style-type: none"> - falaise simple - variation hauteur de la falaise (proche des vailleuses) - peu ou pas de matériaux argileux au sommet de la falaise - peu ou pas de lessivage sur la craie - absence de végétation 	-10 (Criel-sur-Mer)

Synthèse du fonctionnement du littoral

Quiberville – Sainte-Marguerite-sur-Mer

Juillet 2024

S13	<ul style="list-style-type: none"> - falaise simple - sommet de la falaise rectiligne - peu ou pas de lessivage des argiles sur la craie - peu ou pas de matériaux argileux au sommet - présence d'une bande foncée au sommet de la craie - falaise ne présentant pas de variations de hauteur marqué - présence d'éboulements s'étant produit sur toute la hauteur du front crayeux 	Semblable au S6
------------	---	-----------------

Ce découpage par secteur homogène facilite des comparaisons par analogie.

Ainsi sur le secteur d'étude réalisé par le Cerema, les mouvements verticaux historiques ont été recensés et localisés. La concordance de ces évènements localisés avec la classification des secteurs permet par analogie d'extrapoler la tendance d'un secteur donné ayant connu un événement gravitaire à l'ensemble des secteurs similaires.

Tableau 2 : Synthèse des évènements verticaux survenus selon les faciès présents sur la zone d'étude. (Cerema, 2018)

Secteur	Événement historique			
	Date	Localisation	Volume (m ³)	Géométrie
S2	2007	Varengeville		
S5	17/05/2000	Puys	85000	
	18/02/1995		200 - 300	
	17/07/2017	Veules-les-Roses	24000	100m de long
	02/02/2017	Epineville	450-600	30m de long 10m de haut
	03/07/2000		6000	
	15/07/2000	Les Grandes-Dalles	60000	112m de long 96m de large
	03/04/2023	Quiberville		
	24/10/2020			
	28/01/1995			
	1910	Senneville-sur-Fecamp	100 -1000	
	12/02/2000	Criel-sur-Mer		100m de long
	31/01/2013		8000-10000	96m de long 50m de haut
	11/02/2013		15000	55m de long
	2007		7000	
	12/2010		2000	35m de long 30m de large
	31/12/1997			20m de long
	01/2013		7000	170m de long 50m de haut
S6	11/02/2013		8000	40m de long 40m de haut
	02/2011			
	2008			

À la suite du recensement des mouvements verticaux historiques survenus pour des faciès identiques à ceux de la zone d'étude, une première tendance est identifiable. Les éboulements ont lieu majoritairement sur des secteurs type S5 et S6. Le volume moyen de matériaux en mouvements est de 17 000m³ avec une occurrence principalement sur les mois de décembre, janvier et février pour les événements hivernaux et juillet pour les événements estivaux (Tableau 2).

Cette analyse succincte, permet d'ores et déjà d'extrapoler que les mouvements verticaux au droit de la zone d'étude auront de plus fortes probabilités d'avoir lieu aux secteurs S5 et S6, soit directement à

l'Est et l'Ouest de la zone de littoral urbanisé des communes de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer.

2.5 Caractéristiques de l'estran et des petits fonds

Les galets ont une grosseur qui varie selon, notamment, leur position au regard des ouvrages bloquant le transit. En amont des ouvrages dans le sens de la dérive littorale le cordon est dodu tandis qu'il est plus mince en son aval (Cerema 2023b).

Les cordons se situent systématiquement en haut de plage, mais aussi localement au niveau de la sortie de l'épi buse de la Saône. Leur granulométrie décroît du haut du cordon vers le bas (Cerema 2023b). En milieu et bas de cordon ils sont fréquemment recouverts par une fraction sableuse. Ce sable est probablement d'origine infratidale car les matériaux dont il se compose ont des caractéristiques granulométriques similaires aux sables des petits fonds se trouvant dans la bande des 0 à 15 mètres de profondeur (Costa et al. 2005).

On retrouve des graviers siliceux dans les petits fonds sur la section se trouvant entre Saint-Valery-en-Caux et Tréport. Ils correspondent à un mélange de sables et de graviers de granulométrie hétérogène (DUCLOS, P.A. 2012 in Cerema 2022a). Entre Saint-Valery-en-Caux et le cap d'Ailly, la couverture sableuse est composée de 70 à 97 % de sables mal triés et de 1 % de particules fines. Dans les petits fonds le long du littoral, les sables se présentent sous forme de placages d'épaisseur variée sur le platier rocheux (AUGRIS, C. et CLABAUT, P. 2013 in Cerema 2022a) : ils sont inférieurs à 2 m d'épaisseur entre le Cap d'Ailly et Veules-les-Roses.

En zone naturelle de gros blocs de grès issus d'éboulement ou d'effondrement de la falaise sont visibles sur l'estran et découvrent dans les petits fonds. En aval de la plage, un bunker est « planté » dans le platier sur l'estran à la suite de son éboulement d'origine anthropique pour des questions de sécurisation de la plage. Au même titre que les très gros blocs de grès proches du pied de falaise, le bunker joue un rôle d'obstacle pour les vagues en absorbant une part de leur énergie cinétique.

2.6 Caractéristiques topo-bathymétriques

La topographie de la zone d'étude est caractérisée par des falaises simples peu hautes, d'une trentaine de mètres, juste en aval de la plage de Quiberville. Puis, très rapidement la falaise devient complexe pour aboutir sur les « frettes » au niveau du Cap d'Ailly (Figure 9), ce qui correspond aux arrière-falaises meubles, très instables qui glissent vers la mer sous l'action de la nappe phréatique superficielle. Elles sont d'une altitude d'une trentaine de mètres en haut de la paroi verticale, pour aboutir à 60 à 80 mètres en tête de falaise. La tête de ces falaises se situe à 150 à 200 m de la paroi, dans les terres. Cette zone de frettes est caractéristique de la commune de Sainte-Marguerite-sur-Mer.

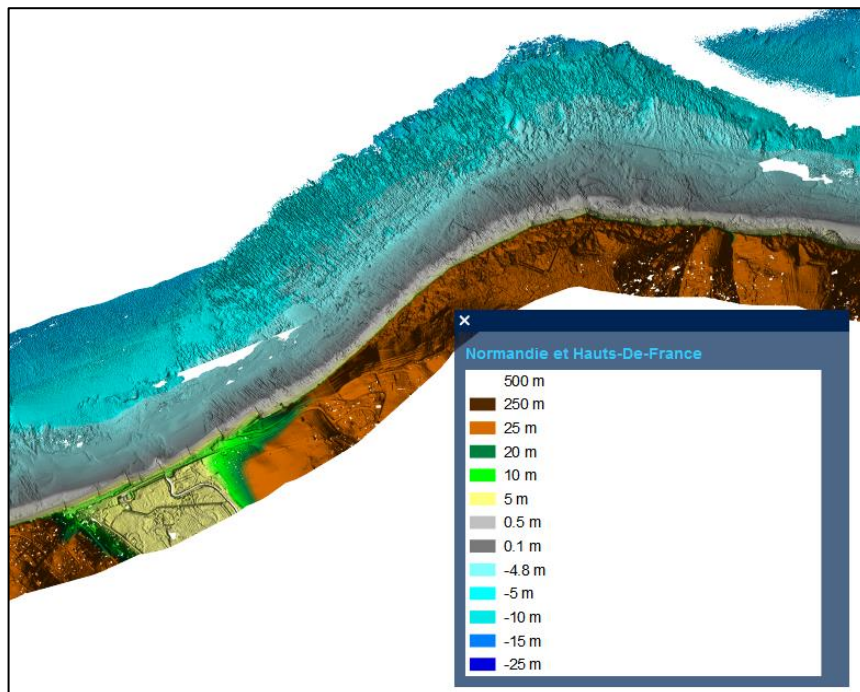


Figure 9 Modèle 3D de la falaise de Sainte-Marguerite-sur-Mer, mai 2019 (Cerema, 2022)

Les frettes sont bordées de chaque côté par la basse vallée et son marais rétro-littoral de Quiberville et Saint-Marguerite-sur-Mer d'une part, et la vasseuse perchée de Vasterival d'autre part.

La basse vallée de la plage de Quiberville Sainte-Marguerite-sur-Mer présente un cordon de galets à profil étagé, dont l'altitude, pouvant atteindre 9 mètres, et la morphologie, évoluent au fil des saisons et des événements météo-marins. D'après les vols drone effectués par le Cerema l'estran sableux en bas de plage présente une altimétrie variant de plus ou moins 1,5 mètres environ, selon les conditions météo antérieures aux observations.

La bathymétrie de la Manche est caractérisée par une pente décroissante très douce depuis le trait de côte pour atteindre une profondeur maximale d'environ - 200 mètres au niveau des paléovallées (Laurent et al. 2023). Selon les levés lidars du SHOM (Litto3D) au large des frettes et de la plage de Quiberville - Sainte-Marguerite-sur-Mer, la bathymétrie est en moyenne de -5 mètres de profondeur à 500 mètres au large du trait de côte, pour atteindre -10 à -15 mètres à environ 1 kilomètre de celui-ci (Figure 10).



On peut également observer au large de la plage de Sainte-Marguerite-sur-Mer un levé Lidar au profil lisse, correspondant à la zone sableuse, tandis que la rugosité du platier est observable au large des frettes, bien que ponctuellement ensablée. Le platier quant à lui est légèrement incliné.

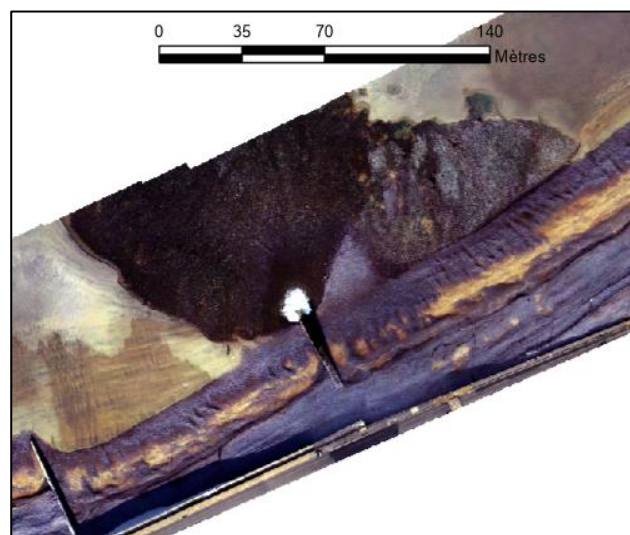
Figure 10 Levé Litto 3D partie maritime sur la zone d'étude (SHOM)

2.7 Caractéristique morpho-sédimentaire et bathymétrique des fonds et de l'estran

Les caractéristiques morpho-sédimentaires de l'estran sont donc les suivants, du haut de l'estran vers les fonds (Figure 11) :

- Le haut de plage présente un cordon de galets étagé dont le stock de sédiment et leur répartition peut varier selon les échanges longitudinaux et transversaux.
- Le bas d'estran est sableux, avec des galets de différentes taille au niveau de la sortie de l'épi-buse de la Saône, sur une largeur d'à peine 200 mètres.

Figure 11 Vol drone réalisé dans le cadre de l'étude sur le cordon de galets, Cerema mars 2020



Dans des profondeurs supérieures à -10 mètres en se déplaçant à l'Est de Saint-Valery-en-Caux, la couverture sableuse devient continue, avec des accumulations de sables moyens (mégarides et de vagues de sables transversales) pouvant atteindre plusieurs mètres (AUGRIS, C. et CLABAUT, P. 2013 in (Cerema 2022a))

Au large du Cap d'Ailly plus précisément, sous l'effet de la diminution des courants de marée, des zones disparates de dépôts sablo-graveleux apparaissent ; elles sont modelées de rubans sableux et de dunes de formes barkhanoïdes, respectivement allongées parallèlement et perpendiculairement aux courants de marée (Cerema 2022a).

3 CONDITIONS CLIMATIQUES, METEOROLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES

La dynamique du trait de côte est impactée par les conditions climatiques, météorologiques et hydrodynamiques telles que les vagues, la houle, le vent, le niveau marin, la température de l'eau, les courants marins. Les côtes du département de la Seine-Maritime sont soumises à des fortes conditions parfois complexes du fait d'un marnage important et de l'exposition aux houles.

3.1 Contextes météorologiques et climatiques

3.1.1 Climatologie générale

Le climat normand est un climat tempéré océanique résultant de la position moyenne des centres d'actions barométriques qui déterminent la circulation générale de l'atmosphère. Cela se traduit par des hivers doux et pluvieux ainsi que des étés frais et humides, une faible amplitude saisonnière des températures mensuelles de 4° à 17° C, une régularité des précipitations avec en moyenne 130 jours de pluie pour environ 800 mm/an (Ellineau 2013 et Cantat 2006 In Cerema 2022a), une fréquence et une intensité importante des vents avec une moyenne de 5,2 m/s à la station la plus proche : Dieppe (Tableau 3) (Cerema 2022a).

Tableau 3 Tableau climatique de Dieppe, Cerema 2022a, 1991 / 2021

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep- tembre	Octobre	No- vembre	Décembre
Température moyenne (°C)	4.9	5	7.1	9.8	12.9	15.9	17.9	17.8	15.6	12.5	8.3	5.6
Température minimale moyenne (°C)	2.7	2.5	3.9	6	9.3	12.1	14.2	14.3	12.4	9.8	6.2	3.4
Température maximale (°C)	7.1	7.7	10.4	13.6	16.5	19.6	21.5	21.4	19.1	15.4	10.6	7.7
Précipitations (mm)	83	69	63	62	66	64	61	73	70	94	102	107
Humidité(%)	84%	82%	79%	75%	76%	75%	74%	75%	77%	81%	85%	84%
Jours de pluie (jrée)	10	9	9	9	9	8	9	9	9	11	12	12
Heures de soleil (h)	3.4	4.3	5.9	8.2	8.7	9.6	9.9	9.0	7.2	5.5	4.1	3.6

3.1.2 Température

Les températures sont homogènes sur l'ensemble de l'année avec une température moyenne de 10,7°C. Cependant, en moyenne pour le mois le plus froid, en janvier, les températures atteignent difficilement 4.1°C et de même pour le mois le plus chaud, en juillet, avec 17.7°C à Dieppe (Cerema 2022a) (Figure 12).

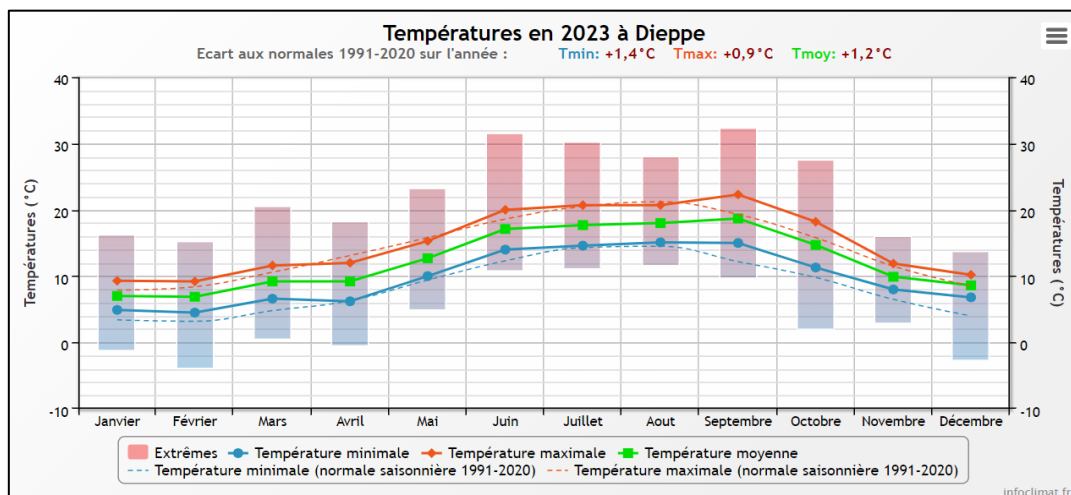


Figure 12 Graphe des températures en 2023 à Dieppe, infoclimat.fr, 2023

D'après l'ensemble des relevés effectués à la station météorologique de Dieppe, sur 317 jours soit 87% de l'année, les températures journalières maximales sont comprises entre 1 et 24° C. Elles sont plus élevées, soit supérieures à 25° C, seulement 7 jours soit 2% de l'année. À l'inverse, les températures froides, soit inférieures ou égales à 0° C, sont présentes sur 32 jours 9% de l'année. L'intensité de ces températures froides, provoquant le gel, la moitié est comprise entre 0 et -2° C et l'autre moitié est concerné par des températures inférieures à -2° C. Enfin dans 77% des cas de gel, les séquences durent deux jours consécutifs. L'alternance des séquences de gel et de dégel joue un rôle dans la déstabilisation des matériaux composant les falaises. Un total d'environ 28 cycles de gel/dégel a été enregistré annuellement entre 1981 et 2010 (Cantat, 2012 In Letortu 2013).

3.1.3 Pluviométrie

Les précipitations sont généralement minimales durant le mois d'avril et maximales durant le mois de novembre (Figure 13).

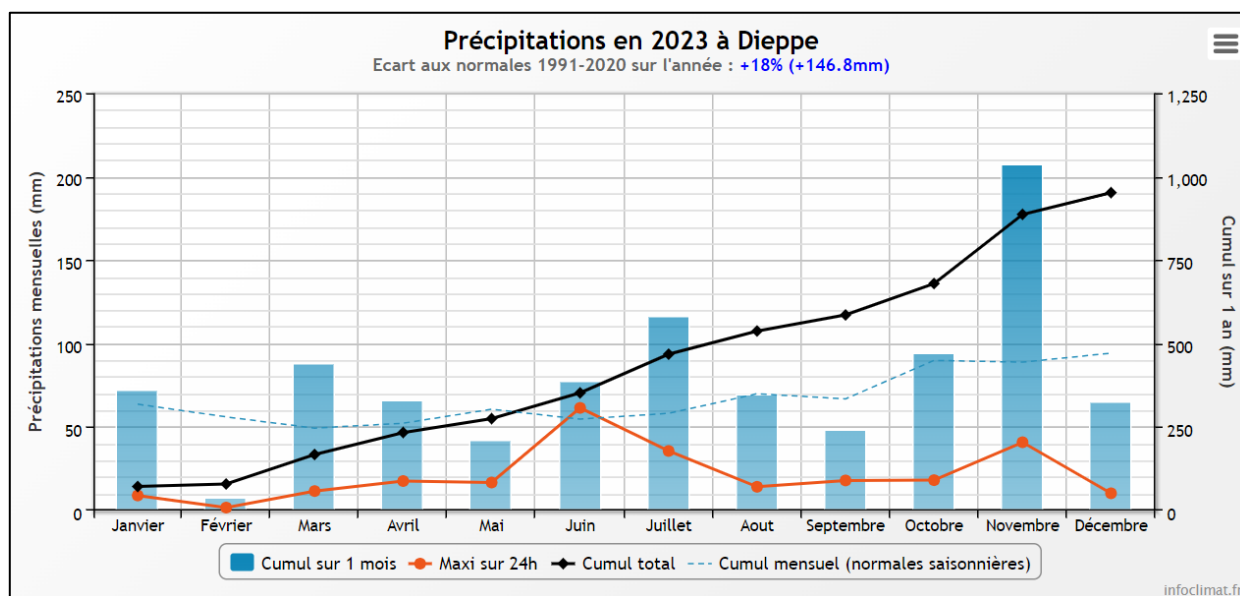


Figure 13 Graphique des précipitations en 2023 à Dieppe, infoclimat.fr, 2023

Des mesures effectuées au sémaphore de Dieppe (station météo la plus proche) indiquent que pour la période de 1981 à 2010, les périodes hivernales (d'octobre à janvier) sont les plus pluvieuses pouvant atteindre des cumuls mensuels de 90 mm. Les précipitations mensuelles minimales sont de 42 mm et les maximales sont de 77 mm (Cerema 2022a).

D'un point de vue des mesures journalières de précipitation, près de 130 jours par an, soit un peu plus d'un jour sur trois est pluvieux. Cette tendance peut atteindre un jour sur deux entre octobre et janvier. De plus, lors des jours de pluie dans 77% des cas, il pleut entre 1 et 5 mm. Les précipitations sur la durée sont également importantes. En effet, les jours pluvieux à partir de sept jours consécutifs, représentent 32% de l'année. Ces précipitations peu intenses, mais cumulées sur de longues périodes, favorise également la déstabilisation des falaises (Letortu 2013).

3.1.4 Vent

Sur le secteur de la zone d'étude, les vents sont à 60% de secteur sud à nord-ouest et à 30% de secteur nord à est. La direction et la force des vents varient également selon les saisons. Les plus forts coups de vents s'observent entre novembre et mars avec une orientation généralement sud-ouest. Au contraire, en été les vents sont plus faibles et sont davantage en provenance de l'ouest (LCHF 1986 ; Costa 1997 ; Augris et al. 2004 In Elineau 2013). Au sémaphore de Dieppe, les vents moyens annuels sont de 5,2 m/s. La proportion des vents faibles sur une année moins de 6 m/s est de 5,7%, les vents moyens supérieurs ou égal à 8 m/s sont présents 10% de l'année et les vents très forts se manifestent durant 8% de l'année avec des rafales supérieures ou égales à 16 m/s (Cerema 2022a). Les forts coups de vents et tempêtes sont les principales perturbations impactant la dynamique sédimentaire, ces derniers prenant majoritairement un axe sud-ouest à nord-est.

Le littoral de Quiberville et de Sainte-Marguerite-sur-Mer est donc impacté par les flux de sud-ouest à nord-ouest pour lesquels les fetchs¹ sont importants (Letortu 2013) ;

3.2 Conditions hydrodynamiques

3.2.1 Température de la mer

La température des eaux de la mer est étroitement liée à la bathymétrie. En effet, de façon générale ce sont les eaux côtières, connaissant des bathymétries faibles qui sont plus chaudes en été. Au contraire lors de la saison hivernale ce sont les eaux de grandes profondeurs qui sont les plus chaudes, car elles connaissent moins de variation saisonnière. En ce qui concerne les eaux au large de la zone d'étude, les températures sont influencées par des fonds plus importants que dans le golfe normand-breton par exemple, les températures y sont donc plus chaudes en profondeur et connaissent des écarts moins importants. En moyenne la température sur l'ensemble de la colonne d'eau (2010-2015) est de 12,5° à 13° C. Quant aux écarts types observés (2010-2015), ils sont en moyenne de 3,8° à 4,8° C. En profondeur, les températures peuvent descendre jusqu'à 8° C (Cerema 2022a).

3.2.2 Niveau marin

Le niveau marin est composé du niveau moyen, de la marée astronomique et de la surcote ou de la décote² qui prend en compte les effets atmosphériques et la combinaison d'autres ondes (vagues, sèches, tsunamis, etc.). Le niveau marin peut-être mesuré en mètre NGF, à Dieppe, le niveau moyen est de 0,48 m avec comme plus basse mer astronomique -4,52 m et comme plus haute mer astronomique 5,66 m (Figure 14) (Cerema 2022a).

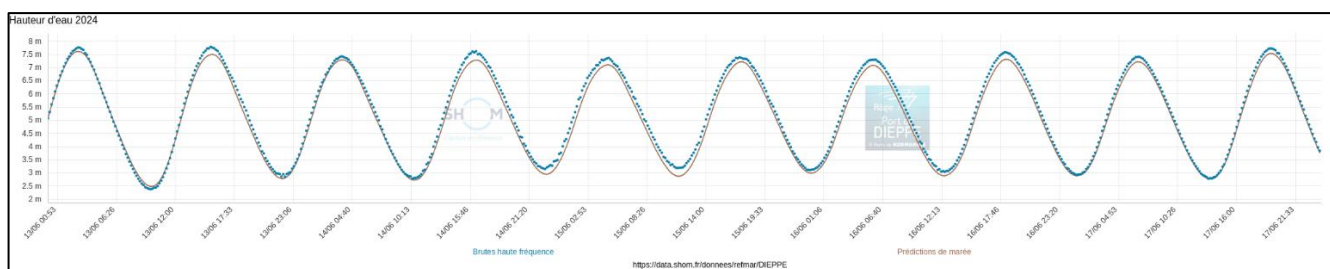


Figure 14 Exemple de données issues du marégraphe de Dieppe, Refmar, SHOM, 2024

En Manche, la marée correspond à la propagation et à la réflexion d'une onde de marée provenant de l'océan Atlantique et se propageant dans la manche d'ouest en est. Elle dépend de la bathymétrie et de la géométrie du bassin. La forme de la Manche, se rétrécissant d'ouest en est, la marée augmente donc son amplitude et par conséquent son marnage. Les marées astronomiques impactant notre zone d'étude ont un intervalle moyen de 6 h et 13 min. Le marnage atteignant jusqu'à 10,18 m au marégraphe de Dieppe (Cerema 2022a).

A cela, il faut rajouter les phénomènes de surcote. Ce phénomène peut également avoir comme origine seule ou conjointe, le vent et les vagues. Lorsque les surcotes sont combinées à un niveau marin de vives-eaux, elles peuvent entraîner des submersions marines sur le littoral. Cette conjonction de facteurs est rare, sur 150 surcotes observées en Manche, seulement 16 d'entre-elles étaient supérieures à 1 m (Costa et Delahaye, 2005 repris par Elineau 2013). La plus forte valeur de surcote de pleine mer observée, a atteint 1,61 m le 16 octobre 1987 à Dieppe (marégraphe le plus proche)

¹ Fetch : temps et distance en mer ou sur un plan d'eau sur laquelle souffle un vent donné sans rencontrer d'obstacle, plus le vent va souffler longtemps et sur une grande distance, donc plus le fetch est important, plus la hauteur des vagues sera grande. OCLM

² Surcote/décote : c'est la différence entre le niveau marin observé et le niveau marin qui existerait en présence de la marée seule. Lorsque cette différence est positive on parle de surcote et lorsqu'elle est négative on parle de décote. Une surcote/décote a principalement une origine météorologique, elle est générée lors du passage d'une dépression ou d'un anticyclone. La diminution de 1 hPa de la pression atmosphérique a pour effet l'augmentation de 1 cm du niveau de la mer (PARKER, J.-A. et FODEN, D., 2009).

(Cerema 2022a). Enfin, concernant les niveaux extrêmes, le plus fort niveau de pleine mer observé au marégraphe de Dieppe atteint la valeur de 5,95 m NGF le 28 février 2010 lors de la tempête Xynthia.

3.2.3 Etats de mer

D'un point de vue des états de mer, dans des conditions climatiques dites normales, les houles en Manche sont généralement de secteur ouest. Elles sont renforcées lorsque les vents sont les plus forts, notamment en période hivernale d'octobre à mars. Les houles primaires sont plutôt d'ouest et les mers de vent sont plutôt de ouest-sud-ouest. Sur le secteur d'étude les fortes vagues sont majoritairement liées aux mers de vent, plutôt qu'aux houles primaires (Cerema 2022a). Les directions de provenance des vagues sont à 60% orientées ouest, nord-ouest (Elineau 2013). À Dieppe, près de 80% des houles sont inférieures à 1 m, la hauteur maximale mesurée est de 4 m (Figure 15). Le linéaire côtier de Quiberville et de Sainte-Marguerite-sur-Mer étant quasiment parallèle aux directions de provenance de la majorité des houles, leur impact sur le secteur est donc réduit, mais existant (Cerema 2022a).

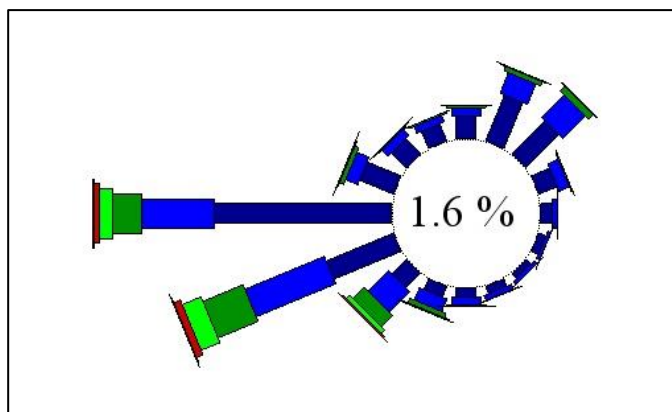


Figure 15 Rose des houles (au large de Dieppe), ANEMOC, 1979-2011

3.2.4 Courants marins

Les courants marins jouent également leur rôle dans les conditions hydrodynamiques à prendre en compte pour expliquer l'évolution du littoral de Quiberville et de Sainte-Marguerite-sur-Mer. Les courants généraux en Manche sont issus d'une branche du Gulf Stream provenant de l'Atlantique Nord de direction nord-nord-est. Cependant, ces courants sont négligeables par rapport aux courants de marées (Cerema 2022a). Ces derniers tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, avec une variation d'intensité et de direction selon le cycle de la marée. Plus précisément, les courants de flots (marée montante) portent vers le nord-est, tandis que les courants de jusant (marée descendante) portent vers l'ouest. En début de marée montante à Dieppe, les courants de marée sont orientés nord-est à sud-ouest avec une vitesse moyenne comprise entre 1 et 1,5 m/s. Ensuite, 3 heures avant la pleine mer jusqu'à trois heures après la pleine mer, les courants s'inversent. Ces derniers prennent une orientation de sud-ouest à nord-est avec une vitesse moyenne de 0,5 à 1 m/s. Enfin, les courants s'inversent à nouveau, suivant ainsi le cycle des marées.

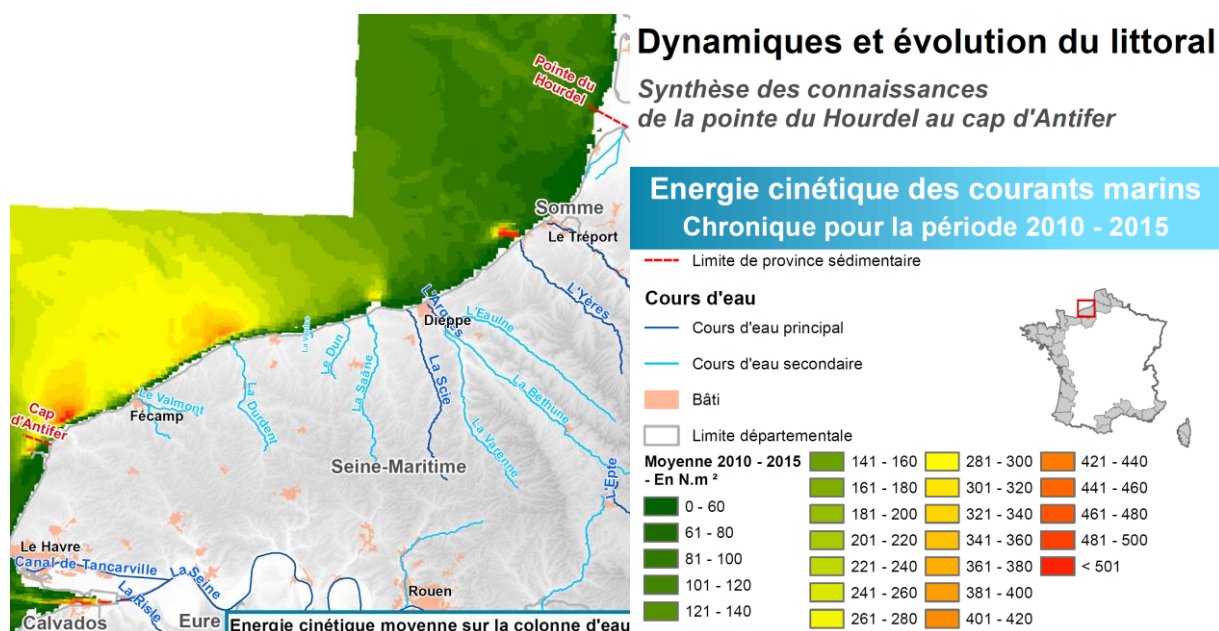


Figure 16 Energie cinétique des courants marins (2010-2015), Dynamiques et évolution du littoral, Fascicule n°2, Cerema, 2023

En plus de la vitesse estimée du courant, la Figure 16 montre l'énergie cinétique liée aux courants. Sur le littoral de la zone d'étude, ce dernier est compris entre 0 et 60 N.m² et au large les forces peuvent aller jusqu'à environ 220 N.m² (Cerema 2022a). Néanmoins, malgré les moyennes de vitesses, quelques variations sont possibles. En effet, le courant de flot est plus rapide d'environ 20 à 30% que le courant de jusant (Latteux 2001). Les directions des courants de marées varient également en fonction du trait de côte du littoral. Par exemple les courants sont orientés nord-nord-est et sud-sud-ouest à Antifer alors qu'à Dieppe, ils sont orientés est-nord-est et ouest-sud-ouest (LCHF, 1986 in Elineau 2013).

3.3 Analyse du fonctionnement hydraulique du site permettant de comprendre les interactions entre la mer et le littoral

Le secteur d'étude est concerné par le fleuve côtier de la Saâne. Ce dernier a un débit maximum pouvant dépasser 40 m³.s⁻¹. Son débit minimum est très faible, environ 1 m³.s⁻¹. Son embouchure est artificialisée via une buse avec un clapet anti-retour qui permet l'évacuation de la Saâne sur l'estran (Cerema 2022a). Malgré ce niveau de débit parfois faible, un volume d'eau oscillant³ non négligeable est présent dans l'estuaire de la Saâne. Ce dernier se situe entre 70 000 et 100 000 m³. La dérive littorale obtenue par modélisation hydro sédimentaire est d'environ 6 500 m³ par an en galets et potentiellement 39 000 m³ en sable (Antea Group 2017). Le littoral de Quiberville et de Sainte-Marguerite-sur-Mer est aussi concerné par les apports solides de la Seine. Une partie significative des sédiments expulsés par le fleuve, environ 500 000 t/an, transite vers le nord, le long du littoral de la Seine-Maritime puis de la Picardie (Latteux 2001).

³ Volume oscillant : masse d'eau qui, dans un estuaire, se déplace alternativement vers l'amont puis vers l'aval sous l'influence de la marée. (Projet MARC, Ifremer).

4 MOBILITE DU TRAIT DE COTE

D'après le Réseau d'Observation du Littoral Normandie Haut-de-France (ROLNHDF), le trait de côte peut être définie par la limite entre la terre et la mer. Il peut être d'origine naturel (côtes basses, côtes à falaises ou côtes rocheuses) ou artificielle (digue, perré...)

Comme présenté dans la partie 1 Géomorphologie du Littoral, le littoral du secteur d'étude est formé de falaises. Ces dernières sont en érosion continue, principalement sous l'effet des processus continentaux (ruissèlement, gel-dégel), marins (vent, houle) et parfois en raison d'aménagements anthropiques. Cette érosion peut être accélérée par des événements ponctuels irréversibles (voir partie 2.4) causant une érosion par à-coups (Cerema 2022b).

Suites à des événements majeurs apparus au cours des 18^e et 19^e siècles, de nombreuses études ont été réalisées afin d'évaluer ce recul afin d'adopter des mesures pour l'urbanisation des secteurs à risques (Cerema 2022a)

4.1 Méthodes d'analyse des traits de côte à falaise

Selon Letortu 2013, les nombreux objectifs pour lesquels l'érosion côtière est étudiée, la diversité dans le choix du référentiel « trait de côte », des équipements et des documents disponibles, ont conduits à l'utilisations de différentes méthodes de mesure de l'évolution du trait de côte. Dans sa thèse, elle présente deux méthodes de calcul : une approche par la ligne de base et une basée sur l'aire.

Dans cette partie seront présentées ces deux différentes méthodes appliquées dans les études réalisées sur le secteur d'étude.

4.1.1 Indicateur national de l'érosion côtière – Cerema 2018

L'indicateur national d'érosion côtière a été produit dans le cadre de la Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte. L'objectif est de fournir au 1 / 100 000 un aperçu global, homogène et comparable de la mobilité passé du trait de côte français sur une période de plusieurs dizaines d'années afin de dégager des tendances d'évolution sur le long terme (Cerema 2018c).

L'élaboration de l'indicateur repose sur trois étapes de production :

1. Choix des supports et des marqueurs du trait de côte
2. Digitalisation des marqueurs du trait de côte
3. Calcul des taux d'évolution

Étape 1 :

La durée d'observation de l'étude est conditionnée par le choix des supports. Au moment de l'étude, les principaux supports disponibles étaient la BD-Ortho Historique de l'IGN et des archives traitées par le Shom et l'Ifremer pour la période ancienne, l'Ortholittorale V2 et la BD-Ortho de l'IGN pour la période récente. Les périodes correspondantes sont situées entre 1920 et 1957 pour la période ancienne et entre 2005 et 2014 pour la période récente.

Une fois ce travail fait, les marqueurs du trait de côte ont été choisis. Ces marqueurs sont définis comme des « marqueurs morphologiques du littoral observables aussi bien sur le terrain que sur des photographies aériennes » (Cerema 2018c). Pour les côtes à falaise, c'est la limite de végétation (équivalent généralement au haut de falaise) qui a été retenue.

Étape 2 :

Les marqueurs ont ensuite été digitalisés d'après les supports choisis. Dans un premier temps sur les prises de vue aérienne récentes plus précises, au 1 / 2500, puis sur les prises de vues anciennes, en suivant bien le même type de marqueur afin d'obtenir une comparaison fiable.

Étape 3 :

La tendance d'évolution du trait de côte a été calculée selon la méthode de la ligne de base, d'après des profils espacés de 200 m le long du rivage (Figure 17). Au droit de chaque profil, la distance comprise entre les deux traits de côte a été mesurée pour calculer un taux d'évolution en m/an. Sur

l'exemple ci-dessous, il y a eu un recul de 140 m au droit du transect entre 1937 et 2011, ce qui correspond à une vitesse d'évolution d'environ 1.8 m/an (Figure 18).

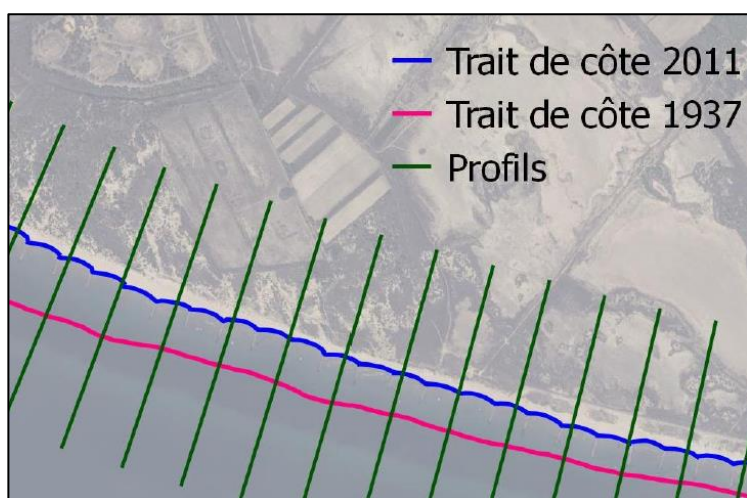


Figure 17 Exemple de profils générés le long du rivage (Cerema, 2018)



Figure 18 Principe général du calcul des tendances d'évolution du trait de côte (Cerema, 2018)

4.1.2 Littoraux normands 2027 – Cerema 2023

L'étude Littoraux normands 2027 a pour objectif de déterminer les enjeux impactés par le recul du trait de côte et par la submersion marine aux horizons 2050 et 2120 en Normandie. Pour cela, l'évolution passée du trait de côte a été analysée afin d'être projetée à des horizons futurs.

Cette analyse a été réalisée en trois étapes :

1. Digitalisation du trait de côte récent
2. Calcul des vitesses d'évolution
3. Choix de la période d'évolution à projeter dans le cas d'une côte à falaise

Étape 1 :

Cette étape a consisté à mettre à jour, à une échelle de 1 / 1000, le trait de côte récent digitalisé pour la réalisation de l'Indicateur national d'érosion côtière, en contrôlant et modifiant au besoin les changements et évolutions relevés sur les orthophotographies les plus récentes (2019 pour la Seine-Maritime) (Figure 19).

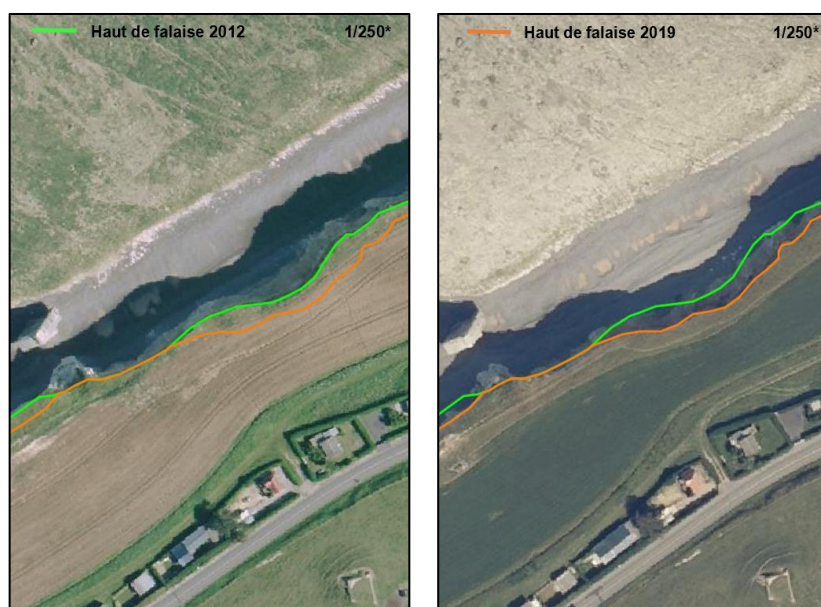


Figure 19 Trait de côte 2012 mis à jour pour correspondre à 2019

Étape 2 :

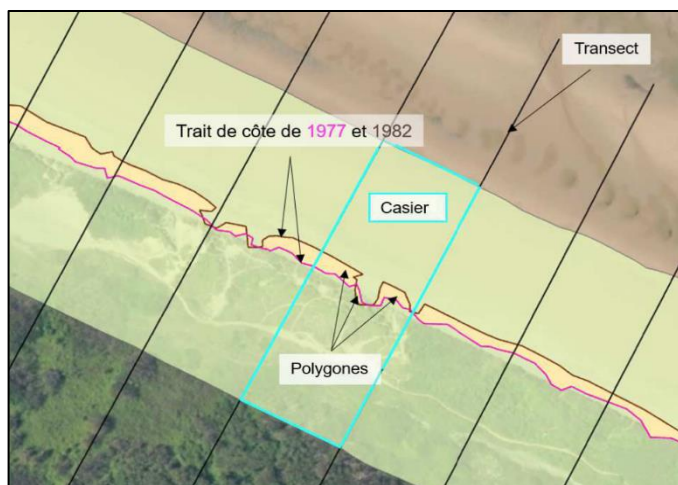
Comme vu précédemment, les côtes à falaises sont en érosion continue, parfois accélérée par des événements ponctuels pouvant causer des reculs significatifs (Cerema 2023a).

M.Crowell et al. (1993), préconisent d'étudier l'évolution des falaises sur un pas de temps de 60-80 ans afin de mesurer les grandes tendances d'évolution et non la variabilité du recul lié aux tempêtes et aux variations saisonnières du stock de galets en pied de falaise (Cerema 2023a). Au moment de l'étude, les traits de côte disponibles sur le département de la Seine-Maritime sont ceux de 1947, 2010, 2012, 2015 et 2019.

Il a donc été décidé d'analyser l'évolution du trait de côte entre 1947 et 2019.

Étape 3 :

La méthode utilisée pour calculer les vitesses d'évolution du trait de côte est celle basée sur l'aire dite des « surfaces perdues ». Elle consiste à mesurer l'aire située entre deux traits de côte dans un espace défini.



Pour appliquer cette méthode, le littoral a été découpé par des transects espacés de 50 m, positionnés selon les ouvrages impactant le transit sédimentaire. Ces transects permettent de délimiter des casiers dans lesquels les calculs seront effectués. La surface de calcul analysée correspond à l'ensemble des polygones, délimités par deux traits de côte, au sein d'un même casier (Figure 20).

Figure 20 Terminologie des éléments permettant de calculer la surface gagnée et/ou perdue entre deux traits de côte de millésimes différents (Cerema, 2023)

Une fois la surface totale des polygones mesurées, la surface totale d'évolution peut être calculée. Pour cela, trois types de calculs sont réalisés :

- Les valeurs positives en érosion et en accrétion = $S_{\text{totale en accrétion}} - S_{\text{totale en érosion}}$
- Les valeurs nulles d'érosion et les valeurs positives en accrétion = $S_{\text{totale en accrétion}}$
- Les valeurs positives en érosion et les valeurs nulles d'accrétion = $S_{\text{totale en érosion}}$

Il reste ensuite à calculer la vitesse d'évolution entre deux traits de côte en appliquant la formule suivante :

$$\frac{S_{\text{totale}}}{N_{\text{années}} * L_{\text{transect}}}$$

Avec S_{totale} , la surface d'évolution totale au sein d'un casier, $N_{\text{années}}$ le nombre d'année séparant les deux traits de côte et L_{transect} la distance entre deux transects. Le résultat obtenu s'exprime en m/an.

4.1.3 Etude sur le recul du trait de côte sur le littoral de Seine-Maritime – Cerema 2018

L'objectif de cette étude est d'estimer les reculs du trait de côte potentiel à différentes échéances futures pour déterminer les enjeux qui pourraient être concernés en Seine-Maritime. Pour cela, le recul moyen par an et le recul maximal du trait de côte ont été définis.

Les mesures ont été réalisées d'après les deux traits de côte produits dans le cadre de l'Indicateur national de l'érosion côtière : le trait de côte historique de 1947 et le trait de côte récent de 2012. Sur le secteur à falaise de la zone d'étude, le marqueur morphologique retenu est le haut de falaise sauf au niveau du Cap d'Ailly où le marqueur retenu correspond à la ligne de crête des frettes (Figure 21).



Figure 21 Marqueurs morphologiques du trait de côte au niveau de Sainte-Marguerite-sur-Mer

Des transects ont été générés tous les 50 m le long du littoral selon la position des ouvrages majeurs (ouvrage de plus de 100 m et / ou ayant un fort impact sur le stock sédimentaire).

Deux méthodes d'analyse sont ensuite appliquées :

1. Calcul du recul moyen par la méthode des surface perdues
2. Calcul du recul maximal

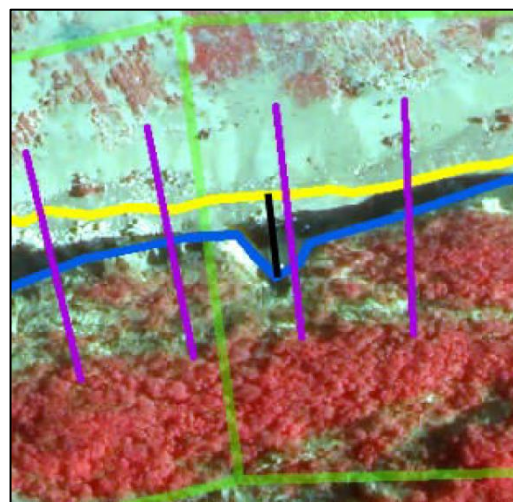
Première méthode :

La méthodologie expliquée en 3.1.2 est appliquée.

Deuxième méthode :

Par casier de 50 m, la distance la plus grande entre deux traits de côte est sélectionnée. Pour cela, des transects espacés de 5 m sont générés au sein des casiers de 50 m. Le transect le plus long est représentatif du recul maximal au sein du casier (Figure 22).

Figure 22 Recul maximal entre deux traits de côte (casier de 50m, recul max, trait de côte récent, trait de côte ancien)



4.1.4 Suivi du trait de côte entre Sainte-Marguerite-sur-Mer et l'Église de Varengueville – Cerema 2018 à 2022

L'objectif de l'étude est de mieux comprendre le fonctionnement du littoral au niveau des falaises majoritairement complexes du Cap d'Ailly, entre Sainte-Marguerite-sur-Mer et l'église de Varengueville-sur-Mer. Pour cela, des modèles 3D ont été réalisés à intervalle de temps régulier : février 2018, mai 2019, novembre 2019, septembre 2020, juin 2021, novembre 2021 et mars 2022.

Ces analyses ont été réalisées en quatre étapes :

1. Réalisation des vols drones
2. Modélisation 3D par photogrammétrie

3. Délimitation du trait de côte
4. Calcul de l'évolution du trait de côte au niveau du haut de falaise et au niveau des frettes

Étape 1 :

Les vols drone sont réalisés sur 4 km le long des falaises, à une hauteur de 120 à 150 m d'altitude. Chaque vol parcourt 800 m : 400 m à l'aller avec la caméra orientée vers les frettes puis 400 m au retour avec la caméra orientée vers le pied de falaise.

Afin de géoréférencer les données relevées, des cibles géoréférencées ont été installées sur la zone d'étude.

Étape 2 :

Les images sont traitées par photogrammétrie afin d'obtenir des nuages de points, un Modèle Numériques d'Élévation (MNE) et des orthophotographies. Le modèle 3D est ensuite généré par un logiciel spécifique (Figure 23).



Figure 23 Modèle 3D de la falaise de Sainte-Marguerite-sur-Mer – mai 2019

Étape 3 :

La digitalisation du trait de côte d'après les modèles 3D permet de vérifier l'apport de l'acquisition par drone dans l'analyse du fonctionnement de la falaise.

Lors des premiers rapports, le trait de côte était relevé par photo-interprétation. Du fait de la complexité de la morphologie de la falaise, des erreurs d'interprétation et de digitalisation dues aux glissements de terrain en crête de falaise et de l'échelle du levé de trait de côte ont pu être observés.

Le rapport de 2022 présente une nouvelle méthodologie consistant, dans un premier temps, à redéfinir le marqueur du trait de côte. Il correspond désormais à la première rupture de pente identifiée. L'ensemble des traits de côte, de 2018 à 2021, ont été refait pour suivre la même méthodologie de levé.

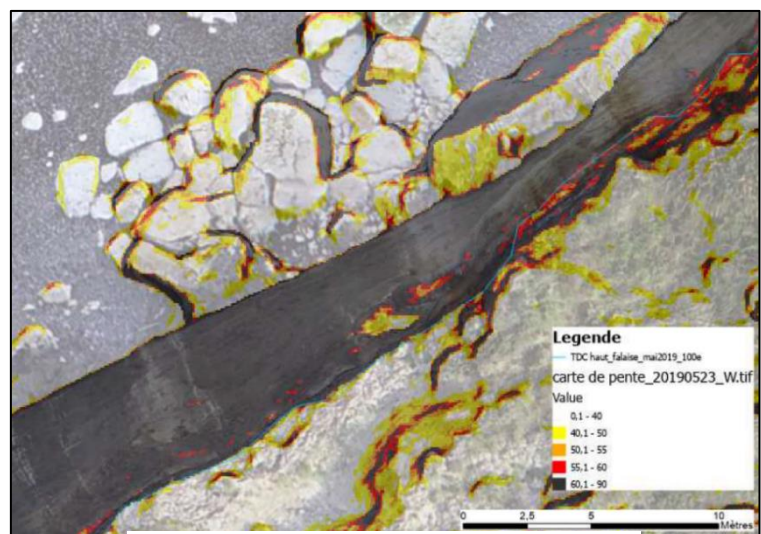


Figure 24 Carte des pentes, Cerema 2022

Pour digitaliser ce nouveau marqueur de trait de côte, des cartes de pentes ont été générées à partir des MNE obtenus. Après observation, il a été considéré que la rupture de pente d'environ 55° facilitait les départs de blocs et correspondait donc au trait de côte. Suivant cette méthode, le trait de côte a été digitalisé au 1 / 100 (Figure 24).

Au niveau des frettes, des difficultés ont été rencontrées en raison de la qualité de l'orthophotographie et de la végétation. Des secteurs à enjeux ont été déterminés et des levés DGPS organisés afin de conforter la méthodologie et la compléter.

Étape 4 :

Pour calculer l'évolution du haut de falaise et des frettes, la méthode des surfaces perdues (voir partie 4.1.2) a été appliquée selon des transects espacés de 50 m. L'analyse des résultats a montré que les casiers de 50 m peuvent entraîner un biais notamment au niveau des éboulements. L'analyse a donc été de nouveau réalisée mais à partir de transects espacés de 10 m.

4.1.5 L'évolution du trait de côte et les submersions marines dans les communes de Sainte-Marguerite-sur-Mer et Quiberville. – G.Delsigne 2023

Le mémoire s'intitulant « L'évolution du trait de côte et les submersions marines dans les communes de Sainte-Marguerite-sur-Mer et Quiberville. » réalisée en 2023 par Grégoire Delsigne consiste à quantifier le recul des falaises crayeuses de la commune de Sainte-Marguerite-sur-Mer à différents pas de temps et d'étudier l'évolution des conditions de franchissement de la mer (Delsigne 2023). Dans une première partie, l'évolution de la falaise sur un pas de temps long est étudiée. Cette partie est divisée en trois étapes :

1. Choix et traitement des orthophotographie
2. Choix du marqueur du trait de côte et digitalisation du trait de côte
3. Calcul des vitesses de recul de la falaise

L'auteur a décidé de travailler sur un pas de temps long (70 ans) d'après les images aériennes de l'IGN et l'orthophotographie de 2020 du ROL. Le choix des images s'est appuyé sur leur continuité, la présence d'éléments repères nécessaires au géoréférencement (route, bâtiment) et la visibilité du trait de côte.

Pour mesurer l'érosion à une échelle fine et observer la vitesse d'évolution de la falaise, le marqueur de trait de côte « haut de falaise » a été digitalisé à l'échelle 1 / 1000. Un tri a été réalisé afin d'éviter les aberrations, certains traits de côte récents peuvent apparaître en « accrétion » par rapport à des traits de côte plus anciens. Les traits de côte retenus après cette étape sont ceux de 1947, 1966, 1989, 2000 et 2020.

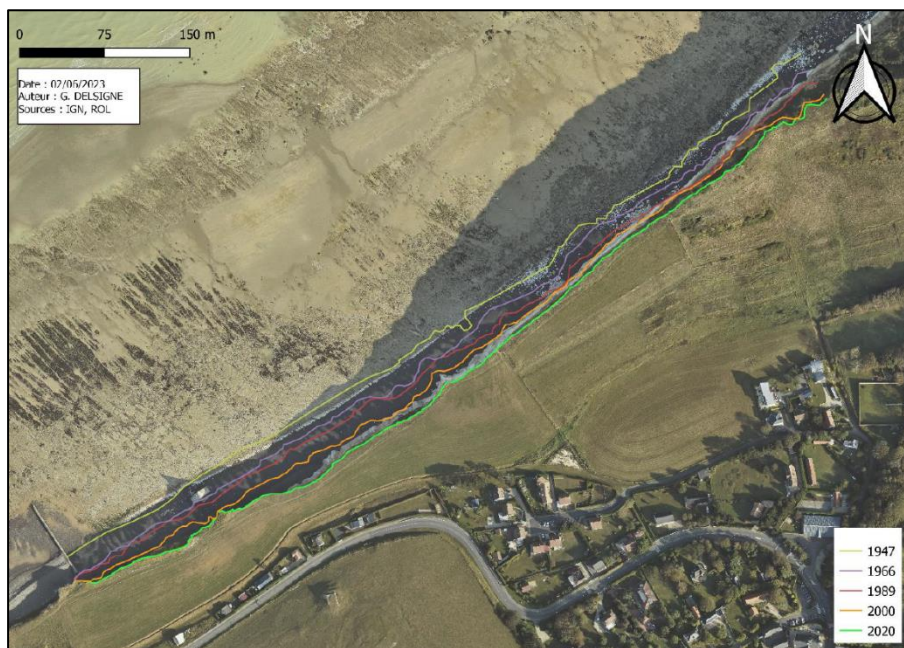


Figure 25 Traits de côte utilisés pour les calculs d'évolution du trait de côte

Trois questions sont soulevées pour déterminer les méthodologies d'analyse de l'évolution de la falaise :

- La construction de l'épi en 1964 a-t-elle provoqué un ralentissement du recul de la falaise ?
- L'épi affecte-t-il toute la falaise d'Ouest en Est de la même façon ?
- Quel est le rythme de recul global de la falaise depuis 1947 ?

Dans les trois cas, la méthode basée sur l'aire est appliquée (ou méthode des surfaces perdues) permettant d'obtenir des vitesses d'évolution en m/an.

Pour répondre aux questions posées ci-dessus, les périodes suivantes ont été analysées :

1. La période totale **1947-2020** : pour connaître le recul global moyen actuel du trait de côte.
2. La période **1947-1966** : de la plus ancienne date à la construction de l'épi
3. La période **1966-2020** : de la construction de l'épi à la date la plus récente digitalisée

La comparaison des résultats (2) et (3) permet de répondre à la première question. L'analyse des vitesses d'évolution obtenues en (3) sur l'ensemble de la falaise permet de répondre à la deuxième question. Enfin, les résultats obtenus en (1) permettent de calculer le recul global de la falaise depuis 1947.

Dans une deuxième partie, l'évolution du trait de côte de la falaise de Sainte-Marguerite-sur-Mer est analysée sur un pas de temps court, d'ordre saisonnier, par photogrammétrie. L'objectif est de mettre en évidence les zones de la falaise qui ont perdu de la matière lors d'éboulement ou d'écroulement et de mesurer la distance affectée. L'analyse a été réalisée entre septembre 2022 et avril 2023 et s'est déroulée en trois étapes :

1. Acquisition photogrammétrique des falaises
2. Modélisation des nuages de points
3. Comparaison des deux nuages de points

Étape 1 :

L'utilisation de la photogrammétrie nécessite de prendre plusieurs photographies géoréférencées de la falaise sur plusieurs pas de temps. Les photographies ont été prises le 19 septembre 2022 et le 11 avril 2023.

Étape 2 :

Les images sont traitées sur un premier logiciel afin de leur attribuer des coordonnées GPS. Sur un deuxième logiciel, les deux nuages de point sont générés ([Figure 26](#)).



Figure 26 Modélisation de la falaise le 19 septembre 2022

Étape 3 :

A l'aide d'un outil du logiciel permettant de calculer la distance entre deux nuages de points, les différences entre ces derniers sont analysées. Les zones d'accumulation et d'érosion sur la falaise sont alors obtenues (Figure 27).

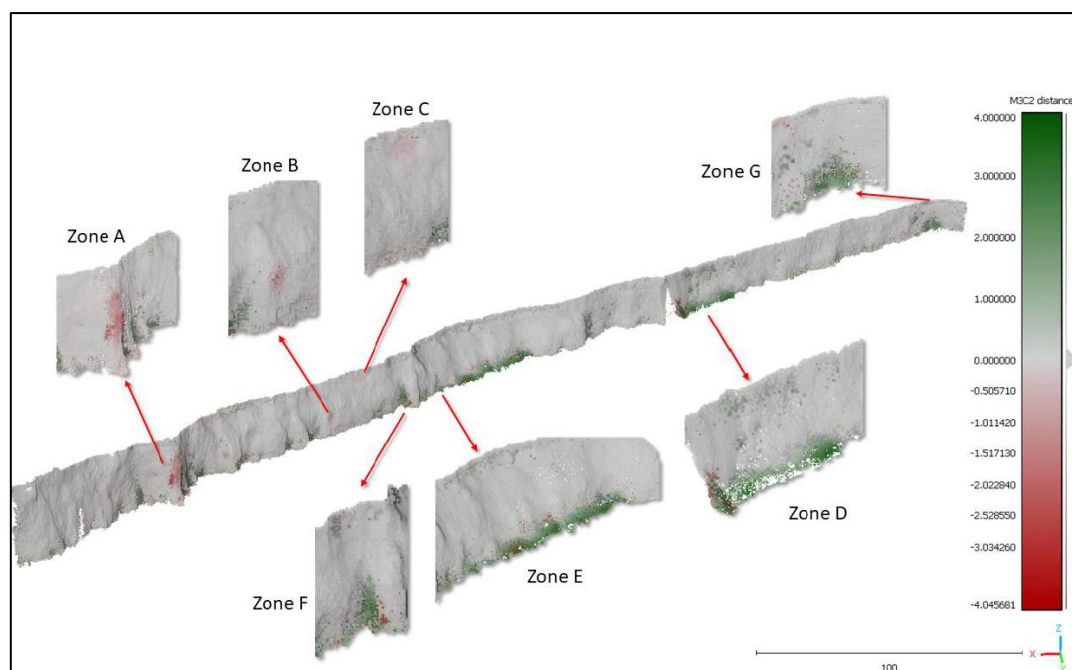


Figure 27 Zones d'accumulation et d'érosion sur la falaise sur la saison hiver / printemps 2022-2023

Finalement, les volumes de gains et de pertes de sédiments sont mesurés à l'aide d'un logiciel.

4.1.6 Étude sur l'érosion côtière en aval des ouvrages majeurs en Seine-Maritime – Secteur de Sainte-Marguerite-sur-Mer – Cerema 2018

L'objectif de cette étude est d'étudier le comportement du trait de côte en aval des ouvrages majeurs pour identifier leur impact sur le stock de galet et sur les falaises. Elle fait suite à l'étude sur le recul du trait de côte sur le littoral de Seine-Maritime (voir partie 4.1.3). Un ouvrage est considéré majeur lorsqu'un épi a une longueur supérieure à 100m ou qu'un ouvrage transversal semble avoir un impact sur les dynamiques du trait de côte. L'analyse a été menée en deux étapes :

1. Digitalisation de traits de côte datant de la construction de l'ouvrage majeur étudié et de 20 ans après sa construction. Si une extension a été construite, les traits de côte datant de l'extension de l'ouvrage et de 20 ans après la construction de l'extension sont aussi digitalisés.
2. Calcul de la vitesse d'érosion du trait de côte

L'analyse a été menée sur sept secteurs : Sainte-Marguerite-sur-Mer, Pourville, Dieppe, Puys, Penly, Criel-sur-Mer et Mesnil-Val. Seulement le secteur de Sainte-Marguerite-sur-Mer sera détaillé ici.

Étape 1 :

Les traits de côte ont été digitalisés d'après la méthode de l'Indicateur d'érosion côtière, selon les marqueurs du trait de côte « haut de falaise ». Sur le secteur d'étude, les traits de côte suivant ont été digitalisés :

- 1966 d'après les orthophotographie Geoportail,
- 1982 d'après l'Ortho du ROLNP,
- 1955 d'après les orthophotographie Geoportail,
- 2014 d'après l'Ortholittorale V2.

Étape 2 :

La méthode de calcul des surfaces perdues par casier de 50 m a été appliquée. Les périodes suivantes ont été analysées :

- 1966-2014 pour analyser l'impact global de l'ouvrage sur le recul du trait de côte
- 1966-1982 pour analyser l'impact de l'ouvrage sur 20 ans
- 1995-2014 pour analyser l'impact global de l'ouvrage après son extension.

4.1.7 Limites des méthodes présentées

Pour l'ensemble des études présentées, les taux d'évolution du trait de côte obtenus correspondent à une évolution pluriannuelle où les effets des éboulements et la variabilité inter et intra-annuelle du trait de côte sont lissés. La dynamique d'évolution du trait de côte n'est donc pas étudiée. Enfin, la contribution des aménagements aux processus érosif n'est pas prise en compte.

L'approche de la ligne de base analyse une évolution du trait de côte ponctuelle, perpendiculaire aux transects. Bien que l'évolution soit généralement représentative de la mobilité du trait de côte de part et d'autre du point de calcul, dans le cas des côtes à falaises, une évolution liée à un éboulement ponctuel peut être mesuré alors qu'il n'a pas eu lieu sur le reste de la falaise, et inversement (Cerema, 2018). Cela entraîne donc des surestimations des vitesses de recul. La méthode la plus pertinente pour analyser le haut de falaise serait donc celle basée sur l'aire, qui permet une continuité d'analyse sur l'ensemble du linéaire (Letortu 2013).

La non prise en compte des dates de construction des ouvrages dans l'analyse de l'évolution du trait de côte ne permet pas d'analyser leur impact. Des analyses avant construction de l'ouvrage et après construction seraient plus pertinentes.

Plus spécifiquement, lors d'analyses par relevés drone, des limites liées à la trajectoire et au positionnement x/y/z peuvent apparaître. Ces limites peuvent être expliquées par différents éléments :

- Un nombre réduit de cibles permettant le géoréférencement,
- Les différentes hauteurs de vols,
- Le temps, le vent, l'ensoleillement qui peut créer du « flouté de bougé » sur les photos et la réverbération du platier pouvant masquant les cibles,
- Les paramètres du capteur,
- Le matériel utilisé,
- La réception des satellites sur le terrain et la correction différentielle du GPS, donnée par les précisions verticales et horizontales.

4.2 Analyse historique de l'évolution du trait de côte

Le trait de côte de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer est constitué de falaises de deux classes morphologiques différentes. Il existe en effet trois classes de morphologie des falaises (Figure 28) (Latteux 2001) :

- Les falaises simples à craie homogène,
- Les falaises à piédestal résistants dont la base plus dure est en avancée,
- Les falaises à abruptes superposées ou « complexes » (Letortu 2013) dont la structure géologique verticale est hétérogène, surmontée par des terrains meubles sablo-argileux, propices aux éboulements.

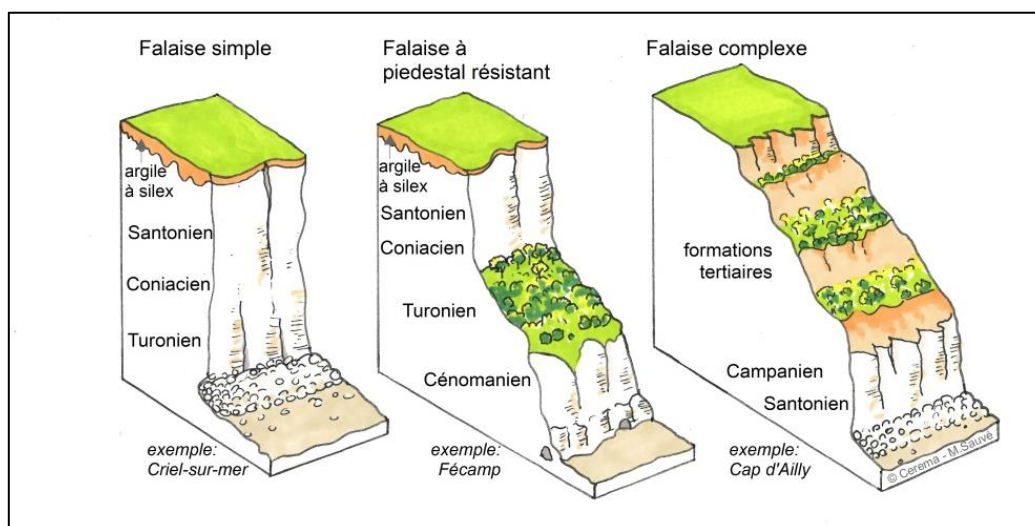


Figure 28 Illustration des différentes classes morphologiques des falaises (Cerema, NC)

Les falaises à l'ouest de Quiberville ainsi que celle juste à l'est de Sainte-Marguerite-sur-Mer ont une morphologie dite de falaise simple. Plus à l'est, au niveau du Cap d'Ailly, les falaises sont de morphologie dite complexe.

4.2.1 Analyse diachronique des falaises simples de Quiberville et de Sainte-Marguerite-sur-Mer

Plusieurs études d'analyse de l'évolution du trait de côte ont été réalisées au niveau de la zone d'étude. Au niveau des falaises crayeuses à l'est et à l'ouest des deux communes, quatorze traits de côte ont été digitalisés, à différentes échelle (voir Tableau 4 ci-dessous), en prenant seulement compte des études présentées dans la partie précédente.

Tableau 4 Traits de côte digitalisés sur les falaises simples à l'est et à l'ouest de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer

Trait de côte	Échelle de digitalisation	Étude	Secteur
2022	1 / 100	Suivi du trait de côte entre Sainte-Marguerite-sur-Mer et l'Église de Varengeville – Cerema 2022	Sainte-Marguerite-sur-Mer
2021			
2020			
2019			
2018			
2020	1/1000	L'évolution du trait de côte et les submersions marines dans les communes de Sainte-Marguerite-sur-Mer et Quiberville – G.Delsigne 2023	
2000			
1989			
1966			
1947			
1966	1/2500	Étude sur l'érosion côtière en aval des ouvrages majeurs en Seine-Maritime – Cerema, 2018	
1982			
1995			
2014			
2019	1 / 1000	Littoraux normands 2027 – Cerema 2023	Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer
2015-2016			
2012	1 /2500	Indicateur National d'érosion côtière – Cerema 2018 et Étude sur le recul du trait de côte sur le littoral de la Seine-Maritime – Cerema 2018	

La disponibilité de traits de côte sur plusieurs périodes est un avantage dans le calcul d'évolution du trait de côte. Cependant, cela peut mener à des variations dans les résultats lors de l'application d'une même méthodologie.

Cela a pu être constaté sur la falaise à l'est de Sainte-Marguerite-sur-Mer, en comparant les résultats de l'étude Littoraux normands 2027 du Cerema avec le mémoire de G.Delsigne. Sur une même période donnée (1947 – 2019-2020), les résultats varient fortement alors que la même méthode d'analyse basée sur l'aire a été appliquée (Figure 29). Cependant, l'étude régionale s'appuie sur le trait de côte de 1947 digitalisé lors de la réalisation de l'indicateur national d'érosion côtière, alors que G.Delsigne a digitalisé un nouveau trait de côte de 1947. Cela montre bien les limites liées à l'interprétation de l'opérateur lors de la digitalisation.

Dans son analyse, G.Delsigne observe une augmentation de l'érosion d'est en ouest avec la majorité du secteur d'étude qui recule avec une vitesse supérieure ou égale à 0.5 m / an (Delsigne 2023). En parallèle, l'étude du Cerema montre une zone plus érodée sur une distance d'environ 200 m avec en son centre, une zone où la vitesse d'érosion est plus importante que sur la totalité de la zone d'analyse (Cerema 2023a).

Sur le même secteur mais sur différentes périodes d'analyse, les résultats de l'étude sur l'érosion côtière en aval des ouvrages majeurs en Seine-Maritime constatent que sur la période 1966-2014, le trait de côte a reculé jusqu'à 0.9 m/s de 150 à 400 m après l'ouvrage (Cerema 2018b). Selon l'étude départementale, entre 1947 et 2014, le trait de côte reculerait plus sur une zone d'environ 250 m, 150 m après le dernier épi. Le reste de la falaise a majoritairement un recul faible (< 0.25 m/an) (Cerema 2018a).

Bien que les résultats différents selon les études, il semblerait que le secteur directement à l'est du Blockhaus soit plus sensible à l'érosion (Figure 29).

Sur les falaises à l'ouest de Quiberville, les études régionales et départementales réalisées par le Cerema proposent des résultats similaires : une érosion moyenne entre 0.5 et 0.6 m/an sur la quasi-totalité de la falaise et une érosion plus faible sur les premiers 150 m à l'est (Cerema 2023a; 2018a).

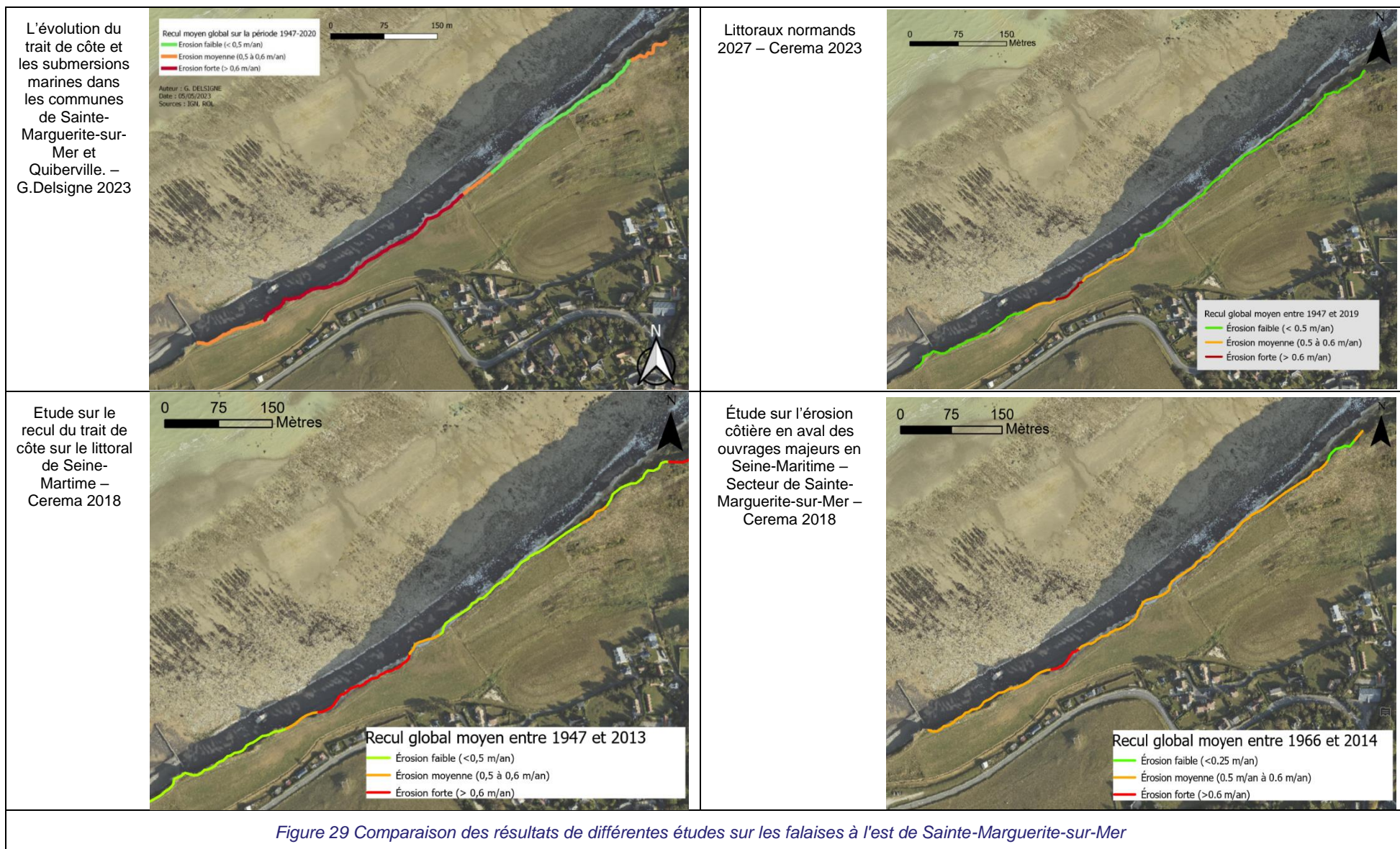


Figure 29 Comparaison des résultats de différentes études sur les falaises à l'est de Sainte-Marguerite-sur-Mer

4.2.2 Analyse diachronique des falaises complexes du Cap d'Ailly

Comme vu précédemment, les falaises du Cap d'Ailly sont formées d'une alternance de matériaux, entraînant des prédispositions aux mouvements de terrain et à l'érosion. En effet, trois types de processus ont été distingués, tous conditionnés par la présence d'eau qui fragilise la falaise (Conservatoire du Littoral 2015) :

- Une zone d'arrachement localisée en haut de falaise. Il s'agit de glissements liés à la nature des terrains en place (des matériaux fragiles, meubles et facilement mobilisables).
- Des glissements "de masse" correspondant à la nappe située dans les sables fauves (au-dessus des argiles). Ce sont ces glissements qui forment les frettes.
- Des phénomènes d'éboulement de la falaise crayeuse.

Un exemple de la forte érosion de cette zone est le phare d'Ailly, situé à la pointe d'Ailly. A la construction du premier phare en 1775, celui-ci était situé à 160 m de la falaise. En 1951, il n'était déjà plus qu'à 4 m, soit un rythme d'érosion de près de 90 cm/an (Billy 1952 in Latteux 2001). En 1958, un nouveau phare est mis en service, plus éloigné du bord de la falaise. L'ancien phare s'est écroulé en 1968, rattrapé par l'érosion (Université de Caen Normandie 2013).

Comme présenté dans la partie précédente, plusieurs études d'analyse de l'évolution du trait de côte ont été réalisées au niveau de la zone d'étude. Au niveau des frettes, neuf traits de côte ont été digitalisés, à différentes échelle (voir tableau ci-dessous).

Tableau 5 Traits de côte digitalisés au niveau des frettes du Cap d'Ailly

Trait de côte	Échelle de digitalisation	Étude
2022	1 / 100	Suivi du trait de côte entre Sainte-Marguerite-sur-Mer et l'Église de Varengueville – Cerema 2018 à 2022
2021		
2020		
2019		
2018		
2019	1 / 1000	Littoraux normands 2027
2015-2016		
2013	1 / 2500	Indicateur National d'érosion côtière
1947		

Le Cerema, dans son étude sur le Suivi du trait de côte entre Sainte-Marguerite-sur-Mer et l'église de Varengueville-sur-Mer entre 2018 et 2022, indique que pour une même méthodologie appliquée, les frettes sont plus difficiles à digitaliser que les falaises crayeuses en raison de la géométrie et de la qualité des orthophotographies, de la végétation très présente sur le secteur et du degré de pente des frettes (Cerema 2022b). Ces erreurs ainsi que l'échelle de digitalisation peuvent expliquer les différences entre les traits de côte digitalisés. Par exemple, sur la Figure 30, le trait de côte rouge digitalisé en 2021 dans le cadre de l'étude Littoraux normands 2027 publiée en 2023 ne coïncide pas avec le trait de côte de la même année digitalisé en 2022 pour l'étude du Suivi du trait de côte entre Sainte-Marguerite-sur-Mer et l'église de Varengueville-sur-Mer entre 2018 et 2022.

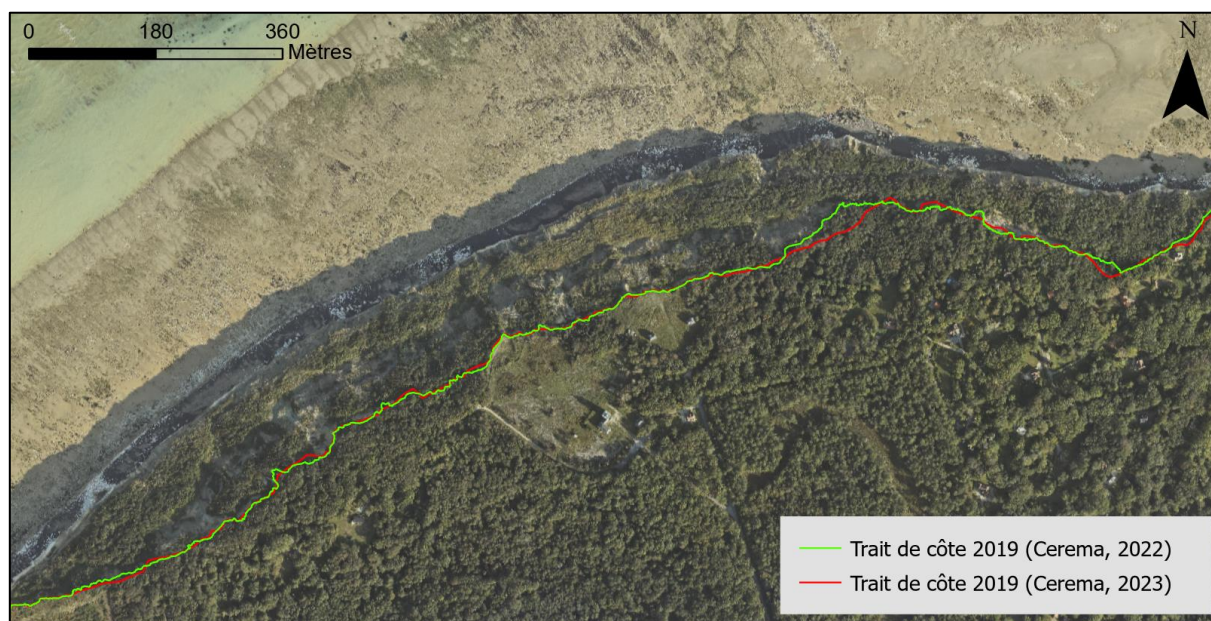


Figure 30 Différences de digitalisation du trait de côte 2019

La conséquence de ces différentes digitalisations du trait de côte apparaît lors de l'analyse de son évolution. Par exemple, en utilisant le trait de côte plus précis, en vert sur la figure ci-dessus, pour analyser la période 1947-2019, la zone au nord-est va montrer une accrétion qui n'apparaîtra pas en utilisant le trait de côte rouge (Figure 31).

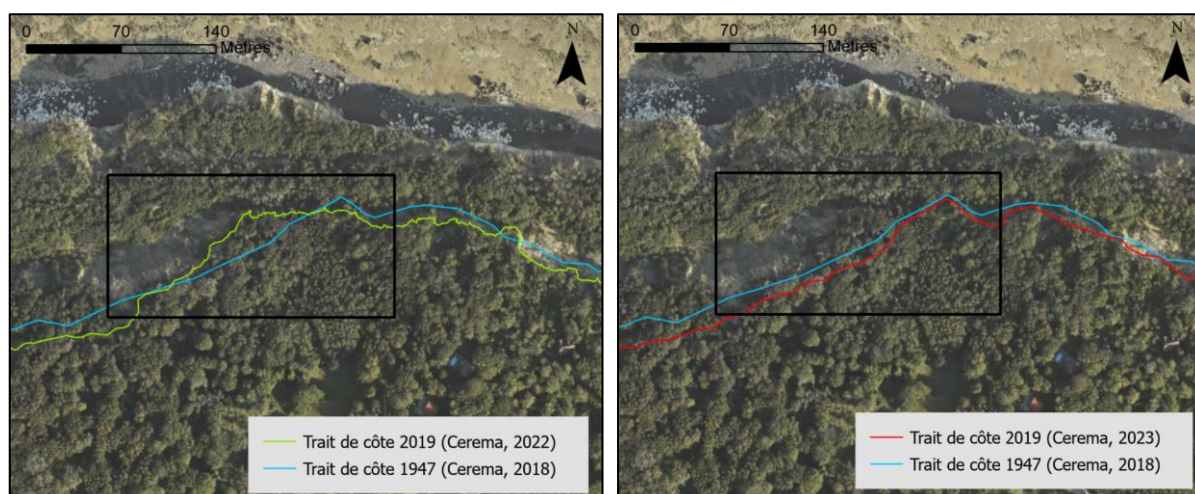


Figure 31 Différences de résultats selon le trait de côte utilisé

Comme il est conseillé d'étudier l'évolution des falaises selon un pas de temps long et selon l'échelle la plus précise possible, les résultats de l'étude sur le recul du trait de côte sur le littoral de Seine-Maritime seront d'abord présentés.

L'analyse départementale a montré sur ce secteur des frettes, sur la période 1947-2013, un recul moyen de 0.48 m/an avec des reculs maximums à 1 m/an (Cerema 2018a).

Sur une période plus courte, l'analyse par vol drone entre 2018 et 2022 indique que le secteur a connu une évolution faible (majoritairement de moins de 0.25 m/an) avec quelques secteurs plus marqués par l'érosion. En effet, certains ont pu reculer jusqu'à 2 m / an. L'analyse a montré que plus de 77 % des casiers du secteur N-NW ont été érodés contre 44 % sur le secteur E-O (Figure 32) (Cerema 2022b).

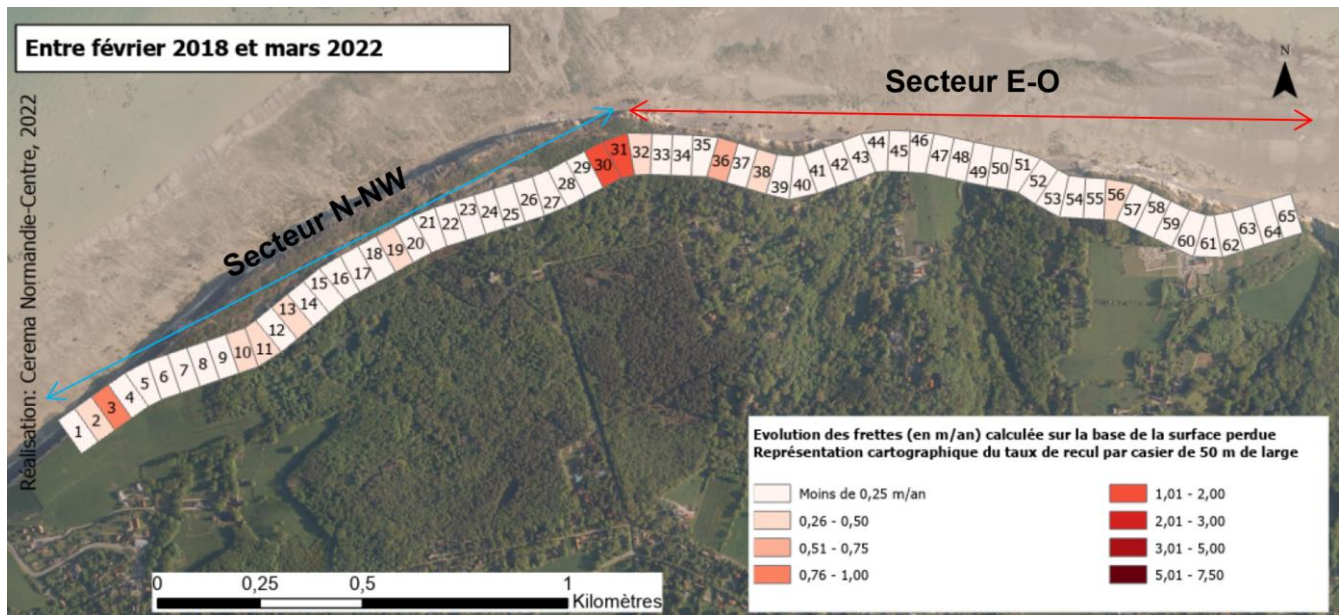


Figure 32 Évolution moyenne annuelle des frettes entre 2018 et 2022 (Cerema, 2022 modifié par Cerema, 2024)

5 EVENEMENTS EXCEPTIONNELS

Les falaises ne reculent pas de façon régulière tant dans l'espace que dans le temps. Ainsi chaque année les falaises subissent des mouvements gravitaires (voir partie 2.4) engendrant leur recul de l'ordre de quelques centimètres à quelques mètres pour les plus importants. On parle alors de recul moyen. Mais il existe aussi d'autres phénomènes plus importants et plus soudains qui entraînent en une fois un recul conséquent pouvant être de l'ordre de 30 m. Il s'agit alors d'événements majeurs (Cerema 2018a).

Les événements énergétiques majeurs peuvent être à l'origine d'importantes modifications du littoral et induire des impacts significatifs durables sur l'évolution du trait de côte.

Les liens entre les événements majeurs et les évolutions morphologiques du littoral sont connus historiquement, mais la compréhension des phénomènes et la quantification des effets sur le trait de côte restent encore peu documentés. Ils constituent des enjeux de connaissances prioritaires pour l'élaboration de projection de recul du trait de côte.

5.1 Inventaire des événements exceptionnels (historique)

Le **Tableau 6** suivant liste des événements exceptionnels recensés sur le littoral de la zone d'étude depuis 1940. Ces données sont issues des données Météo France, du Shom, du Fascicule 2 sédimentaire du Cerema ainsi que d'articles de presse.

Tableau 6 Inventaire des tempêtes ayant impactées la zone d'étude (SHOM, Cerema 2022, MétéoFrance)

Date	Nom	Intensité	Lieu de mesure	Conditions météo océaniques			
				Coeff de marée	Vent max (km/h)	Houle (en m)	Surcote
04/11/2023	Domingos			75/80			Entre 0.96 et 1.11 m
01/11/2023	Ciarán		Dieppe		110		
02/08/2023	Patricia			93	81		0.23
10/02/2020	Ciara	Forte	Gatteville (50)	108	163		
13/12/2019		Forte	Saint Vaast (50)		148		
07/06/2019	Miguel		Dieppe				
03/01/2018	Eleanor	Forte	Dieppe	107	137		0.42 m
12/01/2017	Egon			101	146		0.72 m
12/2013	Dirk	Forte	Gatteville		148		
27/10/2013	Christian		Dieppe		129		
02/2010	Xynhtia	Exceptionnelle	Dieppe	102	83,5		
10/03/2008	Johanna		Le Havre	106-104	100		0.6 m
17/12/2004	Dagmar	Forte	Dieppe	71	155	5 m	1.32 m
02/01/2003	Calvannn	Forte	Le Havre	86-88	115		
27/10/2002	Jeannette	modérée	Dieppe	60-65	137		
30/10/2000	Oratia	modérée	Le Havre	87-80	176		1.68 m
26/12/1999	Lothar	Exceptionnelle	Rouen	94	140	11m	0.7 à 1 m
03 au 05/01/1998			Le Havre	80-73	166		1.26 m
26 au 28/02/1990	Viviane	Exceptionnelle	Le Havre	108	162		1.5 m

28/02 au 01/03/1990	Wiebke	Forte	Le Havre	102	148		1.67 m
03/02/1990	Herta	Exceptionnelle	Le Havre	70	151		1.33 m
25/01/1990	Daria	Forte	Le Havre	64	173 (Fécamp)		2.05 m
22/01/1988		Forte	Dieppe	103	137	6	1.33 m
15/10/1987	« L'ouragan »	Exceptionnelle	Dieppe	24	180	10 max 16	1.72 m
25/03/1986		Forte	Le Havre		144		
23/11/1984		Forte	Le Havre		166	99,102, 86	1.34 m
09/02/1984		Exceptionnelle	Dieppe	66 et 62	144		
23/01/1984		Forte	Dieppe		144		
27/11/1983		Exceptionnelle	Le Havre		126		
28/12/1979		Indéterminée	Dieppe	60	122		1.52 m
15/12/1979		Indéterminée	Dieppe	49	148		0.94 m
16/01/1974		Indéterminée	Dieppe	63-68	112		1.40 m
06/07/1969		Indéterminée	Dieppe	67	112		0.65 m
01/02/1953		Indéterminée	Rouvray	83-80	133		
07/08/1948		Indéterminée			108		
14/03/1940		Indéterminée	Le Havre	76 et 72	140		

Les données de conditions météo océaniques renseignées sont celles enregistrées au plus proche de la zone d'étude.

Ce registre des tempêtes ayant affectées le littoral de la zone d'étude laisse apparaître une saisonnalité dans les événements. En effet, sur ces 36 événements listés, 32 soit 88 % ont eu lieu entre le mois d'octobre et mars, c'est à dire en automne et hiver.

5.2 Impacts sur le littoral

Les événements météo-marins exceptionnels peuvent être à l'origine de fortes modifications du littoral et induire des impacts significatifs et durables sur l'évolution du trait de côte (Cerema 2022a). En effet, l'érosion côtière ainsi que les inondations sont les deux aléas les plus occurs (GIEC normand 2021). Ils peuvent intervenir de façon isolée ou simultanément, même s'ils n'ont pas le même impact sur le littoral.

5.2.1 Érosion du trait de côte

Sur le littoral de la zone d'étude, les événements exceptionnels affectent la morphologie des cordons de galets bordant les côtes basses, ici au droit des zones urbanisées.

Lors de ces événements, le profil de l'estran est abaissé car le budget sédimentaire se trouve fortement impacté. Lors des tempêtes, la quantité de sédiments, graviers et galets sont remaniés. Les galets, qui transitent le long du littoral et qui s'accumulent momentanément, sont en diminution, rendant plus fragile le cordon face aux vagues de tempêtes.

D'après les travaux menés par Stéphane Costa dès 1997 sur l'évolution des profils de plage après les événements tempétueux, la partie supérieure du cordon galet est fortement érodée par la réflexion de la houle au profit de la partie basse. Le pied du cordon de galets connaît des variations altimétriques

dans la zone médiane de l'estran pouvant atteindre parfois 50cm (Costa 1999). Le bas estran quant à lui est soumis à de faibles variations de l'ordre de 10 à 20cm. Les analyses granulométriques ont montré que la granulométrie de l'estran, lors des périodes de forte agitation marine, devient plus grossière en raison du départ des matériaux les plus fins.

De manière générale, durant les événements extrêmes, le haut de l'estran connaît une érosion liée à la réflexion de la houle sur le cordon de galets. Ce transit de sédiments du haut estran engraisse le moyen estran et peut former une petite barre sableuse. Finalement, l'évolution s'inverse lors du retour à la normale. La partie inférieure va venir enrichir la partie supérieure de l'estran sableux et par conséquent du cordon de galets (Costa 1999).

Les pieds de falaise en temps normal protégé par le cordon de galets sont alors vulnérables à l'assaut des vagues et par conséquent sont fragilisés (Cerema 2022a).

Les études menées par le Cerema sur le suivi du cordon de galets de la plage de Quiberville ont calculé les variations de volume du cordon avant et après tempête. Les premières observations concernent la tempête Miguel du 7 juin 2019. Des vols drones ont été effectués avant et après tempêtes, ainsi, l'écart constaté permet de mettre en évidence le comportement de résilience du milieu. A l'issu des analyses effectuées, la plage de Quiberville a connu une perte de 175 m³ à la suite du passage de la tempête. Pour plus de précision, le linéaire a été découpé en trois secteur (partie Ouest, centrale et Est) ainsi, il apparaît que la partie centrale de l'estran a connu une grande perte au profit de la partie Est. (Figure 33)

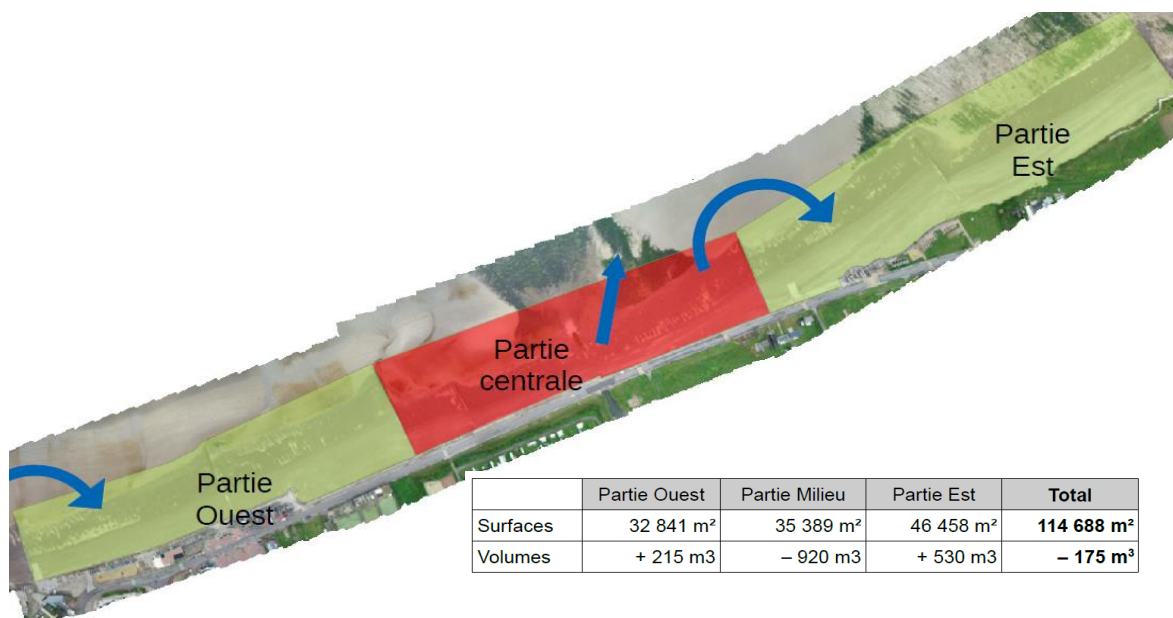


Figure 33 Schématisation des mouvements sédimentaire suite à la tempête Miguel sur le littoral de Quiberville. (Cerema, 2020)

Autre exemple de suivi du cordon de galets, la tempête Patricia du 2 août 2023. L'analyse porte ici sur une période du 27 avril au 8 août 2023. Ici, l'écart de volume estimé entre ces deux dates est un gain de 2 207m³ (Figure 34).

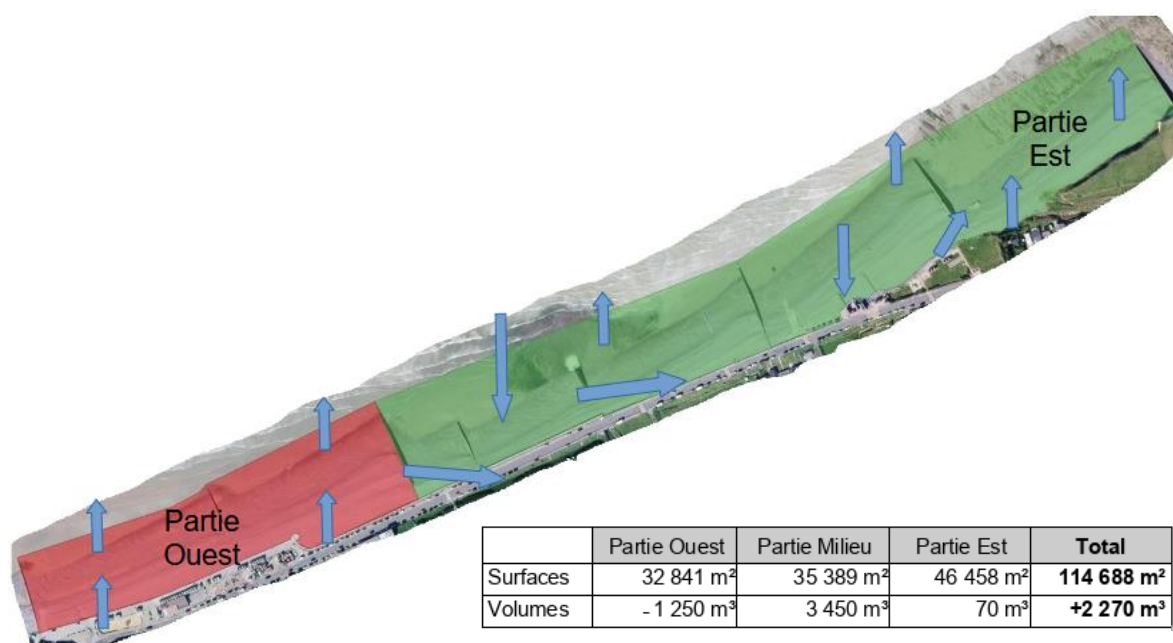


Figure 34 Schématisation des mouvements sédimentaire à la suite de la tempête Patricia sur le littoral de Quiberville.

Cependant, le manque de données historiques sur le remaniement des volumes sédimentaire, l'écart temporel important des vols par rapport à la tempête et les caractéristiques des tempêtes montre bien l'impact des tempêtes sur les mouvements de galets mais ne permet pas de le qualifier.

5.2.2 Inondation par la mer

L'inondation par la mer, autrement dit les inondations temporaires de la zone côtière par la mer interviennent généralement lors de conditions météorologiques et marégraphes particulières, souvent extrêmes. Elles sont le résultat d'une conjonction de facteurs bien connus : une faible pression atmosphérique, un fort vent d'afflux (ces deux facteurs peuvent déterminer une surcote ou « onde de tempête ») au moment d'une pleine mer de vive-eau (Letortu, Costa, et Cantat 2012). L'inondation par la mer peut se manifester sous trois modes différents (Figure 35) :

- **La submersion par franchissement de paquets de mer** : Les déferlements de la houle, les paquets de mer, dépassent la cote des crêtes des ouvrages ou le terrain naturel ;
- **La submersion par débordement** : c'est à dire que le niveau de la mer est supérieur à la cote des crêtes des ouvrages ou du terrain naturel ;
- **La submersion par rupture** : Le système de protection est insuffisant ou défaillant. Les terrains situés en arrière sont en dessous du niveau marin et suite à l'attaque de la houle par exemple se retrouvent inondés.

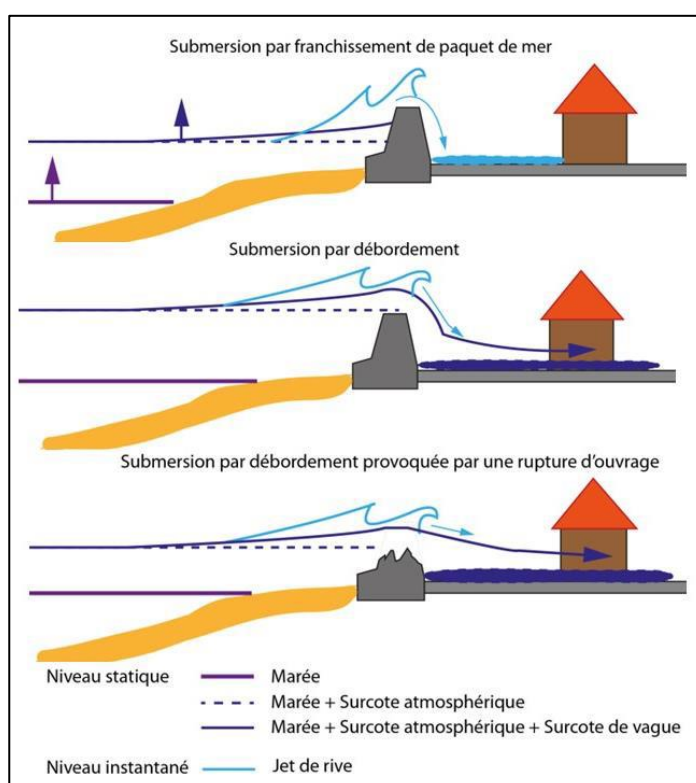


Figure 35 Schéma des 3 types de submersions marines, modifié par G. Delsigne, BRGM

Compte tenu de la forte attractivité des espaces littoraux et de l'accroissement des populations vivants à proximité de la côte, ainsi que les phénomènes naturels participant au dérèglement de l'équilibre de la frange littorale, la prise en compte de l'aléa inondation par la mer est de plus en plus cruciale d'autant plus qu'elle touche majoritairement de vastes espaces urbanisés, englobant parfois tout ou partie d'une agglomération.

Le réseau d'observation du littoral, classe leur impact sur le littoral selon trois degrés de gravité :

- Submersion marine faible : La mer envahie l'ensemble de l'estran et de la digue promenade.
- Submersion marine modérée : La mer atteint la voie publique la plus proche d'un ouvrage de protection ou aménagement portuaire.
- Submersion marine sévère : Des dégâts relevant de la catastrophe naturelle sont engendrés.

Afin de pouvoir évaluer le risque d'inondation par la mer, la connaissance des niveaux extrêmes est nécessaire. C'est à dire : le niveau moyen de la mer, les surcote et les effets hydrodynamiques.

Les phénomènes de surcotes, particulièrement dommageable lors des conditions météo- marines extrêmes, correspond au volume d'eau franchissant les ouvrages côtiers (ou les cordons dunaires). Dans le secteur de la zone d'étude, donc en Manche, les surcotes sont constatées lors des tempêtes qui poussent les masses d'eau dans la Manche, au droit des zones qui connaissent des dépressions importantes. Ainsi, à Dieppe, les enregistrements des surcote les plus importantes ont été relevées en octobre 1987 (1.79m) en décembre 1979 (1.19m) et en novembre 1984 (1.17m)

Les effets hydrodynamiques associés aux événements extrêmes correspondent à la surélévation du niveau de la mer lié au déferlement sur la plage (swash runup) ou bien à l'action de la houle avant déferlement (wave setup). Ces effets peuvent être à l'origine de niveaux extrêmes (Letortu 2013).

Dans leur travail de caractérisation des facteurs responsables des inondations par la mer, Letortu, Costa, et Cantat 2012 ont recensé les inondations par la mer apparues entre 1949 et 2010. (Figure 36) Sur les 78 submersions marines qui ont été recensées lors de cette étude, 48 sont de gravité sévère, 12 de gravité modérée et 12 de gravité faible.

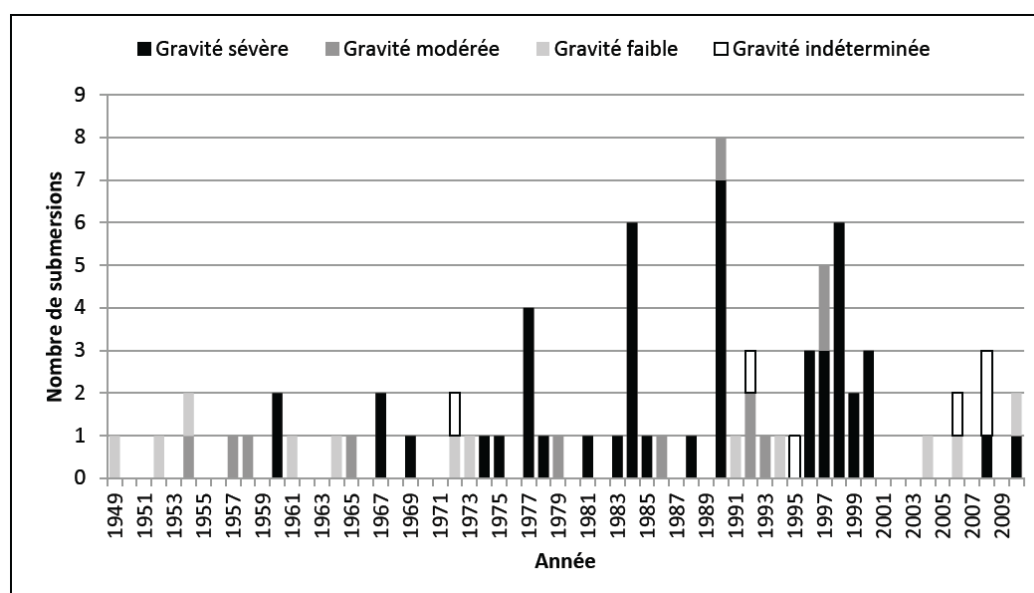


Figure 36 Nombre de submersions recensées en Manche orientale de 1949 à 2010 selon leur degré de gravité. (LETORTU et Al. 2012)

Letortu, Costa, et Cantat 2012 expose une conclusion selon laquelle, l'évolution du nombre des inondations par la mer ne montre pas de tendance générale bien affirmée au cours des 62 dernières années. Cependant, une augmentation du nombre d'évènement de gravité sévère depuis la fin des années 1980 est identifiée.

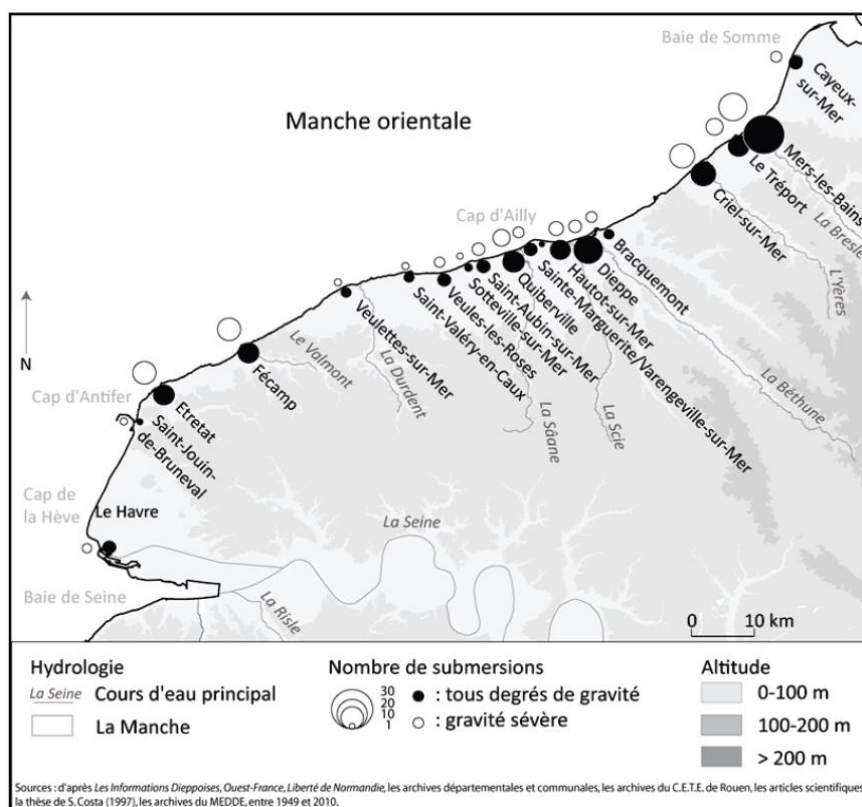


Figure 37 Nombre de submersions marines recensées par commune entre Le Havre et Cayeux-sur-Mer (1949-2010).

Outre l'étude temporelle, l'approche spatiale a permis de mettre en évidence les sites du littoral de Seine-Maritime les plus sensibles aux inondations par la mer (Figure 37). Ainsi la commune de Quiberville a connu entre 1949 et 2010 un minimum de 10 submersions (Letortu, Costa, et Cantat 2012).

Le littoral des communes de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer est sensible aux inondations par la mer, du fait de son ouverture aux flux d'ouest et de ses caractéristiques morphologiques et altimétriques (voir partie 2.6).

Depuis 2011, ce littoral a essentiellement été marqué par trois tempêtes responsables de submersions marines (Delsigne 2023) :

- La tempête Egon (janvier 2017)
- La tempête Eleanor (janvier 2018)
- La tempête Ciara (février 2020)



Figure 38 Franchissement par paquet de mer engendrant des dommages aux infrastructures sur la route digue de Sainte-Marguerite-sur-Mer et Quiberville. J.Favrel 2018

En outre, la commune de Quiberville a fait l'objet sur les quarante dernières années de quatorze arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour des phénomènes d'inondations, de coulées de boue, de glissements et d'affaissements de terrain et de chocs mécaniques liés à l'action des vagues (Chambre régionale des comptes Normandie 2023).

Un des événements le plus marquant est d'ailleurs l'inondation survenue le 26 décembre 1999. Qui a été le résultat de la concomitance de deux tempêtes successives (Lothar puis Martin)

Sur la commune de Sainte-Marguerite-sur-Mer, quatre événements ont fait l'objet d'une procédure de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle inondation sur la période 1984 -1999.

D'après l'étude portée sur l'inventaire des inondations par la mer de Pauline Letortu, ces événements suivent une évolution croissante dans la commune de Quiberville sans pour autant présager de leur intensité.

5.3 Réaction et résilience du milieu

Dans certains cas la tempête est l'agent principal, il fixe le sens de l'évolution (recul irrémédiable), ou encore le rythme des changements. Dans d'autres cas, la tempête n'est qu'un phénomène exceptionnel et l'évolution reste liée à la domination des conditions moyennes.

La résilience est d'abord un outil d'aide stratégique, car il existe un lien entre la vulnérabilité et la résilience : un système plus résilient est moins vulnérable (Dauphiné et Provitolo 2007). C'est pourquoi, les collectivités exposées au recul du trait de côte sont appelées à élaborer des stratégies de long terme pour prévenir les risques littoraux. La loi « Climat et Résilience » d'août 2021 propose aux communes volontaires de nouveaux outils permettant de mettre en place des actions de sensibilisation, des systèmes de protections, la préservation des espaces naturels et la recomposition du territoire (Ministère de la Transition Ecologique et de la cohésion des territoires 2023).

Par ailleurs, une véritable politique de gestion du trait de côte a été proposée dans le cadre du Grenelle de la Mer, traitant aussi de la politique de prévention des risques inondations à la suite de tempêtes via la Directive Inondations. Ces nouvelles orientations s'inscrivent clairement dans une perspective d'adaptation au changement climatique (Allain et Teil 2012).

Outre l'aspect réglementaire de la résilience des espaces littoraux, la résilience étant un concept polysémique, la réaction du milieu naturel est aussi à considérer. La résilience correspond à la capacité du milieu de maintenir sa forme littorale en dépit des changements induit par des dynamiques extrêmes. Et au mieux de reprendre sa forme initiale.

Les conditions de la plage avant la tempête auront des incidences sur l'état après tempête. En effet, un budget sédimentaire déficitaire corrélé à un profil de plage bas sont des conditions aggravantes mais aussi favorable aux franchissements par paquet de mer (Figure 35). A l'inverse, parfois les conditions morphologiques de l'estran peuvent limiter voire empêcher une inondation par la mer.

En période d'événements exceptionnels, l'état du littoral met en évidence diverses zones pouvant connaître des érosions fortes, des changements rapides ou des sédimentations abondantes sans pour autant connaître la corrélation entre le matériel érodé et celui accumulé.

Une fois les conditions climatiques redevenue normale ou moins extrêmes, le milieu va tendre à retrouver une stabilité, un équilibre. D'après Stéphane Costa (Costa 1999), la portion sableuse, pour l'essentiel d'origine intertidale qui constitue la partie interne du cordon de galets participe à l'adaptation du profil du cordon aux conditions hydrodynamiques grâce à la variation du volume du cordon.

De manière générale, on estime que lorsque le budget sédimentaire est en équilibre, les sédiments emportés par les tempêtes sont restitués progressivement au niveau des plages sous l'effet de la houle ou des marées (Conservatoire du Littoral, s. d.). Contrairement aux éboulements de falaises qui sont irréversibles mais qui peuvent contribuer à engraissement de l'estran grâce à la mise en circulation d'un nouveau volume de sédiment.

6 OUVRAGES PRESENTS SUR LE LITTORAL

Depuis la fin du XIX^e siècle, le littoral est devenu un espace privilégié pour le tourisme balnéaire et par conséquence pour l'implantation urbaine. Des défenses contre la mer ont donc été mises en place au travers de la construction d'ouvrages de génie civil pour protéger contre les risques d'inondations par la mer ainsi que pour fixer le trait de côte via l'édification de digues promenades.

Malgré cette expansion des zones littorales urbanisées et/ou protégées, les communes de Quiberville-sur-mer et Sainte-Marguerite-sur-mer s'inscrivent dans un littoral faisant partie des moins urbanisés de métropole. Du Cap d'Antifer à l'Ouest de la zone d'étude, à la commune de Ault à l'Est, le littoral connaît un caractère naturel sur 89% de son linéaire (Cerema 2022a). Ce secteur connaît une évolution des aménagements qui lui est propre en lien avec les activités et les enjeux de ce territoire littoral (protection contre les submersions marines, lutte contre l'érosion, protection à des fins économiques, tourisme, pêche, etc.) (Cerema 2022a).

En effet, plus de la moitié du linéaire côtier est composée de falaises rocheuses entaillées par endroit de valleuses à topographie relativement faible ne permettant le développement de l'urbanisation que de façon très concentrée.

Les risques d'érosion du trait de côte, d'inondations par la mer couplés aux risques inondations notamment en cas de difficultés d'écoulement à la mer de la Saône, sont présents sur le territoire communal depuis plusieurs siècles et ont donné lieu périodiquement à la construction et/ou la réhabilitation d'ouvrages de défense contre la mer (Chambre régionale des comptes Normandie 2023).

Par conséquent, pour tenter de limiter la dynamique d'érosion côtière et les transferts sédimentaires, des ouvrages ont été mis en place sur l'estran au niveau de la basse vallée.

Un aménagement de défense du littoral est souvent composé d'une combinaison d'ouvrages de types différents et s'accompagne de méthodes d'entretien des hauts de plage (Bougis 2000).

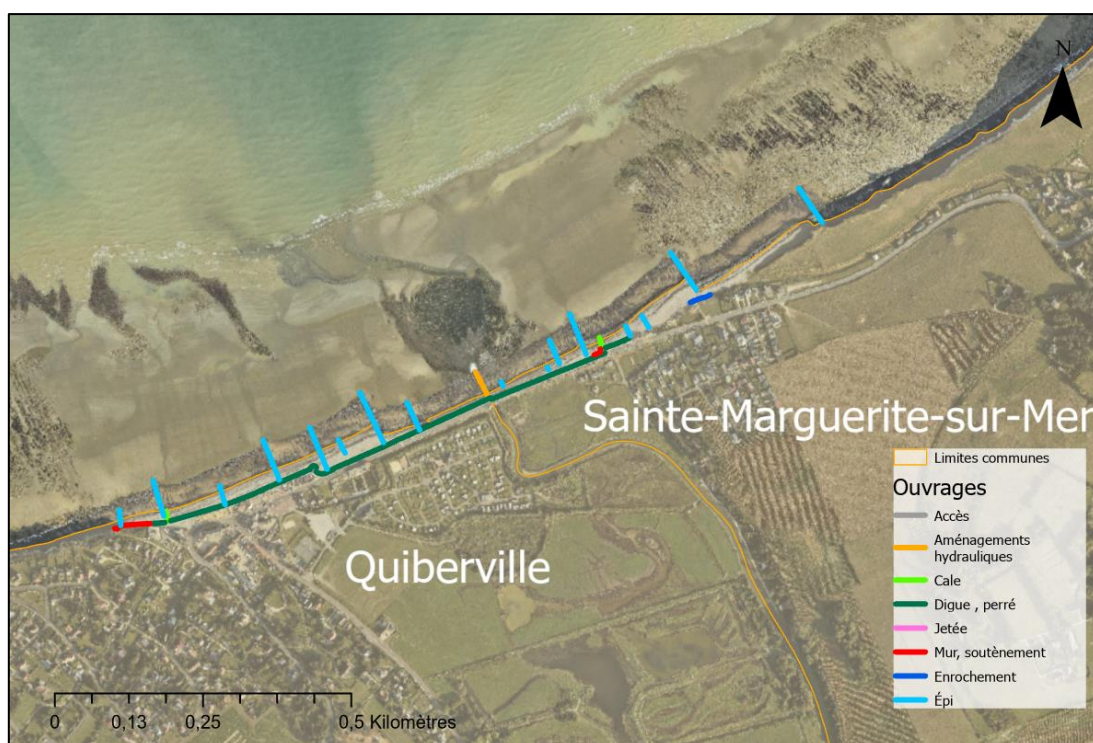


Figure 39 Carte des ouvrages et aménagements présents sur le littoral de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer

6.1 Recensement et caractéristiques des ouvrages

6.1.1 Ouvrages longitudinaux

6.1.1.1 Généralités

Les ouvrages longitudinaux sont souvent ceux ce substituant au trait de côte naturel afin d'empêcher que la mer ne gagne des terrains en amont, soit par érosion, soit par inondations par la mer lors des tempêtes. Ces ouvrages forment la plupart du temps un point haut entre l'estran et les zones basses à protéger. Par ailleurs, les perrés sont implantés pour le tourisme balnéaire à partir du XIX^{ème} siècle où les stations attractives édifient ou aménagent des promenades.

Dans ce contexte, le trait de côte est fixé, les plages ne sont plus libres, elles sont adossées à l'ouvrage. Les ouvrages longitudinaux sont très répandus car jugés efficaces immédiatement, garantissant à court terme une protection des enjeux à l'arrière de l'estran mais pas l'estran lui-même (Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer 2010).

Les perrés ou digues sont implantés de façon à limiter ou empêcher l'effet d'arrachement des vagues sur l'estran, le pied de dune ou de falaise. L'énergie des vagues est absorbée ou réfléchiée par l'ouvrage plutôt que par le littoral.

Ces infrastructures localisées en haut de plage, sensiblement au droit du trait de côte, sont constituées d'éléments en béton armé, en éléments préfabriqués ou en maçonneries de silex, de grès ou de granit (Syndicat Mixte du Littoral de la Seine-Maritime, s. d.).

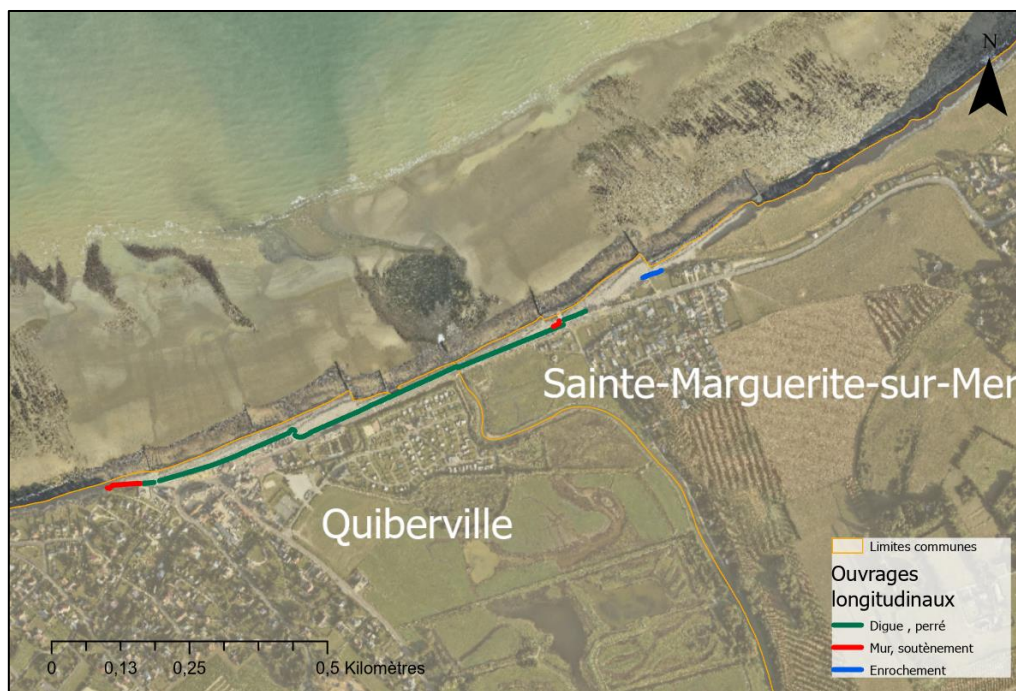


Figure 40 Carte des ouvrages longitudinaux présents sur le littoral de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer.

6.1.1.2 Ouvrages longitudinaux sur le territoire de la zone d'étude

Le littoral de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer est sur une grande partie de son linéaire fixé par une digue. Les enjeux aujourd'hui associés à ces ouvrages sont multiples. Outre son rôle mécanique sur les mouvements sédimentaires, la digue représente un attrait touristique et par conséquent économique. Elle est toujours utilisée comme promenade car offre une espace de déambulation protégé de la circulation.

A l'ouest de la vailleuse, la jonction entre la partie basse du littoral et les falaise un mur permet de protéger le pied de falaise de l'assaut des vagues.

A l'Est, le littoral est légèrement moins urbanisé offrant un trait de côte plus sauvage, moins contraint par les ouvrages. Au droit du mémorial de la Seconde Guerre Mondiale, Opération Jubilee, un enrochement a été mis en place.

6.1.2 Ouvrages transversaux

6.1.2.1 Généralités

Les ouvrages transversaux limitent ou arrêtent le transit littoral afin de retenir les sédiments constitutifs de l'estran. Les épis sont des ouvrages placés sur l'estran, de manière transversale par rapport au trait de côte (Cerema 2017). Les épis courts qui agissent sur le transport par jet de rive sont utilisés pour les plages à galets. Les épis longs qui descendent jusqu'à la barre de déferlement, agissent également sur le transit par courant littoral (Bougis 2000). Ces ouvrages agissent essentiellement sur les déplacements de sédiments longitudinaux par rapport au trait de côte en accumulant dans l'espace créé entre deux épis consécutifs (casier) des sédiments. La bonne efficacité d'un tel ouvrage nécessite son implantation en série avec d'autres (Cerema 2017).

Ils sont généralement espacés de 1.5 à 2 fois la longueur de l'épi.

Les épis impactent le transport sédimentaire littoral, ainsi une accrétion est produite sur le côté amont de l'ouvrage au transport des particules, alors que sur la face aval l'estran est en érosion.

Sur les plages à galets de haute Normandie, les épis peuvent être plus long que sur les plages de sable. Ils sont en maçonnerie, d'une longueur pouvant atteindre 150 m avec une hauteur plus importante en haut estran, diminuant vers le bas estran (Bougis 2000).

Les épis peuvent être composés de plusieurs matériaux :

- Les épis en bois sont constitués de planches verticales séparées ou jointives maintenues dans une structure pouvant être constituée de bois ou d'acier.
- Les épis en acier, quant à eux sont construits grâce à des palplanches.
- Enfin, les épis en maçonnerie sont des ouvrages bien plus larges et hauts.

Ces derniers peuvent aussi être constitués d'enrochements, de palplanches ou même d'éléments en géotextile.

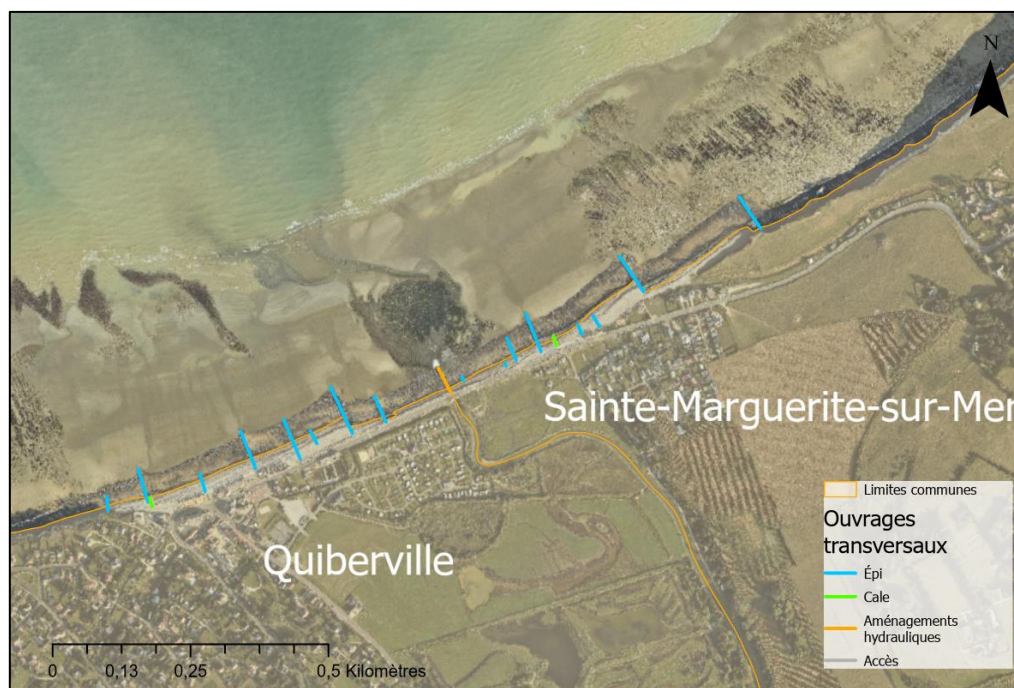


Figure 41 Carte des ouvrages transversaux présents sur le littoral de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer.

6.1.2.2 Ouvrages transversaux sur le territoire de la zone d'étude

Avant la construction au XVIII^{ème} siècle d'une première digue de défense contre les hautes mers à l'embouchure de la Saône, les eaux de la mer remontaient, à marée haute, sur toute la largeur de la vallée au-delà d'Ouville-la-Rivière.

Une première buse estuarienne en bois par laquelle la Saône se jette à la mer avait été construite et inaugurée en 1864. La buse initiale a fait l'objet de travaux de restauration en 1879 et 1920, avant d'être remplacée par l'actuel dispositif maçonné en 1955. Parallèlement, des travaux de protection de la plage de Quiberville ont démarré en 1887, avec la création d'un épi à une vingtaine de mètres à l'est de la buse de la Saône (Figure 42). D'autres épis ont été réalisés postérieurement. Le littoral de Quiberville est protégé par huit épis ainsi que l'épi buse semi enterré servant d'exutoire à la Saône. Plus à l'Est, la commune de Sainte-Marguerite-sur-Mer compte trois épis similaire à ceux que Quiberville ainsi que trois autres d'envergure plus restreinte. Par ailleurs, les photos aériennes anciennes semblent montrer la présence de deux anciens épis aujourd'hui disparus.

Au droit de la zone d'étude les épis présentent les mêmes caractéristiques. Leur structure est faite d'éléments en béton ou de maçonnerie surmontée d'une couverture en béton. Leur implantation en haut de l'estran et leur longueur variante entre 70 et 80 m permet une efficacité optimale (Figure 43).



l'estran de Quiberville (Cerema, 2023)

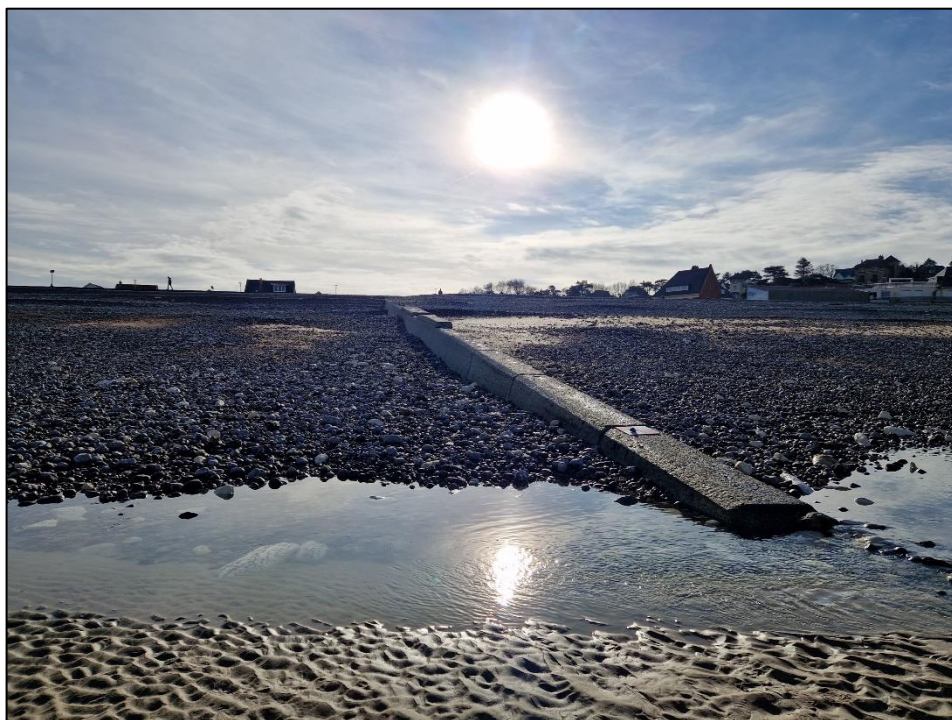


Figure 43 Photo d'un épi sur l'estran de Quiberville (Cerema, 2023)

6.2 Caractérisation de l'impact des ouvrages sur le transit littoral

Alors que l'édification de ces ouvrages de protection du littoral s'est faite pour limiter les impacts des inondations par la mer ou du transit sédimentaire, ces aménagements peuvent avoir des effets pervers, perturbant la dynamique du milieu, voire exacerbant l'érosion en d'autres endroits (Allain et Teil 2012).

Cette fixation artificielle du trait de côte provoque une modification de la capacité d'adaptation de la plage aux conditions hydrodynamiques à l'équilibre naturel.

6.2.1 Impact des ouvrages longitudinaux sur le transit littoral

Sur les littoraux où sont implantés des ouvrages longitudinaux tels que des digues, il existe une diminution pouvant être très importante du matériel sédimentaire de l'estran. En effet, la force des vagues favorise l'arrachement des sables, graviers ou galets selon l'intensité et ainsi leur transport. L'ouvrage peut avoir pour conséquence de déstabiliser les échanges sédimentaires et de fragiliser d'avantage l'estran située immédiatement en aval du transit sédimentaire de l'ouvrage. Une cellule d'érosion peut alors apparaître contribuant à l'amaigrissement de la zone.

Si ce phénomène est trop intense, les fondations peuvent être mises à nu, menaçant la stabilité de l'ouvrage et donc sa pérennité (Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer 2010).

La réflexion des vagues sur les ouvrages entraînant une intensification des transports longitudinaux, favorisant le démaigrissement des plages. Le profil des plages se trouve donc abaissé et les vagues connaissent un point de déferlement au pied ou sur les ouvrages au lieu de bas de la plage.

Par ailleurs la présence d'ouvrage longitudinal, provoque un déplacement de l'érosion côtière de part et d'autre de l'ouvrage, créant un espace saillant et donc un point dur. Les matériaux se trouvent chassés vers des espaces où l'énergie du courant y est plus faible induisant une pénurie sédimentaire localisée et ainsi une grande sensibilité aux inondations par la mer.

6.2.2 Impact des ouvrages transversaux sur le transit littoral

La perpendicularité des ouvrages permet une accrétion du côté amont du transport sédimentaire.

Le déséquilibre des systèmes côtiers peut être engendré par les ouvrages de protection du littoral. En effet, les conditions hydrodynamiques sont modifiées s'en suit une modification du transport sédimentaire. Un épi créé, à son extrémité des remous qui peuvent être générateurs d'affouillement (Bougis 2000), entraînant la déstabilisation de l'assise des structures pouvant même causer leur affaissement (Leclerc 2010).

Les sédiments sont captés par les épis et remplissent les casiers (Leclerc 2010). Cette phase est temporaire en conditions normales, cependant, lorsque le budget sédimentaire est trop faible, les ouvrages transversaux induisent une pénurie d'apport sédimentaire en aval de la dérive. Ainsi, l'érosion sera intensifiée (Letortu et al. 2014). Dans ces zones qui ne sont plus alimentées, les cordons de galets perdent de leur capacité à limiter l'impact des tempêtes. Le risque d'érosion de la falaise est accru et le risque de submersion marine des zones basses souvent habitées est réel (Cerema 2022a).

Ce phénomène a lieu sur l'estran de Quiberville. En effet, un fort volume de galets s'accumule sur la partie Ouest des épis, induisant un déficit sur la partie Est. En effet, les épis réduisent l'accumulation des galets en aval de la dérive. Par ailleurs, les galets accumulés au droit des ouvrages ne sont pas remobilisés dans le transit sédimentaire engendrant d'autres endroits en érosion (Cerema 2018b).

Cet épi (Figure 44) construit initialement en 1964 pour une longueur de 35m à trente ans plus tard, en 1994 été rallongé de 35m pour attendre aujourd'hui une longueur totale de 75m.



Figure 44 Accumulation de galets à l'Est du dernier épi de Sainte-Marguerite-sur-Mer, décembre 2017 (Cerema NC)

Grâce aux interprétations issues de l'analyse des photo aériennes avant et après construction puis au court du temps, un recul du trait de côte a été mis en évidence. En effet, 20 ans après la construction de l'épi, un recul de 5 à 10 mètres est visible à une distance d'environ 400 mètres en aval de l'épi.

En revanche, durant les 20 années qui suivent l'extension de l'épi, le recul de la falaise est de plus de 15 m en moyenne et peut atteindre près de 20 mètres localement au plus près de l'ouvrage. Ce phénomène s'accompagne d'une nette érosion dès le pied de l'épi, tandis qu'aucun changement significatif est remarquable en amont de l'ouvrage sur cette même période (Cerema 2018b) ;

De façon générale, toutes les plages délimitées par un ouvrage tel qu'une jetée portuaire ou un épi majeur connaissent une accrétion de sédiments, par transfert des galets sur l'estran avec accumulation à l'aval du transport contre les ouvrages (Cerema 2022a).

7 CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le changement climatique en cours impacte l'ensemble des facteurs naturels d'évolution du littoral, qu'ils soient climatiques ou hydrodynamiques et au premier rang desquels figure l'élévation du niveau moyen de la mer. Les connaissances au niveau global s'appuient nécessairement sur les rapports de référence émis par le GIEC.

7.1 Scénarios proposés par le GIEC et les impacts sur le littoral : échelle globale et nationale

Il en existe quatre, correspondant chacun à un avenir possible selon les efforts plus ou moins grands réalisés par l'Homme afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial à l'horizon 2300 (Figure 45) :

- Un scénario d'atténuation **RCP2.6**,
- Deux scénarios intermédiaires de stabilisation **RCP4.5** et **RCP6.0**
- Un scénario correspondant aux émissions de gaz à effet de serre si aucunes améliorations n'est réalisée **RCP8.5** (IPCC 2014 in Cerema 2023a).

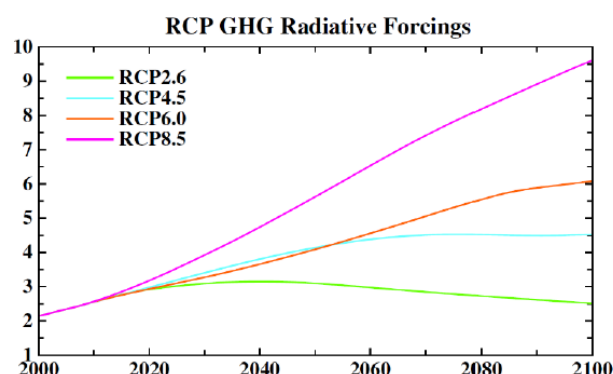


Figure 45 Forçage radiatif des scénarios RCP estimés pour une simulation du climat futur (Nazarenko et al. 2015)

Les principaux facteurs d'élévation du niveau des mers sont la dilatation thermique des océans et la fonte de réservoirs terrestres de glace (glaciers, calottes polaires, etc.). À l'horizon 2100, le niveau moyen des mers et des océans devrait s'élever en moyenne de 43 cm (fourchette probable 29 à 59 cm) selon le scénario RCP2.6, et de 84 cm (fourchette probable 61 à 110 cm) d'après le scénario RCP8.5 par rapport à 1986-2005 (Figure 46). L'augmentation du niveau des mers sera probablement à l'origine de fortes migrations de populations, puisque plus d'un milliard de personnes vivent dans des basses terres côtières (inférieures à 10 mètres d'élévation).

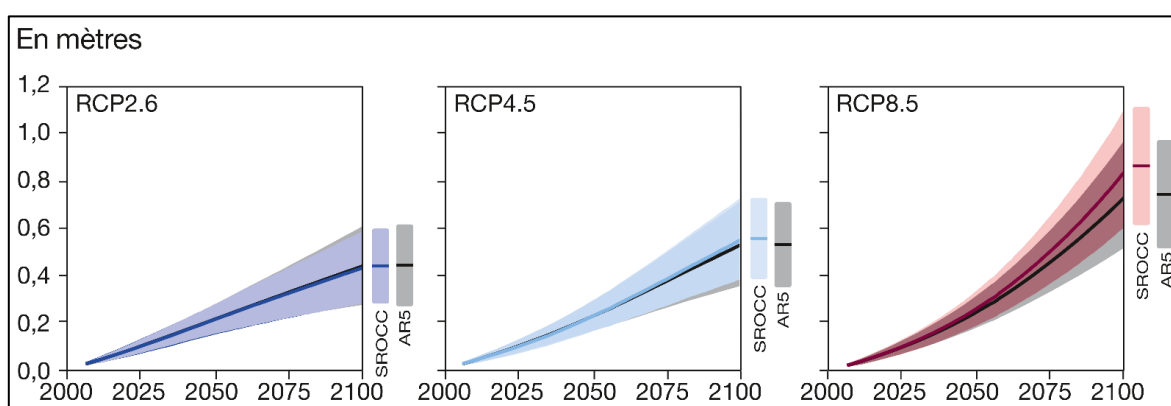


Figure 46 Projections de la hausse du niveau des mers selon les scénarios du Giec par rapport à la période 1986-2005 (Giec, SROCC, 2019)

7.2 Déclinaison à l'échelle régionale - Giec normand

Les effets du changement climatique s'observent aussi à l'échelle régionale de la Normandie. Pour rapporter cela, le Giec Normand a également publié des rapports évoquant les constats et les scénarios à l'échelle de la Normandie. En effet, à la suite des relevés de températures de l'ensemble des stations météo de la région, la température a augmenté de 0,6 à 0,8° C entre 1981 et 2010, par rapport à la période de 1951 à 1980. La tendance régionale montre un réchauffement plus marqué sur les valeurs maximales de températures plutôt que sur les valeurs minimales (Figure 47) (GIEC normand 2023).

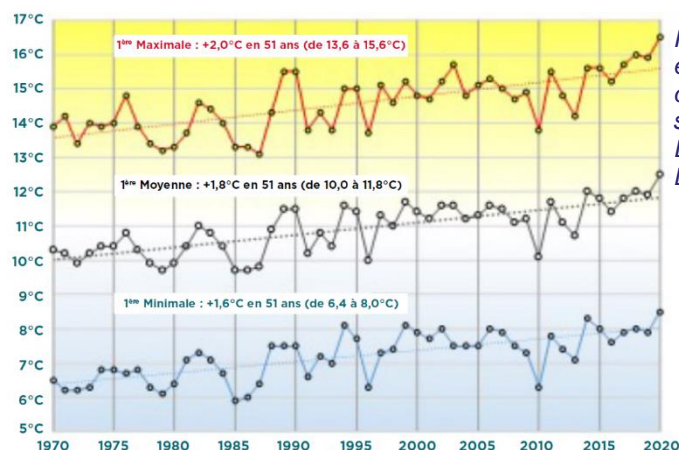


Figure 47 Température de l'air moyenne annuelle et tendance entre 1970 et 2020. Tendances linéaires (pointillés) et moyennes des minimales (bleu), moyenne (gris) et maximales (rouge), des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen., Données Météo France, Giec Normand

Concernant l'évolution des précipitations et du nombre de jour de vent fort, les données étudiées par le Giec Normand, ne permettent pas d'évaluer avec certitude une évolution.

Néanmoins, le groupe du Giec Normand propose des scénarios possibles d'évolution du climat dans la région. D'un point de vue des températures, les projections indiquent que l'élévation moyenne en Normandie pourrait être contenue à 1° C dans le cadre du scénario le plus optimiste et à 3,5° C dans le cadre du scénario le plus pessimiste. Selon, ce dernier, une augmentation importante de la fréquence des jours de chaleur supérieure ou égale à 25° C devrait avoir lieu, d'environ 15 jours actuellement à plus de 40 jours à la fin du siècle.

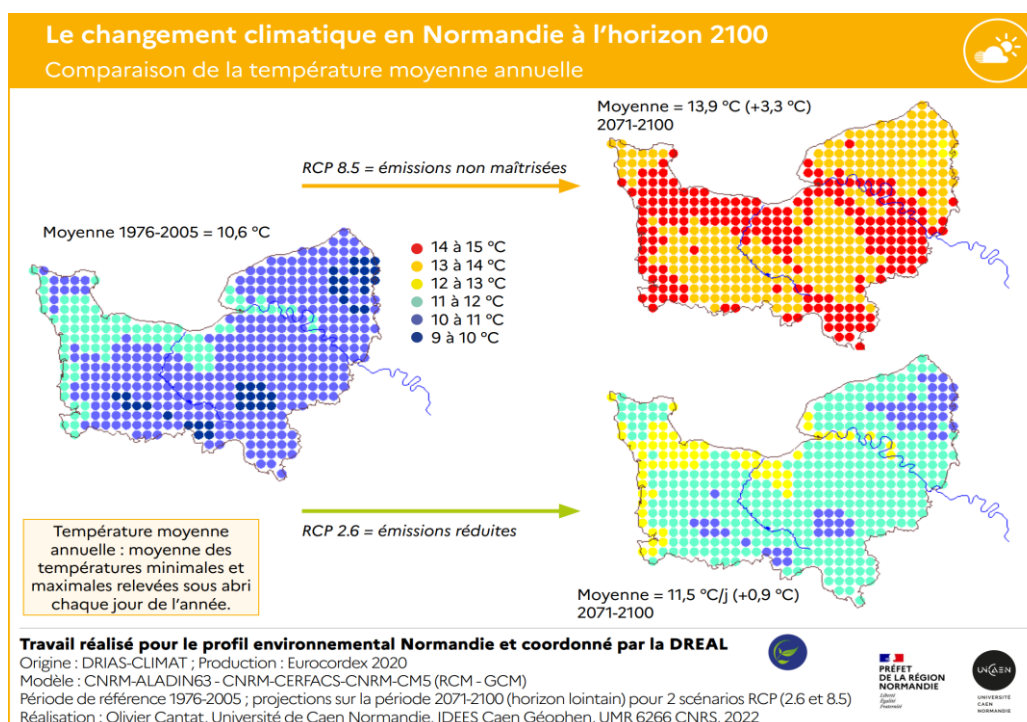


Figure 48 Comparaisons de la température moyenne annuelle, Données DRIAS-CLIMAT 2020, Olivier Cantat pour la DREAL Normandie, 2022

Pour les températures les plus froides, une diminution est également constatée. En effet, le nombre de jour de gelée devrait passer de 35 jours par an actuellement à 12 jours d'ici la fin du siècle. Le littoral serait cependant moins rapidement et moins intensément impacté que l'intérieur des terres grâce à la présence de la Manche et de son influence maritime (Figure 48).

Au regard des précipitations, l'évolution des cumuls annuels à la fin du siècle, serait une baisse d'environ 10% par rapports aux cumuls relevés actuellement. Néanmoins, cela est à relativiser, parce que le nombre de jours de très fortes précipitations (supérieur à 20 mm) augmenterait. Il passerait ainsi de 4,1 jours par an à 4,9 jours (Figure 49).

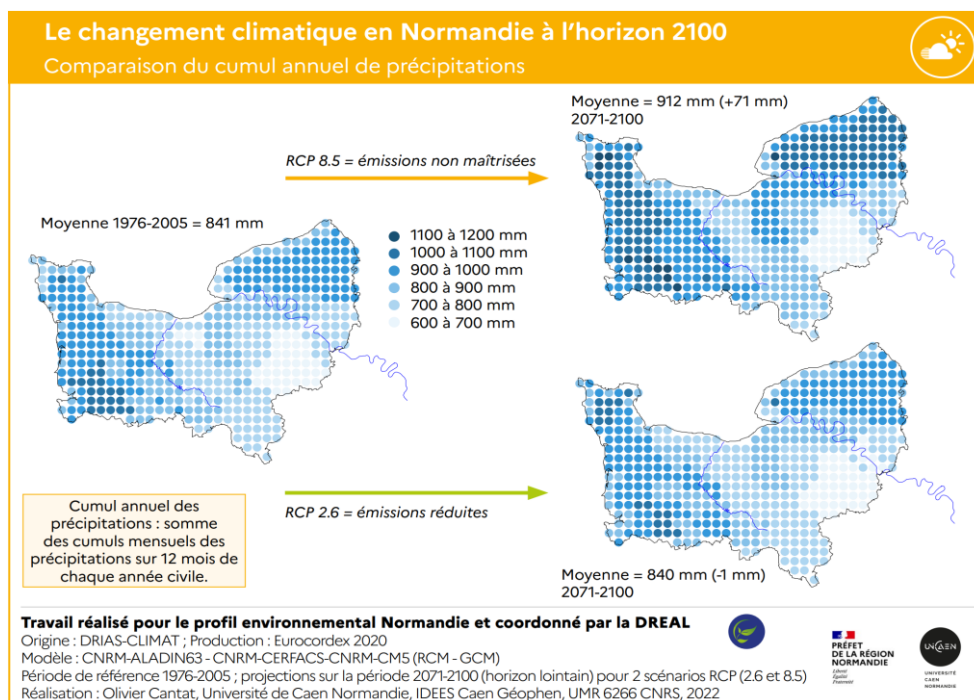


Figure 49 Comparaisons du cumul annuel de précipitations, Données DRIAS-CLIMAT 2020, Olivier Cantat pour la DREAL Normandie, 2022

Enfin, au sujet du vent et du risque de tempête, il est difficile de faire une projection avec les données dont dispose le Giec Normand. Plus précisément, le changement climatique impact également le littoral avec plusieurs effets et aléas déjà présents.

Ces effets peuvent être multiples et regroupent l'érosion côtière, la submersion marine ou encore l'augmentation du niveau de la mer. En termes de constats, les études mettent en évidence que deux tiers des côtes normandes sont en érosion (Cerema 2018c) et que les falaises qui concernent entre autres le littoral de Quiberville et de Sainte-Marguerite-sur-Mer sont affectées par des reculs de 20 à 25 cm/an en moyenne.

Le littoral normand est également sensible aux submersions marines du fait qu'une partie de ce littoral est ouverte aux flux atmosphériques d'ouest perturbés et que les territoires concernés présentent de très nombreuses zones topographiquement basses.

D'un point de vue des projections, le Giec Normand rappelle que le niveau marin augmente en moyenne de 3 mm/an, soit une hausse de 20 cm pour les 100 ans à venir. Cependant, cette hausse pourrait être encore plus importante si nous ne pouvons maintenir le réchauffement des températures en dessous de 4° C. Elle pourrait atteindre 1,1 m à 1,8 m d'ici 2100.

Au sujet des tempêtes, cela reste difficile de prévoir si leur nombre et leur intensité vont augmenter, mais avec la montée du niveau marin, la fréquence et l'intensité des submersions marines pourraient s'accroître. En Manche, il est montré que les marées hautes de forts coefficients (110-115) qui apparaissent 3 à 4 fois par an en moyenne, pourrait apparaître environ 65 fois/an si le niveau marin augmente d'un mètre (Costa et al. 2019).

7.3 Observations et prospections à l'échelle locale

En ce qui concerne le littoral de Quiberville et de Sainte-Marguerite, l'évaluation de la tendance d'élévation du niveau de la mer se fait avec les données du marégraphe de Dieppe (le plus proche). Grâce à la base de données SONEL (REFMAR, SHOM), on dispose du niveau marin depuis 1954 au marégraphe de Dieppe et on peut constater graphiquement son évolution. Le niveau moyen mensuel est passé de 4,74 m en janvier 1954 à 5,16 en janvier 2024 (Figure 50).

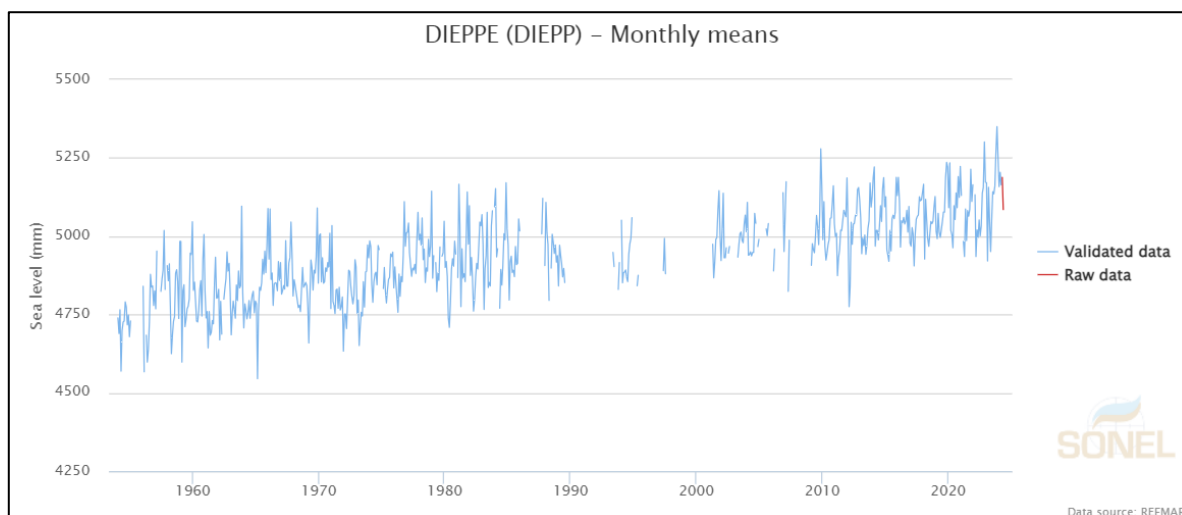


Figure 50 Niveau marin observé au marégraphe de Dieppe de 1954 à 2024, Base de données SONEL, REFMAR, SHOM, 2024

D'un point de vue des projections, le niveau de la mer à Dieppe a été estimé grâce aux différents scénarios proposés par le Giec. L'élévation estimée en 2100 serait de 0,5 m selon le scénario le plus optimiste et de 0,88 m d'après le plus pessimiste. En 2150, l'élévation serait de 0,74 m suivant le scénario le plus optimiste et de 1,42 m pour le plus pessimiste (Figure 51).

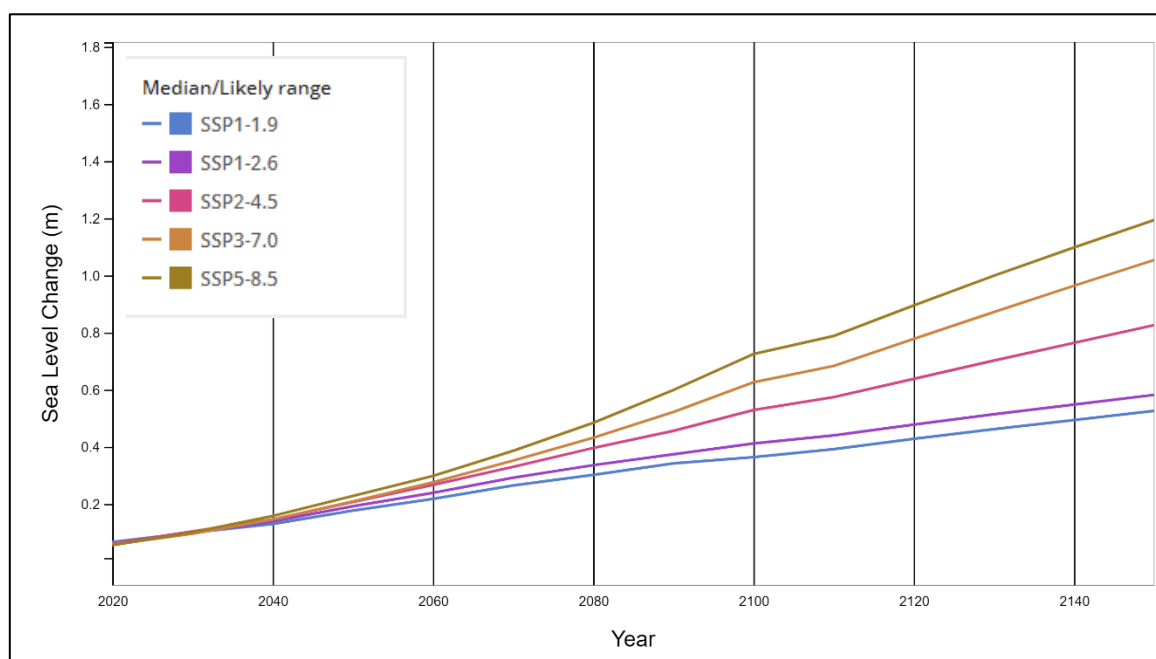


Figure 51 Elévation du niveau moyen de la mer pour le port de Dieppe selon différents scénarios proposés par le GIEC (<https://sealevel.nasa.gov/>)

À cette échelle locale, il est difficile d'émettre des scénarios concernant l'évolution des températures, des précipitations et des vents. Néanmoins, les scénarios probables sur les communes de Quiberville et de Sainte-Marguerite-sur-Mer se rapprocheront probablement des projections régionales.

8 ANNEXES

9 BIBLIOGRAPHIE

- Allain, Sophie, et Geneviève Teil. 2012. « S'adapter au changement climatique dans l'estuaire de la Seine ».
- Antea Group. 2017. « Etude de définition et de faisabilité pour la reconnexion de la Saône à la mer - Phase 1 : Définition et analyse des scénarii d'aménagement ».
- Bougis, Jean. 2000. « Ouvrages de défense littoraux COURS DE FORMATION CONTINUE ».
- BRGM. 1970. « Carte géologique de Dieppe (ouest), notice explicative ».
- . 1995. « Glissement de terrain sur la commune de Quiberville (Seine-Maritime) ».
- Cerema. 2017. « Cartographie nationale des ouvrages et aménagements littoraux ».
- . 2018a. « Étude sur le recul du trait de côte de la Seine-Maritime ».
- . 2018b. « Etude sur l'érosion côtière en aval des ouvrages majeurs en Seine-Maritime ». Cerema Normandie-Centre.
- . 2018c. « Indicateur national de l'érosion côtière : Spécifications techniques ».
- . 2021. « Évaluation des mouvements de terrain et des enjeux de la descente de Vasterival ».
- . 2022a. « Dynamique et évolution du littoral, synthèse des connaissances. Fascicule n°2 : De la pointe du Hourdel au cap d'Antifer ».
- . 2022b. « Suivi du trait de côte entre Sainte-Marguerite et l'église de Varengeville-sur-Mer : Exploitation des vols drone des campagnes 2018 à 2022 ».
- . 2023a. « Littoraux normands 2027 : Analyse des effets de l'érosion côtière et de la submersion marine sur le littoral normand aux horizons 2050, 2120 et 2300 incluant l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique ».
- . 2023b. « Suivi du cordon de galets de la plage de Quiberville (2018 à 2022) ».
- Chambre régionale des comptes Normandie. 2023. « Rapport d'observations définitives de la chambre régionale des comptes Normandie sur les comptes et la gestion de la commune de Quiberville ».
- Conservatoire du Littoral. 2015. « Plan de gestion du Cap d'Ailly - Volume II : état des lieux ».
- . s. d. « Dunes et plages : un mécanisme perpétuel ». <http://rivages-en-mouvement.conservatoire-du-littoral.fr/dunes-et-plages-un-mecanisme-perpetuel/>.
- Costa, et Delahaye. 2005. « Rapport final - Programme INTERREG 3 a - "Plage à risques(PAR)" ».
- Costa, Stéphane. 1999. « Sédimentologie des plages de galets des côtes françaises de la Manche : application à la défense contre la mer / The sedimentology of shingle beaches on the French Channel coasts : its application to sea defence ». *Revue de géographie de Lyon* 74 (1): 35-43. <https://doi.org/10.3406/geoca.1999.4927>.
- Costa, Stéphane, Françoise Gourmelon, Claude Augris, Philippe Clabaut, et Bernard Latteux. 2005. « Apport de l'approche systémique et pluridisciplinaire dans l'étude du domaine littoral et marin de la Seine-Maritime (France) ». *Noréis - Géographie du littoral : approche géomatique*, n° 196, 91-108.
- Costa, Stéphane, Olivier Maquaire, Pauline Letortu, Guillaume Thirard, Vincent Compain, Thomas Roulland, Mohand Medjkane, et al. 2019. « Sedimentary Coastal Cliffs of Normandy: Modalities and Quantification of Retreat ». *Journal of Coastal Research* 88 (sp1): 46-60. <https://doi.org/10.2112/SI88-005.1>.
- Dauphiné, André, et Damien Provitolo. 2007. « La résilience : un concept pour la gestion des risques »: *Annales de géographie* n° 654 (2): 115-25. <https://doi.org/10.3917/ag.654.0115>.
- Delsigne, Grégoire. 2023. « L'évolution du trait de côte et les submersions marines dans les communes de Sainte-Marguerite-sur-Mer et Quiberville. » Caen.
- Elineau, Sylvain. 2013. « Le risque naturel côtier sur la communauté d'agglomération du Havre (Haute-Normandie): Une évaluation des aléas. », 297.

GIEC normand. 2021. « Systèmes côtiers, Risques naturels et restauration des écosystèmes. » 6. https://cloud.normandie.fr/s/RqqMPzaeStop9GG?dir=undefined&path=%2F6_Littoral&openfile=5069977.

———. 2023. « Changement climatique et aléas météorologiques ».

Junique, Thomas, Raphaël Antoine, Vincent Guilbert, Bruno Beaucamp, Cyril Ledun, Stéphane Costa, Olivier Maquaire, Robert Davidson, et Cyrille Fauchard. 2024. « Investigation of the Geological and Hydrogeological Structure of Chalk Cliffs with Visible, Thermal Infrared and Electrical Resistivity Imaging ». *Journal of Hydrology* 630 (février):130642. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130642>.

Latteux, Bernard. 2001. « Synthèse sur les problématiques et enjeux d'évolution du littoral haut-normand et picard », 464.

Laurent, Marie, Julie Bignon, MÉRIL MÉRINDOL, Loïc Moutoussamy, Edith Leborgne, Yann Le Faou, Laure Avisse, et al. 2023. « Description sommaire de l'état de la connaissance et des caractéristiques physiques de la façade maritime Manche Est – Mer du Nord ».

Leclerc, Anne-Marie. 2010. « Ouvrages de protection du littoral : effets sur la morphologie des plages et sur les communautés benthiques intertidales, région de Saint-Siméon et de Bonaventure, baie des Chaleurs (Québec, Canada) ».

Letortu, Pauline. 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 de Caen.

Letortu, Pauline, Stéphane Costa, Abdelkrim Bensaid, Jean-Michel Cador, et Hervé Quénol. 2014. « Vitesses et modalités de recul des falaises crayeuses de Haute-Normandie (France) : méthodologie et variabilité du recul ». *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 20 (vol. 20-n° 2): 133-44. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10588>.

Letortu, Pauline, Stéphane Costa, et Olivier Cantat. 2012. « Les submersions marines en manche orientale : approche inductive et naturaliste pour la caractérisation des facteurs responsables des inondations par la mer ». *Climatologie* 9:31-57. <https://doi.org/10.4267/climatologie.165>.

Ministère de la Transition Ecologique et de la cohésion des territoires. 2023. « Érosion du littoral : à quoi s'attendre et comment s'adapter ? » Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique. 17 juillet 2023. <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/dossiers-thematiques/impacts/erosion-du-littoral>.

Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer. 2010. « Les ouvrages longitudinaux de protection des côtes sableuses ». In *La gestion du trait de côte*, Quae.

Prémaillon, Mélody. 2018. « Hiérarchisation des facteurs d'érosion des falaises côtières du site au globe ». Toulouse.

Syndicat Mixte du Littoral de la Seine-Maritime. s.d. « Définition et rôles des ouvrages littoraux ». <https://sml76.fr/2023/07/definitions-et-roles-des-ouvrages-littoraux-geres-par-le-sml76/>.

Université de Caen Normandie. 2013. « Ruissellements, érosion et modalités de gestion du Cap d'Ailly : Expertise préalable à l'établissement d'un nouveau plan de gestion ».

9.1 Table des illustrations

Tableau 1 : Tableau des différents secteurs et leurs caractéristiques associées. (Cerema, 2018).....	17
Tableau 2 : Synthèse des évènements verticaux survenus selon les faciès présents sur la zone d'étude. (Cerema, 2018)	18
Tableau 3 Tableau climatique de Dieppe, Cerema 2022a, 1991 / 2021	21
Tableau 4 Traits de côte digitalisés sur les falaises simples à l'est et à l'ouest de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer.....	35
Tableau 5 Traits de côte digitalisés au niveau des frettes du Cap d'Ailly	38
Tableau 6 Inventaire des tempêtes ayant impactées la zone d'étude (SHOM, Cerema 2022, MétéoFrance)	41
Figure 1 Carte géologique de la zone d'étude (BRGM).....	11
Figure 2 Colonne litho stratigraphique des dépôts Éocène du Cap d'Ailly.....	11
Figure 3 Schéma explicatif de l'établissement du budget sédimentaire.....	13
Figure 4 Quatre principaux type d'instabilités gravitaires des falaises littorales (Sunamura, 1992 in Prémaillon, 2018) (a-Chutes de blocs, b-Effondrement de pan, c-Glislements, d-Ecoulements).....	15
Figure 5 Répartition des effondrements recensés en haute-Normandie entre 2002 et 2009. (Letortu, 2012)	15
Figure 6 Variation du taux d'érosion le long du littoral haut Normand (modifié d'après Letortu et al. (2014a) in Prémaillon (2018))	16
Figure 7 Répartition saisonnière des effondrements en volume cumulé et en nombre. (Letortu, 2012)	16
Figure 8 : Cartographie des secteurs homogènes au droit de la zone d'étude d'après l'étude Cerema 2018	17
Figure 9 Modèle 3D de la falaise de Sainte-Marguerite-sur-Mer, mai 2019 (Cerema,2022).....	19
Figure 10 Levé Litto 3D partie maritime sur la zone d'étude (SHOM)	20
Figure 11 Vol drone réalisé dans le cadre de l'étude sur le cordon de galets, Cerema mars 2020.....	20
Figure 12 Graphe des températures en 2023 à Dieppe, infoclimat.fr, 2023	21
Figure 13 Graphe des précipitations en 2023 à Dieppe, infoclimat.fr, 2023	22
Figure 14 Exemple de données issues du marégraphe de Dieppe, Refmar, SHOM, 2024	23
Figure 15 Rose des houles (au large de Dieppe), ANEMOC, 1979-2011.....	24
Figure 16 Energie cinétique des courants marins (2010-2015), Dynamiques et évolution du littoral, Fascicule n°2, Cerema, 2023.....	25
Figure 17 Exemple de profils générés le long du rivage (Cerema,2018)	27
Figure 18 Principe général du calcul des tendances d'évolution du trait de côte (Cerema, 2018)	27
Figure 19 Trait de côte 2012 mis à jour pour correspondre à 2019	27
Figure 20 Terminologie des éléments permettant de calculer la surface gagnée et/ou perdue entre deux traits de côte de millésimes différents (Cerema, 2023)	28
Figure 21 Marqueurs morphologiques du trait de côte au niveau de Sainte-Marguerite-sur-Mer	29
Figure 22 Recul maximal entre deux traits de côte (casier de 50m, recul max, trait de côte récent, trait de côte ancien).....	29

Figure 23 Modèle 3D de la falaise de Sainte-Marguerite-sur-Mer – mai 2019.....	30
Figure 24 Carte des pentes, Cerema 2022	30
Figure 25 Traits de côte utilisés pour les calculs d'évolution du trait de côte.....	31
Figure 26 Modélisation de la falaise le 19 septembre 2022	32
Figure 27 Zones d'accumulation et d'érosion sur la falaise sur la saison hiver / printemps 2022-2023	33
Figure 28 Illustration des différentes classes morphologiques des falaises (Cerema, NC).....	35
Figure 29 Comparaison des résultats de différentes études sur les falaises à l'est de Sainte-Marguerite-sur-Mer.....	37
Figure 30 Différences de digitalisation du trait de côte 2019.....	39
Figure 31 Différences de résultats selon le trait de côte utilisé.....	39
Figure 32 Évolution moyenne annuelle des frettes entre 2018 et 2022 (Cerema, 2022 modifié par Cerema, 2024).....	40
Figure 33 Schématisation des mouvements sédimentaire suite à la tempête Miguel sur le littoral de Quiberville. (Cerema, 2020).....	43
Figure 34 Schématisation des mouvements sédimentaire à la suite de la tempête Patricia sur le littoral de Quiberville.....	44
Figure 35 Schéma des 3 types de submersions marines, modifié par G. Delsigne, BRGM.....	44
Figure 36 Nombre de submersions recensées en Manche orientale de 1949 à 2010 selon leur degré de gravité. (LETORTU et Al. 2012)	45
Figure 37 Nombre de submersions marines recensées par commune entre Le Havre et Cayeux-sur-Mer (1949-2010).....	46
Figure 38 Franchissement par paquet de mer engendrant des dommages aux infrastructures sur la route digue de Sainte-Marguerite-sur-Mer et Quiberville. J.Favrel 2018	46
Figure 39 Carte des ouvrages et aménagements présents sur le littoral de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer.....	48
Figure 40 Carte des ouvrages longitudinaux présents sur le littoral de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer.....	49
Figure 41 Carte des ouvrages transversaux présents sur le littoral de Quiberville et Sainte-Marguerite-sur-Mer.	50
Figure 42 Trace d'un ancien épi en bois sur l'estran de Quiberville (Cerema, 2023).....	51
Figure 43 Photo d'un épi sur l'estran de Quiberville (Cerema, 2023)	51
Figure 44 Accumulation de galets à l'Est du dernier épi de Sainte-Marguerite-sur-Mer, décembre 2017 (Cerema NC)	53
Figure 45 Forçage radiatif des scénarios RCP estimés pour une simulation du climat futur (Nazarenko et al. 2015)	54
Figure 46 Projections de la hausse du niveau des mers selon les scénarios du Giec par rapport à la période 1986-2005 (Giec, SROCC, 2019)	54
Figure 47 Température de l'air moyenne annuelle et tendance entre 1970 et 2020. Tendances linéaires (pointillés) et moyennes des minimales (bleu), moyenne (gris) et maximales (rouge), des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen., Données Météo France, Giec Normand	55
Figure 48 Comparaisons de la température moyenne annuelle, Données DRIAS-CLIMAT 2020, Olivier Cantat pour la DREAL Normandie, 2022	55

Figure 49 Comparaisons du cumul annuel de précipitations, Données DRIAS-CLIMAT 2020, Olivier Cantat pour la DREAL Normandie, 2022	56
Figure 50 Niveau marin observé au marégraphe de Dieppe de 1954 à 2024, Base de données SONEL, REFMAR, SHOM, 2024	57
Figure 51 Elévation du niveau moyen de la mer pour le port de Dieppe selon différents scénarios proposés par le GIEC (https://sealevel.nasa.gov/)	57

9.2 Glossaire

Abat d'eau : Pleuvoir de façon soudaine et violente.

Accrétion : Progression de la ligne de rivage par accumulation de sédiments.

Agent érosif : Agents favorisant l'érosion du trait de côte. Peut-être continental (ruissèlement, gel...) ou marin (vague, marée...).

Agent submersif : Agent favorisant une submersion (vague...)

Ajustement isostatique : Soulèvement des masses terrestres lié à la déglaciation.

Anthropique : Fait par un être humain (constructions, action humaine...)

Barkhane : Dune mobile en forme de croissant donc les cornes s'allongent dans le sens du vent dominant.

Bathymétrie : Mesure des profondeurs marine.

Casier : Couche SIG regroupant les polygones d'un même ensemble de polygones. Cette couche de casiers permet de calculer les vitesses d'évolution par tronçon de 50 m.

Cellule hydro-sédimentaire : compartiment de littoral qui peut être décrit et analysé de manière autonome du point de vue des transports sédimentaires transversaux et longitudinaux.

Climatologie : Discipline scientifique d'étude du climat et de l'état moyen de l'atmosphère sur de longues périodes dans le temps (répartitions géographiques et saisonnières des températures, des vents, des précipitations, etc.). La climatologie peut aussi s'appliquer au domaine océanique (paramètres de température de l'eau, de salinité, de pH, etc.).

Cordon littoral : Accumulation littoral linéaire, parallèle au trait de côte.

Cordon de galets : Accumulation de galets en haut de plage, liée à la production de silex issu de l'ablation des falaises ou du platier rocheux.

Cordon dunaire : Forme littorale constituée d'une accumulation de sable, parallèle à la côte.

Crétacé : Période géologique s'étendant de -145.5 millions d'années à -65.5 millions d'années.

Dérive littorale : Flux de sédiments sensiblement parallèle au rivage, en proche côtier.

Diachronique (analyse) : Analyse qui envisage les changements dans le temps entre deux dates.

Digue : Ouvrage longitudinal destiné à protéger les basses-terres contre les submersions.

Dune : Forme de relief érigée avec des matériaux meubles, généralement des sables, par un fluide en mouvement (vent, eau).

Écroulement : Mouvement rapide entraînant, au pied d'un versant de pente forte, une masse de matériau issue d'une fragmentation.

Épis : Ouvrage de protection du littoral positionné sur la plage ou l'estran transversalement au trait de côte, captant une partie du transport sédimentaire de la dérive littorale.

Érosion côtière : Recul du trait de côte causé par une prépondérance des phénomènes d'enlèvement des matériaux (sable, galets...) sur les dépôts.

Estran : Partie du littoral qui se trouve entre les plus hautes et les plus basses mers, correspondant à la zone de balancement des marées.

Estuaire : Embouchure d'un fleuve.

Évènement historique : Évènement exceptionnel (éboulement d'une falaise).

Faciès : Ensemble de caractère lithologique permettant de décrire une roche, un affleurement.

Facteur météo-marin : Facteur analysant les paramètres liés à la météorologie et à la mer (vent, houles, marée, précipitation...)

Falaise : Ensemble de rochers escarpés situés sur le littoral ou en retrait du littoral.

Frange littorale : Espace de transition entre la terre et la mer.

Géomorphologie : Discipline scientifique dont l'objet est de nommer et de mesurer les formes du relief.

Géoréférencement : Relier un objet et ses données à sa position dans l'espace par rapport à un système de coordonnées.

Glissement : Mouvement entraînant une masse de matériaux meubles vers le bas d'un versant, avec une vitesse faible.

Houle : Oscillations régulières de la surface de la mer, observées en un point éloigné du champ de vent qui les a engendrées, dont la période se situe autour de dix secondes.

Infiltration : Introduction d'eau de surface dans le sol.

Jet de rive : Masse d'eau projetée sur un rivage vers le haut de l'estran par l'action de déferlement des vagues.

Lidar : technique de mesure de distance (télémétrie) qui exploite les propriétés de la lumière, comme le radar exploite celles des ondes électromagnétiques ou le sonar celles des ondes acoustiques.

Marais retro-littoral : Régions côtières plates et humides, insuffisamment drainées et souvent inondées dont la nature, les activités, les aménagements et les paysages sont fortement et directement influencés par la présence de la mer.

Marégraphe : Instrument de mesure du niveau marin.

Marnage : La différence de hauteur d'eau, observée ou calculée, en un lieu et pour un jour donné, entre le niveau de pleine mer et le niveau de basse mer.

Morphodynamique : Discipline consacrée à l'étude des formes (du littoral) et à leur évolution sous l'action des facteurs hydrodynamiques et éoliens.

Ortholittoral : Orthophotographie du littoral

Orthophotographie : Image photographique dont on a corrigé les déformations dues au relief du terrain, à l'inclinaison de l'axe de prise de vues et à la distorsion de l'objectif. Les orthophotographies disposent d'un système de coordonnées géographiques.

Ouvrage : Construction permettant de protéger le littoral de l'érosion et de la submersion marine. Il peut être transversal (épis) ou linéaire (digue).

Ouvrage linéaire (ou longitudinal) : Ouvrage parallèle au trait de côte

Ouvrage transversal : Ouvrage perpendiculaire au trait de côte.

Photointerprétation : Analyse d'images aériennes.

Plage : Espace découvert en bord de mer, plus ou moins plat. Accumulation littorale due à la mer, de granulométrie hétérogène et variable.

Platier : Estran rocheux affleurant à marée basse.

Rose (de houle, de vent) : Représentation des fréquences des directions de provenance du vent ou de la houle, en un site de mesure donné et pendant une période d'observation déterminée.

Ruissellement : Écoulement instantané et temporaire, diffus ou concentré, des eaux sur un versant à la suite d'une averse.

Sémaphore : Poste de signalisation établi sur une côte pour communiquer avec les navires.

Silex : Roche sédimentaire siliceuse d'origine physico-chimique. Se trouve sous forme de nodules dans les falaises calcaires.

Submersion marine : Envahissement des espaces côtiers par la mer à la suite d'un fort coefficient de marée, d'une tempête, d'un tsunami ou du réchauffement climatique.

Topographie : Étude et mesure du relief du terrain. Le relief peut être naturel (dune, falaise) ou artificiel (bâtiment, route).

Trait de côte : Ligne de contact théorique entre la terre et la mer.

Transit sédimentaire : Transport naturel des sédiments par l'eau.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN