



HAL
open science

L'érosion des falaises au sein des aléas côtiers : suivi, compréhension et partage

Pauline Letortu

► **To cite this version:**

Pauline Letortu. L'érosion des falaises au sein des aléas côtiers : suivi, compréhension et partage. Géographie. Université de Bretagne Occidentale, 2023. tel-04230578

HAL Id: tel-04230578

<https://hal.science/tel-04230578>

Submitted on 9 Oct 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

Remerciements

Cette habilitation à diriger des recherches, présentée comme un travail personnel, est également un travail collectif. Mon itinéraire de recherche, commencé à Caen (de 2009 à 2013) et poursuivi à Brest (de 2014 à aujourd'hui), a été jalonné de très belles rencontres.

L'accueil en août 2014 au sein du laboratoire LETG-Brest a été très chaleureux et mes débuts en tant qu'enseignante-chercheuse ont été facilités. J'ai conscience d'avoir été privilégiée, car les tâches administratives sont (pour le moment) limitées, ce qui laisse une grande place pour mes recherches et mes enseignements.

Je tiens à exprimer mes premiers remerciements à mon garant, Pascal Bernatchez, professeur de géographie à l'Université du Québec à Rimouski, titulaire de la chaire de recherche en géoscience côtière. Sa venue sur les terrains de mes recherches, ses remarques et ses conseils avisés, son hospitalité lors de ma venue au Québec et sa bienveillance ont permis de réaliser cet écrit sereinement.

Mes deuxièmes remerciements vont à Stéphane Costa, professeur des universités à l'Université de Caen Normandie, pour sa confiance accordée tout au long de mon parcours. Sa rencontre a été déterminante.

Je souhaite exprimer ma gratitude à Cyril Tissot, directeur du laboratoire LETG-Brest et Iwan Le Berre, directeur du département de géographie, pour les encouragements sincères et leur soutien sans faille. J'adresse une pensée à Brice Trouillet, directeur de l'UMR multisite LETG, pour ses encouragements.

Je veux remercier vivement Virginie Duvat, professeure des universités à La Rochelle Université, Denis Mercier, professeur des universités à Sorbonne Université et Marie-Hélène Ruz, professeure des universités à l'Université du Littoral Côte d'Opale, pour m'avoir fait l'honneur d'être rapporteurs de cette HDR. Leur intérêt pour mon travail est une grande joie. Je remercie chaleureusement Marion Amalric, maître de conférences HDR à l'Université de Tours, Françoise Gourmelon, directrice de recherche CNRS au LETG-Brest et Alain Hénaff, professeur des universités à l'Université de Bretagne Occidentale d'avoir accepté d'examiner ce travail. Quant à Stéphane Costa, je suis très heureuse qu'il soit l'invité de ce jury.

Je tiens à exprimer chaleureusement ma reconnaissance :

- à l'équipe du laboratoire LETG-Brest avec laquelle je travaille avec bonheur au quotidien (notamment Fred Audard, Louis Brigand, Axel Creach, Véronique Cuq, Bernard Fichaut, Eric Foulquier, Françoise Gourmelon, Alain Hénaff, Iwan Le Berre, Nicolas Le Corre, Adeline Maulpoix, Catherine Meur-Férec, Ingrid Peuziat, Julie Pierson, Mathias Rouan, Serge Suanez, Cyril Tissot, etc.) avec une dédicace toute spéciale à Laurence David et Isabelle Mescoff que j'apprécie tant et qui ont travaillé dur sur ce manuscrit (graphisme et relecture, respectivement). Je pense aussi aux postdoctorants, docteurs, doctorants, ingénieurs, stagiaires et contractuels qui font partie cette aventure avec une pensée toute particulière pour Déborah Belleney, Simon Beurel, Eugénie Cazaux, Pauline Clain, Jean-Marie Derval, Elisée Gbégnon, Marie Guingot, Marie Jabbar, Thibaud Lami, Katja Laute, Lucile Mineo-Kleiner, Cyril Pensec, Céline Perherin, Lucille Ritschard, Roza Taouki, Claire Théry, Jeanne Thibault et Benjamin Troadec. Une pensée spéciale à Zoé Bessin qui est la première doctorante que je co-encadre et c'est un grand plaisir ;

- à l'équipe du département de géographie avec qui j'ai le plaisir d'échanger dans une ambiance conviviale et stimulante et qui a toujours soutenu les projets pédagogiques que je souhaitais initier. Une dédicace

particulière à Yvanne Bouvet qui m'a tant encouragée dans la rédaction de ce manuscrit et avec qui j'aime discuter de géographie et de tant d'autres choses ;

- à Riwalenn Ruault qui est, selon moi, la meilleure ingénieure pédagogique et c'est loin d'être son seul talent ! Elle a été d'une grande pertinence, d'une bienveillance rare et d'un soutien indéfectible ;

- à l'équipe talentueuse de l'IUEM et plus largement de l'UBO, dont Jérôme Ammann, Emmanuel Augereau (acolyte depuis 2010), Stéphane Bertin, Elisabeth Bondu, Emmanuelle Cam, Aurélie Claude, Jacques Deverchère, Céline Diverres, France Floc'h, Elisabeth Guillou, Gael Hamon, Sébastien Hervé, Marion Jaud, Sandy Joiris, Maxime Kernec, Nicolas Le Dantec, Bernard Le Gall, Enora Leproust, Anaëlle Le Roux, Delphine Le Roux, Caroline Lummert, Christophe Martin, Patricia Merny, Quentin Millière, Delphine Muths, Manuelle Philippe, Adélie Pomade, Christophe Prunier, Nadine Reniers, Justine Roddier sans oublier l'équipe du fablab ;

- aux Caennais du laboratoire IDEES : Olivier Maquaire, Olivier Cantat pour leurs nombreux conseils et leur aide précieuse et, bien sûr, Robert Davidson qui m'accompagne au pied et au sommet des falaises de Seine-Maritime. D'une grande compétence et d'une générosité toute québécoise, je mesure la chance que j'ai de faire du terrain en sa compagnie depuis 2009. Je remercie également chaleureusement les trois jeunes docteurs de ce laboratoire, Guillaume Thirard, Bastien Peuziat et François Beauvais pour leur aide et leur expertise précieuse ;

- à Paul Tréguer, fondateur de l'IUEM, avec qui j'ai l'honneur de travailler sur des projets liant les sciences de la mer et du littoral et les médias. Sa compétence et sa confiance m'ont beaucoup apporté ;

- aux membres de l'UMR multisite LETG que j'ai toujours plaisir à voir lors de nos diverses réunions scientifiques (particulièrement Thomas Corpetti, Hervé Quénol et Jean Nabucet) ;

- aux enseignants-chercheurs, doctorants, ingénieurs et techniciens avec qui j'ai la chance de collaborer sur le technopôle de Plouzané (Ronan Querrec), à Vannes (Sébastien Lefèvre et Iris de Gélis), à Lyon (Pascal Allemand, Philippe Grandjean et Sophie Passot), à Strasbourg (Clément Hibert), à Rouen (Raphaël Antoine et Cyrille Fauchard), à Rennes (Jérôme de la Bernardie et Laurent Longuevergne), au Québec (Guillaume Marie) et en Grèce (Niki Evelpidou et Emmanuel Vassilakis) ;

- à l'équipe de la composante « Lettres et sciences humaines » avec une pensée pour Patricia Brun, Christine Delage et Joëlle Klingler ;

- aux étudiants, qui se prêtent volontiers à différents formats d'enseignement ;

- à Vincent Dubreuil et Yann Richard de la section 23 du conseil national des universités pour leur soutien ;

- à Maude Corriveau, Elizabeth Davidson et Patrick Emo pour leur gentillesse, leur générosité et leur accueil à Rimouski, à Caen et aux abords des falaises de Varengeville-sur-Mer ;

- aux élus, gestionnaires, habitants, enseignants et collégiens de Guissény et de sa communauté de communes pour leur implication et leur soutien avec une dédicace spéciale à Valérie Ar Gall, Patrick Calonnec, Dominig Chorlay, Noémie Floch et Nicolas Loncle ;

- à Lucile Bourguignon et Mahafaka Ranoarisoa pour leur grande aide dans l'étude bibliométrique ;

- à Olivier Aballain et Stéphane de Vendevre pour nos échanges et leur motivation pour l'école d'été « Mer et Journalisme » et le diplôme universitaire « Mer et Médias ».

Je tiens à témoigner ma gratitude à ma famille élargie (avec Trevor et Jenny) qui me soutient, avec une mention toute spéciale à ma mère ainsi qu'à Herveline. Je pense également à mes amis normands et bretons (Riwalenn, Aline, Julie, Marion, Emilie, Guillaume, Justine, Anaëlle, Sébastien, Anthony, Mélanie, Emmanuel, Isabelle, Laurence, Thibaud et Léna). Merci aussi à mes chers voisins (Josiane, Daniel, Karine, Damien, Joseph, Danièle, Yvette et Eric) qui veillent sur mes enfants lors de mes missions.

Mes derniers remerciements sont adressés à Romain et à nos deux blondinets, Valentin et Oscar, qui sont mes plus belles rencontres. Je leur dédie ce travail.

Table des sigles et des acronymes

AAP	Appel A Projets
ACP	Analyse en Composantes Principales
AGEO	<i>Atlantic GEOhazard platform</i>
ANEMOC	Atlas Numérique d'Etats de Mer Océaniques et Côtiers
ANR	Agence Nationale de la Recherche
AP	Apprentissage Profond (<i>deep learning</i>)
API	interface de programmation d'application (<i>Application Programming Interface</i>)
ASP	Ames Stereo Pipeline
BD	Base de Données
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
CC	Creative Commons (licence)
CCPI	Communauté de Communes du Pays d'Iroise
CEREMA	Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CERV	Centre d'Etudes de la Réalité Virtuelle
CETMEF	Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales
CLCL	Communauté de communes Lesneven côte des Légendes
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNN	réseau neuronal convolutif (<i>Convolutional Neural Network</i>)
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CO3D	Constellation Optique en 3D
CoCliCô	Collecte de Clichés Côtiers
COCORISCO	COonnaissance, COmpréhension et gestion des RISques COtiers
CRISI	outil de Collecte et Relevé d'Informations Suite à une Inondation
DDTM	Direction Départementale des Territoires et de la Mer
D(R)EAL	Direction (Régionale) de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DF	ondes stationnaires générées par les interactions vagues/vagues (<i>Double Frequency</i>)
dGPS	système de positionnement différentiel par satellite (<i>differential Global Positioning System</i>)

DRELIO	DRone hELIcoptère pour l'Observation et l'environnement
DYNALIT	DYNAmique du LITtoral et du trait de côte
EDF	Electricité De France
EGEL (master)	Expertise et Gestion de l'Environnement Littoral
ENIB	Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest
ENSTA	Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées
EPCI	Etablissement Public de Coopération Intercommunale
EROCOVUL	EROSion COtière et VULnérabilité du trait de côte en Bretagne
EROFALITT	EROSion des FAlaises du LITToral normand
ERT	tomographie de résistivité électrique (<i>Electrical Resistivity Tomography</i>)
ESTRAN	Espace Scientifique et Technique des Ressources Aquatiques et de la Navigation
ETP	Equivalent Temps Plein
EUR	Ecole Universitaire de Recherche
F3	contribution de la micro-Fracturation induite par les ondes inFragravitaires à l'érosion des Falaises
GAN	réseau antagoniste génératif (<i>Generative Adversarial Network</i>)
Geo-Ocean	Géosciences Océan (CNRS, UBO, UBS) et Géosciences Marines (IFREMER)
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GIS BreTel	Groupement d'Intérêt Scientifique Bretagne Télédétection
GNSS	système de navigation par satellite (<i>Global Navigation Satellite System</i>)
GPS	système de positionnement par satellite (<i>Global Positioning System</i>)
GPR	radar à pénétration de sol (<i>Ground Penetrating Radar</i>)
GPU	unité de traitement graphique (<i>Graphics Processing Unit</i>)
GR	sentier de Grande Randonnée
HDR	Habilitation à Diriger des Recherches
HF	ondes Haute Fréquence générées par une combinaison de facteurs locaux (<i>High Frequency</i>)
HIRACLES	imagerie haute résolution pour l'étude de l'érosion des falaises (<i>High-Resolution imAgery for CLiff Erosion Studies</i>)
HR	Haute Résolution
H _s	Hauteur significative des vagues

HT	Hors Taxe
IDEES	Identité et Différenciation de l'Espace, de l'Environnement et des Sociétés
IDG	Infrastructure de Données Géographiques
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER
IG	ondes InfraGravitaires (<i>InfraGravity waves</i>)
IGN	Institut Géographique National
IMTA	école nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique Bretagne Pays de la Loire
INDIGEO	INfrastructure de Données et d'Informations GEOréférencées sur l'environnement
INEC	Indicateur National de l'Erosion Côtière
INIST	INstitut de l'Information Scientifique et Technique
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
INSPIRE	<i>INfrastructure for SPatial InfoRmation in the European community</i>
IoU	<i>Intersection over Union</i>
I-REACT	<i>Improving Resilience to Emergencies through Advanced Cyber Technologies</i>
IRISA	Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires
ISblue	école universitaire de recherche interdisciplinaire spécialisée en sciences et technologies marines (<i>the Interdisciplinary graduate School for the blue planet</i>)
ISRM	<i>International Society of Rock Mechanics</i>
IUEM	Institut Universitaire Européen de la Mer
JCGM	<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>
LCHF	Laboratoire Central d'Hydraulique de France
LETG	Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique
LGO	Laboratoire Géosciences Océan (devenu Geo-Ocean en 2022)
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LISA	indicateurs locaux d'association spatiale (<i>Local Indicators of Spatial Autocorrelation</i>)
LOPS	Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale
LSW	<i>Local Search Window</i>
MATE	Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
MEDDE	Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie
MEEDM	Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer
MEEM	Ministère de l'Ecologie, de l'Energie et de la Mer
METL	Ministère de l'Equipement, du Transport et du Logement

MGM	<i>More Global Matching</i>
MNE	Modèle Numérique d'Élévation
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MOOC	<i>Massive Open Online Course</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NGF	Nivellement Général de la France
OBELIX	OBservation de l'Environnement par Imagerie complexe
OR2C	Observatoire Régional des Risques Côtiers
OSI	interface web-SIG de l'ObServatoire Intégré des risques côtiers
OSIRISC	ObServatoire Intégré des RISques Côtiers
PIT tag	marquage par transpondeur passif intégré
PLU	Plan Local d'Urbanisme
PPR(L)	Plan de Prévention des Risques (Littoraux)
PPRSM	Plan de Prévention du Risque d'inondation par Submersion Marine
PRI	Projet de Recherche Informatique
RA	Réalité Augmentée
RCP	profil représentatif d'évolution de concentration (<i>Representative Concentration Pathway</i>)
RD	Route Départementale
REFMAR	Réseaux de rEFérence des observations MARégraphiques
RGE	Référentiel à Grande Echelle
RGF	Réseau Géodésique Français
RICOCHET	évaluation multirisque de territoires côtiers en contexte de changement global (<i>multi-RIsk assessment on COastal territory in a global CHange contExT</i>)
RISCOREV	RISques COtiers et REalité Virtuelle
RM	Réalité Mixte
RMSE	racine de l'erreur quadratique moyenne (<i>Root Mean Square Error</i>)
RNOTC	Réseau National des Observatoires du Trait de Côte
ROL	Réseau d'Observation du Littoral
ROLNP	Réseau d'Observation du Littoral Normand et Picard
RPC	<i>Rational Polynomial Coefficients</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>

RV	Réalité Virtuelle
SF	ondes de gravité de surface typiques (houle) (<i>Swell Frequency</i>)
SfM-MVS	<i>Structure from Motion-Multi-View Stereo</i>
SGM	<i>Semi-Global Matching</i>
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
SIG	Système d'Information Géographique
SML	Sciences de la Mer et du Littoral
SNO	Service National d'Observation
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SSGM	<i>Smooth Semi-Global Matching</i>
SSP	Trajectoires socio-économiques partagées (<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>)
THR(S)	Très Haute Résolution (Spatiale)
TLS	scanner laser terrestre (<i>Terrestrial Laser Scanner</i>)
TTC	Toutes Taxes Comprises
UAR	Unité d'Appui et de Recherche
UBO	Université de Bretagne Occidentale
UE	Unité d'Enseignement
UMR	Unité Mixte de Recherche
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i> (temps universel coordonné)
WoS	<i>Web of Science</i>
WSDOT	<i>Washington State Department Of Transportation</i>
ZBNM100	Zones Basses pour un Niveau Marin centennal de référence

Introduction

Depuis mon arrivée en 2014 comme enseignante-chercheuse à l'Université de Bretagne Occidentale (UBO), mes recherches sur les aléas¹ côtiers (érosion côtière², submersion marine³) se sont surtout concentrées sur l'érosion des falaises⁴ en raison des nombreux enjeux⁵ menacés, des opportunités de projet et d'une volonté de développement de cette thématique au sein du laboratoire LETG-Brest (littoral, environnement, télédétection, géomatique) à l'institut universitaire européen de la mer (IUEM). Ces dernières années, les falaises sont de plus en plus étudiées, et ce, de manière naturaliste⁶, voire systémique⁷ (Berouchachvili et Bertrand, 1978 ; Pinot, 1998 ; Bertrand et Bertrand, 2014), mettant en évidence des combinaisons, des relais de processus, des hystérésis et des discontinuités (Godard, 1992 ; Costa, 1997 ; Costa et al., 2007 ; Basara, 2019 ; Roulland, 2022). Les visées de ces recherches sont fondamentales et appliquées, car la caractérisation, le suivi, la compréhension et la quantification des dynamiques érosives et de leurs causes constituent des enjeux scientifiques, politiques et sociaux contemporains.

En effet, la volonté de l'Etat de limiter (voire de diminuer) les enjeux face aux aléas côtiers (Cousin, 2011 ; Buchou, 2019) et l'intégration du changement climatique dans les documents réglementaires (loi « Climat et résilience⁸ ») mettent en évidence que nous sommes à un moment charnière. Après une longue période de confiance dans l'ingénierie de défense contre la mer, la tempête Xynthia, survenue entre le 26 février et le 1^{er} mars 2010, a été un choc. Cette tempête a généré de l'érosion côtière et des submersions marines avec un bilan humain très lourd. Parmi les 47 décès, 41 sont liés à la submersion marine (dont 29 à la Faute-sur-Mer) et six liés au vent. Ce drame a montré la vulnérabilité aux risques côtiers⁹ d'une partie du littoral français et de ses usagers (Vinet et al., 2012). En conséquence, le guide méthodologique sur les plans de prévention des risques littoraux (PPRL) du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE, 2014) est mis en place. Son objectif est une meilleure prise

¹ Un aléa est « *un événement d'origine naturelle ou humaine potentiellement dangereux dont on essaie d'estimer l'intensité et la probabilité d'occurrence par l'étude des périodes de retour ou des prédispositions du site (MATE-METL, 1997)* » (Hénaff et Philippe, 2014, p. 8).

² L'érosion côtière est une « *perte de sédiments pouvant entraîner un recul du trait de côte ou un abaissement de l'estran* » (MEDDE, 2014, p. 151). Cette définition de l'érosion côtière n'est pas géomorphologique. Tout au long de cette habilitation à diriger des recherches (HDR), j'utiliserai le terme d'« érosion » comme synonyme d'« ablation » alors qu'en géomorphologie, l'érosion comprend au sens large l'ablation, le transport et l'accumulation. Ce choix terminologique s'appuie sur la volonté de partager un langage commun avec les élus, les gestionnaires (services de l'Etat et collectivités territoriales) et le grand public. J'ai bien conscience du manque de justesse du terme pour la communauté des géomorphologues.

³ La submersion marine est l'inondation temporaire des côtes basses par la mer au moment d'une pleine mer de vive-eau (pour les mers à marée), souvent en raison d'une tempête (basses pressions et vents d'afflux forts) (MATE-METL, 1997 ; MEDDE, 2014).

⁴ D'après Guilcher (1954, p. 42), une falaise est « *un ressaut non couvert de végétation, en forte pente (entre environ 15° et la verticale ou le surplomb), de hauteur très variable, au contact de la terre et de la mer, et qui est due à l'action ou à la présence marines* ».

⁵ Les enjeux « *représentent la valeur humaine, économique ou environnementale des éléments exposés à l'aléa (MATE-METL, 1997)* » (Hénaff et Philippe, 2014, p. 8).

⁶ D'après Dufour et Lespez (2019, p. 320), les approches naturalistes correspondent aux « *activités de recherche qui se basent sur l'observation, la mesure, l'analyse et/ou la modélisation de processus qui possèdent une forte dimension physico-chimique et/ou biologique* ».

⁷ L'approche systémique appliquée en géographie cherche à établir l'ensemble des interactions spatio-temporelles entre des contraintes historiques, économiques, sociales, mentales, physiques et naturelles d'un territoire donné (Marchand, 1996).

⁸ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>

⁹ Le risque est la conjonction d'aléa(s) et d'enjeu(x).

en compte des risques dans la gestion actuelle et future des espaces littoraux. En 2016, la condamnation du maire de La Faute-sur-Mer pour homicides involontaires et mise en danger de la vie d'autrui a eu un retentissement fort auprès des élus. En 2021, la loi « Climat et résilience » modifie l'approche de la gestion du littoral en France (l'érosion des falaises n'est plus dans la liste des aléas couverts par le régime des catastrophes naturelles dit « CatNat »), avec de nouveaux documents réglementaires (par exemple, la carte locale d'exposition au recul du trait de côte).

Dans cet écotone¹⁰ qu'est le littoral, mes recherches sont principalement géomorphologiques, avec une approche naturaliste. Cependant, un des objectifs est de fournir des éléments de réponse sur l'évolution de ces formes afin d'aider à mieux gérer ces territoires, en plus du volet « acculturation¹¹ » que je développe. L'humain est donc au cœur de la vocation appliquée de mes recherches. Dans le prolongement et l'étoffement de mes recherches doctorales, les problématiques que je développerai dans ce volume sont à diverses échelles de temps et d'espace, selon des points d'observation multiples et avec différents acteurs du territoire :

- Quels sont les vitesses, les rythmes et les modalités d'érosion des falaises ?
- Quels sont les agents et les processus responsables de l'érosion des falaises et quelles sont leurs contributions ?
- Comment utiliser ces informations pour cartographier cet aléa dans un contexte de changement climatique ?
- Comment (in)former les citoyens au (sur le) suivi des aléas côtiers (érosion, submersion marine) pour mieux les comprendre et réfléchir aux stratégies de gestion du littoral ?

La démarche développée s'appuie sur de la pluridisciplinarité, que ce soit dans les orientations méthodologiques ou thématiques, au travers de plusieurs projets menés en Bretagne et en Normandie. Les compétences mobilisées appartiennent, certes, à la géographie, mais aussi aux géosciences, à l'informatique et aux sciences de l'éducation.

En s'inspirant des recommandations de la section 23 du conseil national des universités, ce premier volume se structure en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à mon positionnement sur l'objet de recherche « falaise » (et son corollaire l'érosion), qui constitue le sujet majoritaire de mes travaux. Le deuxième chapitre dresse un bilan des méthodologies employées et des innovations mises en place pour répondre aux problématiques scientifiques. La troisième partie présente les principaux résultats de recherche et mon apport à la géographie. Ces trois premiers chapitres reposent sur des travaux collectifs publiés et de nombreux inédits. La dernière partie, consacrée aux perspectives de recherche, est la plus personnelle. Elle possède principalement des éléments inédits, mais dont les réflexions sont le fruit d'échanges collectifs, qui émanent de plusieurs projets déjà amorcés ou à venir.

¹⁰ « Un écotone est une transition entre deux écosystèmes, comme la bande intertidale ou la lisière d'une forêt » (<http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/ecotone>).

¹¹ L'acculturation, en sociologie, correspond au « processus par lequel un individu apprend les modes de comportements, les modèles et les normes d'un groupe de façon à être accepté dans ce groupe et à y participer sans conflit » (Mucchielli-Bourcier et Mucchielli, 1969, <https://www.cnrtl.fr/definition/acculturation>). En sciences de l'éducation, l'acculturation peut être envisagée de deux façons : l'« adaptation d'un individu à une culture étrangère avec laquelle il est en contact » ou le « processus par lequel un individu ou un groupe assimile la culture d'un autre groupe » (Chauveau, 2011, p. 156). Dans cet écrit, cette dernière définition est celle retenue.

Chapitre 1 Objet de recherche « falaise » et son corollaire « érosion » : problématiques et points de vue

Le littoral est un espace de transition, car à l'interface de la lithosphère, de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère (comprenant la noosphère¹²). Cet écotone embrasse donc les influences abiotiques (continentale, marine et atmosphérique), biologiques et sociales, qu'elles soient actuelles ou héritées. Depuis plusieurs décennies, deux dynamiques différentes sont présentes sur le littoral et y convergent, générant les risques côtiers (Meur-Férec et Morel, 2004) :

- une tendance globalisée à l'érosion (aléa naturel fort, auquel se surajoutent les actions humaines avec la modification des stocks de sédiments, l'artificialisation de la côte, etc.) dans un contexte de changement climatique¹³ (GIEC¹⁴, 2019), associée parfois à un contexte régional favorable à la tendance érosive (par exemple, l'épuisement des stocks sédimentaires hérités de la dernière période glaciaire) ;

- une dynamique de densification de l'occupation des côtes (Perrin et al., 2013 ; Neumann et al., 2015) se traduisant, le plus souvent, par la construction d'infrastructures qui fixe la position du trait de côte.

L'érosion côtière, la submersion marine et la migration dunaire¹⁵ constituent les aléas côtiers (MATE-METL¹⁶, 1997 ; MEDDE, 2014) (Figure 1.1). Certains de ces aléas sont liés, comme l'érosion et la submersion marine. Par exemple, les cordons dunaires en avant des côtes basses forment un rempart « naturel » face aux houles de tempête et aux forts coefficients de marée, et donc à la submersion marine. Si ces cordons s'érodent, une brèche ou une surverse est probable lors des hauts niveaux d'eau, pouvant générer une submersion marine sur les terrains bas situés derrière le cordon.

Je travaille principalement sur l'aléa « érosion côtière » le long des falaises. Cependant, avec des projets comme OSIRISC (observatoire intégré des risques côtiers), je peux m'intéresser à tous les « aléas côtiers » dans le cadre de la vulnérabilité systémique¹⁷.

¹² L'homme intervient à travers la noosphère (*noos* = intelligence) (Demangeot, 2009). Par la suite, nous distinguerons les actions anthropiques de celles biologiques en raison de l'ampleur des modifications humaines sur les espaces étudiés.

¹³ La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (United Nations, 1992), dans son article 1, définit le changement climatique comme : « *un changement de climat, lequel est attribué directement ou indirectement à l'activité humaine, qui modifie la composition de l'atmosphère mondiale et qui vient s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée sur des périodes comparables* ». Cette définition fait donc une distinction entre les changements climatiques attribuables aux activités humaines qui modifient la composition de l'atmosphère, et la variabilité climatique attribuable à des causes naturelles. Les conséquences du changement climatique sur les zones côtières portent notamment sur l'élévation du niveau moyen des mers, l'évolution de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques comme les tempêtes, les modifications du cycle de l'eau, etc.

¹⁴ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

¹⁵ La migration dunaire correspond à la progression par le vent marin du front de dunes mobiles non stabilisées par la végétation (origine naturelle ou anthropique). Les sédiments sont transportés vers l'intérieur des terres et peuvent entraîner l'enveloppement progressif des terrains adjacents (MATE-METL, 1997 ; MEDDE, 2014).

¹⁶ Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement-Ministère de l'équipement, du transport et du logement

¹⁷ D'après Meur-Férec et al. (2020, p. 3), dont l'approche est inspirée de D'Ercole et al. (1994), la vulnérabilité des sociétés peut être définie « *à travers leur capacité de réponse à des crises potentielles, capacité qui dépend de facteurs conjoncturels (l'aléa) et structurels (contexte social, économique, culturel, fonctionnel, institutionnel)* ». La capacité de réponse, décrite par D'Ercole et al. (1994), est aussi bien sur le court que le long terme (appelées respectivement capacité de réponse et capacité d'adaptation par Gallopín (2006)).

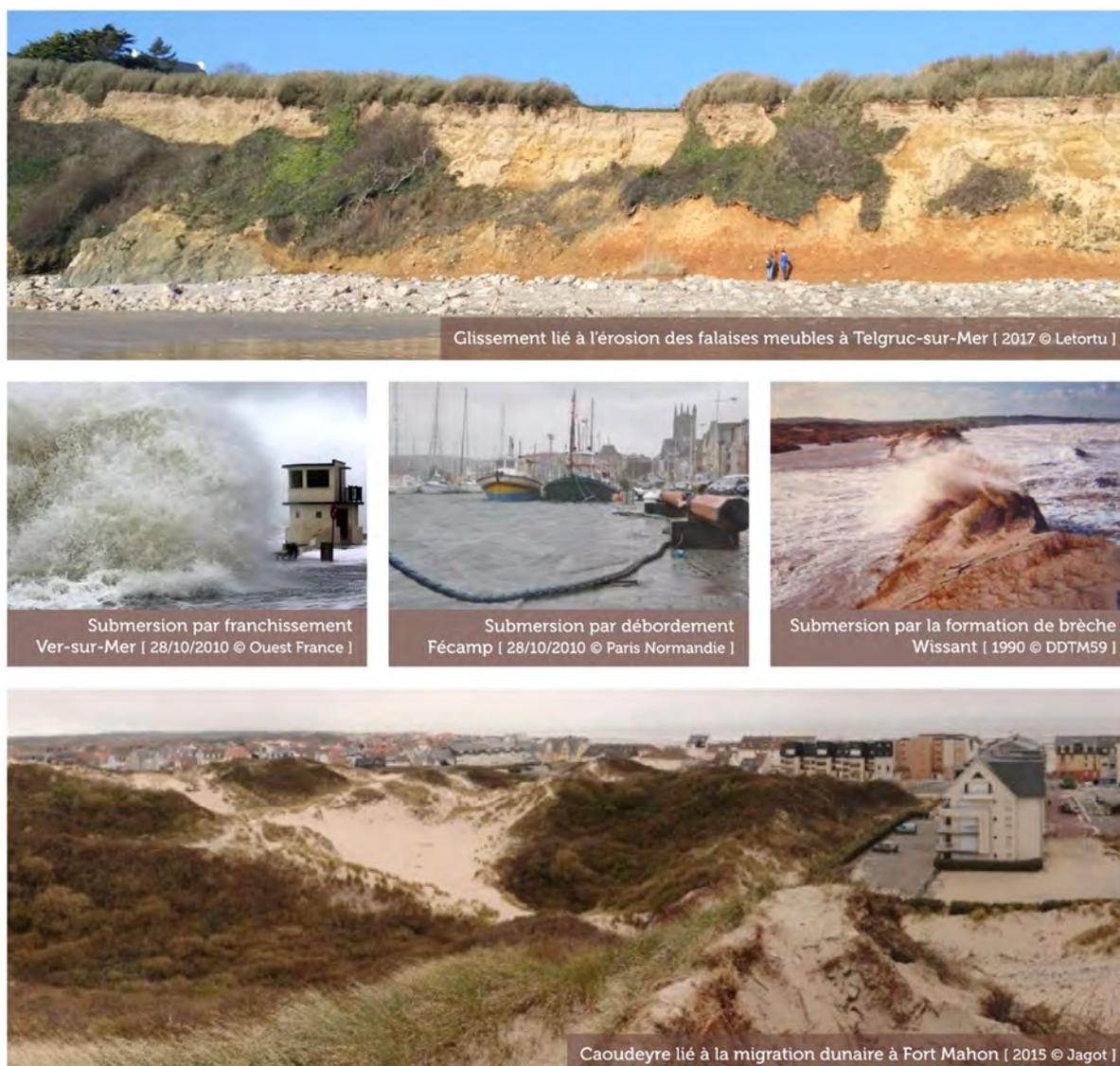


Figure 1.1 : Trois types d'aléas côtiers (érosion côtière, submersion marine et migration dunaire)

Ce chapitre a pour objectif de présenter 1) le contexte de recherche de l'objet « falaise » et son corollaire « érosion » avec des précisions terminologiques pour clarifier les termes utilisés dans cet écrit, 2) un état de l'art et les questions scientifiques afin d'explicitier mon positionnement de recherche et les points de vue choisis, 3) les terrains d'étude en Normandie et en Bretagne.

1.1 Falaise et érosion : contexte

1.1.1 Précisions terminologiques

La position du trait de côte et la morphologie côtière varient en fonction des échelles spatiales et temporelles observées. Une des classifications des types de côtes repose sur la structure géologique, ce qui permet de dissocier les côtes d'ablation (meubles ou rocheuses) des côtes d'accumulation (de sédiments),

Contrairement à la plupart des approches sur la vulnérabilité qui étudient les aléas à part, dans l'approche systémique, les aléas deviennent une partie intégrante de la vulnérabilité, tout comme les enjeux, la gestion et les représentations. La vulnérabilité comme système à quatre composantes (vulnérabilité systémique) est une résultante, exprimant la fragilité d'un territoire dans son ensemble.

auxquelles se surajoute le terme de « côtes artificialisées » en raison des modifications humaines qui ont figé la position du trait de côte (le plus souvent en bétonnant). Les côtes d'ablation ne peuvent que reculer, tandis que celles d'accumulation peuvent avancer et reculer (plages, dunes, embouchures fluviales, lagunes, récifs coralliens).

Au sein des côtes d'ablation rocheuses, deux morphologies sont distinguées : les côtes à dénudation et celles à falaises. En effet, lors de la submersion par la mer d'un paysage terrestre, le départ des altérites ou d'une éventuelle couverture sédimentaire, suivi d'une attaque de la roche en place, détermine deux niveaux d'évolution (Pinot, 1998) :

1) seule la couverture meuble a été dépouillée tandis que la roche en place, solide, est simplement mise à nu (pas d'attaque érosive) : nous sommes sur une côte à dénudation ;

2) quand l'évolution se prolonge, la roche en place, attaquée par l'érosion, recule, aboutissant à une plateforme d'érosion et une falaise rocheuse : nous sommes sur une côte à falaises (sous-entendues rocheuses) ;

Il existe un domaine transitoire entre une côte à dénudation et une côte à falaises rocheuses : les falaises meubles (Basara, 2019). Elles sont caractérisées par la poursuite de l'érosion des formations meubles en abrupt et par l'attaque de la roche en place à la base.

La définition d'une falaise comme « *un ressaut non couvert de végétation, en forte pente (entre environ 15° et la verticale ou le surplomb), de hauteur très variable, au contact de la terre et de la mer, et qui est due à l'action ou à la présence marines* », donnée par Guilcher (1954, p. 42), appelle quatre remarques principales :

- le commandement des falaises est variable : il est possible de distinguer les microfalaises (décimétriques), les hautes falaises (entre 100 et 500 m) et les mégafalaises (supérieures à 500 m) (Guilcher, 1966 ; Paskoff, 1978, 1998) ;

- les côtes rocheuses ne sont pas synonymes de côtes à falaises, car certaines s'inclinent doucement vers la mer (côtes à dénudation) ;

- les côtes à falaises ne sont pas synonymes de falaises rocheuses. En effet, des falaises se rencontrent dans des matériaux meubles suffisamment consolidés pour générer un abrupt, tels que les matériaux d'origine glaciaire (dépôts morainiques), marine (plages anciennes), fluviale (alluvions), volcanique (projections volcaniques), éolienne (loess). Il arrive parfois que, à la suite de fortes conditions d'agitation marine, on parle de falaises dunaires¹⁸ ;

- l'absence de couverture végétale évoquée dans cette définition me semble imprécise (est-ce une couverture totale ?). Beaucoup de falaises pourtant actives présentent de la végétation éparses sur son front, mais il est vrai qu'une couverture végétale complète du front de falaise est effectivement signe de stabilité.

¹⁸ « Le terme de falaise est d'introduction récente (un siècle et demi) en langue française dans le sens que nous lui donnons aujourd'hui. En effet, auparavant, il désignait des dunes littorales. C'est parce que les dunes littorales étaient fréquemment (mais pas durablement) entaillées sur leur front par des abrupts sapés à la base par les vagues que le terme a fini par désigner plus particulièrement cet abrupt, et qu'ensuite on l'a étendu à des abrupts similaires taillés en roches dures » (Pinot, 1998, p. 91). Aujourd'hui, la plupart des géomorphologues ne réservent le terme de falaise qu'aux côtes d'ablation.

Mes recherches concernent principalement les falaises rocheuses sédimentaires de craie¹⁹ en Normandie, secondairement les falaises rocheuses métamorphiques d'orthogneiss²⁰ en Bretagne. Depuis 2021, je me tourne, dans le cadre du projet international HIRACLES (imagerie haute résolution pour l'étude de l'érosion des falaises, financé par le centre national d'études spatiales (CNES)) et de la thèse de Z. Bessin, vers les falaises rocheuses calcaires²¹ en Grèce (île de Zakynthos) et les falaises meubles bretonnes (Pléneuf-Val-André²²). Je participe ponctuellement au suivi des falaises à Crozon depuis 2020, initié par N. Le Dantec, à savoir les falaises Porzh Koubou (alternance grès²³/schistes²⁴, groupe de Kerguillé) et Tromel (schistes et quartzites²⁵ de Plougastel).

1.1.2 Répartition spatiale

Bien que tout calcul de longueur de côte soit problématique en raison des propriétés de type « courbes fractales » des côtes (paradoxe du trait de côte²⁶ de Mandelbrot (1982)), les côtes d'ablation sont le type de côtes le plus représenté à l'échelle mondiale.

Selon Emery et Kuhn (1982), les falaises (définies par les auteurs comme des versants abrupts qui bordent les côtes, intégrant les côtes à falaises rocheuses et meubles) sont qualifiées d'ubiquistes, car elles représenteraient 80 % du linéaire côtier mondial. Cependant, cette valeur est issue d'observations personnelles et de l'atlas marin d'Isakov (1953) avec certaines erreurs, notamment dans les pays en développement (économique). Par exemple, le long du désert du Namib, les « falaises » sont en réalité des dunes (Figure 1.2).

¹⁹ La craie est définie comme une « roche sédimentaire marine, calcaire (90 % ou plus de CaCO_3) à grain très fin, blanche, poreuse, tendre et friable, traçante » (Foucault et al., 2014, p. 95-96).

²⁰ Le gneiss est une « roche métamorphique du métamorphisme général, très commune, à grain moyen ou grossier (du mm au cm), à foliation souvent nette caractérisée par des lits généralement de teinte sombre, riche en minéraux ferromagnésiens (micas, amphiboles, etc.) alternant avec des lits clairs (blancs, gris, rosés) de quartz et de feldspaths, ces derniers nombreux et visibles à l'œil nu (différence d'avec les micaschistes). [...] Selon l'origine, on distingue les paragneiss dérivant de roche sédimentaire [...] et les orthogneiss formés à partir de roches magmatiques » (Foucault et al., 2014, p. 165-166).

²¹ Le calcaire est une « roche sédimentaire carbonatée contenant au moins 50 % de calcite CaCO_3 , pouvant être accompagnée d'un peu de dolomite, d'aragonite, de sidérite. Les calcaires sont de faible dureté (rayés au couteau), et font effervescence (dégagement bouillonnant de CO_2), à froid sous l'action d'un acide dilué, ce qui les distingue des dolomies, qui ne le font pas » (Foucault et al., 2014, p. 59). Comme le souligne Basara (2019), le caractère peu résistant à l'érosion du calcaire aboutit parfois à des classifications ambiguës : dans la base de données EUROSION (2003), les falaises rocheuses calcaires sont incluses dans les falaises meubles.

²² Les falaises des Vallées et de la grève de Nantois correspondent à une succession de formations pédo-sédimentaires quaternaires (Basara, 2019).

²³ Le grès est une « roche sédimentaire détritique terrigène composée à 85 % au moins de grains de quartz plus ou moins arrondis, de 1/16 mm à 2 mm » (Foucault et al., 2014, p. 175).

²⁴ Le schiste est une « roche ayant acquis une schistosité sous l'influence de contraintes tectoniques. Ces schistes sont caractérisés par un débit plus ou moins facile en feuillets, dû soit à une fracturation (schistosité de fracture), soit à une orientation des cristaux de la roche parallèlement à ces plans de clivage, et ce sont alors des roches métamorphiques » (Foucault et al., 2014, p. 327).

²⁵ Le quartzite est une « roche siliceuse, compacte, à cassure conchoïdale lisse ou finement esquilleuse (écailleuse), en général claire et d'aspect gras » (Foucault et al., 2014, p. 306).

²⁶ Le calcul de longueur dépend de l'échelle spatiale de la mesure et du degré de généralisation cartographique.

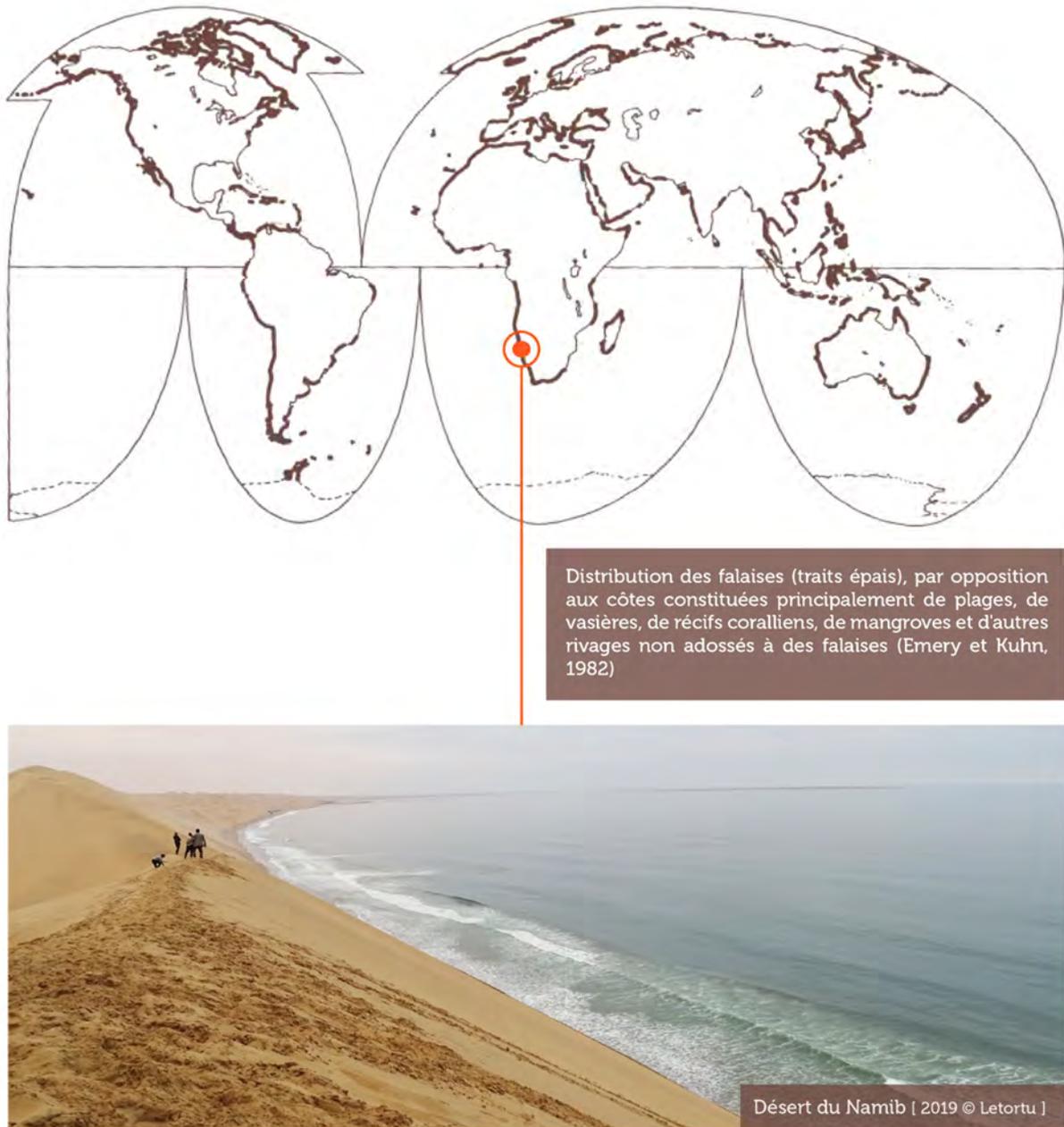


Figure 1.2 : Distribution des côtes à falaises (Emery et Kuhn, 1982) et une erreur le long du désert du Namib

En considérant comme « falaise » une rupture de pente forte à la côte (pouvant donc inclure falaises rocheuses et meubles), Young et Carilli (2019) proposent une estimation basée sur une enquête documentaire détaillée, une recherche d'images, une analyse cartographique sous un système d'information géographique (SIG) utilisant le modèle numérique d'élévation (MNE) de la NASA²⁷ (SRTM²⁸ 3 arc second, 90 m de résolution) et la base de données Arctic Coastal Dynamics. La valeur estimée est de 52 % du linéaire côtier global (Figure 1.3). Ce résultat est cohérent avec l'étude de Luijendijk et al. (2018) qui estime les côtes sableuses à 31 % du linéaire côtier mondial non englacé.

²⁷ National aeronautics and space administration

²⁸ Shuttle radar topography mission

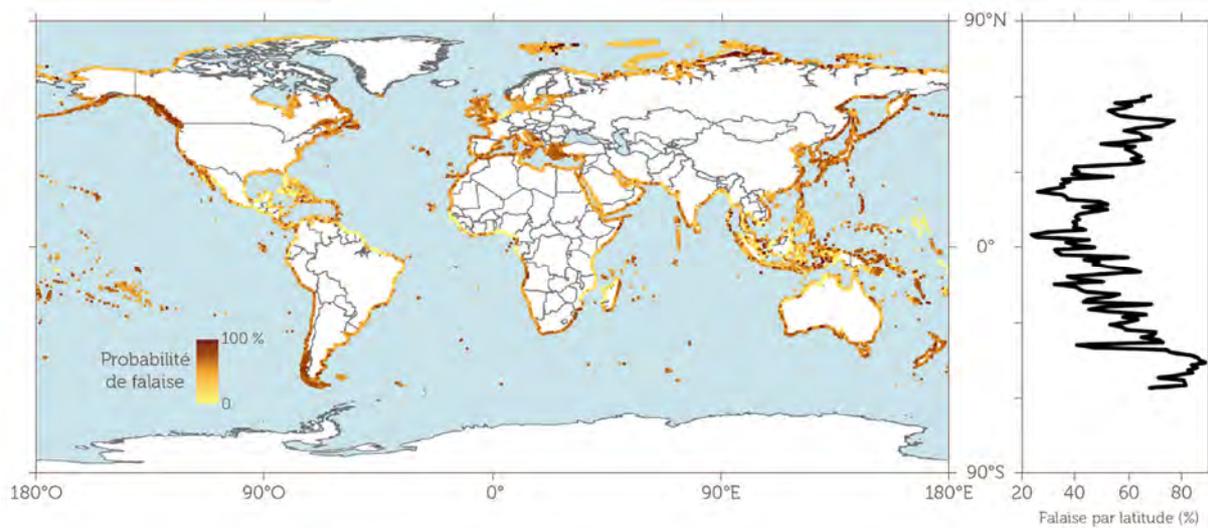


Figure 1.3 : Carte de probabilité d'occurrence des falaises à l'échelle globale (Young et Carilli, 2019)

À l'échelle française, la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte *via* le portail géolittoral²⁹ fournit une typologie des côtes à six classes : falaise et côte rocheuse supérieure à 20 m, falaise et côte rocheuse inférieure à 20 m, côte d'accumulation sableuse et sablo-limoneuse, côte d'accumulation vaseuse, côtes artificialisées (zones portuaires et poldérisées) et sans rattachement. Cette typologie regroupe les falaises meubles et rocheuses.

À l'échelle régionale, il y a la distinction des falaises meubles et rocheuses. Le linéaire côtier breton est constitué à 42 % de falaises rocheuses, 23 % d'accumulations littorales, 20 % de falaises meubles, 7 % de plates-formes rocheuses, 8 % de littoral artificialisé (Hénaff, 2003, Figure 1.4).

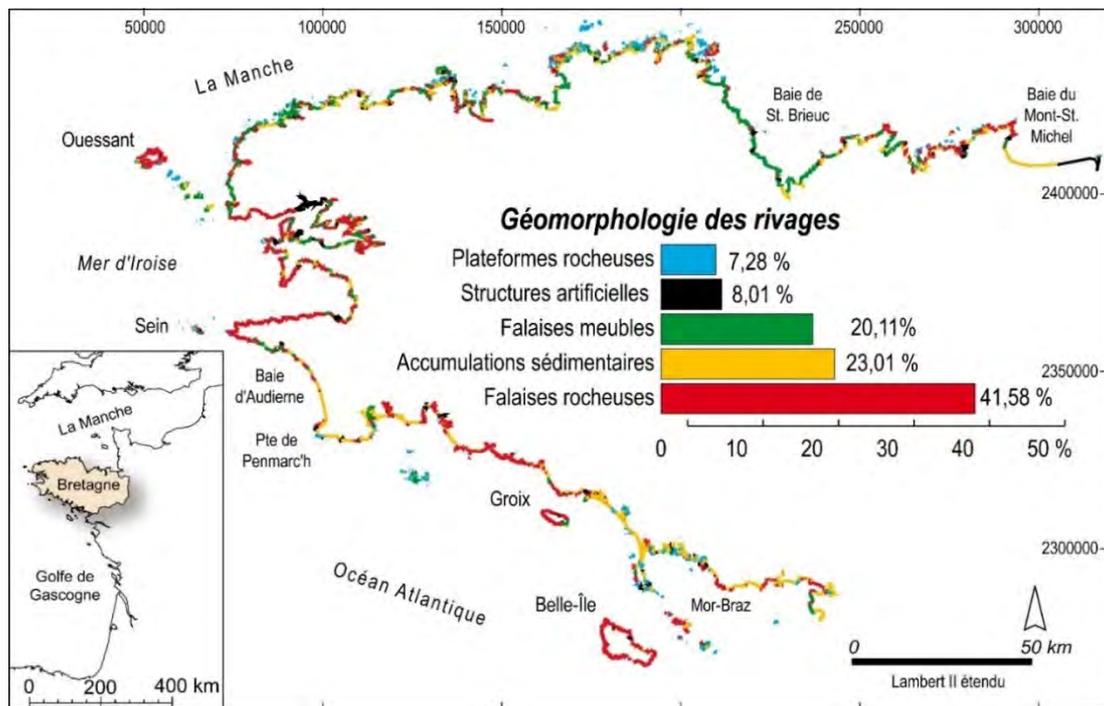


Figure 1.4 : Types de littoraux en Bretagne et distribution géographique (Hénaff et al., 2018)

²⁹ https://geolittoral.din.developpement-durable.gouv.fr/telechargement/dictionnaire_donnees/N_nature_cote_L.pdf

Sur le linéaire côtier normand, il y a 30 % de milieu estuarien, 29 % de falaises rocheuses, 26 % de plages de sables et de galets, 9 % de côte artificialisée, 5 % de côtes rocheuses basses et 2 % de falaises meubles (ROLNP³⁰, 2012, Figure 1.5). Les falaises rocheuses sont majoritairement présentes sur le littoral de Seine-Maritime, qui constitue le secteur principal de mes recherches en Normandie.

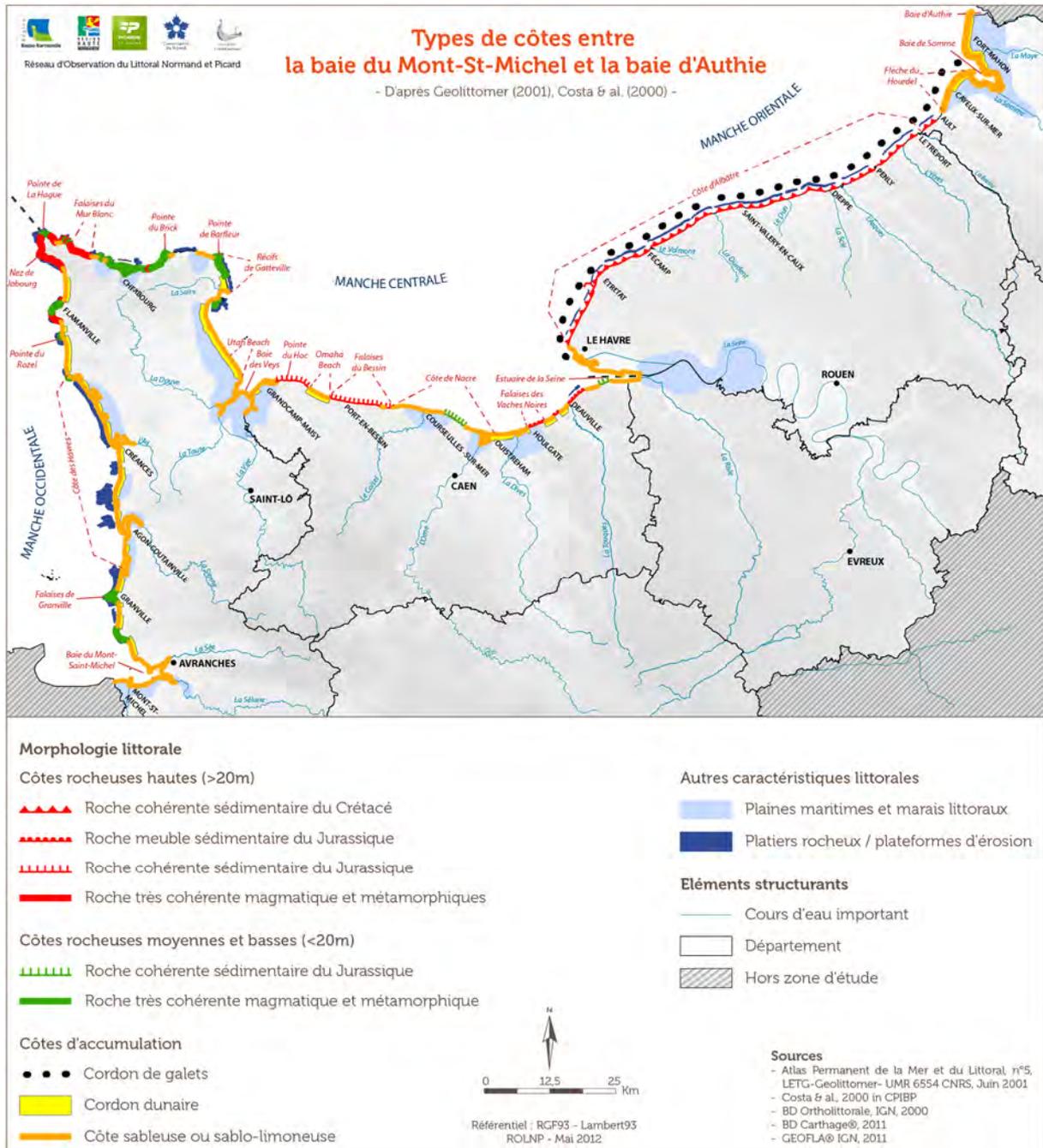
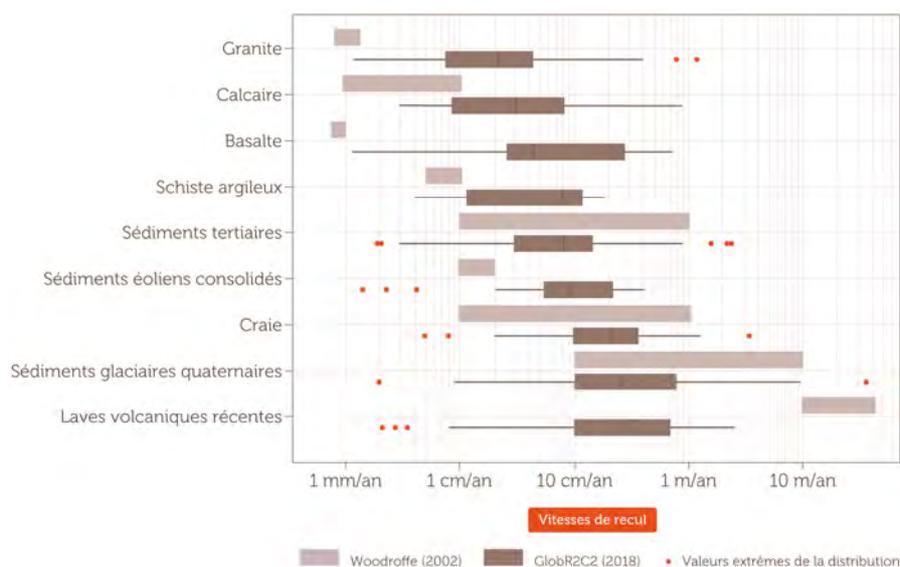


Figure 1.5 : Types de côtes entre la baie du Mont-Saint-Michel et la baie d'Authie (ROLNP, 2012)

³⁰ Réseau d'observation du littoral normand et picard

1.1.3 Dynamiques d'évolution

A grands traits et à l'échelle globale, les vitesses moyennes de recul sont notamment fonction de la résistance de la roche comme l'expliquent Sunamura (1992), Woodroffe (2002) et Prémaillon, Regard et Dewez (2017). Sans surprise, les falaises de craie reculent plus vite que les falaises granitiques (médiane autour de 0,20 m/an, contre 0,02 m/an, respectivement). Cependant ces distributions, bien que distinctes, restent multimodales et étendues (Prémaillon, Regard et Dewez, 2017) (Graphique 1.1).



Graphique 1.1 : Vitesses de recul des falaises en fonction de la lithologie : comparaison entre Woodroffe (2002) et GlobR2C2 (*global recession rates of coastal cliffs*, 2018) (Prémaillon, 2018)

À l'échelle nationale, l'indicateur national de l'érosion côtière (INEC), développé par le CEREMA³¹ à la demande du ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires (Hédou et al., 2015) et finalisé en 2018 (Hédou et al., 2018), détermine l'évolution du trait de côte sur une période d'au moins 50 ans selon des profils espacés de 200 m le long du littoral (échelle cartographique : 1/100 000 ; système de coordonnées géographiques : Lambert 93 associé au réseau géodésique français RGF93)³²). Les côtes rocheuses (54 % des profils en côtes naturelles), définies par les falaises et roches basses, sont à 90 % stables sur la période étudiée. Seulement 6 % d'entre elles reculent de manière modérée et correspondent surtout à des roches sédimentaires, dont les falaises crayeuses.

Les vitesses de recul des falaises sont le résultat d'un subtil rapport de force entre les agents et les processus marins, continentaux, biologiques et anthropiques qui affectent un espace caractérisé par une morphostructure pouvant être complexe et spécifique à chaque site. Les falaises crayeuses en sont un bon exemple : à petite échelle, la lithostratigraphie va influencer sur le recul, tandis qu'à grande échelle, le rôle des impacts anthropiques (jetée portuaire, épi, descente à la mer, centrale nucléaire EDF³³) est visible (mesure du recul tous les 50 m, Figure 1.6) (Letortu et al., 2014a).

³¹ Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

³² Ce système de projection constitue la norme française et est utilisé pour toutes les données géoréférencées de mes recherches (sachant que pour les données 3D, le z se rattache au nivellement général de la France appelé IGN69).

³³ Electricité de France

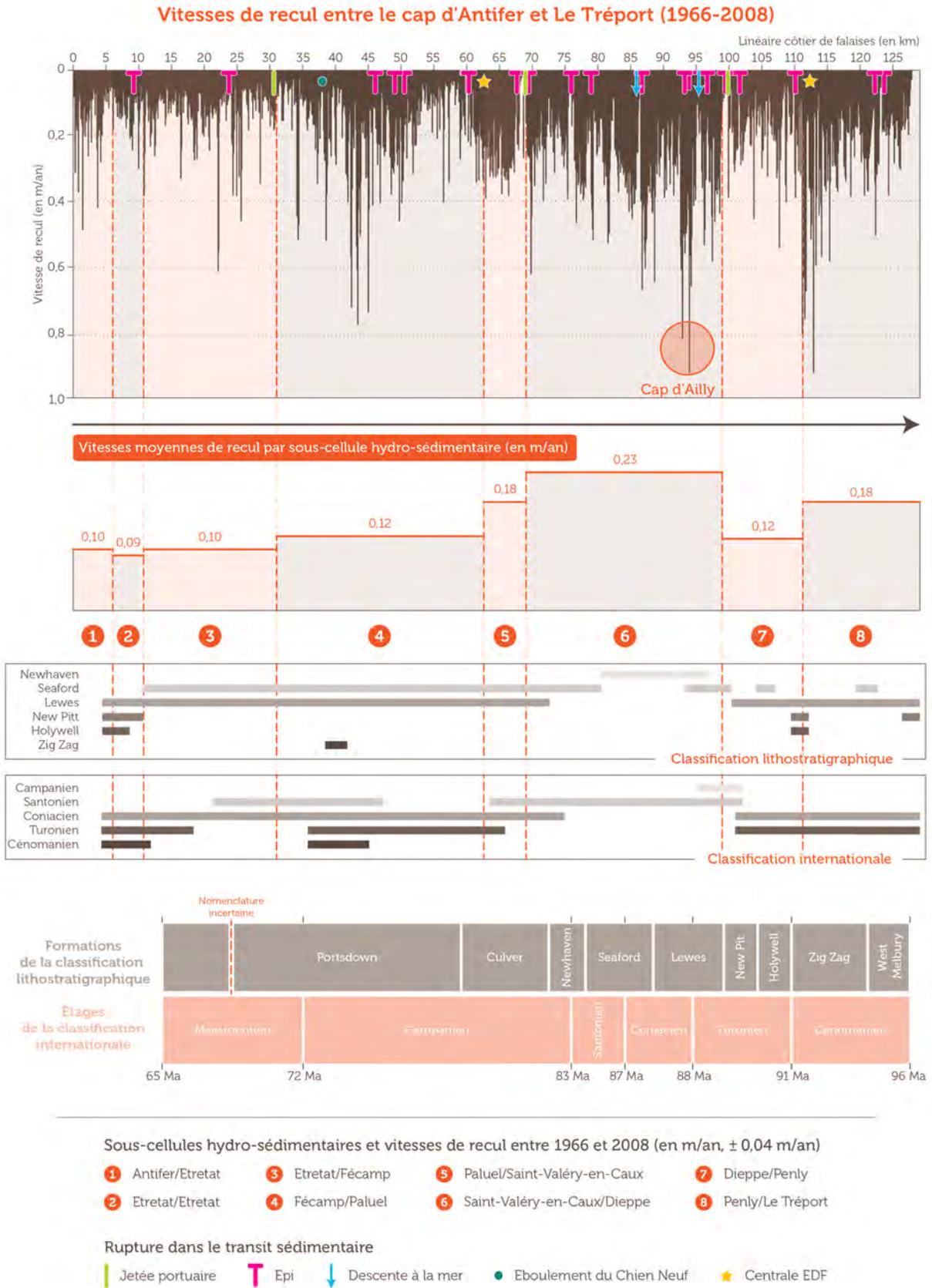


Figure 1.6 : Impacts des obstacles au transit sédimentaire et de la lithologie sur les vitesses de recul des falaises de Seine-Maritime (1966-2008), établies tous les 50 m (modifié d'après Letortu et al., 2014a)

1.1.4 Objet approprié, mais relativement peu étudié

Les dynamiques de recul peuvent être fortes et rattrapent actuellement les enjeux nombreux, en raison des aménités qui continuent d'attirer la population dans les départements littoraux. A l'échelle nationale, le rapport Buchou³⁴ (2019, p. 8) résume le processus de littoralisation³⁵ et ses problèmes, qui seront exacerbés par les conséquences du changement climatique (GIEC, 2019, 2022a). « *Le « trait de côte » a toujours été en mouvement : les cartes anciennes l'attestent, mais une relative amnésie vis-à-vis de ce phénomène et l'illusion technologique des 30 Glorieuses ont un temps fait penser que l'Homme pouvait « stabiliser » la côte... Or, ce territoire mouvant a connu, depuis les années 1850, une attractivité d'abord limitée aux élites, suivie d'un véritable engouement à partir des années 1960 (Photographie 1.1). Le phénomène s'étend aujourd'hui au « littoral ».* En tenant compte de la capacité d'accueil touristique de ces espaces, près de 14 millions de personnes peuvent actuellement résider simultanément dans les intercommunalités littorales. Cette contradiction est désormais aggravée par le changement climatique. Les conséquences en sont connues : hausse du niveau des mers, aggravation des phénomènes tempétueux, perturbation du cycle de l'eau continentale, accélération de la fragilité des côtes, raréfaction des apports sédimentaires. Les enjeux identifiés par le CEREMA (2018) sont d'envergure sur ce littoral ainsi « pris entre deux vagues »³⁶ : 16 500 bâtiments concernés par le recul pour une valeur globale de 3,7 milliards d'€³⁷, 22 000 km d'infrastructures de transport, des dizaines d'établissements de santé, sans compter des éléments majeurs de notre patrimoine naturel, culturel et paysager ».

D'après le scénario central³⁸ de l'institut national de la statistique et des études économiques (INSEE), la deuxième vague (l'haliotropisme de la population) ne cesse de s'amplifier. En effet, la population des départements littoraux devrait augmenter entre 2013 et 2050 de 14,1 % (contre 11,5 % pour les départements non littoraux), soit 3,6 millions d'habitants en plus (près de 3,3 millions en métropole). Les départements littoraux accueilleraient 39 % de la population française en 2050 et participeraient à hauteur de 44 % à l'accroissement de la population française sur l'intervalle étudié (INSEE, 2018)³⁹. Cette

³⁴ Ce rapport est le fruit du travail de la mission parlementaire de S. Buchou, député de Vendée, dont l'objectif était de fournir des pistes concrètes pour repenser l'élaboration de nos politiques publiques sur le littoral, face à l'érosion côtière (<https://www.ecologie.gouv.fr/adaptation-du-littoral-au-changement-climatique-elisabeth-borne-salue-qualite-du-rapport-stephane>).

³⁵ « *La littoralisation est un processus de concentration des populations et des activités humaines le long ou à proximité des littoraux. Elle est sous-tendue par deux grandes logiques d'attractivité : une logique [...] de production matérielle qui vise à la recherche d'une efficacité économique croissante liée à la mondialisation et à la maritimisation des échanges et permise en particulier par la révolution des transports maritimes et terrestres ; une logique de récréation, de recherche d'aménités : tourisme, recherche d'un cadre de vie pour les lieux de résidence, associés ou non aux lieux de travail, etc.* » (<http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/littoralisation-ou-maritimisation>).

³⁶ Cette formule « *le littoral entre deux vagues* » est de P. Grosvalet, président du conseil départemental de Loire-Atlantique (Lebreton et Grosvalet, 2014) : la première vague vient du niveau croissant des océans, la seconde correspond à l'attrait résidentiel et touristique des côtes (Buchou, 2019).

³⁷ Selon l'une des hypothèses, la plus vraisemblable aux yeux de la mission Buchou, à savoir le recul généralisé sur la majorité du littoral (S2) et la disparition progressive des ouvrages (B) de l'étude *Connaissance du trait de côte - Evaluation prospective des enjeux affectés par le recul du trait de côte* (CEREMA, 2018).

³⁸ Le scénario central décline par département les évolutions récentes constatées au niveau national : solde migratoire positif de 70 000 personnes par an, solde naturel stable avec un vieillissement de la population. A l'échelle nationale, l'espérance de vie des femmes et des hommes atteindrait respectivement 90,3 ans et 86,8 ans en 2050, contre 85,0 ans et 78,7 ans en 2013 (INSEE, 2018).

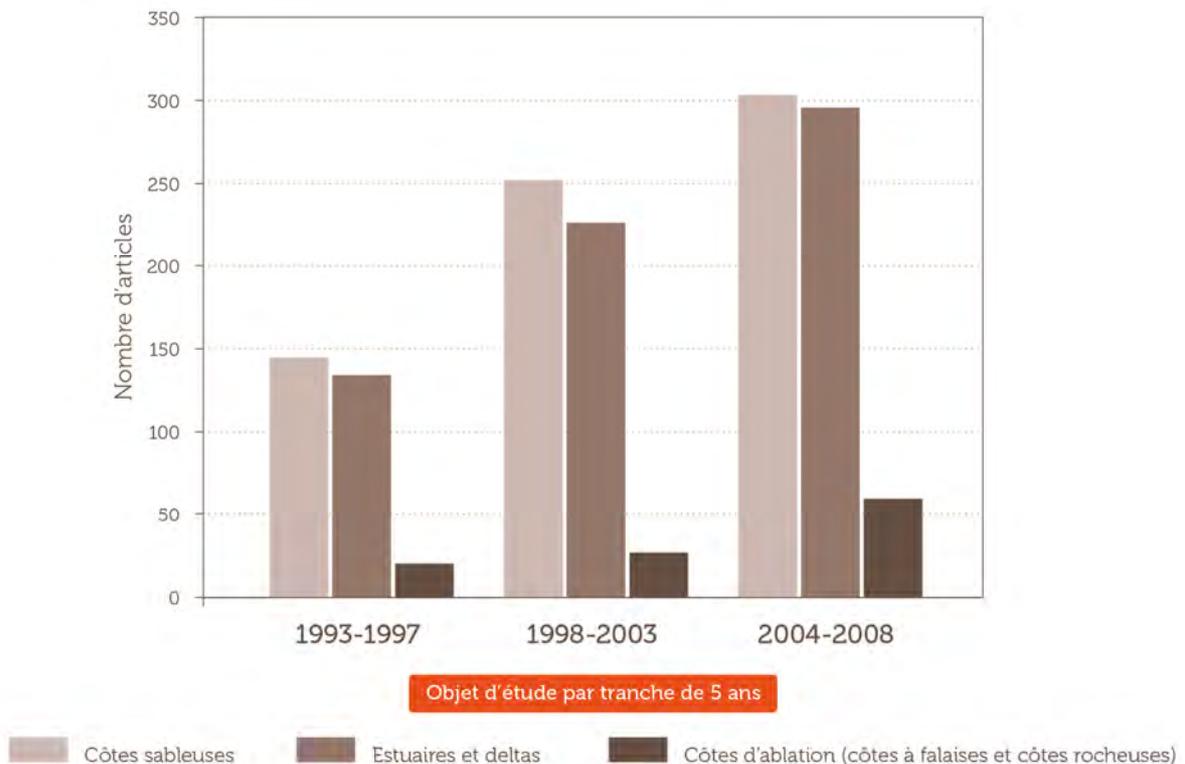
³⁹ Ce qui signifie que l'essentiel de la croissance se fait ailleurs. En outre, beaucoup de départements littoraux ont des métropoles qui ne sont pas littorales (Rennes, Nantes, Rouen, etc.).

augmentation des enjeux est valable à l'échelle mondiale, même si des disparités régionales demeurent (Small et Nicholls, 2003 ; Balk et al., 2009 ; Neumann et al., 2015).



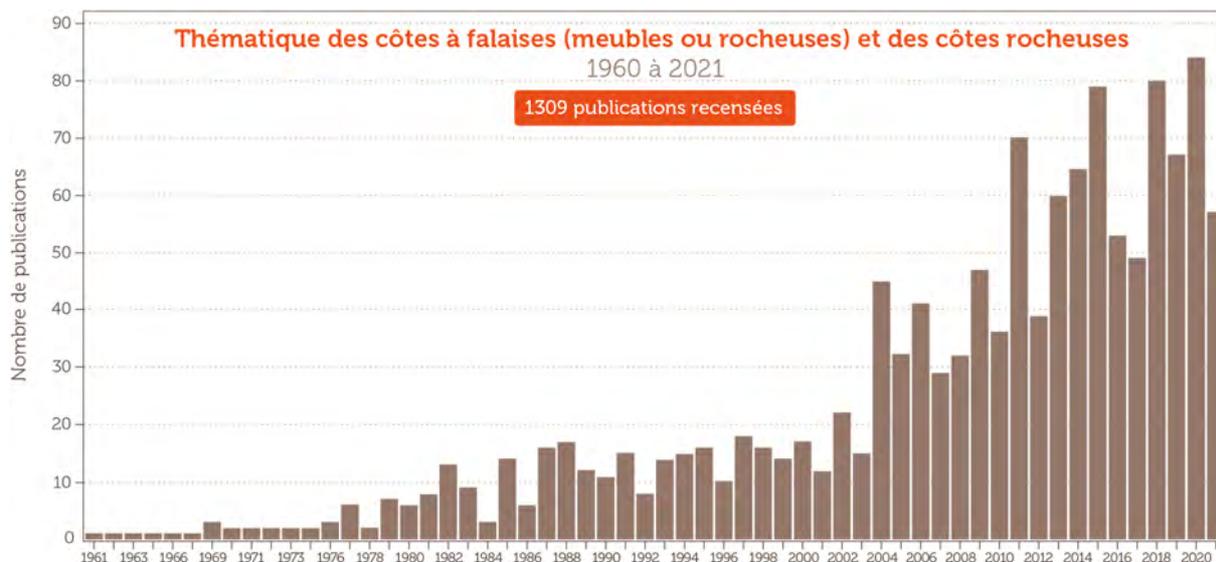
Photographie 1.1 : Le front de mer à Biarritz où les falaises et les plages présentent de nombreux enjeux (vue depuis la pointe Saint-Martin)

Pour bien gérer l'espace, les connaissances scientifiques constituent un préalable essentiel. Malgré la forte représentativité spatiale des falaises et les risques croissants, que ce soit à l'échelle globale, nationale ou régionale, les côtes d'ablation ont été peu étudiées par rapport aux côtes d'accumulation (Trenhaile, 1980, 2002 ; Naylor et al., 2010 ; Mercier, 2022) (Graphique 1.2).



Graphique 1.2 : Nombre d'articles liés à la géomorphologie publiés sur les différents types de côtes dans le monde entre 1993 et 2008 (Naylor et al., 2010)

De 1960 à 2003, les publications sur les côtes à falaises (meubles ou rocheuses) et les côtes rocheuses sont autour d'une dizaine de publications par an. Cette relative faiblesse de la production scientifique est probablement multifactorielle : 1) le résultat de l'appropriation plus tardive de ces espaces côtiers par les populations et donc des problèmes de gestion plus circonscrits et tardifs, 2) le manque de données sur un objet vertical et souvent haut, dangereux et difficile d'accès, 3) la complexité de ces systèmes côtiers (par exemple, les interactions avant-plage/plate-forme/plage/falaise/plateau). Mais, depuis 2004, l'augmentation est forte avec un pic en 2020 de 84 publications (Graphique 1.3).



Graphique 1.3 : Distribution annuelle des 1 309 publications recensées sur les côtes à falaises (meubles ou rocheuses) et les côtes rocheuses entre 1960 et 2021 dans les bases Scopus d'Elsevier et du Web of science™ (WoS) Core Collection de Clarivate Analytics, accessible par abonnement sur internet par le biais de la plate-forme WoS (institut de l'information scientifique et technique (INIST-CNRS) – unité d'appui à la recherche (UAR76)

La communauté scientifique internationale est petite (moins de 500 personnes) et appartenant principalement aux pays développés économiquement (pour le 1^{er} auteur, Figure 1.7), avec une cinquantaine de chercheurs qui sont présents dans les grands colloques internationaux de géomorphologie sur la session « *rocky coast* ». Mais cette communauté est active, avec des ouvrages collectifs de référence comme *Rock Coast Geomorphology : A Global Synthesis*, synthèse coordonnée par Kennedy, Stephenson et Naylor (2014), qui permettent un état de l'art mondial des recherches sur les côtes rocheuses et à falaises. Dans cet ouvrage de référence, les trois coordinateurs sont géographes, et sur les 53 auteurs, 16 sont géographes (les autres étant principalement géologues). En France, la communauté de chercheurs et d'enseignants-chercheurs titulaires est faible : une vingtaine travaillant complètement ou partiellement sur ces thématiques (Dunkerque, Le Havre, Rouen, Caen, Brest, Nantes, Paris, Toulouse, Pau, Aix-Marseille, etc.). Cette communauté regroupe majoritairement des géologues, même si, au sein du service national d'observation de la dynamique du littoral et du trait de côte (SNO DYNALIT), l'équilibre est de mise pour les falaises.

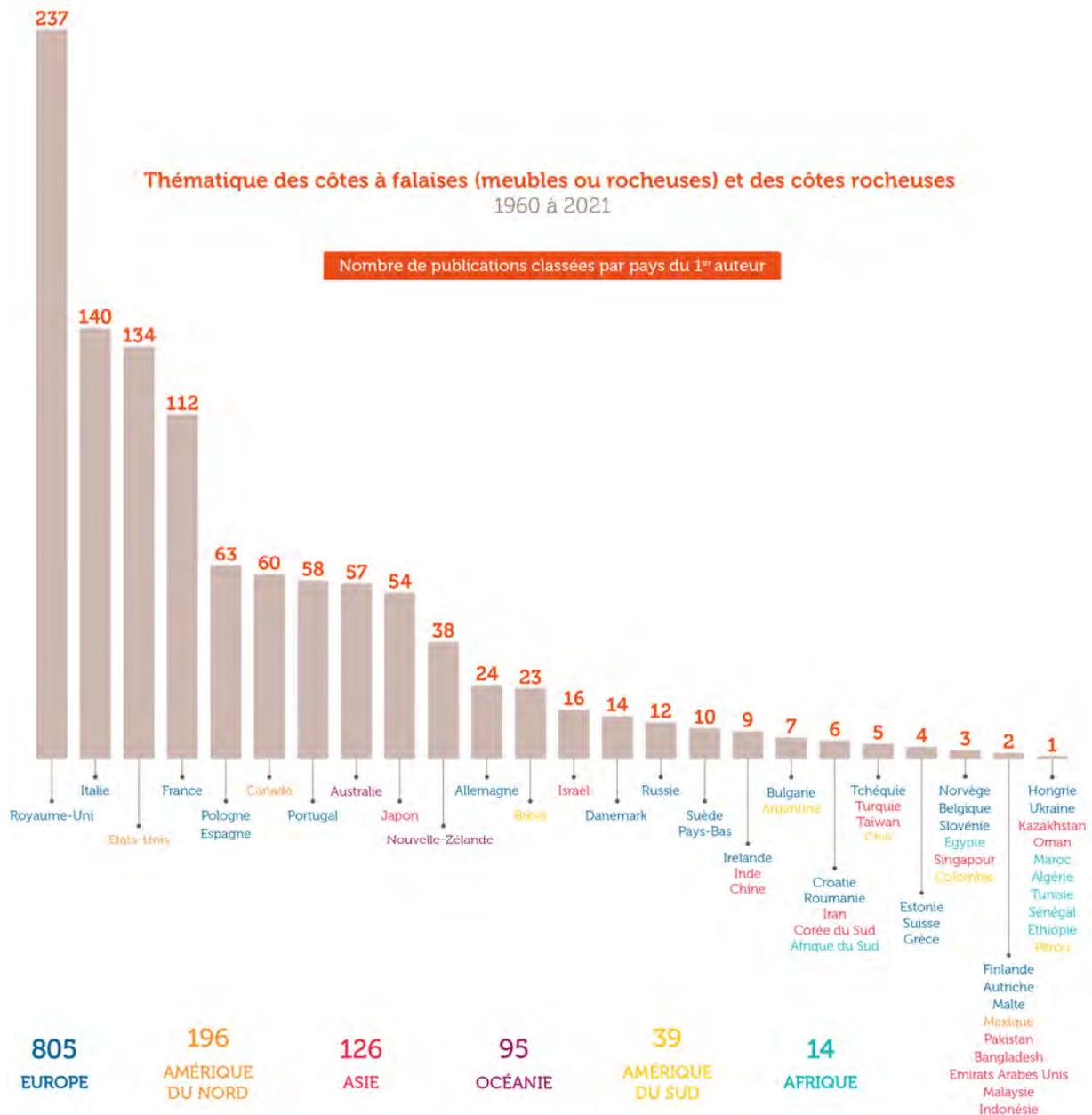


Figure 1.7 : Histogramme du pays du premier auteur pour les 1 309 publications recensées sur les côtes à falaises (meubles ou rocheuses) et les côtes rocheuses entre 1960 et 2021 dans les bases Scopus d'Elsevier et du WoS™ Core Collection de Clarivate Analytics, accessible par abonnement sur internet par le biais de la plate-forme WoS (INIST-CNRS - UAR76)

1.2 Questions scientifiques : permanence et émergence

Ma recherche sur les falaises est géographique : elle vise à « *analyser, problématiser, expliquer, diagnostiquer, contribuer à l'action et à la pratique sociale (acteurs sociaux)* » (Scheibling, 2015, p. 213). Par une recherche fondamentale et appliquée, l'objectif est d'améliorer le suivi et la compréhension des côtes à falaises, par des approches multiples (par emboîtement d'échelles, naturaliste y compris avec le tournant quantitatif⁴⁰ (Dufour et Lespez, 2019), systémique et citoyenne) afin d'accompagner la gestion de ces espaces. Cette

⁴⁰ En essayant de ne pas tomber dans le « piège » formulé par G. Bachelard « *il faut réfléchir pour mesurer et non mesurer pour réfléchir* » (Bachelard, 1938, p. 213).

démarche, plus originale pour les côtes à falaises, est le fruit de rencontres lors de mon itinéraire professionnel.

Depuis ma soutenance de thèse (2013) et mon poste à Brest (2014), mes questions de recherche sur les falaises demeurent sur : 1) les vitesses, rythmes et modalités de recul, 2) les facteurs prépondérants dans l'érosion, 3) l'aide à la prise de décision pour mieux gérer l'aléa et le risque « recul des falaises ». Certaines connaissances ont progressé tandis que de nouvelles problématiques émergent grâce à des collaborations fructueuses au sein de l'UBO et au-delà. Par ailleurs, mon intégration au sein de l'équipe pluridisciplinaire OSIRISC m'a permis de continuer à travailler plus généralement sur les aléas côtiers (érosion côtière, submersion marine et migration dunaire), avec une visée réflexive et opérationnelle. Les échanges avec les collègues, les gestionnaires et les élus m'ont amenée à développer le volet acculturation, notamment avec les sciences citoyennes⁴¹.

1.2.1 Vitesses, rythmes et modalités d'érosion

Les vitesses de recul (exprimées le plus souvent en m/an) retranscrivent mal l'évolution géomorphologique des falaises, car (1) la vitesse lisse le recul (2D) qui se fait par à-coups (2) elle est majoritairement obtenue à partir du référentiel « haut de falaise » (par exemple, Prêcheur, 1960 ; Costa, 1997 ; Moore et al., 1999 ; Benumof et al., 2000 ; Lahousse et al., 2000 ; Costa et al., 2004 ; Greenwood et Orford, 2008 ; Young et al., 2009 ; Del Río et Gracia, 2013 ; Bezore et al., 2016). Ce référentiel de l'érosion est partiel (quid de l'évolution du pied ou du milieu de falaise ?), contrairement au front de falaise qui capture l'ensemble des évolutions (Young et al., 2009, Figure 1.8).

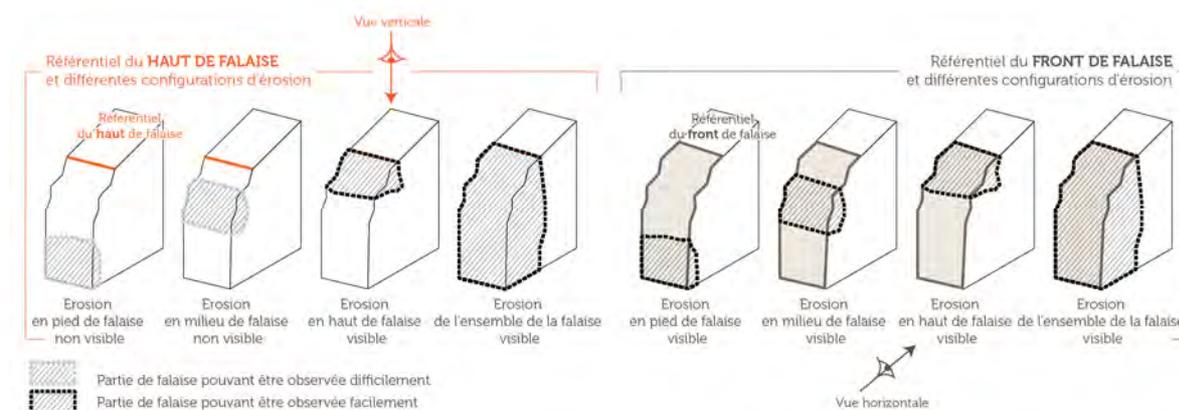


Figure 1.8 : Représentativité du référentiel « haut de falaise » et celui du « front de falaise » pour suivre l'érosion côtière (d'après Young et al., 2009)

Pour une meilleure compréhension de la dynamique régressive des falaises, il est souhaitable d'acquérir des données 1) 3D du front de falaise (du pied au sommet de la falaise) pour observer tous les événements d'érosion, 2) à haute résolution spatiale (inframétrique), 3) à très haute fréquence temporelle (des relevés saisonniers à quotidiens, voire plus), 4) sur des zones à petite échelle (échelle de la cellule hydro-

⁴¹ Le citoyen correspond, dans cette HDR, au grand public (majeur ou mineur) qui n'est pas un professionnel du domaine étudié.

sédimentaire⁴² pour une gestion côtière pertinente), 5) et sur plusieurs décennies pour faire la part des variations et de la variabilité. Actuellement, ce dernier critère est particulièrement limitant.

A défaut, les vitesses de recul obtenues sur plusieurs décennies présentent de sérieux atouts qui expliquent leur intérêt croissant (Naylor, Stephenson et Trenhaile, 2010) :

- les méthodes d'obtention s'appuient sur des données relativement courantes, observant généralement le haut de falaise (cadastres, photographies aériennes, orthophotographies) ;
- les traitements par la méthode des transects sont simples à réaliser sous SIG et en partie automatisés depuis presque deux décennies (Thieler et al., 2005) ;
- elles sont demandées par les élus, décideurs et services de l'Etat, pour appréhender l'érosion et se projeter dans l'avenir avec les PPR(L) (MATE-METL, 1997 ; MEDDE, 2014) et la carte locale d'exposition au recul du trait de côte (loi « Climat et résilience »⁴³, 2021).

En complément, travailler sur les à-coups du recul (2D) ou de l'érosion (3D) permet de comprendre le fonctionnement non linéaire de ces côtes. Ces à-coups se matérialisent par des mouvements gravitaires. Derrière ce terme générique se trouve des éboulements/écroulements (mouvements de masse) et des chutes de blocs et de pierres de taille modeste (mouvements individuels). Ces chutes sont rapidement évacuées par la mer et souvent négligées, car invisible si l'échelle d'observation est petite. D'après Hénaff et al. (2002), au-delà de la distinction entre éboulement et écroulement sur la base de volumes totaux déplacés (respectivement inférieurs ou supérieurs à 10 000 m³), les éboulements se définissent principalement par des critères d'individualisation de nature géométrique et cinématique. Un écroulement désigne le détachement d'un panneau sans basculement tandis que le terme d'éboulement est utilisé lorsque la chute se prolonge par un déplacement roulant après l'impact. Plus que le volume, ce sont donc les critères de nature cinématique et géométrique qui seront utilisés dans ce manuscrit. Quant à l'éboulement, visible à échelle fine, elle se

⁴² La cellule hydro-sédimentaire constitue un compartiment de littoral qui peut être décrit et analysé de manière autonome du point de vue des transports sédimentaires transversaux et longitudinaux (CEREMA, *Dynamiques et évolution du littoral : synthèse des connaissances des côtes françaises*, <https://www.geocatalogue.fr/Detail.do?fileIdentifiant=2fdb345a-6ea5-4474-94a1-589219f24e61>).

⁴³ La loi nommée « Climat et résilience » (loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant sur la lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets ; <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>) est « une réforme du code de l'urbanisme et des modalités de prise en compte du risque érosion dans les documents de planification (articles 239 à 243), de manière à améliorer la gestion des nouvelles constructions dans les zones où le recul du trait de côte est connu et doit être anticipé, pour éviter l'augmentation de la vulnérabilité des personnes et des biens. Ce rôle, historiquement dévolu aux Plans de Prévention des Risques Littoraux (submersion marine et érosion côtière), élaborés par l'État, est dorénavant une obligation transférée aux collectivités locales compétentes en matière de Plans Locaux d'Urbanisme, avec un certain contrôle conservé par l'État, qui publiera par décret la liste des communes littorales qui seront dans l'obligation de réviser leur plan local d'urbanisme (PLU) sous 4 ans. Les règles d'inconstructibilité seront plus progressives que celles des actuels PPRL : inconstructibilité quasi-totale dans la zone exposée à 0-30 ans (avec des exceptions pour l'extension des bâtiments existants ou l'installation des services publics et de nouvelles activités économiques nécessitant la « proximité immédiate » de la mer), mais constructibilité possible dans la zone exposée à 30-100 ans, sous condition d'une démolition des constructions dans leurs dernières années de vie avant la réalisation du risque. Cette obligation de démolition, aux frais des propriétaires, qui concernera uniquement les biens construits sous ce nouveau régime par le biais d'une servitude d'urbanisme, sera contrôlée par les Maires » (<https://www.giplittoral.fr/actualites/promulgation-de-la-loi-climat-et-resilience-dispositions-relatives-la-gestion-de>). Avec cette loi, qui postule que le recul du trait de côte ne constitue pas un risque naturel (contre l'avis des universitaires spécialistes du sujet), les côtes d'ablation menacées par l'érosion ne font plus l'objet d'indemnités par le fonds de prévention des risques naturels majeurs (« fonds Barnier »). Pour les côtes d'accumulation, rien ne change, car elles ne bénéficiaient pas d'indemnités (exception faite des propriétaires de l'immeuble du Signal à Soulac-sur-Mer). Ainsi, l'érosion côtière ne bénéficie pas des outils classiques de la gestion des risques naturels en France. Le seul moyen pour obtenir une indemnité de l'Etat (avec une somme fixée ultérieurement par un décret) est d'intégrer la liste nationale des communes vulnérables au recul du trait de côte.

matérialise par le détachement individuel de pierres (<1 m³) ou de blocs (> 1 m³) (Hénaff et al., 2002) (Figure 1.9).



Figure 1.9 : Types de mouvements gravitaires observés en Seine-Maritime (modifié d'après Letortu, 2013)

La localisation, l'intensité (modalité) et la fréquence des mouvements gravitaires (rythme) sont de la plus grande importance pour les habitants, les gestionnaires et les élus. Même si les accidents sont rares en Seine-Maritime, un pêcheur à pied a été tué par un éboulement en août 2015 à Varengeville-sur-Mer⁴⁴. De plus, le débat scientifique sur la contribution de l'ébouilisation dans l'érosion des falaises demeure. Ces mouvements individuels représenteraient sur les côtes crayeuses du Sussex presque 11 % du recul total (May et Heeps, 1985), 10 % près de Fécamp (Hénaff et al., 2002) et 2 à 25 % à Varengeville-sur-Mer (respectivement, Letortu et al., 2019 et Letortu et al., 2015c). Par ailleurs, les agents déclencheurs de la rupture de ces petits mouvements peuvent être différents de ceux des mouvements de masse. S. Costa a été témoin au cap d'Ailly, le 31/12/1995, d'un épisode de dégel occasionnant une « pluie de gélifracts » formant un tablier d'éboulis. Ce seul événement aurait occasionné un taux d'ablation de 0,014 m (Costa, 1997). Mais pour observer ces phénomènes, les suivis doivent être précis à quelques centimètres près.

L'étude conjointe des vitesses, rythmes et modalités d'érosion n'est pas nouvelle sur les côtes à falaises crayeuses en Normandie (Costa, 1997 ; Hénaff et al., 2002), ce qui en fait une belle exception à la règle. Mais grâce au suivi de terrain sur une longue période et aux nouvelles méthodes d'acquisition (comme le

⁴⁴ https://www.francetvinfo.fr/monde/environnement/eboulement-d-une-falaise-en-seine-maritime-l-erosion-des-cotes-francaises-s-accelere_1043355.html

LiDAR⁴⁵ aéroporté ou terrestre, les satellites agiles) et de traitements des données à plus hautes résolution et précision⁴⁶ (logiciels libres comme CloudCompare, MicMac, etc.), il est désormais possible de répondre à la question suivante : *quels sont les vitesses, les rythmes et les modalités d'érosion observés sur le meilleur référentiel qu'est le front de falaise ?*

1.2.2 Facteurs prépondérants dans l'érosion

Les facteurs impliqués dans l'érosion des côtes à falaises sont mieux compris, mais la part respective des agents impliqués dans la fatigue (facteurs préparants) et dans le déclenchement (facteurs déclenchants) des mouvements gravitaires reste méconnue (pour une synthèse, Kennedy et al., 2014a).

Il est important de bien préciser la terminologie entre facteurs préparants (fatigue) et facteurs déclenchants/de rupture. Conditionnés en tout premier lieu par des facteurs de prédisposition (structure par exemple), les mouvements gravitaires vont être le résultat :

- de facteurs préparants (ou de préparation) qui vont induire une fatigue du matériel par météorisation sur le temps long (des décennies au moins). Ces facteurs, préparant le massif à la rupture, peuvent être définis comme ceux qui agissent pour rendre ce dernier de plus en plus sensible à la rupture sans parvenir à initier le recul. L'équilibre dynamique de la falaise est progressivement réduit par leurs activités, permettant, à terme, d'initier le déclenchement du départ de matériel ;
- de facteurs déclenchants (ou de déclenchement) qui s'y ajoutent et qui vont, quant à eux, initier ces départs de matériel (Lee et al., 2001). Ces facteurs déclenchants peuvent agir au moment du mouvement gravitaire, mais également sur une période de temps plus ou moins longue qu'il est possible de nommer séquence (séquence de précipitations de plusieurs jours, par exemple, aboutissant à un seuil de déclenchement).

Le lieu et le moment de la rupture restent imprévisibles⁴⁷. Ce défi scientifique est également une préoccupation en gestion du risque « érosion » et en aménagement du territoire, avec des attentes sociales et politiques fortes et croissantes. Les personnes, les infrastructures, les sites historiques et les secteurs économiques (tourisme, pêche, loisirs) sont déjà ou pourraient bientôt être menacés (par exemple, CEREMA, 2018 ; Tran et al., 2021).

La rupture des falaises (Figure 1.10) résulte donc de l'interaction de facteurs internes (de prédisposition comme la résistance de la roche, etc.) et externes (préparants et/ou déclenchants). Ces facteurs externes peuvent être d'origine continentale (précipitations, fluctuations de la nappe phréatique, variations de température, etc.), marine (variations du niveau moyen de la mer, marée, état de la mer, etc.), biologique (micro-organismes (algues dont diatomées, cyanobactéries) et macro-organismes (végétaux et animaux) actifs sur le platier, le front de falaise et son sommet) et les actions anthropiques (structures de défense côtière qui

⁴⁵ *Light detection and ranging*

⁴⁶ Mais dont la représentativité temporelle demeure limitée à une décennie au mieux (Young, 2018).

⁴⁷ Alors que la loi « Climat et résilience » est construite sur le postulat que le recul du trait de côte ne constitue pas un risque naturel majeur, car l'érosion du trait de côte est un phénomène prévisible. Ce postulat est en désaccord avec les chercheurs universitaires spécialistes du sujet (voir la tribune rédigée par C. Meur-Férec, S. Costa, G. Ezan et C. Lummert : <https://anel.asso.fr/wp-content/uploads/2021/06/Tribune-Le-risque-d%C3%A9rosion-c%C3%B4ti%C3%A8re.pdf>).

modifient le transport sédimentaire, changements hydrologiques causés par l'imperméabilisation des sols en raison de l'urbanisation, etc.).

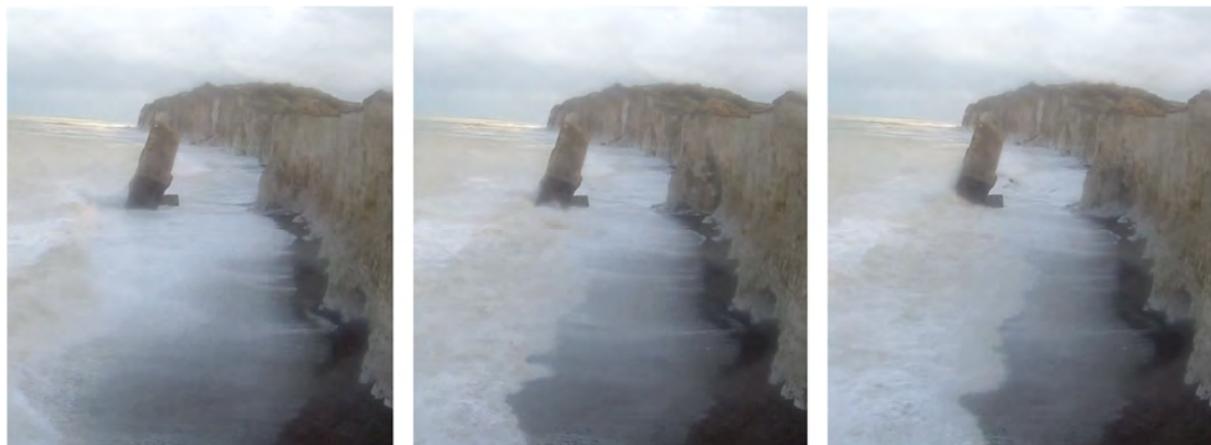


Figure 1.10 : Déclenchement d'un écoulement de 1 009 m³ le 10 février 2020 à 12h19 entre la seconde 37 et 39 (temps universel coordonné, UTC) à Sainte-Marguerite-sur-Mer (après la période d'instrumentation du projet RICOCHET⁴⁸)

Sur les falaises crayeuses normandes suivies depuis plusieurs décennies (Prêcheur, 1960), les épisodes pluvieux comme facteurs de déclenchement de l'érosion font l'objet d'un large consensus. Les mouvements gravitaires coïncident souvent avec de fortes précipitations hivernales (Duperret et al., 2004 ; Letortu et al., 2015c), en particulier lors des années humides qui provoquent une remontée du toit de la nappe phréatique dans le massif crayeux (Lageat et al., 2006) ou lors de fortes pluies en période sèche (Duperret et al., 2002). Cependant, un facteur de déclenchement de l'érosion important, peu fréquent, mais très efficace, tant sur la falaise que sur la plate-forme littorale est le rôle des cycles de gel/dégel (Moses et al., 2006 ; Dewez et al., 2015 ; Letortu et al., 2015a). Lageat et al. (2006) ont écrit que les agents et processus subaériens étaient les principaux responsables du déclenchement des mouvements gravitaires le long des côtes françaises de la Manche et que l'influence marine était limitée au déblaiement des mouvements. Cela a été remis en cause, car de nombreux chercheurs ont mis en évidence le rôle des facteurs marins comme un agent d'érosion, en sus d'un agent de déblaiement qui réactive l'érosion du front de falaise (par exemple Hénaff et al., 2002 ; Earlie et al., 2015 ; Letortu et al., 2015b). Pour contribuer au débat, mes recherches doctorales ont utilisé des analyses statistiques (ajustement à la loi de puissance (Letortu et al., 2014a) et l'analyse multivariée avec l'ACP et CAH) et des analyses empiriques pour identifier les facteurs déclenchants, sur la base de l'inventaire de l'association ESTRAN⁴⁹ contenant 331 mouvements gravitaires collectés hebdomadairement entre 2002 et 2009 de Veules-les-Roses au Tréport (37,5 km, Seine-Maritime). Les résultats ont mis en évidence que, sur un pas de temps de 10 jours précédant l'érosion, « un temps froid (moyenne des températures sous 0 °C) et sec (moyenne de précipitations efficaces de 1 mm) », « de fortes précipitations (moyenne de précipitations efficaces supérieure à 4 mm) et un vent fort (fortes conditions d'agitation marine avec vent maximal tri-horaire atteignant 14 m/s) » sont les conditions les plus propices au déclenchement de mouvements gravitaires (Letortu et al., 2015a).

⁴⁸ Evaluation multirisque de territoires côtiers en contexte de changement global (*multi-risk assessment on coastal territory in a global change context*)

⁴⁹ <http://www.estrancedelamer.fr/l-association/>

Même si certains signes précurseurs ont été identifiés sur certains sites à travers le monde (Rosser et al., 2007), peu d'études ont rassemblé une base de données combinant un enregistrement précis (de la minute à 10 jours) des événements de rupture de falaise et les facteurs externes associés (par exemple, Bernatchez et al., 2011, 2021 ; Letortu et al., 2015c ; Dietze et al., 2020), ce qui permettrait d'évaluer la contribution respective des agents et processus dans le déclenchement de l'érosion. Depuis 2000, plusieurs études ont porté sur les mouvements du sol au sommet des falaises, enregistrés à l'aide de sismomètres à large bande (Adams et al., 2002, 2005 ; Young et al., 2011a ; Dickson et Pentney, 2012 ; Young et al., 2012 ; Norman et al., 2013 ; Young et al., 2013 ; Earlie et al., 2015 ; Vann Jones (née Norman) et al., 2015 ; Young et al., 2016 ; Kennedy et al., 2018 ; Vann Jones et al., 2018). Ces travaux mettent notamment en évidence l'ampleur du déplacement dans la bande de fréquence des ondes infragravitaires⁵⁰, avec une proposition de modèle de balancement de la falaise induit par le chargement de ces ondes infragravitaires sur la plate-forme littorale (Adams et al., 2005). Les mouvements du sol au sommet des falaises sont de bons indicateurs des forçages externes (Norman et al., 2013), mais des questions subsistent sur la fonction de transfert entre l'action des vagues et la réponse des falaises, sur la représentativité spatiale des mesures de déplacement du sol enregistrées et sur l'implication de ces micromouvements au sommet des falaises en termes de rupture des falaises. La connaissance des contributions des facteurs déclenchant la rupture est encore insuffisante (Lim et al., 2010 ; Naylor et al., 2010 ; Kennedy et al., 2014a). Les freins à la détermination de cette contribution respective des facteurs et des processus découlent :

- 1) de la complexité à mesurer les événements de rupture et les agents et processus sous-jacents avec une résolution temporelle suffisante ;
- 2) du décalage temporel variable entre la signature du facteur et l'événement de rupture, ce qui complique l'identification des corrélations et souligne la nécessité d'une surveillance à long terme ;
- 3) de la présence d'un contexte structural et de conditions météo-marines qui sont souvent spécifiques au site et variables dans le temps (y compris la variabilité météorologique et le changement climatique).

Afin de répondre au double questionnement « *quels sont les agents et les processus responsables de l'érosion du front de falaise et quelles sont leurs contributions dans la fatigue et le déclenchement des mouvements gravitaires ?* », mes travaux ont combiné à l'échelle locale :

- des approches naturalistes (y compris avec des méthodes quantitatives et les outils computationnels) avec l'étude de profils de falaise pour déterminer les facteurs prépondérants dans l'érosion ;

⁵⁰ Les ondes infragravitaires (IG) (0,005-0,05 Hz) proviennent principalement de la houle (Bertin et al., 2018) et il a été montré que la « charge » de ces ondes IG sur la plate-forme provoque un lent mouvement de balancement au sommet de la falaise (par exemple, Adams et al., 2005 ; Young et al., 2011a). Pour rappel, les trois autres bandes de fréquences (hors IG) sont (les limites varient légèrement d'un site à l'autre) : (1) la houle, c'est-à-dire les ondes de gravité de surface typiques (SF) (0,05-0,1 Hz), qui contribue également aux mouvements de balancement au sommet de la falaise, à des fréquences plus élevées que les IG (Young et al., 2013, 2011) ; (2) la double fréquence (DF) (0,1-0,3 Hz), qui correspond aux ondes stationnaires générées par les interactions vagues/vagues ; (3) la haute fréquence (HF) (> 1 Hz), qui est générée par une combinaison de phénomènes locaux tels que l'impact direct des vagues sur la paroi de la falaise (Adams et al., 2002 ; Lim et al., 2011) ou sur la plate-forme littorale (Dickson et Pentney, 2012 ; Poppeliers et Mallinson, 2015), l'effet « buffeting » du vent (« *buffeting* », Norman et al., 2013) et les ondes parasites, principalement d'origine anthropique.

- une approche instrumentale (suivis continus sur plusieurs mois, et multiparamètres) sur un front de falaise en Bretagne et un en Normandie pour connaître la part de chaque facteur dans la fatigue et la rupture de la falaise.

1.2.3 Contribution des recherches à l'action et à la pratique sociale

Mes recherches sur les aléas côtiers peuvent contribuer à deux types d'actions (MEDDE, 2012 ; MEEM⁵¹, 2017 ; MTES, 2017) :

- développer, actualiser et diffuser les connaissances afin d'améliorer la culture du risque⁵² qui s'avère souvent insuffisante⁵³ et peu « enrôlante » pour le citoyen (Goutx, 2012) ;

- prévoir⁵⁴ les aléas de demain afin de développer les outils d'aide à la décision pour la gestion des littoraux (notamment l'adaptation et donc de la réduction des risques).

1.2.3.1 Développement, actualisation et diffusion classique des connaissances

Le développement et l'actualisation des connaissances passent par la mise en place d'un suivi fiable, homogène et pérenne des référentiels du trait de côte, initié le plus souvent dans le cadre de projets de recherche, puis soutenu par les observatoires (lorsque le financement des projets s'arrête).

En effet, lorsque les données sont en libre accès et conformes à l'emprise spatiale et au socle minimal souhaité par l'observatoire, il est possible d'intégrer par exemple le SNO DYNALIT et des observatoires régionaux comme le réseau d'observation du littoral (ROL) de Normandie et des Hauts-de-France⁵⁵. Chaque observatoire a son infrastructure de données géographiques (IDG), dédiée à la mise en disposition des données (visualisation et/ou partage de la donnée). Dans le cadre du suivi des falaises de Dieppe et de Varengeville-sur-Mer (cap d'Ailly), nos données sont diffusées *via* DYNALIT au sein de l'IDG Sextant, et moissonnées par INDIGEO⁵⁶. Dans le cadre de nos suivis des aléas côtiers dans l'observatoire breton OSIRISC, nos données et résultats sont diffusées *via* INDIGEO et visualisables grâce au web-SIG OSI⁵⁷.

La diffusion des connaissances passe aussi par la vulgarisation et la médiation scientifiques⁵⁸, sous forme d'articles courts (Figure 1.11), articles de presse, lettres, conférences, débats, atlas, etc. Cette restitution de la recherche, sans nier son utilité, ne constitue pas une association durable entre chercheurs et citoyens.

⁵¹ Ministère de l'écologie, de l'énergie et de la mer

⁵² La culture du risque peut être définie, « *a minima, comme la « connaissance acquise » d'une menace* » (Veyret, 2003, p. 37). Mais ce terme est souvent pris dans une acception plus large, et donc discuté, polysémique et flou. Il correspond souvent à la nécessité d'être conscient d'un risque existant et de connaître les comportements à tenir en cas d'urgence. Le moyen le plus fréquent pour atteindre ces objectifs est l'éducation aux risques (Blesius, 2013).

⁵³ L'Etat considère qu'un « *manque de culture du risque* » rend difficile l'application de sa stratégie de prévention.

⁵⁴ En rappelant que prévoir ne signifie pas prédire.

⁵⁵ <https://www.rolnp.fr/rolnp/index.php/qui-sommes-nous/objectifs-et-missions>

⁵⁶ Cette IDG, qui signifie infrastructure de données et d'informations géoréférencées sur l'environnement, est à l'initiative de LETG (Gourmelon et al., 2017, <https://indigeo.fr>).

⁵⁷ <https://osi.univ-brest.fr/>

⁵⁸ Ces deux termes, pourtant très utilisés, n'ont pas de définitions consensuelles (Millière, 2021). Apparue au XIX^e siècle, la vulgarisation peut être définie comme une communication adaptée au grand public pour partager et diffuser les connaissances

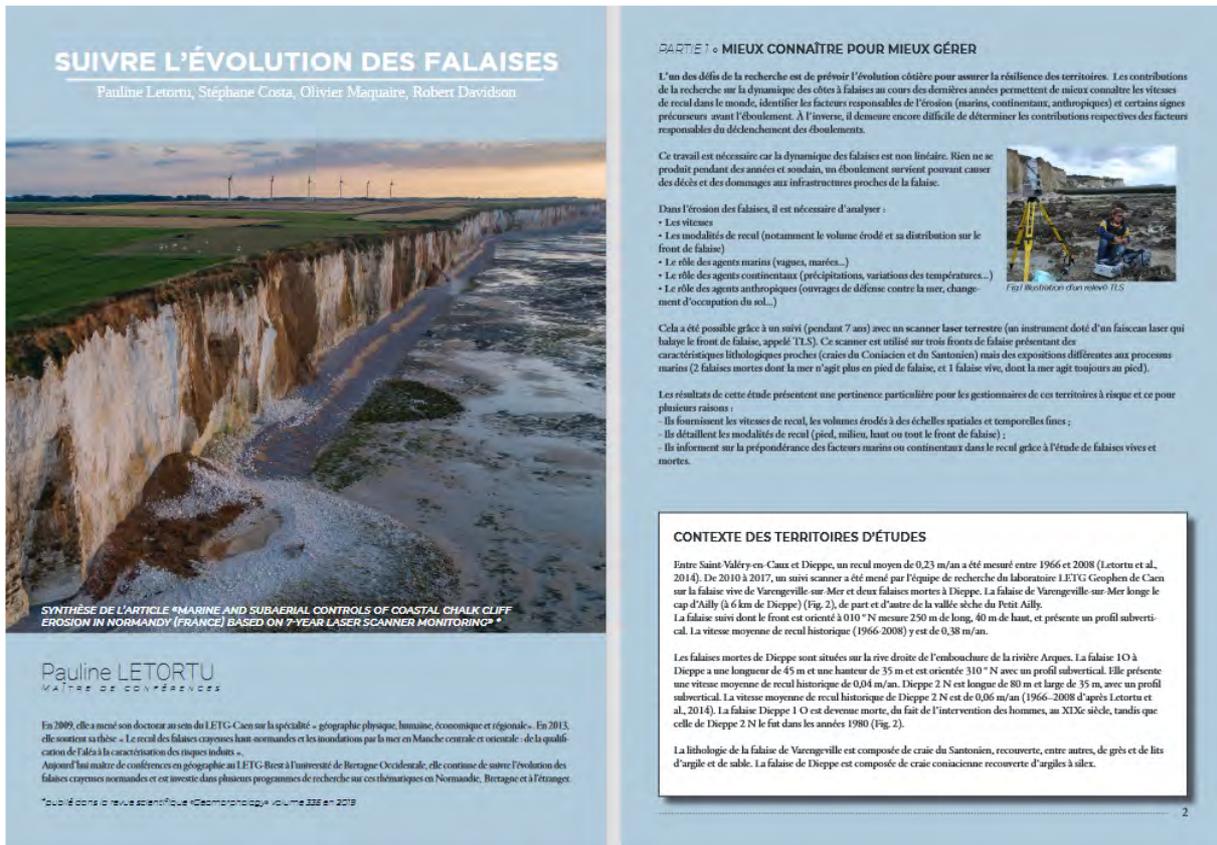


Figure 1.11 : Extrait d'un article de vulgarisation scientifique sur le suivi de l'évolution des falaises dans le cadre du projet RICOCHET, réalisé conjointement par les scientifiques et les employés de l'agence Normandie biodiversité et développement durable

1.2.3.2 Développement et actualisation des connaissances par l'implication des élus, gestionnaires et des citoyens

L'amélioration et la durabilité de l'acculturation, tout comme les changements de pratiques, sont plus importantes dès lors que le citoyen est impliqué dans la coconstruction du projet scientifique (Shirk et al., 2012). L'implication des citoyens dans les actions de prévention et de gestion des risques naturels est croissante : de nombreuses initiatives ont été présentées au sein du webinaire du CEREMA « Culture du risque : le citoyen premier acteur de sa sécurité »⁵⁹ en 2020. Par ailleurs, une synthèse des démarches citoyennes dans l'observation de l'évolution du littoral a été rédigée par A. Maspataud (2020).

L'observatoire breton OSIRISC souhaite évaluer les trajectoires⁶⁰ de la vulnérabilité systémique des territoires soumis aux risques côtiers d'érosion et de submersion. Dans ce cadre, la vulnérabilité côtière est prise dans son sens systémique (Meur-Férec et al., 2008). Elle tient compte de ses quatre composantes que

scientifiques, mais de façon unilatérale et descendante (du « sachant » à un « non sachant »), sans implication des publics dans les choix et les orientations des sujets de recherche (Chavot et Masseran, 2010). La médiation scientifique peut être définie comme une activité de transmission et de partage de savoirs, mais aussi un échange bilatéral entre le monde de la science et de la société, avec prise en compte de l'opinion des publics (Rasse, 2007).

⁵⁹ <https://www.cerema.fr/fr/actualites/culture-du-risque-citoyen-premier-acteur-sa-securite-replay#toc-introduction>

⁶⁰ Une trajectoire indique une séquence de mutations, transformations et bifurcations des dynamiques territoriales (Le Berre et al., 2022).

sont les aléas, les enjeux, les moyens de gestion et les représentations sociales de ces risques (Hénaff et Philippe, 2014). Chacune prise individuellement et de manière équivalente conduit, selon son importance nécessairement variable dans le temps, à rendre plus ou moins vulnérable un territoire côtier. L'observatoire intégré évalue donc régulièrement (saisonnièrement, annuellement, etc.) le poids ainsi que les variations temporelles et spatiales de chacune de ses composantes dans le long terme.

Pour les aléas, le développement et l'actualisation des connaissances peuvent être réalisés par les scientifiques et les gestionnaires. Dans le cadre de la composante « aléas » du projet OSIRISC, nous avons réfléchi au développement de protocoles et d'outils de mesure simples pour suivre les aléas côtiers et les intégrer dans des indicateurs et des indices, dont celui de vulnérabilité systémique aux risques côtiers. Initialement prévus que pour les gestionnaires, nous avons souhaité adapter certains de ces protocoles et outils de mesure au grand public dans un objectif de collecte de données (Figure 1.12) et d'acculturation.

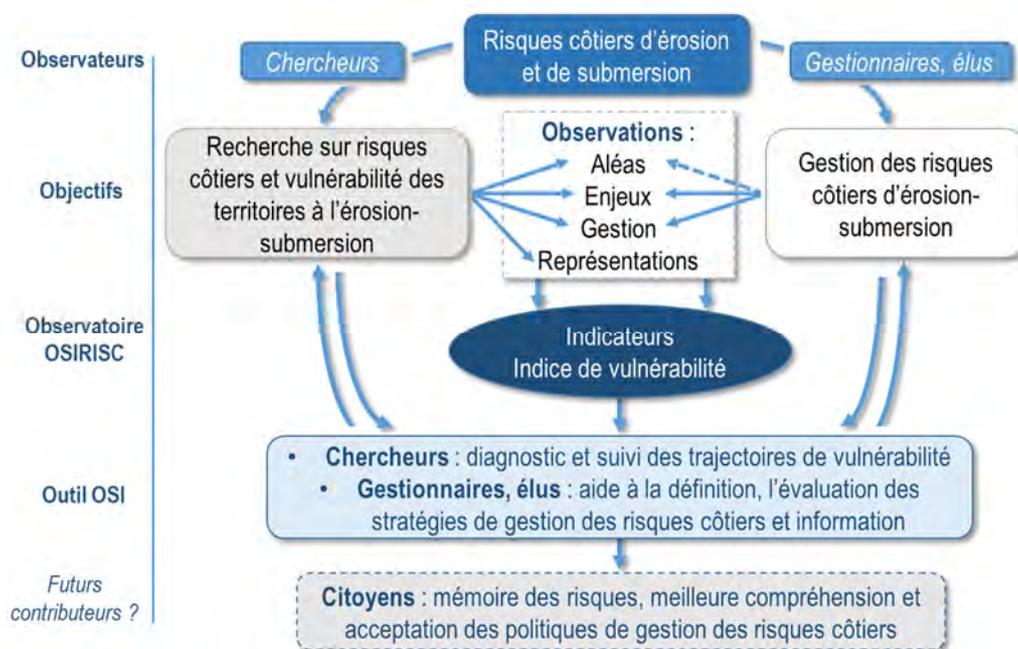


Figure 1.12 : OSIRISC : l'observatoire et les acteurs impliqués (Hénaff et Le Dantec)

Pour un changement de comportement social autour des questions environnementales, les projets de sciences citoyennes peuvent constituer un catalyseur (Van Brussel et Huyse, 2019). Les sciences citoyennes (*citizen science*, Irwin (1995)) peuvent être définies comme l'ensemble des activités de recherche scientifique dans lesquelles des citoyens (qui ne sont pas des scientifiques professionnels) s'impliquent à titre bénévole dans la collecte de données, l'analyse et/ou la valorisation du projet scientifique (Haklay, 2013 ; Sauleau et al., 2021). Les sciences citoyennes sont protéiformes avec différents modèles plus ou moins enrôlants (Tableau 1.1). Dans ce manuscrit, il est utilisé dans le sens d'une contribution des citoyens à la science (et non la science au service des citoyens).

	Sciences citoyennes			
Shirk et al., 2012	<i>Contributory</i>	<i>Collaborative</i>	<i>Co-created</i>	<i>Collegial</i>
Haklay, 2013	<i>Crowdsourcing</i>	<i>Distributed intelligence</i>	<i>Participatory science</i>	<i>Extreme citizen science</i>
Houllier et Merilhou-Goudard, 2016	Sciences citoyennes		Recherches participatives	<i>Community-based research</i>
Cet article	Sciences contributives	Sciences collaboratives	Sciences participatives	Sciences communautaires
Initiateur du projet	Scientifique	Scientifique	Citoyen et/ou scientifique	Citoyen
Rôle du citoyen	Capteur de données (inventaire par exemple)	Collecte, traitement et interprétation basique des données	Coopération étroite avec le scientifique, de la définition des objectifs à la valorisation des résultats	Porte toutes les étapes du projet avec l'appui du scientifique
Objectifs	Production de savoirs (publication scientifique)	Production de savoirs, initiation à la démarche scientifique	Production de savoirs, innovation scientifique et transformation de la société	Production de savoirs, transformation de la société à l'échelle de la communauté
Portée géographique	Large	Large	Locale à large	Locale
Impact scientifique	Elevé	Elevé	Elevé	Moyen
Impact sur la société	Moyen	Moyen	Elevé	Elevé

Tableau 1.1 : Différents modèles de sciences citoyennes (Sauleau et al., 2021)

Dans notre cas (et à l'instar des recommandations de Maspataud, 2020), les sciences citoyennes ne constituent pas qu'un pourvoyeur de données (peu onéreuses, avec une représentativité spatiale et temporelle augmentée, en complémentarité avec les suivis des gestionnaires et scientifiques ; Figure 1.13), mais aussi un moyen d'échanger durablement avec les citoyens sur le littoral d'aujourd'hui et de demain.

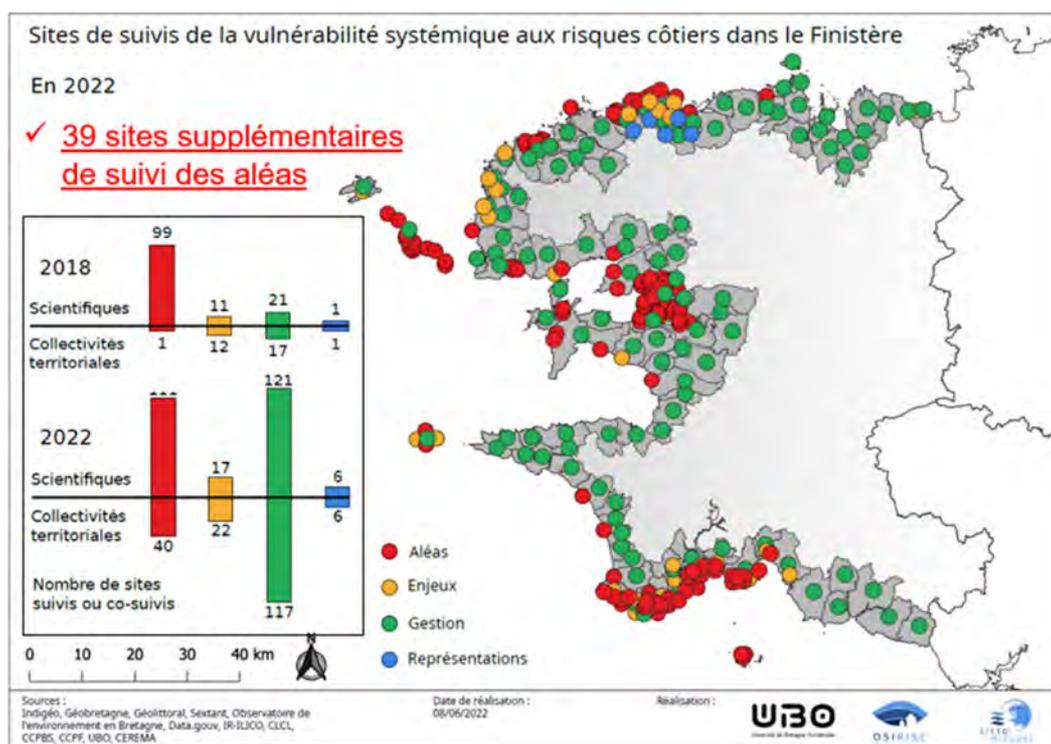


Figure 1.13 : Sites de suivis de la vulnérabilité systémique aux risques côtiers dans le Finistère (UBO, OSIRISC et Littor'Risques⁶¹)

En apprenant ensemble à suivre (grâce à des protocoles et des outils de mesure simples) et mieux comprendre les aléas côtiers et les dynamiques côtières (évolution saisonnière du profil de plage, mouvement du trait de côte, évolution du stock sédimentaire grâce à l'analyse des données et l'obtention de résultats sur plusieurs années), le dialogue entre les acteurs du littoral devrait être plus aisé. Les échanges autour des sites, des mesures, des protocoles, et des résultats permettent une acculturation durable des citoyens. Autrement dit, le citoyen est formé puis observe, mesure, analyse sur plusieurs années. Il comprend mieux la dynamique littorale et donc réfléchit et discute autrement à la façon dont le littoral d'aujourd'hui et de demain peut/doit/pourrait/devrait être géré.

Une de nos questions de recherche émergente est donc : comment (in)former les citoyens au (sur le) suivi, à (sur) la compréhension des aléas côtiers (érosion, submersion marine) et aux (sur les) stratégies de gestion des côtes dans un contexte de changement climatique ?

⁶¹ Pour accompagner les collectivités littorales, l'UBO, le CEREMA et le conseil départemental du Finistère s'associent pour leur apporter des appuis méthodologique, scientifique et technique sur la gestion des risques littoraux d'érosion et de submersion, à travers trois grandes missions : l'observation du littoral, la gestion du trait de côte et le suivi des évolutions de la vulnérabilité face à ces risques (<https://www.risques-cotiers.fr/connaître-les-risques-cotiers/projets/littorisques/>).

1.2.3.3 Prévoir l'aléa « recul des falaises » pour mettre en place une logique d'adaptation

Les modèles scientifiques de prévision de l'évolution des côtes avec des incertitudes réduites⁶² sont des arguments demandés par les gestionnaires et les élus, car ils constituent des arguments forts pour diminuer la réticence des populations à intégrer ces informations (sur la recomposition spatiale, par exemple) (Mineo-Kleiner et Meur-Férec, 2016).

Bien que la contribution respective des facteurs responsables du déclenchement de l'érosion reste un verrou scientifique, la méthodologie nationale de cartographie du recul du trait de côte était définie, jusqu'en août 2022, dans un document réglementaire : le PPRL⁶³ (MEDDE, 2014).

L'aléa « recul du trait de côte » y est uniquement qualifié de « fort ». L'aléa fort à l'échéance de 100 ans nommé L_r se détermine avec T_x (qui est le taux de recul annuel en m/an) et L_{max} (qui correspond au recul maximal instantané du trait de côte dû à un événement ponctuel majeur en m). La formule est la suivante (Figure 1.14) : $L_r = 100 \times T_x + L_{max}$

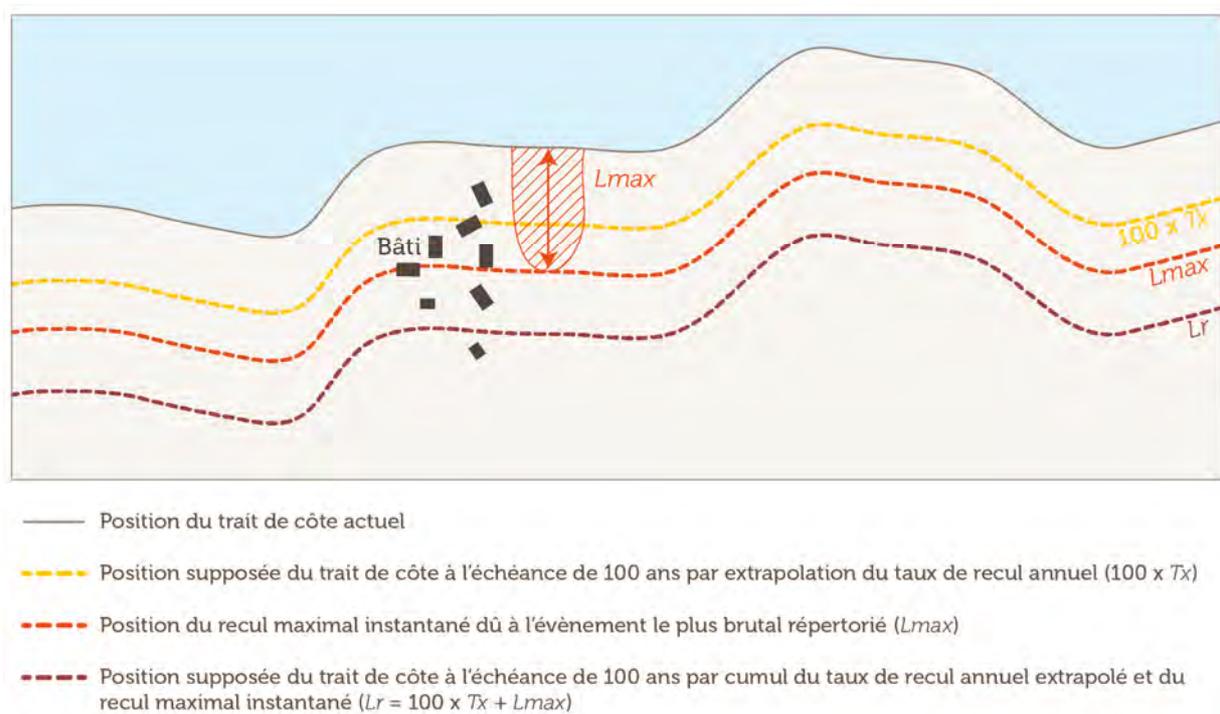


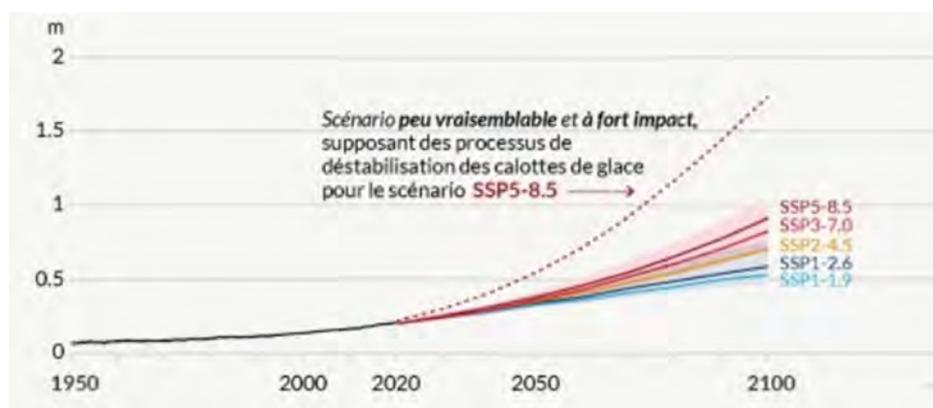
Figure 1.14 : Position supposée du trait de côte à l'échéance de 100 ans (L_r) selon la méthodologie du PPRL (modifié d'après Letortu, 2013)

Ce zonage avec l'aléa fort L_r est binaire : il y a présence ou absence d'aléa. Par ailleurs, l'impact du changement climatique n'est pas intégré dans ce zonage. Le réchauffement climatique causé par l'activité humaine entre la période 1850-1900 et celle de 2010-2019 est de 0,8 °C à 1,3 °C, à l'échelle mondiale. Ce

⁶² S. Costa le dit souvent : « l'incertitude scientifique favorise l'inaction politique ».

⁶³ Comme cette recherche a été finalisée en 2021 (projet RICOCHET) et donc antérieurement aux recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte (Collectif (BRGM/CEREMA), 2022), je développe ici la méthodologie PPRL.

réchauffement modifie la distribution de l'eau sur la planète (fonte des glaces sur terre) et entraîne la dilatation thermique. Les effets sont une augmentation du niveau moyen des mers de 0,20 m entre 1901 et 2018. Cependant, cette augmentation est de plus en plus rapide : 1,3 mm/an entre 1901 et 1971, 1,9 mm/an entre 1971 et 2006, et 3,7 mm/an entre 2006 et 2018 (GIEC, 2022a). Par rapport à la période 1995-2014, l'élévation probable du niveau marin moyen, d'ici 2100, est de 0,32 à 0,62 m dans le scénario dit « optimiste » (SSP⁶⁴1 ou RCP⁶⁵ 2.6), de 0,44 à 0,76 m dans le scénario « intermédiaire » (SSP2 ou RCP 4.5) et de 0,98 à 1,81 m dans le scénario « pessimiste » (SSP3 ou RCP 8.5). Une élévation du niveau marin moyen à l'échelle mondiale au-delà de la fourchette probable (approchant 2 m d'ici 2100 et 5 m d'ici 2150) dans le cadre du scénario très élevé (fiabilité faible) ne peut être exclue, en raison de la grande incertitude qui entoure les changements de la calotte glaciaire (GIEC, 2022a) (Graphique 1.4).



Graphique 1.4 : Variation de la moyenne mondiale du niveau des océans par rapport à 1900 (GIEC, 2022a, <https://resumegiec.wordpress.com/2021/08/11/rapport-du-giec-resume-pour-les-decideurs/>)

Dans un contexte de raréfaction des apports sédimentaires hérités de la dernière transgression marine, ce changement climatique (augmentation du niveau d'eau, phénomènes tempétueux plus sévères, modification du cycle de l'eau continentale) aura des impacts sur la morphologie côtière (Creach, 2021), particulièrement sur les formes d'accumulation basses (comme les récifs coralliens (par exemple, Duvat et al., 2021), deltas, estuaires, marais maritimes, baies, plages, dunes) ou les falaises meubles (Costa et al., 2013, 2021). Connaître le passé est un préalable, mais la remontée actuelle est dissemblable par le stock de sédiments disponible, par l'ampleur de la modification du fonctionnement littoral avec les aménagements et par la rapidité de la montée du niveau marin.

Comme le rappelle Stephenson (2015), la compréhension de l'évolution globale des falaises reste floue, car l'influence des niveaux marins fluctuant durant le Quaternaire, les changements tectoniques et glacio-isostatiques dans l'élévation des terres, le rôle des héritages, et la contribution respective des nombreux facteurs et processus restent complexes à appréhender, à quoi s'ajoute la structure géologique qui entraîne une forte variabilité spatiale des formes. Il n'est donc pas surprenant que les scientifiques aient des difficultés à développer des modèles morphodynamiques cohérents intégrant le changement climatique contemporain.

⁶⁴ Trajectoires socio-économiques partagées

⁶⁵ En fonction des ambitions et mesures globales pour réduire les gaz à effet de serre (GES), quatre profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) existent (Moss et al., 2010 ; van Vuuren et al., 2011 ; Mondon et Imbard, 2013). Ces profils intègrent l'évolution de la concentration des GES, les niveaux de forçages radiatifs et les trajectoires en termes d'usage des sols (van Vuuren et al., 2011 ; Jouzel et Debroise, 2014).

Cependant, depuis 2010, plusieurs modèles ont été proposés (pour une synthèse, Limber et al., 2018). Même si la compréhension et la prévision des effets du changement climatique sur les côtes rocheuses restent modestes, il est cependant admis que la hausse du niveau moyen de la mer rapprochera le point de déferlement des vagues de la falaise. La fréquence et l'efficacité de l'attaque des vagues augmenteront, ce qui accroîtrait le taux de recul du profil vers la terre. A titre d'exemple, pour la Manche orientale et occidentale, les niveaux d'eau associés aux forts coefficients de marée (110-115), qui apparaissent actuellement trois à quatre fois annuellement, passeraient à près de 65 fois par an avec une élévation d'1 m (Costa et al., 2021). Trenhaile (2011) a mis en évidence que l'élévation du niveau marin augmenterait les taux d'érosion (mais l'effet de l'augmentation des tempêtes pourrait être relativement limité). Young et al. (2014) et Limber et al. (2018) ont également modélisé les effets de l'élévation du niveau marin sur les falaises meubles et rocheuses de Californie en modifiant la règle de Bruun (1983, 1988). Limber et al. (2018) ont conclu que les taux d'érosion pourraient être multipliés par un peu plus de 1,5 pour une élévation du niveau marin de 1 m et plus que doublés avec une augmentation du niveau marin de 1,5 à 2 m d'ici la fin du XXI^e siècle. Cela rejoint les valeurs évoquées par Costa et al. (2021) avec un doublement des vitesses de recul en Normandie. L'étude de Shadrick et al. (2022) présente des augmentations de vitesses de recul sur des falaises rocheuses bien plus importantes : une augmentation jusqu'à un ordre de grandeur. Par ailleurs et sans surprise, l'impact sur les côtes à falaises meubles serait plus fort que sur les côtes à falaises rocheuses (Limber et al., 2018a ; Trenhaile, 2019).

La détermination de l'impact du changement climatique sur le recul du trait de côte est donc délicate, car les méthodes d'analyse fiables manquent et les modèles ne sont pas toujours transposables. Dans le cadre du PPRL, l'intégration du changement climatique « *n'a [...] pas un caractère obligatoire* », car « *l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur l'érosion et le recul du trait de côte est très difficile à estimer* » (MEDDE, 2014, p. 58). Seules des pistes de recherche sont évoquées pour son intégration éventuelle : « *la méthode de Bruun en premier ordre de grandeur⁶⁶, l'utilisation de modèles, couplés à une analyse géomorphologique et confrontés aux données de terrain font aujourd'hui partie des outils d'aide à la décision concernant les impacts du changement climatique* » (MEDDE, 2014, p. 59). Désormais, avec la loi « Climat et résilience » (2021), le changement climatique doit être intégré dans la carte locale d'exposition au recul du trait de côte pour les communes inscrites sur la liste des communes concernées par le recul du trait de côte (article L.321-15 du code de l'environnement), en reprenant la méthode de Bruun, l'utilisation de modèles ou l'analyse experte (Collectif (BRGM⁶⁷/CEREMA), 2022).

En France, jusqu'à présent, les études prospectives sur l'aléa « recul du trait de côte » intégrant le changement global concernent rarement les côtes à falaises (Mercier, 2022). Elles concernent surtout les côtes basses sableuses (par exemple, Le Cozannet et al., 2019 ; Thiéblemont et al., 2021) où la question du changement climatique revêt un caractère crucial dans la gestion et l'aménagement de ces territoires (enjeux souvent très forts en raison des aménités environnementales). Pour les côtes d'ablation, des études de projection du recul sont nécessaires et essentielles pour améliorer l'aménagement futur. Une des questions de recherche est donc : **comment prévoir l'emprise spatiale de l'aléa « recul des falaises » à l'échéance de 100 ans en intégrant l'impact du changement climatique ?**

⁶⁶ Cela fournit uniquement un premier ordre grandeur, car la règle est fortement critiquée (Cooper et Pilkey, 2004 ; Davidson-Arnott, 2005).

⁶⁷ Bureau de recherches géologiques et minières

1.3 Variété des échelles spatiales et temporelles et des collaborations (géosciences, sciences de l'éducation, informatique)

Dans le cadre de mes recherches, deux référentiels de la falaise (le haut de falaise et le front de falaise) sont étudiés selon plusieurs niveaux d'analyse dans le temps et dans l'espace (du local (quelques dizaines de m) à l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire (plusieurs dizaines de km), du front de falaise au versant littoral (Figure 1.15), de la pluridécennie à la seconde) et selon plusieurs points de vue (vertical, horizontal, oblique et interne) (Figure 1.16). Cet emboîtement des échelles spatiales est essentiel en géographie, car, comme l'écrit Lacoste (2012, p. 123-124) « *au plan de la connaissance, il n'y a pas de niveau d'analyse privilégié, aucun d'eux n'est suffisant, car le fait de prendre en considération tel espace comme champ d'observation va permettre d'appréhender certains phénomènes et certaines structures, mais va entraîner la déformation ou l'occultation d'autres phénomènes et d'autres structures dont on ne peut a priori préjuger du rôle et qu'on ne peut donc négliger. Il est donc indispensable de se placer aux autres niveaux d'analyse, en prenant d'autres espaces en considération. Il est ensuite nécessaire de réaliser l'articulation de ces observations très différentes, puisqu'elles sont fonction de ce que l'on pourrait appeler des espaces de conceptualisation différents* ».

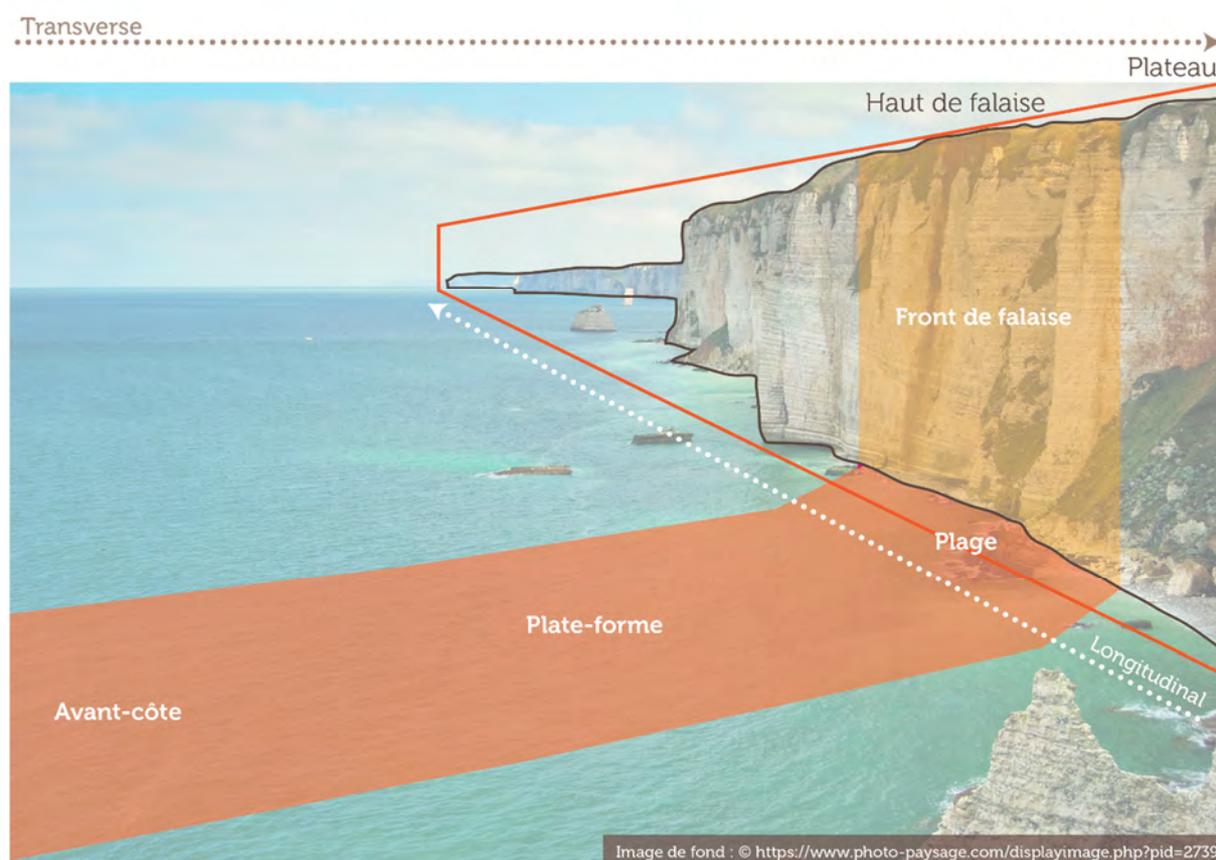


Figure 1.15 : Emboîtement des échelles spatiales dans mes recherches

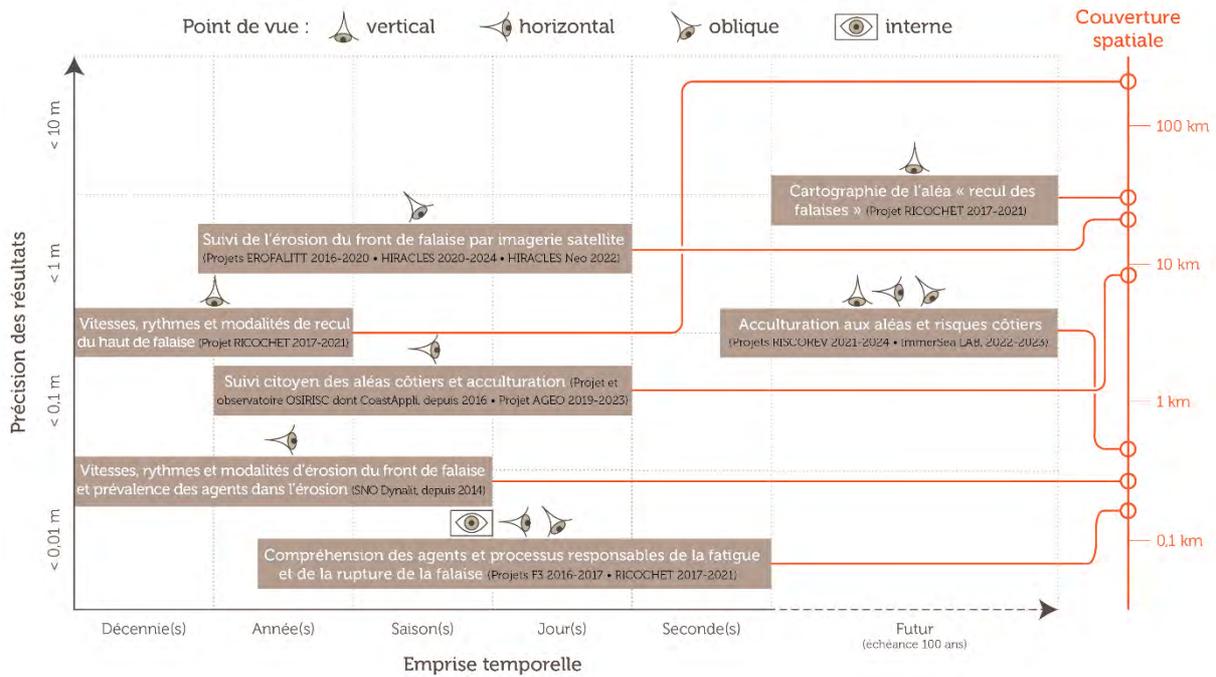


Figure 1.16 : Emprises temporelles, couvertures spatiales, précisions des résultats et points de vue de mes recherches (en fonction des projets de recherche et/ou de formation)

1.3.1 Suivi de la falaise (haut et front de falaise) de l'échelle locale à l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire, sur plusieurs décennies (résolution infradécimétrique)

L'échelle spatiale pertinente de gestion des côtes fait l'objet d'un consensus : l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire. Au sein de cette cellule, il existe souvent des sous-cellules générées par la construction d'ouvrages bloquant le transit sédimentaire. La gestion de l'érosion en aval-dérive de l'ouvrage doit s'articuler avec l'amont-dérive. Ces limites hydro-sédimentaires recoupent d'autres limites administratives ou politiques, rendant la gestion des côtes complexe.

Les vitesses, rythmes et modalités de recul, observés depuis le haut de falaise, sont calculés à échelle fine (par exemple, une vitesse de recul peut être calculée sur des surfaces dont la longueur fait 50 m, avec une précision infradécimétrique, Figure 1.16). Cette valeur est souvent moyennée à l'échelle de la sous-cellule hydro-sédimentaire pour être cohérente avec le fonctionnement du milieu littoral (unités sédimentologiques, Figure 1.6). Ce découpage permet d'apporter des éléments de réponse quant à la gestion de l'érosion. Cette approche méthodologique de mes recherches est un travail réalisé en étroite collaboration avec l'équipe d'IDEES⁶⁸-Caen (S. Costa, O. Maquaire, R. Davidson, M. Medjkane, anciennement LETG-Caen).

Le suivi du front de falaise à l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire est également à privilégier, mais cela est beaucoup plus rare, car les instruments de mesure disponibles couvrent un espace limité. Par exemple, le scanner laser terrestre ou la photogrammétrie terrestre permettent d'atteindre une précision de $\pm 0,02-0,03$ m, mais sur quelques centaines de mètres de long, car la marée limite l'accès au pied de falaise (Letortu et al., 2018). Des alternatives existent depuis 2010 comme le scanner laser mobile (MLS), embarqué

⁶⁸ Identité et différenciation de l'espace, de l'environnement et des sociétés

sur un bateau (Michoud et al., 2014 ; Giuliano et al., 2022), le LiDAR aéroporté déporté en mer pour suivre le front de falaise (ROL de Normandie et des Hauts-de-France) ou le drone sur plusieurs kilomètres. Ces alternatives restent onéreuses en termes d'acquisition (coût du matériel, nombre de personnes sur le terrain), donc peu fréquentes (annuelles au mieux), exigeantes en termes de conditions météo-marines, et le traitement des données demande des compétences techniques. En raison de ces freins, le suivi du front de falaise est souvent limité à quelques centaines de mètres, avec des effets locaux qui peuvent nuire à la représentativité spatiale des résultats et donc à leur transposition. L'essor des satellites agiles permet d'envisager le suivi du front de falaise à l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire, à partir d'images stéréoscopiques ou tristéréoscopiques, en raison :

- 1) de la grande agilité de certains satellites (capable d'atteindre une visée oblique au-delà de 40° pour Pléiades et Pléiades Neo et d'acquérir un triplet d'images en un seul passage) ;
- 2) de la répétitivité des acquisitions propices au suivi saisonnier et événementiel ;
- 3) de la fauchée plurikilométrique des images au nadir (20 km pour Pléiades, Astrium, 2012) ;
- 4) de la très haute résolution spatiale ⁶⁹ (THRS, 0,31 m en panchromatique au nadir pour les images WorldView-4 (DigitalGlobe, 2015), 0,70 m et 0,30 m pour Pléiades et Pléiades Neo respectivement (Airbus Defence and Space, 2017 ; Astrium, 2012) ;
- 5) du coût qui peut être modeste, notamment en France, lorsque les commandes d'images sont associées à un projet de recherche CNES ou issues d'archives ;
- 6) de la durée de vie décennale à pluridécennale des missions (10 ans pour la mission Pléiades, débutée en 2011 et 2012, et avec une continuité des mesures entre les versions suivantes des satellites Pléiades Neo) permettant des suivis à moyen terme.

De nombreux articles ont utilisé des images Pléiades stéréoscopiques ou tristéréoscopiques pour répondre à des questions scientifiques variées (de Franchis et al., 2014 ; Stumpf et al., 2014 ; Poli et al., 2015), notamment dans les environnements côtiers (Airbus, 2015 ; Collin et al., 2018 ; Almeida et al., 2019). Mais, avant nos articles, les images satellites Pléiades (ou autres satellites agiles) n'avaient jamais été utilisées pour reconstituer en 3D le front des falaises pour en suivre l'érosion. Ainsi, ce travail original sur les falaises de Varengeville-sur-Mer, financé par le CNES, a été réalisé entre 2016 et 2017 principalement avec J. Nabucet (LETG-Rennes). Par la suite, l'étude s'est poursuivie avec M. Jaud (UAR 3113 IUEM, Geo-Ocean), C. Théry (stagiaire), R. Taouki (stagiaire puis en contrat à durée déterminée) et Z. Bessin (doctorante).

Ces nuages de points 3D du front de falaise acquis par de multiples sources (TLS, photogrammétrie, imagerie satellite) sont uniques, car le suivi haute fréquence (tous les quatre à cinq mois) a débuté en 2010, grâce à la collaboration avec S. Costa, O. Maquaire et R. Davidson du LETG-Caen (devenu d'IDEES-Caen). La quantité de données collectées et la répétitivité des traitements réalisés nous invitent à aller vers un traitement plus automatisé, notamment *via* la détection de changement sur le front de falaise par l'apprentissage profond (AP). L'AP est un algorithme d'apprentissage basé sur les réseaux de neurones artificiels (Schmidhuber, 2015). Ils sont composés de nombreuses couches qui transforment les données d'entrée (par exemple, des images) en sorties (par exemple, des catégories pour une classification) tout en

⁶⁹ Parmi les images satellites, car par rapport aux données lasergrammétriques évoquées plus haut, les données satellites sont de moindre résolution.

apprenant progressivement des caractéristiques de plus haut niveau (Litjens et al., 2017). Cette approche par AP a l'avantage d'être transposable sur de nombreux domaines de recherche, notamment la classification d'images, la reconnaissance d'objets dans les images et l'analyse de texte et de parole (LeCun et al., 2015 ; Zhang et al., 2016). La télédétection bénéficie de cette technologie (pour une synthèse, Zhu et al., 2017 ; Ma et al., 2019 ; Yuan et al., 2020) qui permet d'aller plus vite et plus loin dans l'analyse des données. En effet, ces méthodes permettent de mieux comprendre des jeux de données diversifiés et hétérogènes (capteurs, résolutions, couvertures spatiales, angles d'observation), ce qui est particulièrement intéressant pour exploiter des données multisources comme les nôtres. Ces travaux reliant la géographie et l'informatique sont menés avec les collègues informaticiens S. Lefèvre (institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires, IRISA), I. de Gélis (doctorante à l'IRISA et dans l'entreprise Magellium) et T. Corpetti (LETG-Rennes).

1.3.2 Suivi de la falaise (front de falaise, intérieur de la falaise) de l'échelle de la falaise au versant littoral, de quelques secondes à plusieurs mois

Alors que le couple plate-forme/falaise est quelquefois considéré de concert (Sunamura, 1983 ; Griggs et Trenhaile, 1994 ; Costa et al., 2006a), la falaise devrait avoir sa place au cœur d'un système⁷⁰ plus vaste et complexe : celui du versant littoral tout entier (Pinot, 1998). En effet, une falaise réagit au minimum en fonction des interrelations avec l'avant-côte, la plate-forme, la plage et le plateau. Les différents agents et processus qui modèlent ce versant littoral sont :

- ceux continentaux et anthropiques sur le plateau ;
- ceux marins, continentaux et anthropiques pour la falaise et la plage ;
- ceux d'origine mécanique, physico-chimique et biologique sur la plate-forme ;
- le démantèlement des formations superficielles peu résistantes sous le choc des houles, dans la zone de l'avant-côte rocheuse ;
- l'accumulation, en bas de la pente sous-marine, de tous les matériaux meubles provenant des actions précédentes, sur les fonds sédimentaires en bas de versant, sous quelques mètres ou dizaines de mètres d'eau.

L'idéal serait de suivre l'ensemble du versant littoral à l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire. Mais se concentrer sur l'ensemble du versant littoral à l'échelle de quelques dizaines de mètres pendant quelques mois, à une résolution descendant à la seconde et au centimètre, constitue déjà un défi scientifique et technique. Les suivis existants associant la falaise à sa plate-forme et à son plateau reposent principalement sur un suivi des micromouvements sismiques en sommet de falaise à l'aide d'un sismomètre à large bande : l'action des vagues (Adams et al., 2002, 2005 ; Young et al., 2011a ; Norman et al., 2013 ; Earlie et al., 2015 ; Vann Jones (née Norman) et al., 2015 ; Thompson et al., 2019). Ces études, souvent menées dans le cadre d'une thèse, suivent un ou deux paramètres (les micromouvements et éventuellement les vagues avec un capteur de pression posé sur la plate-forme) sur quelques heures (Thompson et al., 2019) à plusieurs années (Norman et al., 2013 ; Vann Jones (née Norman) et al., 2015), sur quelques dizaines de mètres à 1 km

⁷⁰ L'approche systémique renvoie à trois idées-clés : la complexité, le rôle des interactions et l'organisation de l'espace (MEEDM, 2010).

(Vann Jones et al., 2018). Ces travaux ont souligné le rôle des vagues qui, en générant un poids sur la plate-forme, entraînent un mouvement de balancier en sommet de falaise, potentiellement favorables à une fatigue du massif rocheux. L'étude d'Earlie et al. (2015), couplant un suivi sismique, une caméra et un suivi topographique du front de falaise et de l'estran met en évidence le rôle majeur des tempêtes dans les mouvements de la falaise et dans leur érosion (Earlie et al., 2015).

Pour discriminer le rôle des agents et des processus marins, continentaux et anthropiques qui peuvent intervenir à différentes échelles spatiales et temporelles et modifier certains éléments du système « versant littoral », plusieurs projets ont été réalisés successivement permettant d'aller vers une portée systémique :

1) les instrumentations ont débuté dans le cadre du postdoctorat « IG waves » de C. Earlie (2015-2017, financé par le LabexMer), coporté par N. Le Dantec, et dans lequel j'ai été associée. Ce postdoctorat avait pour objectif d'examiner le rôle de la morphologie de la plage (réfléchissante/dissipative) et de l'avant-côte dans la dissipation de l'énergie des vagues (surtout les IG) et la réponse de la falaise (micromouvements et potentiellement érosion). L'instrumentation associait un sismomètre à large bande avec quatre capteurs de pression sur l'estran, un profileur de courant en zone subtidale et une station météo sur le plateau. Deux sites à falaises rocheuses étaient instrumentés pendant trois mois (janvier/mars 2016) : Ruscumonoc (plage réfléchissante, Plouarzel) et les Blancs Sablons (plage dissipative, Le Conquet), en Finistère. Ce projet de deux ans s'est terminé plus tôt en raison de la titularisation de la post-doctorante à l'Université de Cardiff ;

2) le projet F3 (financé par la Région Bretagne, dans le cadre de la stratégie d'attractivité durable pour les jeunes chercheurs en Bretagne, 2016-2017) s'est concentré sur les causes de l'évolution de la microfracturation des falaises, favorisant la fatigue du matériel et donc la rupture. K. Laute a été recrutée pour un postdoctorat d'1 an et demi pour étudier le rôle des facteurs marins et continentaux sur l'évolution de la microfracturation des falaises bretonnes (et l'érosion potentiellement). Ce projet, que j'ai coordonné avec N. Le Dantec, a permis des collaborations au sein de l'IUEM (B. Le Gall, F. Floc'h), mais aussi avec l'institut de physique du globe de Strasbourg (C. Hibert, J.-P. Mallet). Entre février et mai 2017, un suivi multiparamètre à haute fréquence de la microfracturation (quatre géophones, deux extensomètres, deux inclinomètres, 20 fissuromètres), des facteurs marins (un capteur de force, un sismomètre, quatre capteurs de pression, une caméra vidéo) et des facteurs continentaux (quatre sondes de température, une station météo, un piézomètre) a été mis en place sur les falaises d'orthogneiss de Plougonvelin (Finistère).

Cette dernière instrumentation a ensuite été étoffée (neuf types d'instruments) et déployée sur les falaises crayeuses de Sainte-Marguerite-sur-Mer (Seine-Maritime), dans le cadre du projet de l'agence nationale de la recherche (ANR) RICOCHET (coordonné par O. Maquaire et S. Costa, 2017-2021, tâche 5.1. coordonnée par N. Le Dantec, LGO), avec des collaborations avec le BRGM (C. Lévy), le CEREMA (C. Fauchard, Y. Huirric, R. Flahaut, R. Antoine) et le laboratoire Géosciences de l'Université de Rennes 1 (L. Longuevergne, J. de la Bernardie). L'instrumentation a été plus systémique (plus de facteurs météo-marins et de réponses de la falaise suivis (microfracturation, micromouvement, rupture)) et sur une durée de 13 mois pour connaître les contributions des agents et des processus dans la fatigue de la falaise et dans le déclenchement de l'érosion.

1.3.3 De l'échelle de la pluridécennie à la seconde, et vers l'avenir

Les échelles de temps que j'étudie vont donc de plusieurs décennies, pour les vitesses de recul, afin de pouvoir dissocier les variations de la variabilité naturelle de l'érosion, à la seconde, afin de déterminer les facteurs responsables du déclenchement des mouvements gravitaires (même si cela n'est pas garanti en raison du décalage temporel variable entre la signature du facteur et l'événement de rupture). Ces recherches se veulent aussi prospectives en essayant d'imaginer le futur aléa « recul des falaises » et de réfléchir aux stratégies de gestion du littoral grâce à la cartographie et à l'acculturation aux aléas et risques côtiers (cette dernière est réalisée avec des collègues des sciences de l'éducation et en informatique) (Figure 1.16).

1.4 Présentation des secteurs étudiés⁷¹

1.4.1 Normandie : les falaises de craie (Dieppe, Varengeville-sur-Mer et Sainte-Marguerite-sur-Mer)

1.4.1.1 Contextes géographique et structural

Au nord-ouest de la France, à la terminaison des plateaux d'aspect tabulaire du Pays de Caux et du Vimeu (Bassin parisien), les falaises normandes de Seine-Maritime, hautes en moyenne de 60 à 70 m, s'étendent sur 100 km du cap d'Antifer au sud-ouest, jusqu'au Tréport au nord-est (Figure 1.17).

Les falaises (de quelques mètres à 120 m autour du cap Fagnet) sont constituées de craies à silex, datées du Crétacé supérieur (Mégny et Mégny, 1980 ; Pomerol et al., 1987 ; Mortimore et al., 2004). Sur ce bâti fortement karstifié (Rodet, 1991 ; Costa, 1997 ; Laignel, 1997 ; Duperret et al., 2002) reposent des formations résiduelles à silex, elles-mêmes recouvertes de loess quaternaires (Lautridou, 1985). Les principales déformations tectoniques, de direction NO-SE, ont porté à l'affleurement divers étages géologiques du Crétacé supérieur (du plus ancien au plus récent) : le Cénomaniens⁷², Turonien⁷³, Coniacien⁷⁴, Santonien⁷⁵ et le Campanien⁷⁶. Ces étages sont marqués par de légères variations de faciès et des discontinuités sédimentaires de détail qui engendrent quelques contrastes de résistance subtils (Juignet et Breton, 1992 ; Costa, 1997 ; Laignel, 1997 ; Duperret et al., 2002). De manière générale, la craie est d'autant plus fragile que sa porosité est haute et sa densité faible. En synthèse des différents travaux (Laignel, 1997, 2003 ; Senfaute et al., 2005 ; Costa et al., 2006b), les craies les plus sensibles sont celles du Campanien et du Santonien, et, dans une moindre mesure, le Coniacien. Les craies les plus résistantes sont celles du Cénomaniens puis du Turonien. La fracturation joue également un rôle majeur dans la résistance

⁷¹ Le niveau de détail dans la présentation des trois secteurs étudiés est ajusté en fonction des connaissances nécessaires à la suite du manuscrit.

⁷² Les craies du Cénomaniens affleurent sur quelques mètres à la base des falaises du cap d'Antifer et d'Etretat, ainsi qu'à l'est de Fécamp. Ces dernières sont hétérogènes, parfois riches en éléments détritiques (argiles et quartz) et peuvent être glauconieuses ou noduleuses.

⁷³ L'étage du Turonien est constitué de craies argileuses, grisâtres à blanchâtres, avec des bancs noduleux fréquents, et peu ou pas de silex. Cet étage affleure du cap d'Antifer à Etretat, de Fécamp à Eletot, et de *Puys* (est de Dieppe) au Tréport.

⁷⁴ L'étage du Coniacien affleure entre le cap d'Antifer et Saint-Valéry-en-Caux, ainsi qu'entre Dieppe et Le Tréport.

⁷⁵ Les craies du Santonien sont présentes de Saint-Valéry-en-Caux à *Puys*.

⁷⁶ La craie du Campanien, la plus récente, est peu présente et ne se retrouve qu'entre Quiberville et *Pourville-sur-Mer* (Hautot-sur-Mer).

du matériel, avec un prédécoupage qui peut être favorable à l'instabilité. Des travaux sur la fracturation existent, mais les données sont discontinues et d'échelles variables (Duperret et al., 2004 ; Genter et al., 2004). Au-dessus de ces assises crayeuses, une couverture de sédiments argileux et sableux d'environ 10 à 30 m d'épaisseur, d'âge paléogène (Bignot, 1962), se substitue à l'habituelle formation résiduelle à silex (Laignel, 1997 ; Costa et al., 2006b), notamment au cap d'Ailly et à Sotteville-sur-Mer (Figure 1.17).

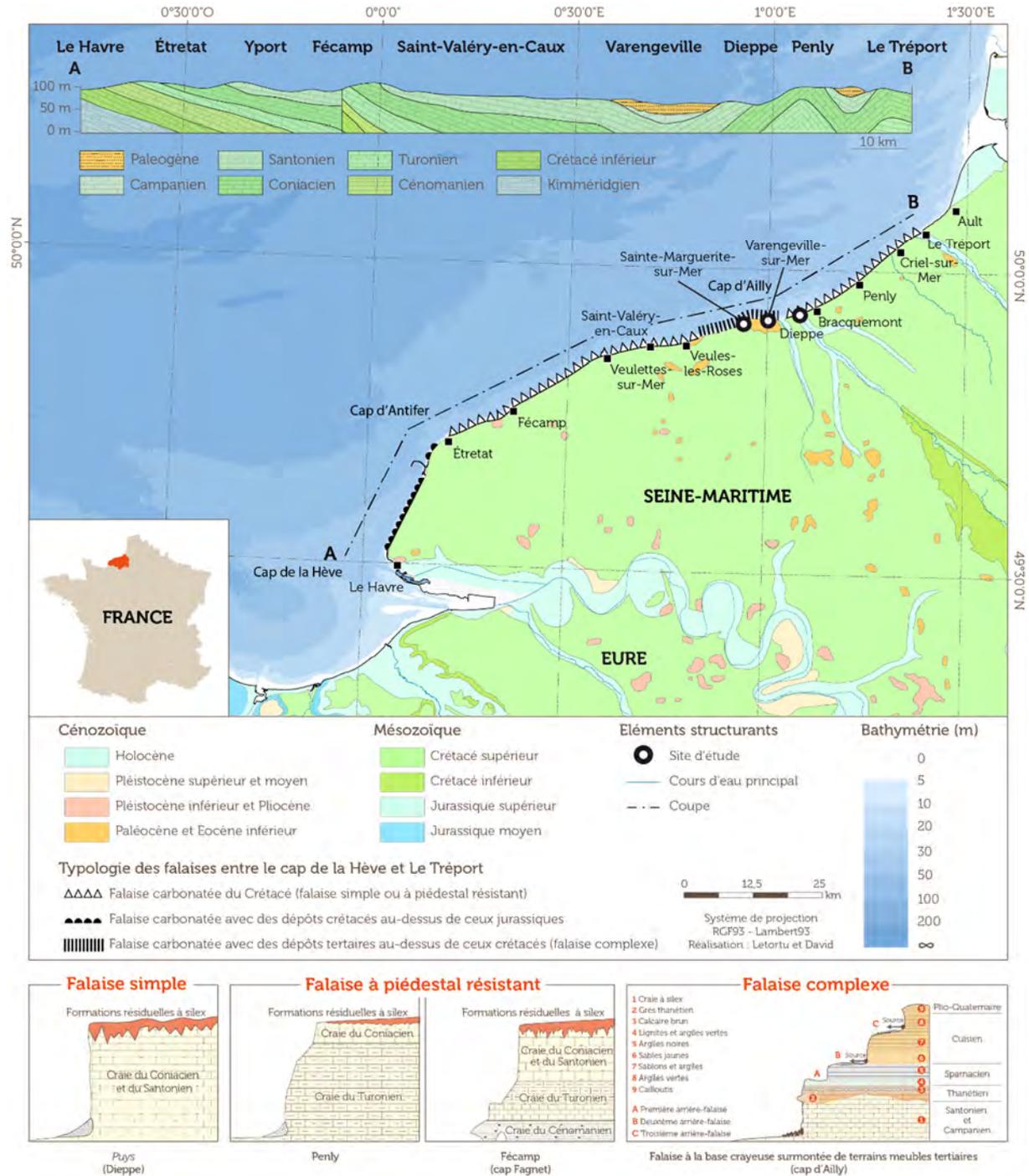


Figure 1.17 : Présentation de la géologie, des types de falaises et de la bathymétrie le long des falaises de Seine-Maritime et les trois sites étudiés (d'après Costa, 1997 ; Letortu, 2013)

Ces variations de résistance entre les étages de craie peuvent être à l'origine d'une érosion différentielle se retrouvant dans le profil plus ou moins vertical des falaises. Trois profils de falaises sont identifiés : 1) la falaise simple (les plus fréquentes, où le Coniacien et le Santonien affleurent), 2) la falaise à piédestal résistant (ressaut basal lié à l'affleurement du Turonien, voire localement le Cénomaniens, située à Etretat, entre Yport et Senneville-sur-Fécamp et entre *Belleville-sur-Mer* (Petit-Caux) et *Mesnil-à-Caux* (Criël-sur-Mer) et les falaises complexes (entre Sotteville-sur-Mer et Hautot-sur-Mer et près de Criël-sur-Mer (*Bois de Cise*)) (Costa, 1997). A leur pied se développe une plate-forme d'érosion marine (de 150 à 700 m de largeur (Costa et al., 2019b ; Duguet, 2019), masquée, en haut de plage, par un cordon de galets de silex. Le linéaire de falaises est entrecoupé par de nombreuses vallées drainées ou sèches perpendiculaires au rivage, protégées à leur débouché par un cordon de galets souvent large (30 m à 100 m de largeur).

Les falaises sont au contact de la Manche, mer épicontinentale caractérisée par un environnement macrotidal de type semi-diurne (9,35 m à Dieppe pour les pleines mers de vives-eaux en cote marine (SHOM⁷⁷, 2020)). La Manche orientale (de la baie de Seine au détroit du Pas-de-Calais) possède des reliefs peu mouvementés et des profondeurs dépassant rarement 50 m. Face aux falaises crayeuses, les fonds sont caractérisés par un substratum rocheux, généralement calcaire, surmonté par des sédiments meubles de faible épaisseur (sauf au Tréport où les ridins peuvent atteindre 8 m). Du large vers les fonds de 6 à 10 m, la couverture meuble a un gradient d'affinement en lien avec les champs de courants de marée, allant des cailloutis (de l'est d'Antifer à l'est de Saint-Valéry-en-Caux) aux sables zoogènes graveleux (de l'est de Saint-Valéry-en-Caux à l'est de Penly), aux sables grossiers (2 à 0,5 mm, de l'est de Penly à l'est de Criël-sur-Mer) puis de sables fins (inférieurs à 0,5 mm, de l'est de Criël jusqu'en baie de Somme) (Augris et al., 2004).

1.4.1.2 Facteurs continentaux, marins et anthropiques en présence

Située à proximité du 50° parallèle nord, la station de Dieppe possède un climat tempéré océanique. Les températures moyennes en hiver sont positives (5,2 °C en janvier et février), avec une moyenne de 30 jours de gel (la température minimale pouvant atteindre -16,6 °C en février) et, en été, elles sont douces (17,4 °C en août). Le total de précipitations est de 798,2 mm. Elles sont assez bien distribuées tout au long de l'année avec 130 jours de pluie (minimum mensuel de 51,5 mm en février et un maximum de 89,8 mm en octobre), associées au passage des perturbations, très fréquentes à ces latitudes moyennes. Les pluies quotidiennes peuvent atteindre 100,8 mm en août lors d'épisodes orageux. Les vents sont fréquents et violents (avec un vent moyen de 5,1 m/s), notamment de novembre à février (66 % du nombre moyen de jours avec rafales de plus de 16 m/s), de direction dominante d'ouest (de sud-ouest à nord-ouest) (Météo-France, 2019a).

Conformément aux données de vent, les houles significatives les plus fréquentes et les plus fortes apparaissent entre octobre et mars. Elles sont principalement d'ouest à sud-ouest puis de nord-ouest, alors que les houles de nord et de nord-est sont plus faibles. Au regard des données de houle, le sens prédominant des transits sédimentaires s'effectue vers le nord-est (65 % du temps contre 35 % du temps vers le sud-ouest). La houle de période de retour annuelle atteint 4,3 m à Dieppe. La houle $H_{1/3}$ reste inférieure à 1 m, pendant 70 % du temps et reste inférieure à 2 m pendant 95 % du temps. La houle est supérieure à 3 m uniquement 0,3 % du temps, soit environ 25 h/an (Teisson, 1986). Les périodes de houle sont relativement faibles en raison de fetchs courts, induits par le caractère épicontinental et semi-fermé de la Manche. Les

⁷⁷ Service hydrographique et océanographique de la Marine

conditions d'agitation ne semblent pas pouvoir mettre en mouvement les galets en dessous du zéro hydrographique (seulement les sables grossiers) (LCHF⁷⁸, 1972 ; Augris et al., 2004). L'alimentation actuelle des plages de galets ne peut se faire que par l'érosion des falaises.

Les actions humaines ont modifié la configuration naturelle avec l'implantation d'infrastructures (poids, vibrations, modifications des écoulements, etc.). Elles sont préférentiellement installées dans les vallées et les valleuses (pour un accès aisé à la mer) et parfois aussi en sommet de falaise, de manière imprudente comme sur la *Côte aux Hérons* à Dieppe ou à Criel-sur-Mer. En pied de falaise, les ouvrages tels que les épis et les jetées portuaires perturbent ou bloquent le transit sédimentaire SO-NE de haut de plage. Le stock et la distribution spatiale des galets ont été/sont fortement modifiés à la côte et avant-côte par 1) le ramassage de galets et des graves de mer 2) les ouvrages précédemment cités auxquels s'ajoutent les centrales nucléaires gérées par EDF (Paluel et Penly) et les descentes à la mer. L'absence ou la faiblesse du cordon de galets en pied de falaise est susceptible de modifier l'efficacité des actions marines au pied des abrupts crayeux, et par conséquent l'intensité et les modalités du recul des falaises (Costa, 1997 ; Costa et al., 2006a ; Letortu et al., 2014a).

Les falaises de craie sont souvent connues dans le monde pour reculer rapidement, avec des vitesses annuelles de recul dépassant parfois plusieurs décimètres (Woodroffe, 2002 ; Prémaillon et al., 2017). La dynamique régressive moyenne entre 1966 et 2008 du cap d'Antifer au Tréport a été estimée à 0,15 m/an (Letortu et al., 2014a). Cependant, il existe une forte variabilité spatiale induite par des phénomènes de lithodépendance et/ou l'influence d'obstacles au transit des galets (Costa, 1997 ; Costa et al., 2003, 2006a ; Letortu, 2013 ; Letortu et al., 2014a ; Costa et al., 2019b). En opposition à la « stabilité » du paysage d'Etretat (vitesses annuelles de recul estimées à 0,09 m/an (Letortu et al., 2014a), Figure 1.18), d'autres secteurs reculent très vite comme autour du cap d'Ailly (localement 0,80 m/an (Letortu et al., 2014a), Figure 1.19).

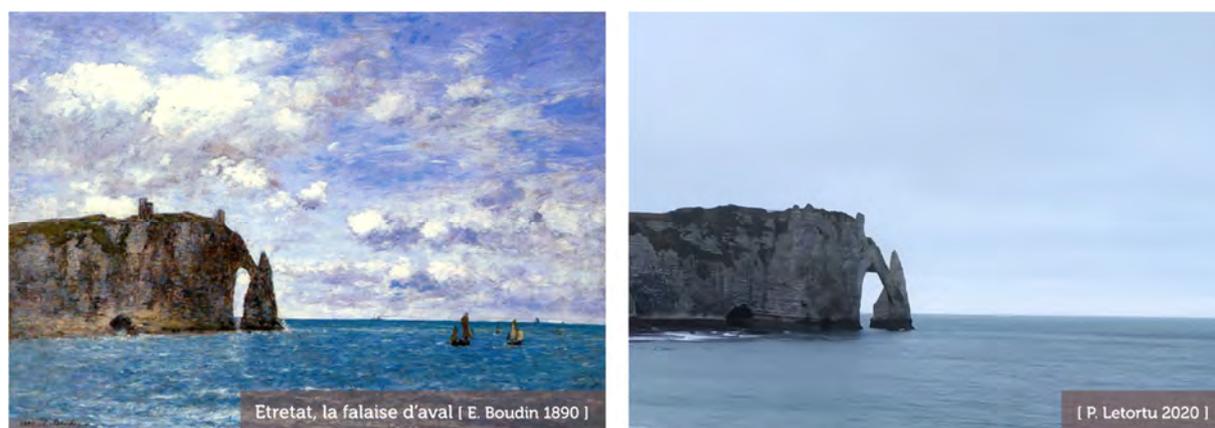


Figure 1.18 : « Stabilité » du paysage d'Etretat (à gauche, la peinture d'E. Boudin en 1890 ; à droite, la photographie prise en janvier 2020)

⁷⁸ Laboratoire central d'hydraulique de France



Figure 1.19 : Instabilité du paysage de Varengeville-sur-Mer avec son église (à gauche, la peinture de C. Monet en 1882 ; à droite, la photographie prise en 2021)

Cependant, ces vitesses moyennes annuelles de recul sont issues de l'interprétation de la position du « haut de falaise abrupt crayeux », et non de l'ensemble du front de falaise, et ce, avec une erreur pluricentimétrique à pluridécimétrique. Par ailleurs, temporellement, l'interprétation de clichés aériens, espacés de plusieurs années, ne permet pas toujours de fournir des informations sur les modalités d'évolution des falaises (mouvement de masse ou mouvement individuel ; départ de matériaux initialement en pied de falaise puis affectant l'ensemble de l'abrupt, etc.), ni même sur les rythmes d'où l'importance d'étudier l'objet « falaise » avec des échelles spatiales et temporelles emboîtées et selon des points de vue variés (vertical, horizontal, oblique et interne, Figure 1.16).

1.4.1.3 Dieppe et Varengeville-sur-Mer pour le suivi diachronique de l'érosion du front de falaise

Afin d'étudier les différences de vitesses, rythmes et modalités d'érosion et de faire la part respective des agents marins et continentaux dans l'érosion des falaises, deux sites voisins aux contextes météorologiques et lithologiques proches (abrupts taillés dans les craies coniaciennes et santoniennes), mais soumis (ou non) aux facteurs marins, ont été choisis (Figure 1.20) :

1) le premier site se trouve en contexte de falaise morte, taillé dans du Coniacien (falaise simple, Figure 1.17), affecté uniquement par les agents et les processus continentaux. La falaise est devenue morte lors de la construction d'un terre-plein au début des années 1980 pour le débarcadère du ferry transmanche et le stockage des graves de mer ;

2) le second site se situe à 6 km au sud-ouest du premier, en contexte de falaise vive, et évolue donc sous l'action combinée des agents continentaux et marins.

Le front de falaise morte est localisé à Dieppe. Ce front vertical (falaise simple) a été subdivisé en deux, en raison de l'orientation différente des fronts de falaise :

- Dieppe 1 ouest (1 O) correspond à un linéaire de 45 m (hauteur de 35 m), et est orienté 310°N (49°56'00" N ; 01°05'30" E) (Figure 1.20C) ;

- Dieppe 2 nord (2 N) correspond à un linéaire de 80 m environ (hauteur de 35 m), dont l'orientation est 010°N (49°56'01" N ; 01°05'35" E) (Figure 1.20C).

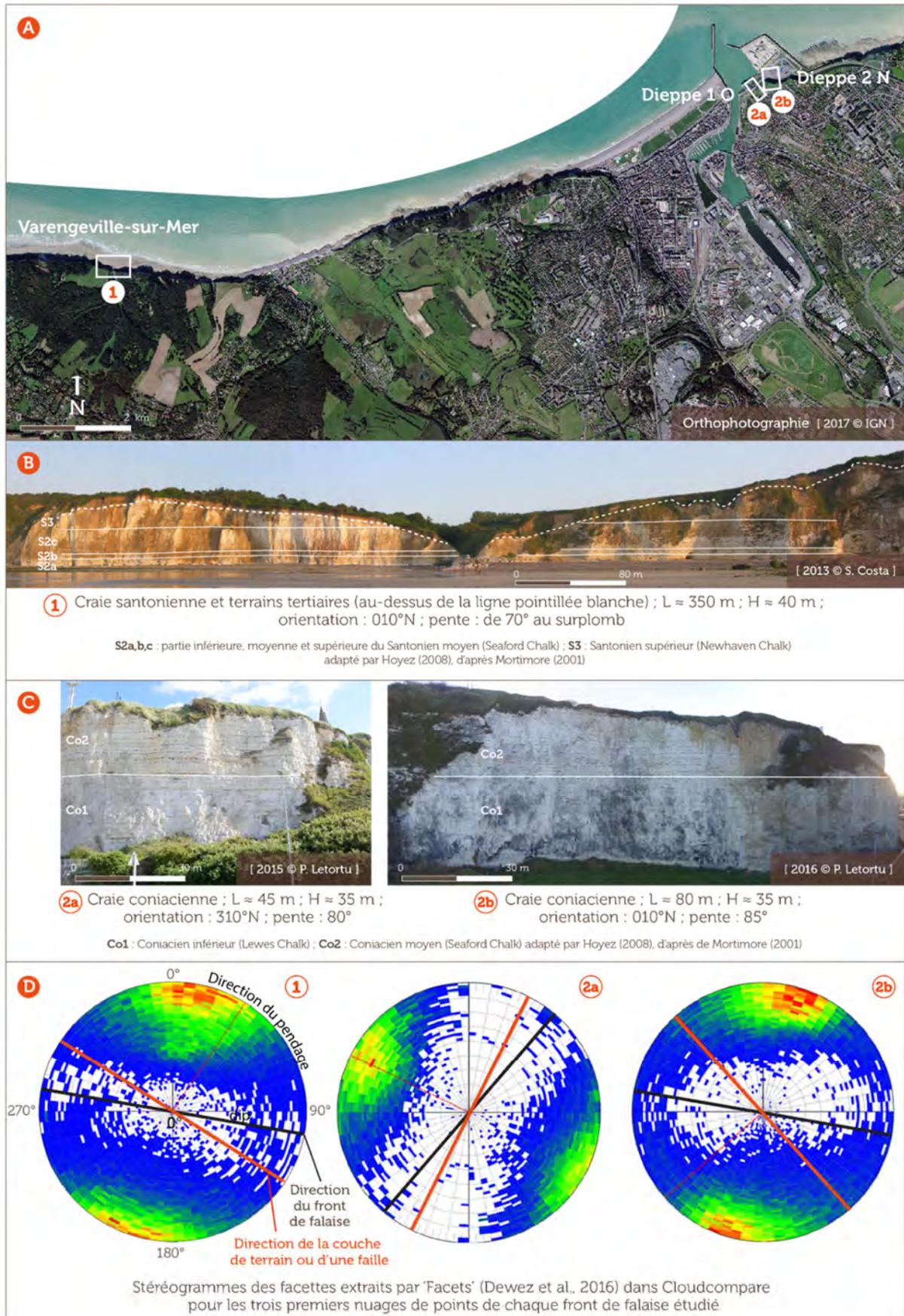


Figure 1.20 : Caractéristiques des sites étudiés dans le cadre du suivi de l'érosion du front de falaise : A) localisation, B) et C) lithologie, longueur (L), hauteur (H), orientation et pente, D) fracturation (d'après Mortimore, 2001 ; Hoyez, 2008 ; Dewez et al., 2016 ; Letortu et al., 2019)

Le second site choisi est situé au cap d'Ailly. Il est caractérisé par des falaises vives constituées de craies santoniennes et des terrains tertiaires composés de sables et d'argiles. Il s'agit d'une falaise complexe avec des nappes perchées dans les terrains tertiaires sus-jacents (Figure 1.17). Dans le détail, ce front de falaise (de 70° au surplomb) se trouve de part et d'autre de la vailleuse du *Petit Ailly* à Varengeville-sur-Mer (linéaire étudié de 250 m, de hauteur maximale de 40 m, d'exposition générale 010°N) (Figure 1.20B).

Sur les sites étudiés (qui font partie du suivi SNO DYNALIT depuis 2014), le dispositif tectonique régional (N110-N130E) est apparent dans les stéréogrammes, avec des diaclases à Varengeville-sur-Mer et Dieppe 2) N (Figure 1.20D). A Dieppe 1 O, l'orientation est d'environ N025E, ce qui correspond au jeu de fractures secondaires observé par Genter et al. (2004). Les pendages des couches sont très faibles (0,5-1 %) (Bignot, 1971). Ces orientations des fractures et la lithologie donnent lieu à des chutes avec un type de rupture vertical dominant dans les deux sites. Peu fréquemment, un type de rupture par glissement peut se produire à Varengeville-sur-Mer entre le Santonien inférieur-moyen et le Santonien supérieur (Duperret et al., 2004).

1.4.1.4 Sainte-Marguerite-sur-Mer : le second site d'instrumentation multiparamètre et continue

Le site de la falaise crayeuse de Sainte-Marguerite-sur-Mer (49°54'34" N, 0°56'18" E, orientation NO, Figure 1.21) a été sélectionné pour mener la deuxième instrumentation continue et multiparamètre (après Plougonvelin, Finistère) afin de mieux comprendre les contributions des agents et des processus dans la fatigue et la rupture des falaises. Les raisons de sa sélection sont les suivantes (Letortu et al., 2022) :

- il est situé au cap d'Ailly, lieu très actif en termes d'érosion (Costa et al., 2004 ; Letortu et al., 2014a, 2014b ; Costa et al., 2019b) où l'évolution des falaises a été de plus en plus surveillée pour acquérir plus de connaissances sur l'érosion (par exemple, Prêcheur, 1960 ; Evrard et Sinelle, 1987 ; Mortimore et al., 2004 ; Letortu et al., 2015c, 2019) ;

- le pied de la falaise est accessible par la plage voisine de Sainte-Marguerite-sur-Mer (au débouché de la Saâne), tandis que le sommet de la falaise l'est par un stationnement proche, avec la possibilité de traverser un champ cultivé à l'aide d'un véhicule tout terrain. Il existe également un chemin de randonnée en sommet de falaise ;

- les autorisations légales pour effectuer le suivi ont été obtenues⁷⁹ (autorité locale, direction départementale des territoires et de la mer (DDTM), propriétaire de la parcelle et agriculteur).

⁷⁹ L'idéal aurait été d'installer cette instrumentation à Varengeville-sur-Mer, au *Petit Ailly*, où le suivi de l'érosion a débuté en 2010. Malheureusement, aucun propriétaire n'a souhaité accueillir l'instrumentation.

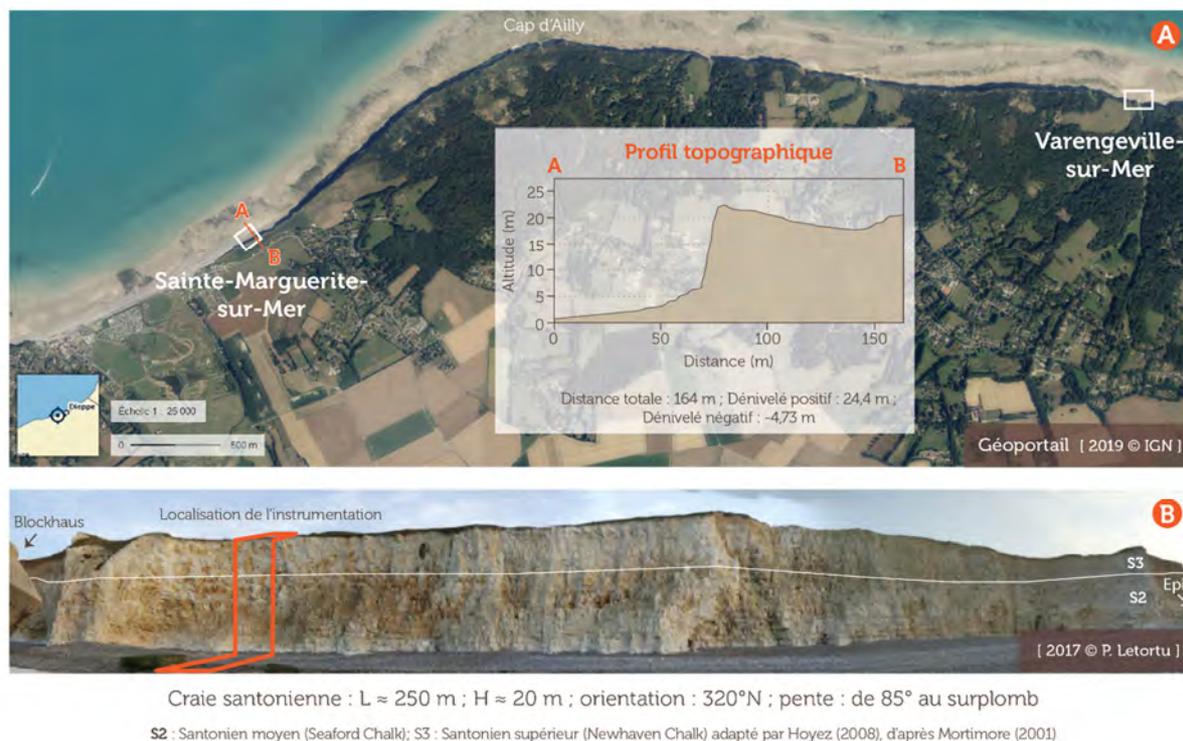


Figure 1.21 : Présentation du site de l'instrumentation de Sainte-Marguerite-sur-Mer : A) localisation (par rapport à Varengeville-sur-Mer) et profil topographique, B) lithologie, longueur (L), hauteur (H), orientation et pente (d'après (Mortimore, 2001 ; Hoyez, 2008))

Le suivi des paramètres jugés responsables de la fatigue et la rupture de la falaise s'est concentré sur une section de 225 m de long (d'une vingtaine de mètres de haut environ), située en aval-dérive d'un épi (ce dernier a provoqué la formation d'un pointement rocheux en amont-dérive par érosion différentielle) et d'un ancien blockhaus (qui est littéralement planté dans la plate-forme). Ces deux éléments ont affecté la morphologie de la plage et de la falaise le long de la côte (Figure 1.21B). La plage de galets au pied de la falaise est étroite (environ 30 m en aval-dérive de l'épi contre 80 m en amont-dérive) et peu épaisse (différence de hauteur des galets d'environ 4 m par rapport à l'amont-dérive).

La craie de la falaise est particulièrement altérée (par des processus chimiques, biologiques et mécaniques qui ont conduit à la fracturation et à la rupture de la roche) à cet endroit (grade 3 à 4 « *weathered rock state* » sur l'échelle de l'ISRM⁸⁰ (WSDOT⁸¹, 2021)) montrant un réseau dense de petites fractures en surface avec un espacement de 10 à 30 cm (de « *closely spaced* » à « *discontinuity spacing* » sur l'échelle de l'ISRM (WSDOT, 2021)).

La topographie du site en sommet de falaise est particulière et a un impact important sur les caractéristiques de la nappe phréatique à cet endroit. Alors que la pente du plateau s'incline globalement vers la mer, elle montre localement une inversion près de la côte avec une pente montante vers la mer (profil topographique de la Figure 1.21A). De plus, il s'agit d'une pente plus douce, orientée vers le sud-ouest, le long de la côte. Cette topographie est donc associée à un système de drainage (orienté parallèlement au bord de la falaise) avec un petit ruisseau intermittent situé à environ 60 m du bord de la falaise.

⁸⁰ *International society of rock mechanics*

⁸¹ *Washington state department of transportation*

1.4.2 Bretagne : les falaises d'orthogneiss à Plougonvelin et la côte de Guissény

1.4.2.1 Contextes géographique et structural

Avec ses 4 000 km de côtes (sur la base du trait de côte de la France métropolitaine du SHOM, en tenant compte des littoraux des îles, îlots et estuaires), la péninsule bretonne s'étend de la baie du Mont-Saint-Michel au nord-est à l'estuaire de la Vilaine, au sud. Les falaises rocheuses occupent près de 42 % de ce linéaire (Hénaff, 2003 ; Hénaff et al., 2018).

La péninsule constitue l'extrémité occidentale émergée du Massif armoricain (117 m, mais aux modèles très variés avec 384 m aux monts d'Arrée), dont l'histoire géologique longue et variée aboutit à des caractéristiques lithostructurales complexes (deux orogénèses majeures : cadomienne (Protéozoïque et Cambrien) et varisque (Dévonien et Carbonifère)). Depuis cette époque, le Massif armoricain n'a pas connu de tectogenèse importante, mais des rejeux post-hercyniens sont intervenus lors de l'orogénèse alpine et pyrénéenne associée à l'ouverture de l'Atlantique Nord. Le tracé très découpé de la côte s'explique notamment par une phase d'érosion continentale et marine au cours des 300 derniers millions d'années (Guilcher, 1948 ; Garreau, 1979 ; Balleve et al., 2013). Lors du Quaternaire, avec l'alternance de périodes froides et d'interglaciaires, les vallées s'encaissent profondément, car le niveau marin est bas, et il y a la mise en place de dépôts soliflués périglaciaires (head) et de sédiments apportés par le vent (loess), venant recouvrir l'ensemble des reliefs (d'où de nombreuses falaises meubles en Bretagne, 20 % du linéaire côtier (Hénaff, 2003)). Le socle de ce Massif armoricain est fait de roches sédimentaires, datées de la fin du Précambrien et d'une couverture paléozoïque, qui se prolonge jusqu'au milieu de la Manche occidentale et jusqu'à la plaine abyssale de l'Atlantique. La péninsule armoricaine est principalement datée de l'Hercynien (quelques lambeaux de sols icartiens demeurent localement).

Trois grands ensembles constituent le littoral breton, correspondant au système de failles (cisaillement nord armoricain, cisaillement sud armoricain et la faille coulissante de la pointe du Raz à Lorient) : 1) la côte nord rocheuse soulevée (déformations tectoniques entre la fin du Tertiaire et le début du Quaternaire, liées à l'orogénèse alpine) où alternent des granites et des roches métamorphiques ; 2) la pointe ouest constituée surtout de roches sédimentaires métamorphisées mais pas uniquement (orthogneiss de Brest, etc.) ; 3) la côte méridionale granitique qui s'affaisse en lien avec le mouvement de bascule observé au nord où les formes d'accumulation dominant (Costa et Suanez, 2013 ; Basara, 2019) (Figure 1.22). Nos sites bretons d'étude se localisent sur la côte nord et la pointe ouest, dont les principales caractéristiques sont décrites ci-après.

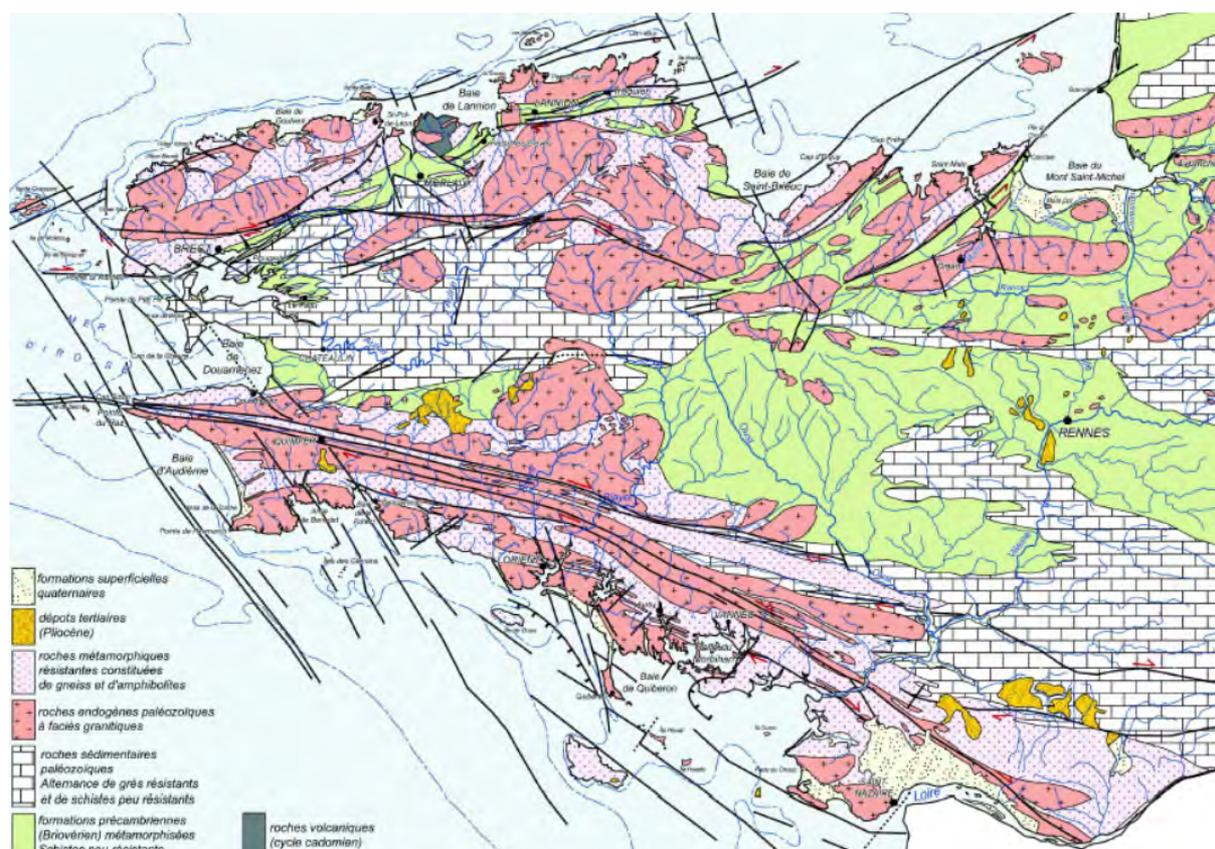


Figure 1.22 : Carte géologique simplifiée du Massif armoricain (France du Nord in Jabbar, 2016)

Les promontoires (plateau du Léon, presqu'île de Crozon, cap Sizun) et les profonds rentrants avec les baies d'Audierne et de Douarnenez (dépressions dans les formations schisteuses ou grésoschisteuses briovériennes) et la rade de Brest (dépression dans les formations primaires) soulignent le travail de l'érosion différentielle dans les alignements E/O de granites, grès, quartzites et schistes, prolongés par les écueils et les îles de la mer d'Iroise (Peulvast et al., 2013 ; CEREMA, 2021a) (Figure 1.22, Figure 1.23). Sur la côte nord, au pied des falaises peu élevées (inférieures à 100 m, à l'exception de Plouha et des caps d'Erquy et de Fréhel) se développe une plate-forme à écueils (Figure 1.23), relativement large (de 5-6 km en moyenne), alternant avec de petites cuvettes (CEREMA, 2021b). Cette plate-forme est masquée, en haut de plage, par un cordon de sable ou de galets, issus du déblaiement et du remaniement des formations meubles (poches d'altérites et dépôts périglaciaires). Sur la pointe ouest, les falaises sont de tendance granitique (gneissique) à schisteuses souvent coiffées de dépôts soliflués périglaciaires (head) ou de limons sur quelques mètres d'épaisseur, alternant avec de nombreuses baies, anses et plages, entaillées dans des formations plus « tendres » de gneiss altérés, schistes ou micaschistes. La zone côtière de la mer d'Iroise se caractérise par la présence d'une zone littorale de basses terres, d'une zone pré-littorale à écueils et îles, en liaison avec une plate-forme sous-marine recouverte de sédiments secondaires et tertiaires (CEREMA, 2021a).



Figure 1.23 : Carte morphologique du littoral de la Bretagne (d'après Bodéré et Pourinet (2001), modifié par Costa et Suanez, 2013)

Cette histoire complexe explique les variations lithologiques des falaises au nord et sur la pointe ouest (particulièrement vrai le long de la pointe ouest avec l'exemple de l'anse du Veryac'h à Camaret-sur-Mer⁸²), mais aussi en types (falaises meubles et falaises rocheuses, et dans les falaises rocheuses : falaises plongeantes, falaises à plate-forme d'érosion marine (à écueils sur la côte nord)) et en dynamique (falaise vive, fausse falaise, falaise morte). La fracturation des roches y est également très variable. Le linéaire de falaises est entrecoupé par des vallées drainées, protégées à leur débouché par un cordon souvent étroit (sauf quand des ouvrages y ont été implantés).

Les falaises sont au contact de la Manche au nord et de la mer d'Iroise à l'ouest, mers épicontinentales caractérisées par un environnement macrotidal de type semi-diurne (8,45 m à Brignogan-Plage et 6,65 m au Trez-Hir à Plougonevelin pour le niveau des pleines mers de vives-eaux en cote marine (SHOM, 2020)). La Manche occidentale présente, dans la partie immergée de la plate-forme, des cuvettes avec des dépôts de faciès néritique ou continental et de sables et galets. Les écueils montrent une érosion sommitale en boules (formations granitiques) ou plus déchiquetée (schistes, gneiss, etc.). Des sillons souvent étroits et à versants raides entaillent la plate-forme à écueils (notamment au niveau des abers). Les plus grands morcellent le talus sous-marin qui, par endroit, peut disparaître pour évoluer en pente douce (baie de Lannion ou de Goulven) (Battistini et Martin, 1956 ; CEREMA, 2021b). Les fonds de la mer d'Iroise alternent entre un réseau de vallées de roches tendres ou des zones de fractures et des hauts fonds de roches dures (chaussée des Pierres

⁸² Ces falaises constituent la coupe continue la plus complète dans l'Ordovicien et le Silurien du Massif armoricain avec près de 50 millions d'années d'histoire sédimentaire établie dans des fonds marins (il y a 475 millions d'années à 410 millions d'années).

Noires, chaussée de Sein) ou des accumulations de sables organogènes (Hinschberger et Pauvret, 1968 ; CEREMA, 2021a).

1.4.2.2 Facteurs continentaux, marins et anthropiques en présence

Située au 48° parallèle nord, la station de Brest bénéficie d'un climat tempéré océanique. Les températures moyennes en hiver sont positives (6,9 °C en janvier et 6,8 °C en février) avec une moyenne de 16 jours de gel (la température minimale pouvant atteindre -14,0 °C en janvier) et, en été, elles sont douces (17,0 °C en août). Le total de précipitations est de 1210 mm, et celles-ci sont assez bien distribuées tout au long de l'année avec 159 jours de pluie (minimum de 59,8 mm en juin et un maximum de 147,8 mm en décembre). Les pluies quotidiennes peuvent atteindre 72 mm en juillet. Les vents sont fréquents et violents avec un vent moyen de 4,3 m/s, notamment de décembre à avril (59 % du nombre moyen de jours avec rafales de plus de 16 m/s), de direction dominante d'ouest (de sud-ouest à nord-ouest) (Météo-France, 2019b).

Les conditions de houle, simulées par le modèle de vagues ANEMOC⁸³ (du 01/01/1979 au 01/01/2011), au large de la Bretagne montrent un quadrant sud-ouest à nord-ouest avec une diminution progressive de la hauteur significative des houles le long de la côte nord (entre 10 et 12 m au niveau de la pointe de Corsen, à 4 à 6 m au niveau de la baie de Saint-Brieuc). Les houles inférieures à 0,25 m sont très rares (< 1 %). Cet amortissement des houles est dû à la présence de la plate-forme continentale de la Manche et la réduction du fetch. Au niveau de la mer d'Iroise, les houles sont de composante ouest aux Pierres Noires (jusqu'à 6 à 8 m, < 1 % des houles inférieures à 0,25 m), puis sud-ouest au Toulinguet (2 à 4 m, 9,2 % des houles inférieures à 0,25 m), avant l'entrée en rade de Brest. Cette dernière est en position d'abri entre les pointes du Conquet et du Raz et les nombreuses îles qui réduisent le fetch. L'amortissement des houles en rade est très net : 85 % des houles à Brest ont une hauteur significative inférieure à 0,25 m (CEREMA, 2021b, 2021a). Comme les conditions d'agitation sont très variées, cela implique une forte variabilité de la mobilité des sédiments.

Comme en Normandie, les actions humaines ont modifié les configurations naturelles avec l'implantation d'infrastructures préférentiellement sur les côtes basses et vallées, et parfois aussi en sommet de falaise. Le stock et la distribution spatiale des sédiments ont été fortement modifiés à la côte (ouvrages de défense contre la mer) et à l'avant-côte. Par ailleurs, la surfréquentation dégrade localement les espaces, notamment les cordons dunaires. L'absence ou la faiblesse du cordon en pied de falaise est susceptible de modifier l'efficacité des actions marines au pied des falaises.

Les falaises bretonnes renvoient l'image d'Epinal de falaises granitiques qui ne bougent pas ou très peu à l'échelle humaine. Mais la lithologie variée (schistes, grès, quartzites, granites, entourés ou non d'auréoles de métamorphisme de contact résistantes) ne peut se permettre cette simplification, notamment dans la pointe ouest. Des éboulements y sont fréquents⁸⁴ et le recul des falaises meubles menace des enjeux comme à Telgruc-sur-Mer avec la déviation du GR 34⁸⁵ (Basara, 2019). Pour les côtes d'accumulation, les évolutions sont très variables spatialement et temporellement. Par exemple, la partie est de la plage du Vougo, à Guissény, montre des phases d'érosion très fortes (jusqu'à -14 m après les tempêtes de l'hiver 2013-2014),

⁸³ L'atlas numérique d'états de mer océaniques et côtiers fournit des informations sur la hauteur et la direction des houles.

⁸⁴ <https://www.letelegramme.fr/bretagne/eboulements-de-falaises-les-derniers-cas-bretons-06-12-2020-12667958.php>

⁸⁵ <https://www.letelegramme.fr/finistere/telgruc-sur-mer/a-telgruc-sur-mer-le-chemin-communal-enfin-debroussaille-a-hauteur-de-trez-bihan-17-04-2021-12736697.php>

mais une stabilité globale, tandis que la partie occidentale est globalement en accrétion. La plage de Porsmilin (sur la commune de Plougonvelin et Locmaria-Plouzané), quant à elle, montre une érosion chronique (Stéphan et al., 2019).

1.4.2.3 Plougonvelin : le premier site d'instrumentation multiparamètre et continue

Afin d'appréhender le rôle des facteurs et des processus marins et continentaux dans l'évolution de la microfracturation des falaises, nous nous sommes intéressés au littoral finistérien de Plougonvelin (48°21'16" N ; 04°40'54" O ; plage de Porsmilin), dans l'anse de Bertheaume, à proximité de la rade de Brest. Ce site-atelier fait l'objet d'un suivi morphologique et topobathymétrique coordonné par F. Floc'h (Geo-Ocean, UBO) au sein de l'observatoire du domaine côtier⁸⁶ et du SNO DYNALIT⁸⁷. Il s'agit d'une plage sableuse de fond d'anse, encadrée par deux éperons rocheux. En contexte macrotidal, cette plage orientée ONO-ESE est adossée latéralement à des falaises à plate-forme d'érosion marine. La partie centrale de la plage correspond à l'embouchure d'un petit fleuve côtier et est séparée de la zone humide (située en amont) par un ancien cordon de galets aménagé avec un remblai. Les falaises, d'une hauteur moyenne de 20 m, sont taillées dans l'orthogneiss de Brest, avec des filons de granodiorite de Trégana, et de quartz. Ces falaises rocheuses présentent une certaine susceptibilité à l'érosion en raison : 1) de la forte altération des roches et l'existence de nombreuses failles et diaclases, 2) de la houle, avec une hauteur significative moyenne de 0,5 m montant à 0,8 à 1,5 m lors de périodes de tempête (Dehouck et al., 2009) et pouvant atteindre jusqu'à 4 m dans des conditions météo-marines exceptionnelles. L'érosion des falaises menace actuellement des enjeux tels que le très fréquenté GR 34 (60 000 passages par an, d'après le compteur installé à la batterie de Toul Logot par la communauté de communes du Pays d'Iroise (CCPI)) (Figure 1.24).

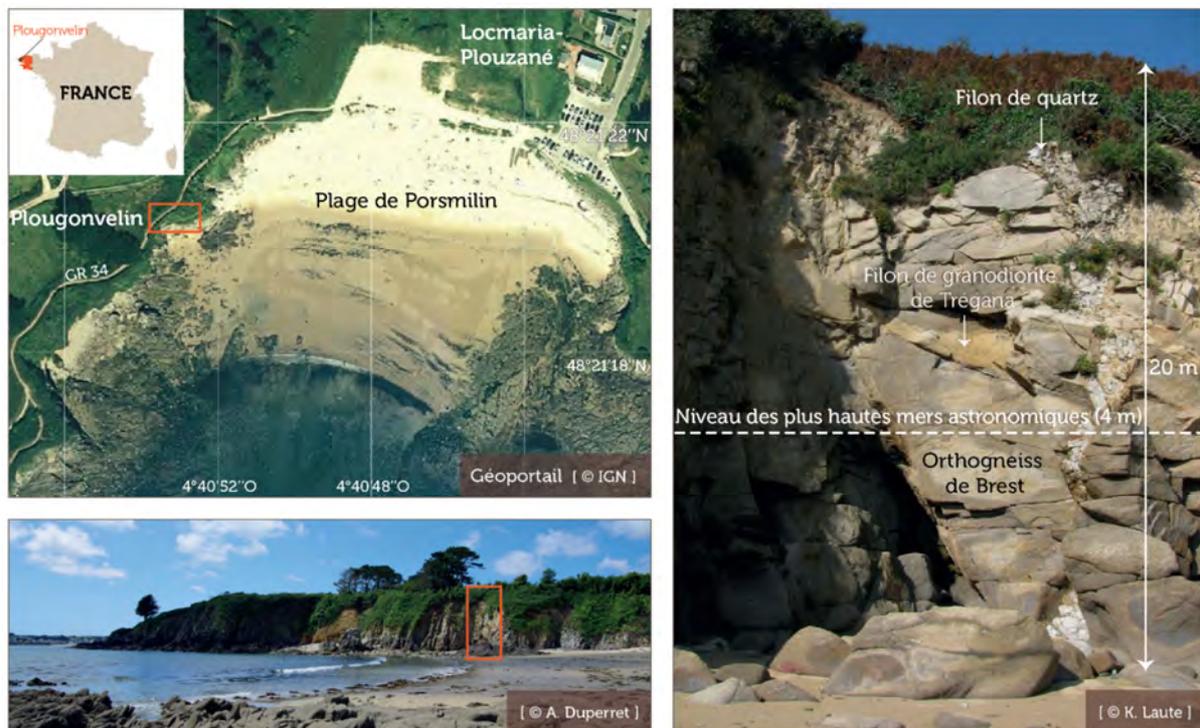


Figure 1.24 : Localisation de la falaise instrumentée à Plougonvelin (Finistère)

⁸⁶ <https://www-iuem.univ-brest.fr/observatoire/observation-cotiere>

⁸⁷ <https://www.dynalit.fr/fr>

1.4.2.4 Guissény pour le suivi citoyen des aléas côtiers

La commune de Guissény se situe à la terminaison septentrionale du plateau du Léon (qui domine de plus de 50 m la Manche). Cette commune, aux côtes découpées et d'orientations diverses, est soumise aux aléas « érosion côtière » et « submersion marine » (Suanez et al., 2008 ; Blaise, 2017 ; Stéphan et al., 2019 ; <https://www.clcl.bzh/environnement/espaces-nat/240-prevention-des-inondations/387-atlas-des-risques-littoraux>) avec l'alternance de côtes basses sableuses (le cordon dunaire du Vougo s'étire sur environ 2 km), de falaises vives et mortes (meubles et rocheuses), avec en contrebas une large plate-forme à écueils (Figure 1.25). À l'est se trouve l'estuaire du Quillimadec dont le tracé a fortement évolué puisqu'il débouchait avant à la plage du Vougo (Suanez et al., 2008). Caractéristique de l'aménagement littoral français, les zones basses étaient autrefois des marais maritimes. Ces derniers ont été drainés et poldérisés pour des raisons économiques (gain de terres agricoles fertiles) et sanitaires (moustiques). Les digues, construites au XIX^e siècle pour éviter les incursions marines, ont permis de cultiver ces terrains, puis avec le « désir du rivage » (Corbin, 1988), ils ont parfois été transformés en parcelles habitées (Poncet, 1984 ; Hallégouët et al., 1992 ; Verger et Ghirardi, 2009). Commune rurale (2 038 habitants en 2019, d'après l'INSEE⁸⁸), l'urbanisation a été forte près de la mer, notamment sur la rive gauche de l'estuaire du Quillimadec et derrière la digue du Curnic (zone poldérisée et urbanisée menacée par l'érosion côtière et la submersion marine).

D'après le plan de prévention du risque d'inondation par submersion marine (PPRSM), Guissény est une des communes finistériennes les plus exposées à l'aléa submersion marine avec huit constructions en zone rouge (aléas les plus forts (exception faite des sites largement urbanisés susceptibles de relever du zonage bleu- inconstructible)) et 121 en zone bleue (secteurs naturels ou urbanisés, en tout ou partie, connaissant les aléas moyen ou faible), principalement à proximité de l'étang lagunaire du Curnic (Figure 1.25).

Les scientifiques de l'UBO sont nombreux à travailler sur cette commune. Certains sites font partie de l'observatoire du domaine côtier de l'IUEM (plage du Vougo suivie depuis 2004 par S. Suanez), de DYNALIT et de l'observatoire des risques côtiers OSIRISC⁸⁹.

⁸⁸ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6005800?geo=COM-29077>

⁸⁹ L'observatoire OSIRISC s'appuie sur diverses initiatives de l'équipe pour diffuser et faire avancer la connaissance sur les risques côtiers : 1) le site web risques côtiers (<https://www.risques-cotiers.fr/>), 2) le jeu sérieux et les sciences citoyennes sur les aléas et risques côtiers, 3) le dGPS à bas coût Centipède (<https://www.risques-cotiers.fr/connaître-les-risques-cotiers/connaître-les-aleas/centipede/>), 4) le partenariat Litto'Risques avec l'UBO, le CEREMA et le Conseil départemental du Finistère pour apporter des appuis méthodologique, scientifique et technique sur la gestion des risques littoraux d'érosion et de submersion aux collectivités locales (<https://www.risques-cotiers.fr/connaître-les-risques-cotiers/projets/littorisques/>), 5) le déploiement de la méthode OSIRISC à l'Ultra-marin (Convention UBO - DEAL Réunion sur l'observatoire du littoral de La Réunion) et à l'international avec le projet européen AGE0 (<https://www.risques-cotiers.fr/connaître-les-risques-cotiers/projets/ageo/>) et le projet franco-québécois ARICO (<https://www.risques-cotiers.fr/connaître-les-risques-cotiers/projets/arico/>).



Figure 1.25 : Carte géomorphologique du site d'étude (modifié de Suanez et al., 2012, d'après Hallégouët, 1971 et Bodéré et al., 1983)

Face aux risques côtiers, accentués par le changement climatique, les gestionnaires et les élus de la commune et son EPCI⁹⁰ à savoir la communauté de communes Lesneven côte des légendes (CLCL) sont engagés dans de nombreuses démarches comme la stratégie locale de gestion intégrée du trait de côte (Figure 1.26). De nombreuses actions d'information et de sensibilisation des citoyens aux risques côtiers y sont présentes. Des documents comme l'atlas des risques littoraux, les bons gestes face aux risques, des modèles 3D de l'élévation future du niveau de la mer, ainsi que des retransmissions de conférences grand public (« La mer monte ! ») sont disponibles en libre accès sur le site internet de la communauté de communes⁹¹. Ce contexte en fait un terreau favorable pour initier des suivis citoyens.

Programme d'action de la stratégie locale de gestion intégrée du trait de côte (SLGITC) de la Communauté de communes Lesneven Côte des Légendes (CLCL)

AXE 0 : GOUVERNANCE DE LA STRATEGIE SLGITC

- ACTION N°1 : ANIMATION DE LA STRATÉGIE, ACCOMPAGNEMENT TECHNIQUE ET COORDINATION ENTRE LES DIFFÉRENTS ACTEURS
- ACTION N°2 : ETUDIER LA FAISABILITÉ DE MISE EN ŒUVRE D'UN PAPI

AXE 1 : L'AMÉLIORATION DE LA CONNAISSANCE ET DE LA CONSCIENCE DU RISQUE

- ACTION N°3 : METTRE EN PLACE UNE STRATÉGIE DE COMMUNICATION ET DE SENSIBILISATION
- ACTION N°4 : MAINTENIR ET AMÉLIORER LA CONNAISSANCE DU TERRITOIRE
- ACTION N°5 : METTRE EN PLACE UN SUIVI DU LITTORAL ET DES OUVRAGES
- ACTION N°6 : RÉALISER UN DIAGNOSTIC DE VULNÉRABILITÉ DES ENJEUX

AXE 2 : LA SURVEILLANCE, LA PREVISION DES CRUES ET DES INONDATIONS

- ACTION N°7 : SUIVI ET MISE EN ŒUVRE DE LA VEILLE OCEANO-METEOROLOGIQUE, INSTRUMENTS DE MESURE

AXE 3 : L'ALERTE ET LA GESTION DE CRISE

- ACTION N°8 : ASSISTANCE POUR LA REALISATION DES PLANS DE GESTION DE RISQUE ET LA MISE EN PLACE D'UN SYSTÈME D'ANNONCE POUR LES POPULATIONS

AXE 4 : LA PRISE EN COMPTE DU RISQUE INONDATION DANS L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME

- ACTION N°9 : DÉCLINER LA STRATÉGIE DANS LES DOCUMENTS D'URBANISME

AXE 5 : LA REDUCTION DE LA VULNERABILITE DES PERSONNES ET DES BIENS

- ACTION N°10 : SE PRÉPARER À L'ADAPTATION
- ACTION N°11 : SE PRÉPARER À LA RELOCALISATION

AXE 6 : LA GESTION DES ECOULEMENTS

- ACTION N°12 : ANALYSER ET ADAPTER LA GESTION HYDRAULIQUE DES ZONES BASSES FACE AUX RISQUES CÔTIERS

AXE 7 : LA GESTION DES OUVRAGES ET DES MILIEUX

- ACTION N°13 : MAINTENIR ET GERER LES OUVRAGES EXISTANTS
- ACTION N°14 : MISE EN ŒUVRE D'UNE GESTION DOUCE SUR LES MILIEUX DUNAIRE
- ACTION N°15 : MISE EN ŒUVRE D'UNE GESTION DOUCE SUR LES COTES « A FALAISE »
- ACTION N°16 : SUIVI ET GESTION DES MILIEUX – ACCOMPAGNEMENT DES PROCESSUS NATURELS



Figure 1.26 : Programme d'action de la stratégie locale de gestion intégrée du trait de côte de la CLCL (<https://www.clcl.bzh/environnement/espaces-nat/240-prevention-des-inondations/372-prevention-des-inondations>)

⁹⁰ Etablissement public de coopération intercommunale

⁹¹ <https://www.clcl.bzh/environnement/espaces-nat/240-prevention-des-inondations>

2.1 Vitesses, rythmes et modalités de recul observés depuis le haut de falaise

2.1.1 Tentative de mise à jour des vitesses de recul avec l'orthophotographie de 2015

2.1.1.1 Nouvelles données à disposition

Dans le prolongement des travaux de S. Costa (Costa, 1997, 2000, 2005 ; Costa et al., 2004), les vitesses de recul entre 1966 et 2008 (soit 42 ans, Letortu, 2013 ; Letortu et al., 2014a) du référentiel « haut de falaise abrupt crayeux⁹² » par l'approche fondée sur l'aire peuvent être réactualisées en Seine-Maritime. Dans le cadre du projet RICOCHET (2017-2021), il s'agissait de vérifier si les valeurs et les tendances étaient toujours d'actualité (ou non). Entre 2008 et 2019, six jeux de données provenant du LiDAR RGE⁹³ Alti, de la BD⁹⁴ Ortho, de l'Ortho littorale sont disponibles (Tableau 2.1).

Année d'acquisition	Nom	Source	Résolution planimétrique (m)
2011	LiDAR RGE Alti	Institut géographique national (IGN)	0,5
2012	BD Ortho	IGN	0,5
2013-2014	Ortho littorale	MEDDE	0,5
2015	BD Ortho	IGN	0,5
2015	Ortho HR (haute résolution)	IGN	0,2
2018	LiDAR topo-bathymétrique	ROL de Normandie et des Hauts-de-France/SHOM	< 0,2 (partie terrestre)

Tableau 2.1 : Jeux de données à disposition en Seine-Maritime entre 2008 et 2018

Certaines données sont écartées :

- les données provenant du MEDDE (Ortho littorale), car elles ont été acquises lors de deux étés successifs (2013 et 2014) ne permettant pas d'avoir un trait de côte complet sur une année ;

- les données LiDAR, car pour détecter le trait de côte « haut de falaise abrupt crayeux », il est nécessaire de convertir les points en raster, puis de digitaliser le trait de côte en s'aidant de l'outil ombrage pour mieux identifier la rupture de pente que représente le haut de falaise. Cette méthode induit une transformation de la donnée brute, qui peut entraîner des erreurs d'interprétation.

Seules les orthophotographies IGN paraissent pertinentes, car les images sont 1) orthorectifiées par l'IGN, 2) dans la continuité méthodologique de la BD Ortho utilisée en 2008. La donnée la plus proche est datée de 2015, avec deux résolutions possibles : 0,5 m (Ortho classique) et 0,2 m (Ortho HR, livrée en 2017). La meilleure résolution d'images a été naturellement choisie. Nous avons donc choisi

⁹² En Seine-Maritime, il peut exister plusieurs hauts de falaise : celui des formations superficielles et celui de l'abrupt crayeux.

⁹³ Référentiel grande échelle

⁹⁴ Base de données

l'Orthophotographie HR 2015 pour augmenter la représentativité temporelle des vitesses de recul entre le cap d'Antifer et Le Tréport (1966-2015).

2.1.1.2 Digitalisation

En raison de l'échelle de l'orthophotographie, où les données sont acquises au 1/2 000 (taille du pixel égale à 0,2 m), la digitalisation peut se faire avec une précision cinq fois plus importante (échelle : 1/400). Quant à l'échelle de rendu, elle dépend de la contrainte de digitalisation fixée par l'échelle de référence du document initial que sont les levés photogrammétriques de 1966 et 1995 (échelle : 1/2 000, données IGN acquises dans le cadre de la coopération au sein du contrat de plan interrégional du Bassin parisien, Costa, 2000). Il s'agit donc de digitaliser l'orthophotographie de 2015 au 1/1 000 (comme l'orthophotographie de 2008). Mais la restitution des résultats se fera au 1/2 000 pour être en accord avec les données issues de la photogrammétrie.

La digitalisation du trait de côte de 2015 a été effectuée par mes soins (comme en 2008), sur un ordinateur unique, avec la même grille de digitalisation pour uniformiser l'interprétation.

2.1.1.3 Calcul des vitesses de recul par l'approche fondée sur l'aire et estimation de l'erreur

L'approche la plus fiable pour calculer de manière continue les vitesses de recul le long des falaises est celle fondée sur l'aire (et non l'approche de la ligne de base avec des transects, démontrée dans Letortu et al. (2014a) et Martins et al. (2022)). Il s'agit d'une mesure de surface grâce à la création, à partir des deux positions de traits de côte, d'un polygone dont la longueur est définie à 50 m (Figure 2.2). Cette échelle permet d'observer des phénomènes de grande échelle, notamment l'influence des obstacles au transit sédimentaire comme les éboulements/écroulements majeurs ou les jetées portuaires.

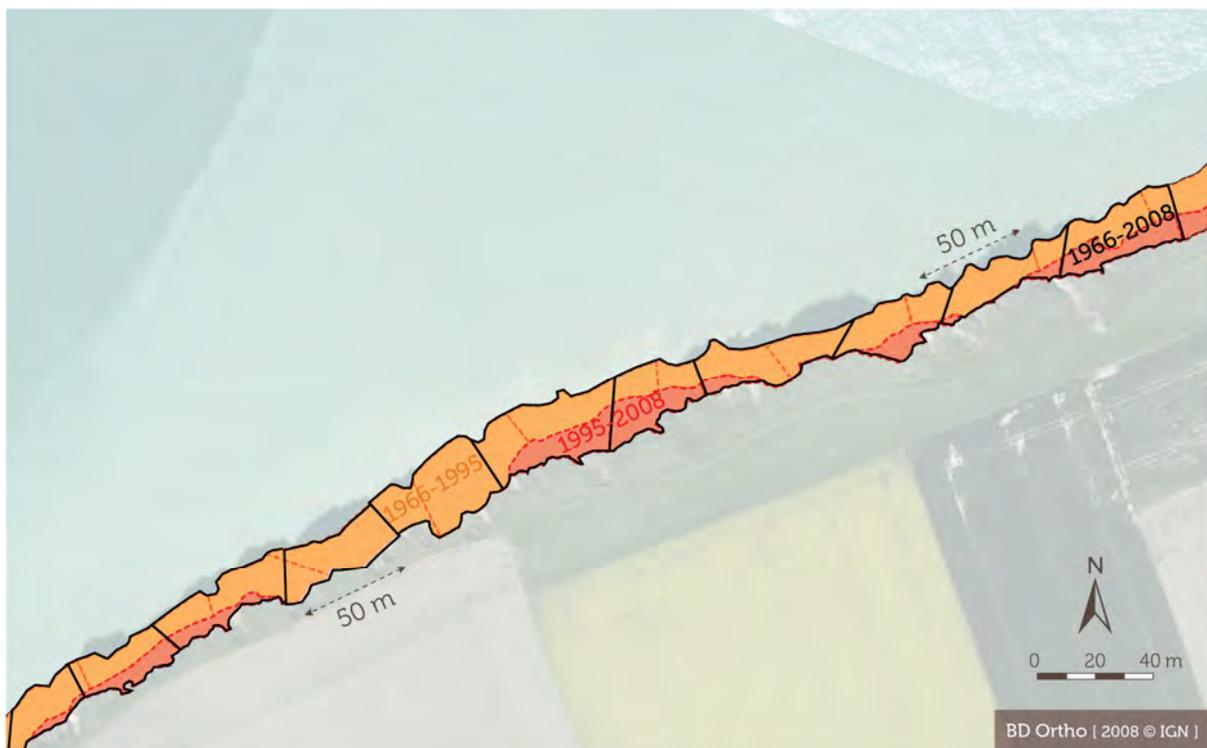


Figure 2.2 : Approche fondée sur l'aire pour une mesure continue des vitesses de recul des falaises (Letortu, 2013)

La méthodologie développée durant la thèse était complexe avec la création d'un modèle nécessitant de bonnes connaissances en SIG. Ce travail avait été réalisé sur ArcGIS par A. Bensaïd, ingénieur de recherche au laboratoire LETG-Caen avec la succession de nombreuses étapes (Figure 2.3).

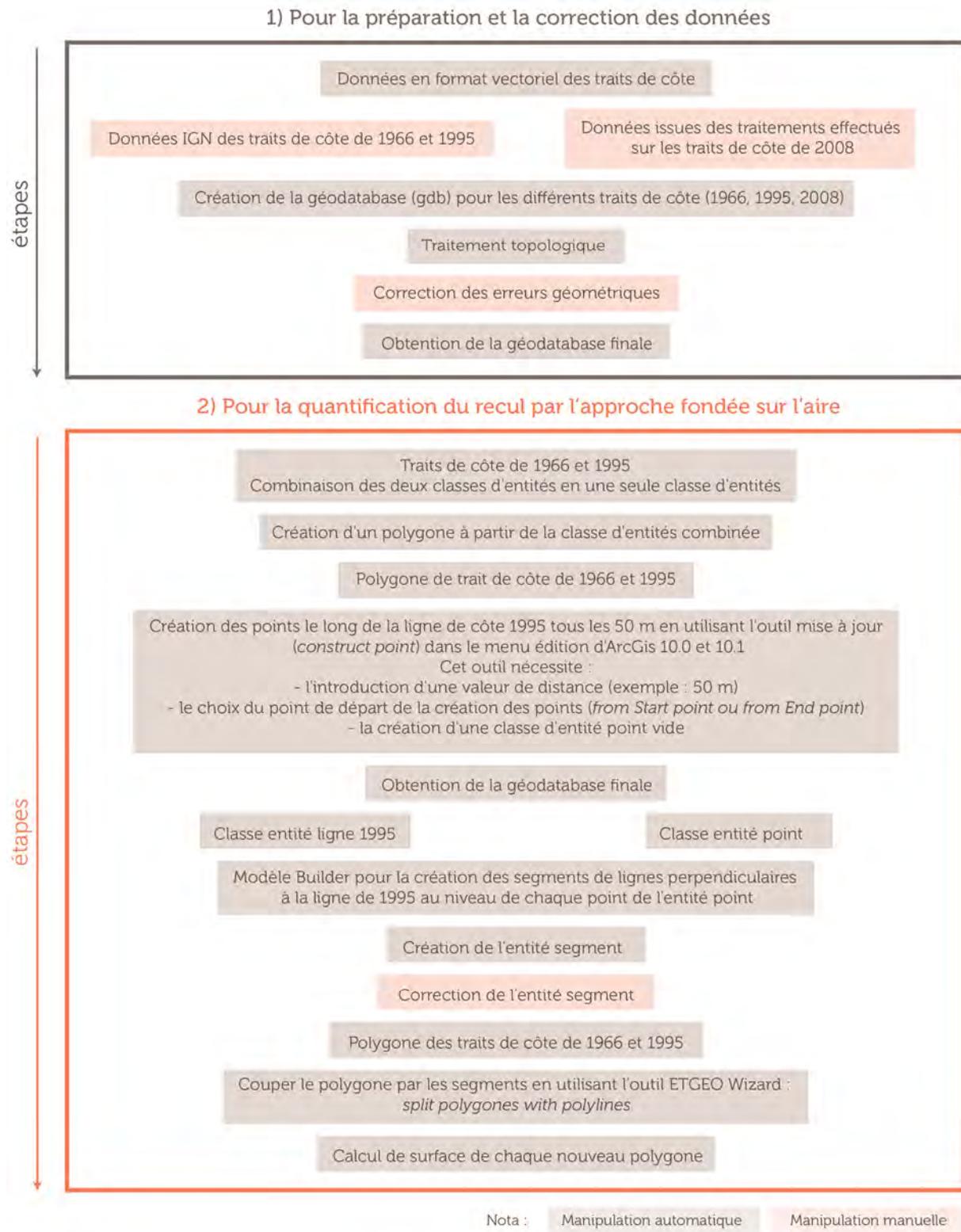


Figure 2.3 : Méthode de calcul par l'approche fondée sur l'aire sur ArcGIS (A. Bensaïd) (Letortu, 2013)

Des méthodes équivalentes sont aujourd'hui développées, notamment DiDUNE⁹⁵. Avec l'aide du trait de côte de 2015, des boîtes de 50 m de large et de 100 m de long ont été générées entre le cap d'Antifer et Le Tréport (Figure 2.4) par M. Juigner (Juigner et al., 2017 ; Kerguillec et al., 2019).

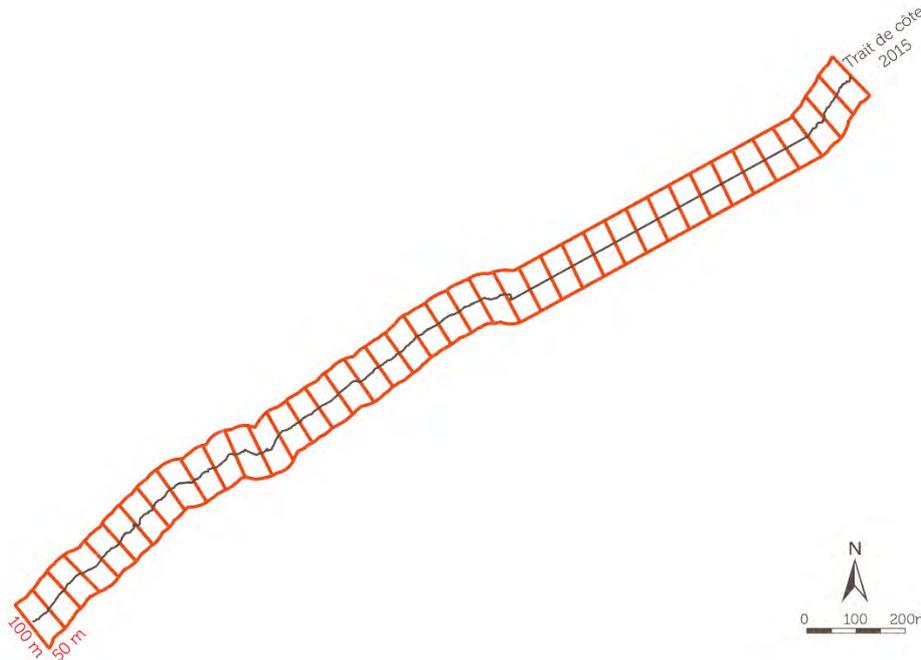


Figure 2.4 : Trait de côte de 2015 et boîtes générées le long du littoral de Criel-sur-Mer

C'est au sein de chacune de ces boîtes que l'aire perdue entre les deux traits de côte est calculée. La méthode sous le logiciel libre Quantum GIS (QGIS), mise en œuvre par J.-B. Suzanne (LETG-Caen) en collaboration avec M. Medjkane (LETG-Caen puis IDEES-Caen), est la suivante :

- les polygones des deux années sont assemblés pour faire un polygone ;
- le polygone est ensuite découpé par boîte ;
- le calcul d'aire est réalisé par polygone découpé par boîte ;
- après jointure spatiale, chaque boîte récupère l'aire perdue et son linéaire ;
- l'aire est ensuite divisée par le linéaire côtier concerné (50 m) ;
- ce résultat étant lui-même divisé par le nombre d'années écoulées entre les deux traits de côte.

L'erreur de recul des falaises a été estimée en adaptant la méthode de la racine carrée de la somme des carrés en fonction du temps (T) (Fletcher et al., 2003 ; Gorokhovich et Leiserowiz, 2011 ; Bernatchez et al., 2021) à notre approche fondée sur l'aire. L'erreur moyenne annuelle (E_a) correspond à la racine carrée de l'erreur cumulée divisée par le temps, où l'erreur cumulée comprend le carré de l'erreur de

⁹⁵ L'outil de diagnostic multiscalaire du service protection dunaire (boîte à outils cartographiques au service de l'observation côtière), développé au sein de l'observatoire régional des risques côtiers (OR2C), est « une boîte à outils dédiée à l'analyse cartographique, à grande échelle, des espaces côtiers. Son principe est guidé par une segmentation de la bande côtière en polygones distincts et contigus, appelés « boîtes ». Le calcul automatisé d'indicateurs thématiques (ex. mobilité du trait de côte) permet de produire des synthèses cartographiques et statistiques pour un diagnostic fin des espaces côtiers, au service de l'observation des territoires littoraux » (<https://geo-or2c.univ-nantes.fr/authentification>).

géoréférencement des données ($E_{g\acute{e}or_{d_1d_2}}$) et le carré de l'erreur de numérisation liée à l'opérateur pour chaque trait de côte ($E_{num_{op_d}}$) (estimée à un pixel, donc dépendant de la résolution et de la qualité intrinsèque de l'image). Notre erreur moyenne annuelle varie entre $\pm 0,06$ m/an (1995-2015) et $\pm 0,16$ m/an (2008-2015).

$$E_a = \frac{\sqrt{E_{g\acute{e}or_{d_1d_2}}^2 + E_{num_{op_{d_1}}}^2 + E_{num_{op_{d_2}}}^2}}{T}$$

2.1.1.4 Comparaison des méthodes de calcul sur le jeu de données 1995-2008

Afin de s'assurer que la nouvelle méthode proposée sur QGIS est valable, J.-B. Suzanne a quantifié les vitesses de recul sur la période 1995-2008, période que j'avais déjà étudiée avec l'ancienne méthode d'A. Bensaid sur ArcGIS. Il convient de préciser que le découpage tous les 50 m n'est pas le même entre les deux méthodes, limitant la pertinence d'une analyse spatiale à cette échelle. Seule l'analyse à l'échelle des sous-cellules hydro-sédimentaires est pertinente.

Les vitesses de recul moyennes entre le cap d'Antifer et Le Tréport sont équivalentes (0,11 m/an). A l'échelle des sous-cellules hydro-sédimentaires, les résultats sont égaux ou très proches. L'écart maximal est de 0,04 m/an entre le cap d'Antifer et Etretat (Tableau 2.2), où le trait de côte est très sinueux.

Sous-cellule hydro-sédimentaire	Vitesse de recul (m/an) sur la période 1995-2008 (P. Letortu et al.) ($\pm 0,09$ m/an)	Vitesse de recul (m/an) sur la période 1995-2008 (J.-B. Suzanne et al.) ($\pm 0,09$ m/an)
Cap d'Antifer/Etretat	0,21	0,25
Etretat/Etretat	0,18	0,19
Etretat/Fécamp	0,09	0,09
Fécamp/Paluel	0,12	0,10
Paluel/Saint-Valéry-en-Caux	0,13	0,14
Saint-Valéry-en-Caux/Dieppe	0,10	0,10
Dieppe/Penly	0,08	0,07
Penly/Le Tréport	0,14	0,17
Total général	0,11	0,11

Tableau 2.2 : Comparaison des vitesses de recul par sous-cellule hydro-sédimentaire obtenues entre 1995 et 2008 en fonction des méthodes utilisées

2.1.2 Continuation des travaux sur les rythmes et les modalités de recul

Pour appréhender les rythmes de recul des falaises crayeuses, nous avons utilisé deux marqueurs géomorphologiques des dynamiques : la zone de départ (ou d'ablation) et celle de dépôt de l'éboulement/écroulement (Figure 2.5). Lors de ma thèse, ce travail sur les éboulements/écroulements utilisait les photographies aériennes géoréférencées et les orthophotographies de 2000 à 2008.

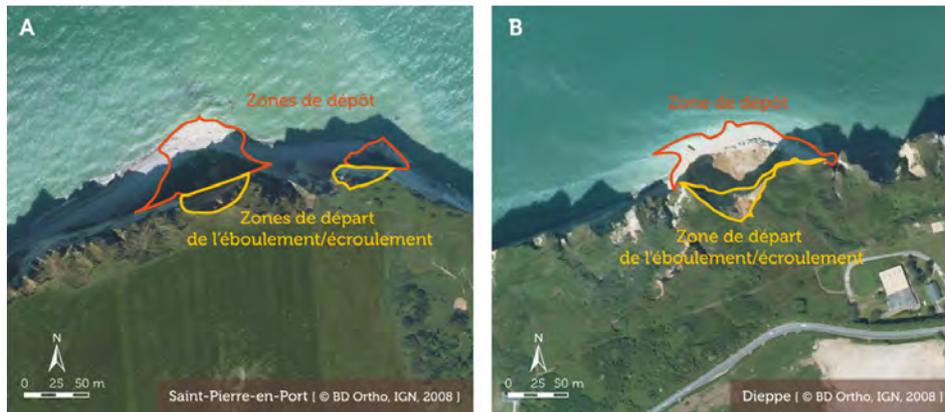


Figure 2.5 : Zones de départ et de dépôt des éboulements/écroulements repérés à Saint-Pierre-en-Port (A) et Dieppe (B) (Letortu, 2013)

2.1.2.1 Nouvelles données à disposition

Depuis, les années 2012, 2013-2014 et 2015 ont été ajoutées (au total 20 séries) dans le cadre du projet RICOCHET (2017-2021)) (Figure 2.6). L'absence de continuité spatiale dans les séries photographiques doit être prise en compte, car certains secteurs vont être suivis à haute fréquence (Etretat/Fécamp), alors que d'autres, entre Saint-Valéry-en-Caux et Quiberville, ne vont l'être qu'à partir de 2000. Aucune mission n'étant à notre disposition avant 2000 entre le cap d'Antifer et Etretat, ce secteur n'a pas été intégré au suivi.

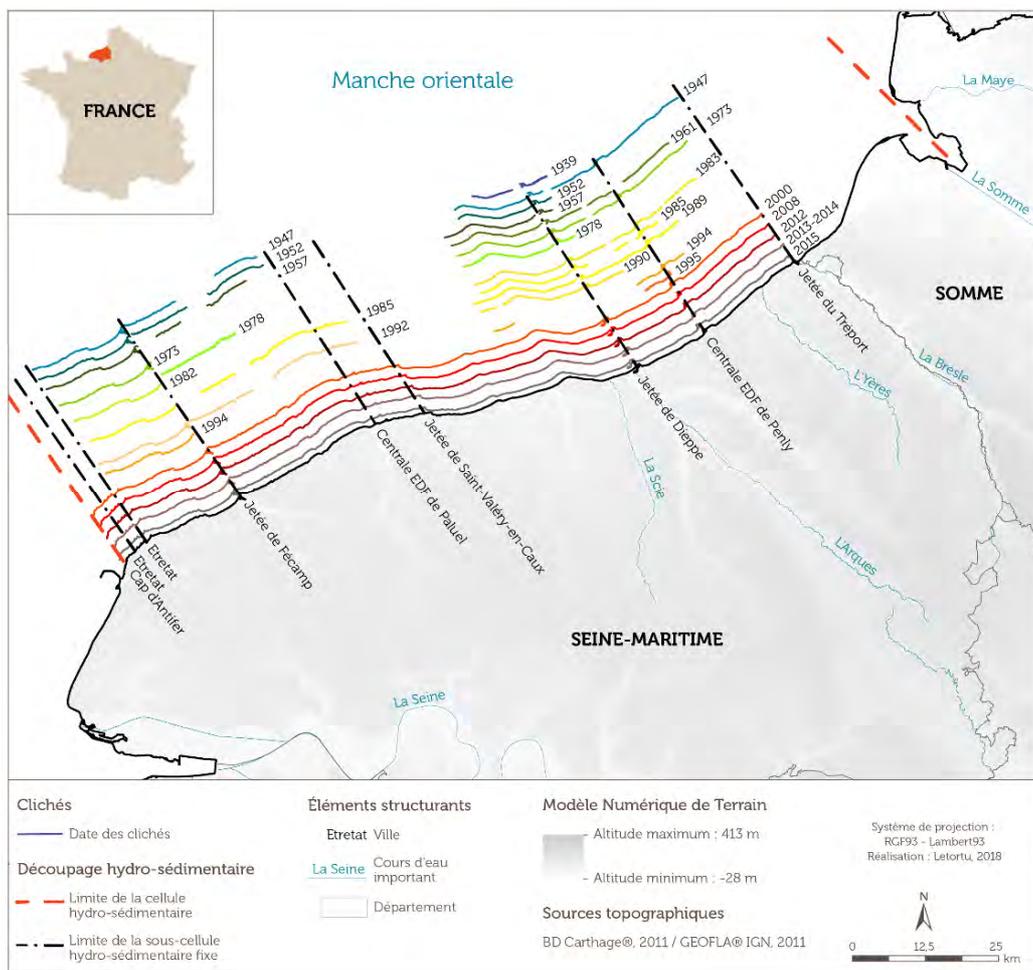


Figure 2.6 : Séries de photographies aériennes verticales disponibles et utilisées jusqu'en 2018

2.1.2.2 Digitalisation

Le recensement des éboulements/écroulements entre Etretat et Le Tréport au 1/2 000 a été réalisé par mes soins et avec l'aide précieuse de C. Pensec (stagiaire de L3). Cette digitalisation (en veillant à ne pas reprendre d'une mission à l'autre les mouvements de masse demeurant longtemps en pied de falaise) permet de renseigner le nombre d'éboulements/écroulements, leur répartition spatiale, mais aussi les zones de départ maximales (L_{max} des PPRL) et leur récurrence⁹⁶.

2.1.2.3 Estimation de la récurrence des éboulements/écroulements

Dès lors que des mouvements de masse et de pan entier de falaise se succèdent au même endroit, nous pouvons estimer la récurrence de ces derniers. Il s'agit de calculer, grâce à l'inventaire diachronique des éboulements/écroulements, l'intervalle de temps entre 1) l'apparition d'un éboulement/écroulement de pan entier de falaise, 2) son évacuation, 3) la météorisation de la falaise, 4) puis l'apparition au même endroit d'un nouvel éboulement/écroulement de pan entier de falaise.



Figure 2.7 : Eboulements/écroulements successifs de pan entier de falaise à Bracquemont (Letortu, 2013)

2.1.3 Travaux de prospective sur l'aléa « recul des falaises » prenant en compte le changement climatique

Egalement dans le cadre du projet RICOCHET (2017-2021), il s'agissait de réfléchir à une cartographie de l'aléa « recul du trait de côte » adaptée aux falaises et intégrant le changement climatique⁹⁷.

Comme évoqué dans le chapitre 1, l'intégration du changement climatique dans les PPRL n'est pas obligatoire dans la cartographie réglementaire PPRL, car aucune méthode « clé en main » n'existe. Ce défi

⁹⁶ J'utilise ici le terme de récurrence pour le temps moyen entre deux événements successifs, car la période de retour est une terminologie parfois critiquée, car elle peut être mal interprétée. En effet, si un événement majeur s'est produit il y a peu de temps, il est parfois compris qu'il y a du temps avant d'avoir un nouvel événement de cette magnitude. Le terme de probabilité d'occurrence peut être préféré (Hénaff et al., 2018), avec une courbe de régression établie à partir de la répartition magnitude/fréquence (ce qui ne peut être réalisé dans notre cas, en raison du faible effectif de notre jeu de données).

⁹⁷ Il convient de rappeler que les méthodes et les résultats, présentés ici et ultérieurement, sont antérieurs à la loi « Climat et résilience » de 2021 et à la publication des recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte (Collectif (BRGM/CEREMA), 2022).

scientifique et opérationnel auquel j'ai participé a été le fruit de réflexions menées principalement par O. Maquaire, S. Costa et F. Rubio (Maquaire et al., 2021).

Faute de données mettant en évidence le rôle du changement climatique dans l'évolution des vitesses de recul des falaises en Seine-Maritime⁹⁸, nous postulons qu'une accélération de l'érosion des falaises aura lieu avec l'élévation du niveau marin liée au changement climatique conformément à la littérature scientifique (par exemple, Limber et al., 2018 ; Trenhaile, 2019). Ce postulat⁹⁹ s'appuie également sur l'analogie avec ce que nous observons à proximité des obstacles au transit sédimentaire : la zone en aval-dérive ayant moins de sédiments disponibles, la falaise est plus impactée par l'action marine et une accélération de l'érosion est visible (Costa, 1997 ; Letortu et al., 2014a).

Dans notre volonté de proposer une méthode de cartographie, nous avons souhaité modifier le zonage binaire de l'aléa fort L_r (soit il y a aléa, soit il n'y en a pas), car la réalité est souvent plus subtile. Ainsi, nous avons proposé une deuxième catégorie au zonage classique de l'aléa, appelée « aléa moyen ». Cette zone « tampon » permet d'intégrer les incertitudes.

Quatre sites à forts enjeux en haut de falaise ont été choisis pour mener cette cartographie de l'aléa (et qui correspondent aux territoires 2 et 3 du projet RICOCHET) :

- 1) Quiberville (échelle communale) ;
- 2) la *côte aux Hérons* (ouest de Dieppe, échelle intracommunale) ;
- 3) *Puys* (est de Dieppe, échelle intracommunale) ;
- 4) Criel-sur-Mer (échelle communale).

La recherche du recul instantané maximal (L_{max}) s'est appuyée sur la digitalisation des zones de départ des éboulements/écroulements (de 1983 à 2015).

Pour établir la cartographie des aléas « fort » et « moyen », deux scénarios ont été testés. Le scénario 1 comprend un aléa fort établi par la formule PPRL ($L_r = 100 \times T_x + L_{max}$) et un aléa moyen. Ce dernier est calculé en multipliant par 100 (afin d'intégrer l'échéance centennale) la moitié de l'erreur moyenne annuelle maximale des vitesses de recul (pour obtenir uniquement celle vers l'intérieur des terres). L'erreur moyenne annuelle maximale est celle de la période 1995-2008 estimée à $\pm 0,09$ m/an (Letortu, 2013). Sur une période centennale, l'aléa moyen a donc une largeur de 9 m. Le scénario 2 est établi à partir de deux options (2a et 2b), issues des travaux de S. Costa (2002) :

- 2a) $L_r = 100 \times T_x \times 1,5 + L_{max}$: calcule l'aléa fort en multipliant par 1,5 le taux de recul sur 100 ans ;
- 2b) $L_r = 100 \times T_x \times 2 + L_{max}$: calcule l'aléa fort en multipliant par 2 le taux de recul sur 100 ans.

Au regard de la littérature peu fournie sur le sujet, le scénario 2a avec une multiplication par 1,5 des vitesses de recul moyennes annuelles actuelles semble une alternative « raisonnable » (Limber et al., 2018b). Comme toute projection est sujette à des incertitudes (élévation du niveau marin réel par rapport à celui

⁹⁸ Le signal du changement climatique sur l'évolution des vitesses de recul sera peut-être visible lors de la mise à jour des vitesses de recul avec les données de 2020 (1966-2008-2020, voir le chapitre 4).

⁹⁹ Ce postulat est bien sûr critiquable : sur certaines côtes comme les îles de la Madeleine (Québec, Canada), où le niveau marin monte rapidement (environ 6 mm/an), l'accélération de l'érosion des falaises de grès n'est pas visible (communication personnelle avec P. Bernatchez).

modélisé, impact local du changement climatique, variabilité de l'évolution du trait de côte et des tendances, etc.), nous avons choisi que l'aléa moyen du scénario 2a intègre l'espace identifié comme « aléa fort » du scénario 2b (auquel s'ajoutent les 9 mètres d'incertitude liée à l'observation). Ainsi, notre proposition finale est le zonage nommé « scénario 2 » (Figure 2.8). Deux scénarios sont donc cartographiés : le scénario 1 ne prenant pas en compte le changement climatique à l'échéance de 100 ans et le scénario 2 le prenant en compte.

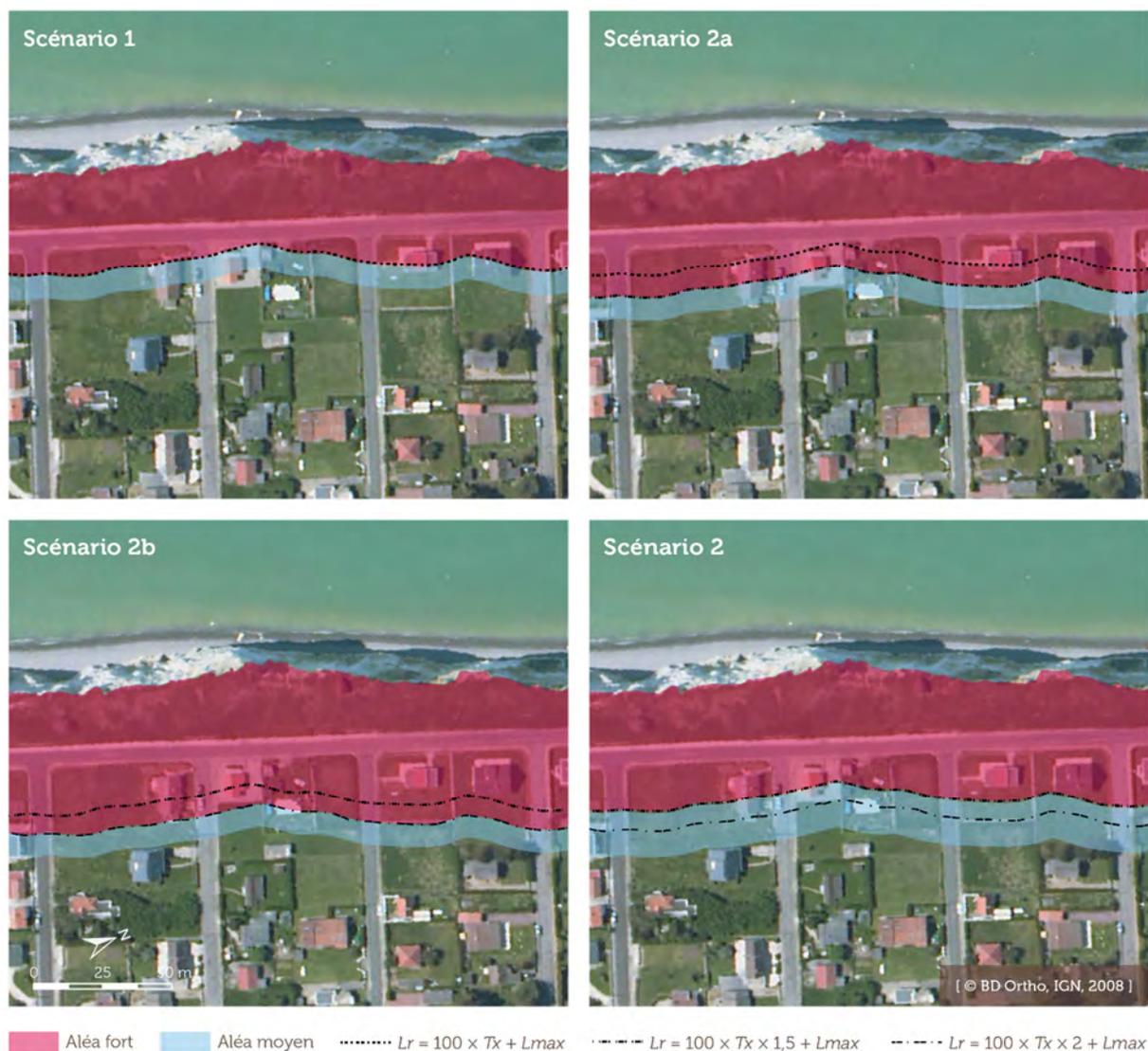


Figure 2.8 : Différents scénarios pour estimer le recul à l'échéance de 100 ans à Criel-sur-Mer

2.2 Evolution des méthodes de suivi du front de falaise

2.2.1 Continuité du suivi à l'échelle locale grâce au relais des méthodes d'acquisition et de traitements

2.2.1.1 Objectifs scientifiques des suivis à THRS

L'évolution du front de falaise est observée principalement par les mouvements de masse, parce que leur taille conséquente permet une détection aisée sur de nombreux supports (photographies aériennes ou obliques, images satellites, etc.). Mais, ces mouvements de masse ne représentent qu'une partie des transferts de matériel induits par l'érosion des falaises. Les mouvements de taille modeste (chutes de blocs de quelques dizaines de cm^3 jusqu'à quelques dizaines de m^3 , chutes de pierres de quelques cm^3 à dm^3) sont souvent négligés, car ils sont invisibles si l'échelle d'observation est petite et la fréquence d'observation basse. Or, cette éboulisation (chutes de blocs et de pierres) doit être prise en compte, car l'ensemble de ces mouvements participent à l'évolution du front de falaise.

Depuis 2010, le suivi du front de falaise au TLS¹⁰⁰ et par photogrammétrie tous les quatre à cinq mois, avec une précision pluricentimétrique, sur des sites en contexte de falaises vive et morte permet de :

- 1) visualiser les zones de départ pour tout mouvement gravitaire (si sa taille dépasse l'erreur des méthodes d'acquisition et de traitements) ;
- 2) quantifier l'éboulisation ;
- 3) faire la part de l'éboulisation par rapport aux mouvements de masse dans le recul du front de falaise ;
- 4) de contribuer au débat sur la prévalence des agents et processus marins ou continentaux dans l'érosion des falaises crayeuses normandes.

2.2.1.2 Méthodes d'acquisition

Depuis octobre 2010, les fronts des falaises de Dieppe (Dieppe 1 O et 2 N) et de Varengeville-sur-Mer (cap Ailly) sont suivis tous les quatre à cinq mois (Figure 2.9). Ces deux sites, distants à vol d'oiseau de 6 km, ont des conditions météorologiques et lithologiques proches, mais sont exposés (ou non) aux agents et processus marins : la falaise à Dieppe est morte, il n'y a donc plus d'actions marines au pied, tandis que la falaise de Varengeville-sur-Mer est vive. Cette différence d'exposition va permettre de quantifier le rôle respectif des agents et processus marins et continentaux dans l'érosion des falaises.

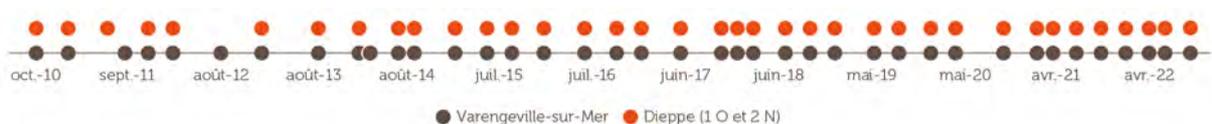


Figure 2.9 : Distribution temporelle des levés du front de falaise depuis octobre 2010 à Varengeville-sur-Mer et à Dieppe

¹⁰⁰ Le scanner laser terrestre (TLS) utilise la technologie du laser pulsé pour déterminer la distance qui sépare l'instrument du point à mesurer. Autrement dit, un faisceau laser infrarouge est émis par le TLS et dès qu'il rencontre un objet de l'environnement, s'y réfléchit et revient au TLS. Ce temps d'aller-retour du signal permet de déterminer avec précision la distance entre le point et le TLS.

Pour répondre à nos questions de recherche, un suivi à forte fréquence temporelle, à THRS et sur une longue durée est essentiel. Afin d'obtenir une précision infradécimétrique permettant d'observer l'éboulis dans l'érosion du front de ces falaises, nous avons utilisé, de 2010 à 2014, un TLS RIEGL LMS390i (prêté par le laboratoire Domaines Océaniques, UBO), puis à partir de 2014, un RIEGL VZ-400, acquis par le LETG et le laboratoire Géosciences Océan (LGO devenu Geo-Ocean) (Figure 2.10A). Cela permet de quantifier l'évolution avec une précision de $\pm 0,02$ m à Dieppe et $\pm 0,03$ m à Varengeville-sur-Mer.

En France, dans le début des années 2010, le suivi des falaises par TLS, avec une précision pluricentimétrique des résultats d'évolution, était une nouveauté (Letortu, 2013 ; Letortu et al., 2015c, 2015b). Par la suite, la méthode s'est démocratisée, tout comme les logiciels de traitements (par exemple, le logiciel libre CloudCompare). Notre suivi des falaises normandes¹⁰¹ de précision pluricentimétrique a continué et progressé jusqu'en février 2021 (Letortu et al., 2019). Par exemple, la réduction du nombre de cibles (d'une douzaine à trois) grâce à la méthode proposée par M. Jaud, ingénieure de recherche à l'IUEM et Geo-Ocean (Jaud et al., 2017), a fait gagner du temps sur le terrain et dans le traitement.

Cependant, le matériel reste coûteux (tout comme le logiciel permettant l'acquisition des données), lourd (entre 30 et 50 kg en fonction du modèle de TLS) et nécessite plusieurs opérateurs pour ce suivi (2-3 personnes, entre 2 h 30 et 3 h 00 de levé pour 350 m de falaises). Les méthodes photogrammétriques basées sur les techniques de SfM-MVS peuvent être des alternatives efficaces offrant des données de qualité équivalente pour un coût moindre. La collaboration avec les ingénieurs de l'IUEM, particulièrement M. Jaud, m'a permis d'explorer cette question méthodologique sur les côtes à falaises¹⁰², beaucoup moins étudiées que les dunes et les plages. Si les différentes méthodes de photogrammétrie classique (drone et terrestre) atteignent la même qualité de données, elles pourraient être interchangeables dans notre suivi, en fonction des conditions météorologiques et de la disponibilité des personnes, sans aucun impact sur les résultats. De plus, si elles sont plus rapides, elles peuvent permettre de suivre plus de sites sur un temps imparti, améliorant la représentativité spatiale des données et des résultats (favorisant leur transposition) (Letortu et al., 2018).

Nos levés photogrammétriques terrestres classiques consistent en la prise de photos depuis la plage et face au front de falaise, avec un appareil photo reflex Nikon D800 (1 kg) avec une focale de 35 mm, prenant des photos de 36 Mpix. Pour recueillir des données sur le front de falaise, comme le recommandent James et Robson (2012), des images de la zone d'intérêt sont acquises depuis différentes positions. Les orientations de caméra ne sont pas parallèles, mais convergent plutôt vers la scène (Figure 2.10C). Cela implique de courtes distances entre les positions d'acquisition (environ 2-3 m lors de la prise de photos à environ 30 m du front de la falaise) et des photos prises à des intervalles angulaires de 10-20°, sur une large gamme d'angles. En effet, pour obtenir un jeu de données de qualité, les photographies doivent se chevaucher d'au moins 60 % (idéalement, un point doit être vu au moins trois fois) et doivent capturer la zone avec au moins deux

¹⁰¹ Mais aussi celles bretonnes dans le cadre des projets IG Waves et F3 où je faisais les acquisitions et le traitement des données TLS.

¹⁰² Cette question implique de nombreux sujets : 1) la résolution et/ou la distance d'échantillonnage au sol, 2) la couverture spatiale, 3) l'exactitude et la précision des ensembles de données pour les relevés diachroniques des mouvements individuels et de masse, 4) l'adaptation des protocoles d'acquisition et de traitement aux sites et aux questions de recherche. Cela a fait l'objet d'un article (Letortu et al., 2018).

angles de prise de vue. Toute la section de la falaise a été couverte en 23 min par 153 photographies collectées le long de la ligne de base (Figure 2.10B). Le chevauchement permet que tout point de la falaise étudiée soit présent sur six photographies, au minimum. Pour le géoréférencement du levé, les coordonnées absolues sont fournies par un tachéomètre (Trimble M3). Afin d'obtenir une reconstitution 3D de haute qualité (James et Robson, 2012) et d'aider à atténuer l'effet « dôme » causé par un modèle de caméra incorrect et une distorsion radiale (James et Robson, 2014), il est recommandé d'utiliser un grand nombre de cibles. Ces dernières doivent être réparties dans toute la zone d'intérêt (Javernick et al., 2014 ; Smith et al., 2014) sans configurations linéaires. Les cibles doivent idéalement couvrir à la fois les marges et le centre de la zone d'intérêt, avec une large gamme de valeurs dans chaque dimension spatiale. Cependant, dans un contexte de falaise, l'accès à la paroi de la falaise est dangereux. En haut de falaise, il peut être difficile d'assurer la bonne visibilité des cibles tout en garantissant la sécurité des personnes qui les installent. L'absence de cibles sur la partie supérieure de la falaise peut créer des distorsions. Pour éviter ce problème, nous avons une grande variété d'angles de vue de photographies terrestres (Jaud et al., 2019b). Un total de 17 cibles a été utilisé avec différentes configurations : neuf positionnées verticalement sur la zone d'intérêt (centre des croix orange, de 40 cm de haut, peintes sur la partie basse du front de la falaise), et huit autres (disques circulaires, de 23 cm de diamètre) positionnées horizontalement sur la plage (Figure 2.10A).

Le levé par drone est mis en œuvre à l'aide d'un drone hexacoptère électrique, appelé DRELIO 10 (drone hélicoptère pour l'observation et l'environnement, plateforme multirotor DS6 assemblée par DroneSys, Figure 2.10A). Un châssis pliable lui permet d'être transporté facilement. Avec un diamètre de 0,8 m, le DRELIO 10 pèse moins de 4 kg et peut supporter une charge utile de 1,6 kg. Le temps de vol est d'environ 20 min. Sur une plate-forme gyrostabilisée inclinable, un appareil photo reflex Nikon D800 (même modèle que pour l'acquisition par photogrammétrie terrestre) avec une longueur focale de 35 mm est installé. L'appareil prend des photos de 36 Mpix toutes les 2 secondes. Le logiciel DJI iOSD gère le contrôle du vol. Pour les étapes délicates du décollage et de l'atterrissage, le pilote (P. Grandjean ou J. Ammann) préfère contrôler le drone grâce au logiciel de la station au sol sur la plage. L'ensemble des données est collecté le long de la ligne de base située à environ 80 m du front de falaise (Figure 2.10B). Comme le montre la Figure 2.10D, les données au sommet de la falaise ont été collectées par la caméra en position nadir. Pour collecter les données sur le front de la falaise, la caméra a été orientée vers l'avant et inclinée à 25° avec des photographies à différentes distances de la falaise pour réduire la distorsion. Dans ce cas, le vol doit être effectué en mode manuel pour maintenir la caméra tournée vers le front de la falaise et dure environ huit minutes. Dans cette configuration, le jeu de données est composé de 110 images obliques et nadir (qui seront traitées ensemble), tout point de la falaise étudiée étant présent au moins sur neuf photographies. Pour le géoréférencement du levé, 22 cibles (disques circulaires, 23 cm de diamètre) étaient positionnées horizontalement sur la plage, sur la partie inférieure de la vailleuse et sur le sommet de la falaise (Figure 2.10A, B et D).

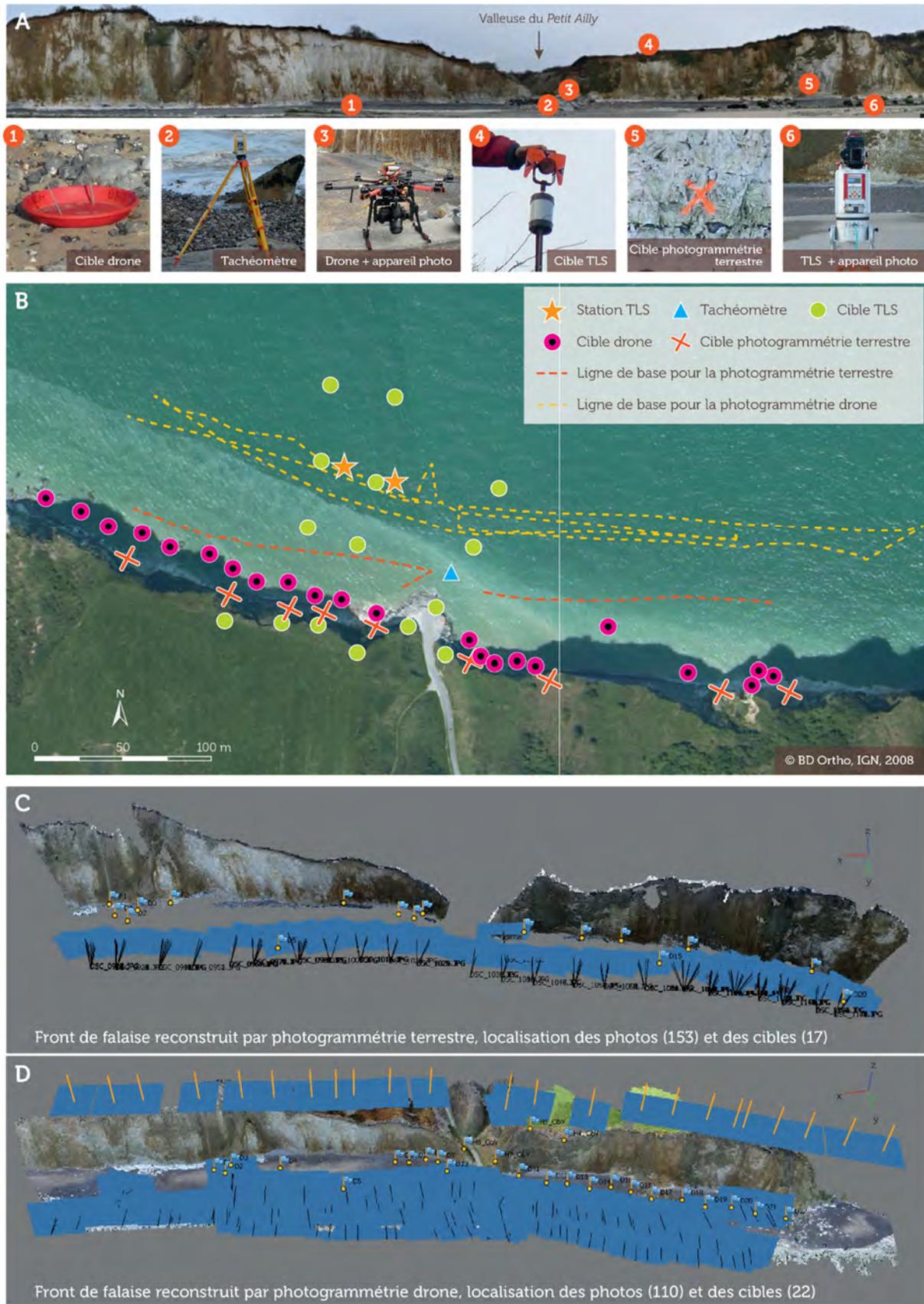


Figure 2.10 : A) Matériel utilisé, B) cibles, stations et lignes de base, C) reconstruction photogrammétrique terrestre, D) reconstruction photogrammétrique par drone à Varengueville-sur-Mer (modifié d'après Letortu et al., 2018)

Nos travaux ont montré que 1) l'erreur moyenne de chaque méthode (TLS, photogrammétrie terrestre et drone) est inférieure à $\pm 0,03$ m, ce qui répond à nos exigences de précision pour le suivi de l'érosion, 2) que la photogrammétrie drone, en plus d'offrir une couverture spatiale plus importante, semble être moins sensible à la variance que la photogrammétrie terrestre classique, mais qu'elle reste dépendante des conditions météorologiques et des disponibilités du pilote, 3) malgré ces différences, les méthodes pourraient être interchangeables lorsqu'aucun pilote n'est disponible, lorsque les conditions météorologiques sont mauvaises ou lorsqu'une grande réactivité est nécessaire (Letortu et al., 2018) (Tableau 2.3).

Catégorie	TLS (RIEGL VZ-400)	Photogrammétrie terrestre (Nikon D800)	Photogrammétrie drone (DS6 et Nikon D800)
Précision	Haute	Basse	Haute
Coût d'achat et de maintenance	Très élevé (achat : 150 000 €)	Faible (achat : 1 500 €)	Elevé (achat : 10 000 €)
Poids (instruments et cibles)	Très lourd (33 kg)	Léger (5 kg)	Lourd (9 kg)
Durée de vie de la batterie	Longue	Très longue	Courte
Vitesse d'acquisition des données	Basse	Basse	Très haute
Sensibilité à l'occlusion	Forte	Forte	Très faible
Sensibilité aux « mauvais » temps (pluie, vent)	Forte	Très faible	Forte
Nombre d'opérateurs par jour	Elevé	Faible	Elevé
Facilité à mettre en œuvre le suivi (cibles, pilote, emplacement de la station)	Faible	Très bonne	Bonne
Flexibilité dans la capacité à capturer la zone d'intérêt (surplomb, grotte, etc.)	Faible	Faible	Très forte
Niveau de compétence requis pour l'acquisition	Haut	Haut	Très haut
Durée d'acquisition	Longue	Longue	Courte
Durée du traitement	Longue	Très longue	Très longue

Tableau 2.3 : Points forts (significatifs en vert) et points faibles (significatifs en rouge) des méthodes utilisant le TLS, la photogrammétrie terrestre et la photogrammétrie drone pour le suivi de l'érosion des falaises (Letortu et al., 2018)

Malgré ces résultats encourageants, nous avons continué le protocole de suivi au TLS jusqu'en 2021, car plusieurs obstacles demeuraient : 1) le temps d'acquisition des données demeurait long pour la photogrammétrie terrestre en raison de l'installation des cibles 2) et le temps de traitement des données photogrammétriques (terrestre ou drone) était long et très variable en qualité. Cela était principalement dû à l'étape d'alignement des photos qui restait difficile en raison de l'absence de géoréférencement des photographies.

La mise en place de la photogrammétrie terrestre RTK (*real time kinematic*) (Jaud et al., 2020) a permis de lever ces deux difficultés tout en conservant une précision de la donnée inférieure à $\pm 0,03$ m. D'une part, le protocole d'acquisition des photos reste proche de la photogrammétrie terrestre classique (pour éviter les

distorsions, les 10-20 photos par station convergent vers le front de falaise avec des angles variés et une distance de 15 à 20 m sépare les stations disposées en quinconce), mais sur le trépied de l'appareil photo est posé un cadre qui permet de fixer le mobile d'un dGPS. Avec un offset connu (D sur Figure 2.11) entre le centre de l'antenne GPS et le centre optique de la caméra, la position de chaque station photographique est connue, et donc celles des photos (il est possible d'y ajouter des photos non géoréférencées). Les cibles deviennent ainsi inutiles. D'autre part, la photogrammétrie terrestre RTK permet d'intégrer les coordonnées cartographiques de prise de vue des photos dans Metashape avant les trois étapes de traitement (alignement des photos, optimisation de l'alignement, création d'un nuage dense). Ces coordonnées facilitent grandement l'étape d'alignement et peuvent permettre d'intégrer de très nombreuses photos, améliorant la résolution du nuage de points. Le temps gagné est considérable : il faut moins de 3 h (contre une à plusieurs dizaines d'heures) sur un ordinateur avec une unité de traitement graphique (GPU) pour traiter 600 photos créant un nuage de points dense (résolution centimétrique) de la falaise sur 350 m.

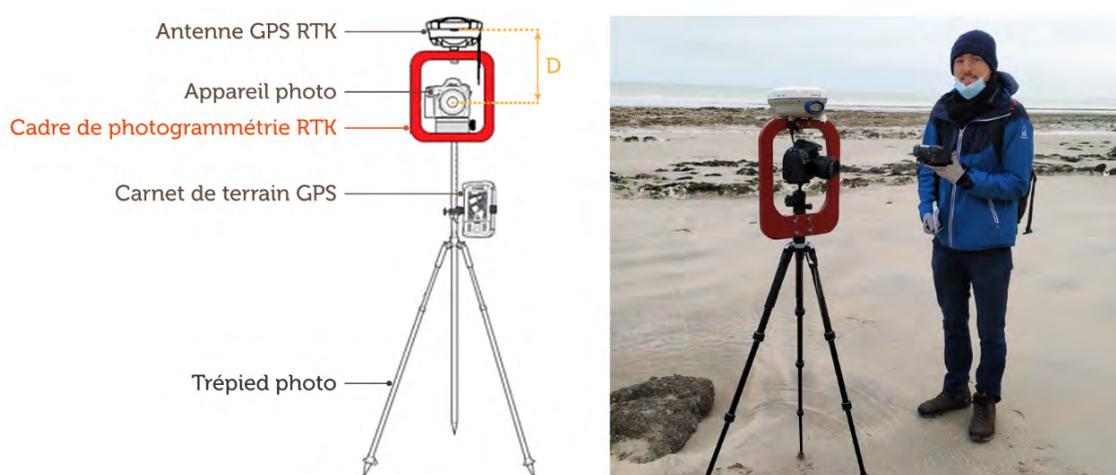


Figure 2.11 : Protocole d'acquisition par photogrammétrie terrestre RTK (Jaud et al., 2020) et sa mise en place à Varengeville-sur-Mer (02/02/2021 avec B. Peuziat)

Ainsi, à partir de février 2021, nous sommes passés du TLS à trois cibles à la photogrammétrie terrestre RTK permettant de limiter à deux personnes sur le terrain, avec un déploiement facile, car le matériel est léger et un gain de temps estimé à 30 min environ par site (Figure 2.12).



Figure 2.12 : Evolutions dans l'acquisition et le traitement des données sur les sites de Varengville-sur-Mer et de Dieppe

2.2.1.3 Méthode de traitements

Tout en stabilisant l'erreur, ce changement de méthode de la lasergrammétrie à la photogrammétrie a permis de réduire le nombre de logiciels de cinq à deux, avec le logiciel payant Metashape et le logiciel libre CloudCompare développé par EDF (Figure 2.12 et Figure 2.13). Par rapport au TLS associé à une dizaine de cibles, le temps d'acquisition sur le terrain a été divisé par deux (3 h à 1 h 30), mais le temps de traitement (réalisé par mes soins, hormis les données dGPS fournies par R. Davidson) reste proche : une journée pour le site de Varengville-sur-Mer et une demi-journée pour Dieppe 1 O et Dieppe 2 N.

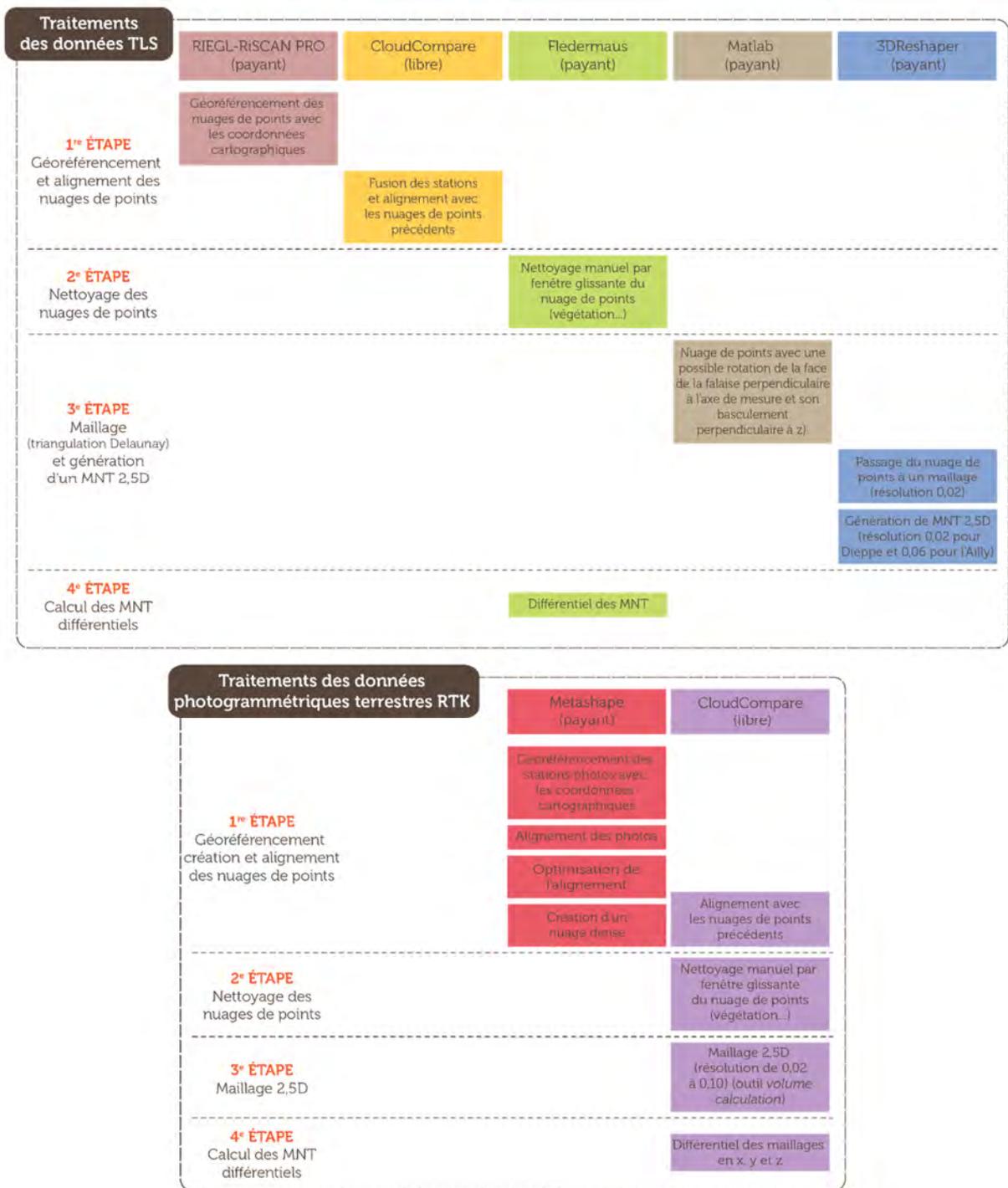


Figure 2.13 : Evolutions dans le traitement détaillé des données sur les sites de Varengeville-sur-Mer et de Dieppe (MNT pour modèle numérique de terrain)

2.2.2 Vers une détection semi-automatique de changement sur le front des falaises de Varengeville-sur-Mer grâce au suivi à haute fréquence temporelle : l'aide de l'AP¹⁰³

2.2.2.1 Présentation du réseau siamois adapté pour détecter le changement sur des nuages de points 3D

Nos suivis à haute fréquence temporelle (tous les quatre à cinq mois) du front de falaise à Varengeville-sur-Mer et Dieppe fournissent un grand volume de données. Par exemple, il y a 35 levés à l'Ailly à Varengeville-sur-Mer entre octobre 2010 et juillet 2021, soit 250 Go de données TLS et photogrammétriques terrestres RTK. Leur analyse repose sur de la détection de changement avec soit de l'érosion (ablation) du front de falaise, soit de l'accumulation (dépôt) en pied de falaise. Cette analyse se fait grâce à la génération de MNT différentiels (qui génèrent une perte d'information en raison du passage de la 3D à la 2,5D) et permet de détecter les volumes perdus ou gagnés. Cette chaîne de traitements sur les deux sites pourrait bénéficier des nouvelles technologies de traitement des données massives et 3D pour gagner du temps, parmi lesquelles l'AP.

La détection de changement 2D est étudiée depuis longtemps en télédétection pour les mises à jour cartographiques, pour connaître, par exemple, les impacts des catastrophes naturelles. Mais sur des objets verticaux, seule la donnée 3D est pertinente. Or, le caractère éparpillé et désordonné des nuages de points 3D empêche leur passage en matrice. Cela complique les calculs informatiques sur ces nuages de points, car les outils habituels de traitements d'images ne peuvent être utilisés. Par ailleurs, en plus des zones d'ombre fréquentes, deux nuages de points identiques n'ont pas les points au même endroit en raison, par exemple, des géométries d'acquisition, des capteurs, etc. Ces éléments vont compliquer la détection de changement. C'est la raison pour laquelle, les méthodes de détection de changement sur les nuages de points 3D passent par une « rasterisation », afin de revenir à la matrice 2D, mais en générant une perte d'information importante (les points les plus hauts sont conservés, mais les façades disparaissent) (de Gélis, 2021 ; de Gélis et al., 2021).

Les méthodes travaillant sur les nuages de points 3D sont soit 1) des post-classifications, à savoir une classification des nuages de points à chaque date, puis une comparaison des étiquettes pour avoir les informations sur le changement (S. Xu et al., 2015) soit 2) des pré-classifications, à savoir une extraction du changement puis une classification de ces changements. Le problème de ces deux méthodes est qu'à chaque étape, l'erreur de classification peut se propager. Pour diminuer l'erreur, diminuer le nombre d'étapes de traitements est l'une des clés. Tran et al. (2018) y parviennent par *machine learning* avec l'algorithme de *random forest* sur les attributs extraits des nuages de points (distribution, géométrie) ou les attributs entre deux nuages de points (de Gélis, 2021). Zhang et al. présentent en 2019 une méthode de détection de changement utilisant des réseaux neuronaux profonds sur des données 3D rasterisées, donc sur des données 2D. Ainsi, les travaux d'I. de Gélis sont les premiers à utiliser l'AP sur les données 3D à l'aide du réseau siamois (de Gélis, 2021 ; de Gélis et al., 2021). Sa méthode d'AP, conçue pour le milieu urbain, peut être testée sur les côtes à falaises afin de connaître la transposabilité de la méthode à d'autres environnements verticaux et changeants.

¹⁰³ Cette section contient de nombreux termes en anglais, car c'est la langue utilisée en informatique et parfois, certains termes ne sont pas traduisibles en français.

Classiquement et de manière synthétique, le réseau siamois est composé :

- d'un encodeur qui contient deux branches qui prennent chacune en entrée les deux images. Pour chacune des images, dans ces branches, il y a des convolutions¹⁰⁴, des *max-poolings*¹⁰⁵. Cette succession d'opérations permet d'extraire des attributs des images à différentes échelles ;
- d'un décodeur, où l'entrée correspond aux attributs extraits dans les deux branches des deux images qui vont, dans le décodeur, être concaténés puis concaténés à nouveau pour construire la sortie : une carte du changement.

Ce réseau siamois détecte et classe bien le changement sur les images en 2D (Caye Daudt et al., 2018 ; Jiang et al., 2020), mais pas sur les données 3D (qui ne sont pas matricielles). Cependant, la convolution 3D *Kernel Point Convolution* (KPConv), développée par Thomas et al., 2019, peut être intégrée dans le réseau siamois et faire de la détection de changement sur les nuages de points 3D. La fonction de convolution est définie grâce à une fonction noyau (*kernel*). Cette dernière est une sphère (ou un cylindre) qui va identifier des points noyaux (Figure 2.14). Par un calcul de distance entre les points des nuages de points et les points noyaux, certains poids vont être attribués à nos points du nuage de points et faire des convolutions dans l'espace 3D (de Gélis, 2021).

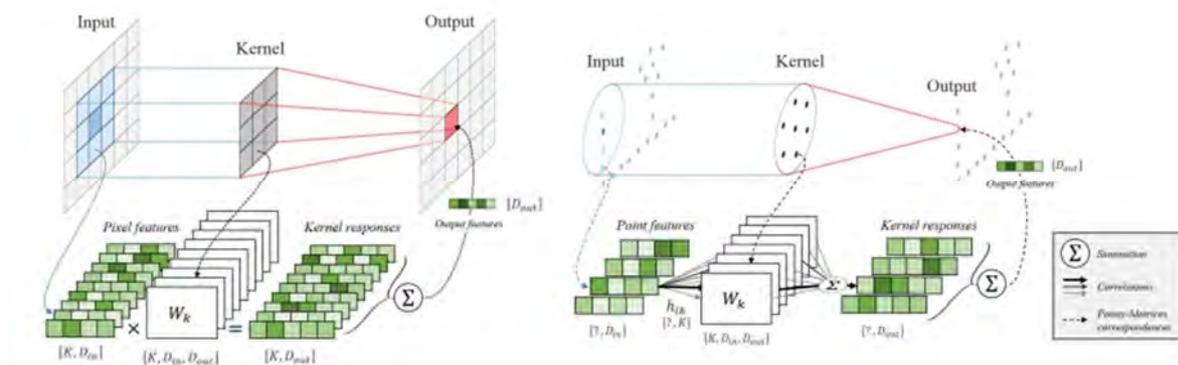


Figure 2.14 : Principe de KPConv sur des points 2D (et non 3D, pour une illustration plus simple) par rapport à une convolution classique sur une image (Thomas et al., 2019)

Les deux branches dans l'encodeur prennent en entrée les deux nuages de points 3D grâce à des convolutions KPConv et des sous-échantillonnages (qui ressemblent à des *max-poolings*) pour changer l'échelle de nos attributs extraits. A chaque étape, la différence des attributs extraits est calculée (réseau siamois), en sélectionnant les points des nuages de points 3D à partir d'un calcul du plus proche voisin. Une classe de changement est obtenue pour chacun des points (de Gélis, 2021 ; de Gélis et al., 2021) (Figure 2.15).

¹⁰⁴ Une convolution peut être exprimée comme un outil qui crée une carte de caractéristiques à partir de l'image originale (Kim, 2019). Autrement dit, la convolution est un filtre (une somme pondérée) qui capte une information spatiale comme les contours ou le voisinage. Plus la taille de la convolution est grande, plus le filtre sera fort. On fait généralement plusieurs convolutions pour obtenir plusieurs attributs structurants de l'image.

¹⁰⁵ Le *pooling* correspond à une réduction de taille (résolution), qui consiste à transformer l'image de la convolution en une petite image en extrayant un représentant de chaque partie (Kim, 2019).

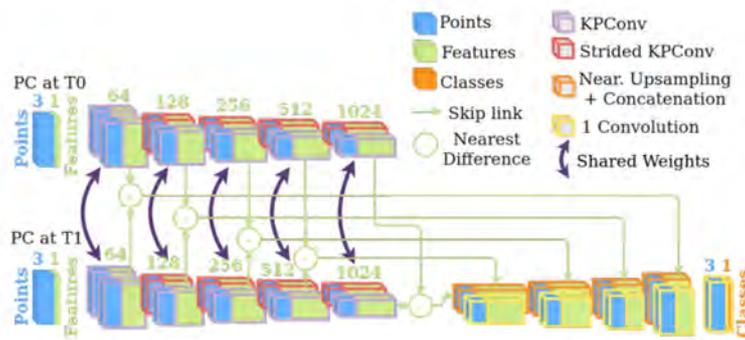


Figure 2.15 : Réseau siamois KPConv développé pour détecter le changement sur les nuages de points 3D (écrits PC dans la figure) (de Gélis et al., 2021)

2.2.2.2 Etapes de l'expérimentation du réseau siamois KPConv sur le front des falaises de Varengeville-sur-Mer

Pour expérimenter pour la première fois ce réseau siamois dans l'extraction et la classification de changement sur les falaises de Varengeville-sur-Mer, nous avons utilisé cinq nuages de points multisources (TLS et photogrammétrie terrestre classique¹⁰⁶) présentant une variété de changements.

Date	Type	Densité moyenne (points/m ²)
25/09/2013	TLS	202
28/01/2016	Photogrammétrie terrestre classique	9 440
02/11/2017	TLS	381
16/01/2018	TLS	334
14/04/2020	TLS	276

Tableau 2.4 : Nuages de points 3D du front de falaise de Varengeville-sur-Mer utilisés par le réseau siamois KPConv pour y détecter du changement (de Gélis et al., 2022)

Quatre principales étapes sont nécessaires (de Gélis et al., 2022) :

1) la préparation des données : une annotation manuelle est effectuée entre les couples de nuages de points à l'aide de l'outil C2C sur CloudCompare afin d'attribuer une étiquette à chaque point du deuxième nuage de la paire. Pour annoter les nuages, le seuil de détection entre les deux nuages de points de chaque couple est de 0,5 m puis affiné à 0,2 m pour certaines parties. Ainsi, seuls les mouvements supérieurs à 0,2-0,5 m sont annotés (certaines chutes de pierres peuvent être manquées). Quatre classes sont définies : pas de changement (0), érosion (1), accumulation (2) et pas de données à comparer (3). La classe 0 désigne les points dont la position a peu ou pas changé entre les deux nuages du couple. Les points du nuage le plus récent du couple sont considérés comme « érosion » (classe 1) lorsqu'ils apparaissent derrière l'ancien nuage de points et comme « accumulation » (classe 2) lorsqu'ils sont situés devant. La classe 3 est également définie pour répondre au problème d'occlusion (due aux méthodes d'acquisition différentes) ;

2) la division des données en jeux : pour évaluer la pertinence de l'apprentissage du réseau siamois, sans biais méthodologique, la base de données est divisée en trois jeux de données en essayant que chaque jeu

¹⁰⁶ La photogrammétrie terrestre classique correspond à un levé photogrammétrie terrestre sans connaissance des coordonnées géographiques ou cartographiques de chaque station photographique par dGPS en temps réel (RTK).

contienne bien les quatre classes : a) le jeu d'entraînement est un jeu d'exemples utilisés pour extraire des caractéristiques des données et ajuster les paramètres du réseau (notamment les poids) (nuages du 25/09/2013 et du 28/01/2017 ; nuages du côté ouest de la valleeuse du 02/11/2017 et du 16/01/2018), b) celui de validation permet d'évaluer l'ajustement du réseau sur le jeu de données d'entraînement tout en ajustant les hyperparamètres du modèle (son architecture comme le nombre de couches cachées, le nombre d'époques, etc.) (nuages du 28/01/2016 et du 02/11/2017). Ce jeu de données permet de tester le modèle à la fin de chaque itération complète du jeu d'entraînement (appelée aussi époque) pour déterminer la distance/similarité entre le résultat fourni par le modèle à la fin d'une itération et le résultat attendu (notre annotation). Cette distance permet de mettre à jour les poids du réseau pour la prochaine itération du jeu d'entraînement ; c) celui de test sert à évaluer de façon impartiale le réseau final sans aucune modification du réseau (nuages du côté est de la valleeuse du 02/11/2017 et du 16/01/2018, nuages du 16/01/2018 et du 14/04/2020). Cela permet d'évaluer la généralisation du modèle final (celui obtenu après validation). Les nuages sont sous-échantillonnés en fonction de la densité de points la plus faible de tous les nuages (1 point tous les 15 cm) ;

3) le paramétrage du réseau et de la méthode : contrairement au réseau siamois adapté aux nuages de points 3D en milieu urbain (de Gélis et al., 2021), le choix d'une sphère a été préféré au cylindre pour un calcul plus rapide des plus proches voisins (sur nos données, il y a moins de points dans une sphère que dans un cylindre, donc le temps de calcul est plus rapide). Le rayon de la sphère est de 10 m. La fonction de perte (qui permet de faire la descente de gradient et donc d'améliorer l'apprentissage), tout comme le mécanisme de régulation qui permet de limiter les phénomènes de sur-apprentissage, sont paramétrés selon de Gélis et al. (2021) ;

4) pour suivre, comprendre et évaluer la qualité de notre prédiction, deux métriques sont choisies : 1) *intersection over union* (IoU) pour comparer la région détectée « prédite » avec la région de la vérité terrain, de manière proportionnelle à la taille de l'objet recherché et 2) l'exactitude (habilité à réaliser des prédictions correctes).

2.2.3 A l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire : les images satellites Pléiades

Le projet CNES EROFALITT (érosion des falaises du littoral normand, 2016-2020) a eu pour objectifs : 1) d'évaluer le potentiel de l'imagerie oblique et très haute résolution Pléiades pour suivre l'érosion des côtes à falaises crayeuses normandes à l'échelle de plusieurs dizaines de kilomètres (compatible avec la cellule ou la sous-cellule hydro-sédimentaire), 2) de proposer une méthodologie d'acquisition et de traitement pour reconstruire par stéréorestitution, à partir d'images obliques, le front de falaise, 3) d'identifier le paramétrage idéal des missions Pléiades (angle de prise de vue le plus adapté au suivi du front de falaise, précision du MNT au sol et sur le front de falaise) pour assurer une bonne reconstitution du front de falaise et donc un suivi de l'érosion à l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire.

2.2.3.1 Caractéristiques des satellites et des images Pléiades

La constellation Pléiades est composée de deux satellites : Pléiades 1A lancé en décembre 2011 et en service depuis début juin 2012, et Pléiades 1B lancé en décembre 2012 et en service depuis avril 2013. Les deux satellites suivent la même orbite héliosynchrone, à 694 km d'altitude. Ce type d'orbite est très intéressant en photogrammétrie, car le satellite repasse au-dessus d'un point donné de la surface de la Terre

à la même heure solaire locale, ce qui limite par exemple les différences d'éclairage qui peuvent être gênantes dans le cas des prises de vue aériennes. Les passages s'effectuent toujours en fin de matinée en Normandie, les satellites passent au-dessus de la France vers 10h40 TU. Le cycle global du satellite est de 26 jours, c'est-à-dire qu'il repasse à la verticale d'un même lieu exactement 26 jours plus tard. Le système d'acquisition des images est un système *pushbroom* : le capteur balaye la zone perpendiculairement à son déplacement afin d'obtenir une information sur la couleur de chaque pixel, l'image étant restituée au fur et à mesure de l'avancement du satellite. La résolution dans la direction du déplacement est proportionnelle au temps d'intégration, compromis entre résolution spatiale (qui exige une intégration brève) et rapport signal-sur-bruit (à savoir la qualité de l'information reçue, qui exige une intégration longue). Lors de la prise de vue, les satellites Pléiades acquièrent en même temps une image panchromatique à 0,7 m de résolution spatiale et une image multispectrale (contenant quatre bandes spectrales : bleu, vert, rouge, proche infrarouge) à 2,8 m de résolution spatiale. Les produits fusionnés sont ensuite rééchantillonnés à 0,5 m de résolution (Astrium, 2012) (Tableau 2.5).

Nombre de satellites	2 (Pléiades 1A et Pléiades 1B)
Résolution au nadir de l'image panchromatique	0,7 m
Résolution au nadir de l'image multispectrale : bleu, vert, rouge, proche infrarouge	2,8 m
Fauchée au nadir	20 km
Altitude du satellite	694 km
Données codées	12 bits/pixel
Temps de revisite avec les deux satellites	1 jour
Angle de dépointage (°)	± 30° en standard, ± 45° maximum
Couverture moyenne	20 km*20 km
Coût des images satellites Pléiades pour les instituts de recherche	Gratuit (sous conditions)

Tableau 2.5 : Caractéristiques des images Pléiades (Astrium, 2012)

2.2.3.2 Méthode d'acquisition des données satellites du front de falaise

Cette approche a été testée sur les falaises crayeuses normandes entre Quiberville et Berneval-le-Grand (20 km) comprenant le site de Varengeville-sur-Mer, où il existe une érosion forte associée de nombreuses données de vérité terrain (suivi DYNALIT) (Figure 2.16). Mais ce secteur n'était pas optimal pour l'imagerie spatiale, en raison de son orientation nord (ombrage sur le front de falaise) et des conditions météorologiques souvent perturbées. Notre credo pour le choix de ce site fut : si notre méthode fonctionne ici, elle fonctionnera ailleurs.

De nombreuses discussions ont eu lieu au cours du printemps 2016 auprès d'Airbus quant au paramétrage des images, car nous travaillons sur un objet inhabituel, à savoir une paroi verticale qu'est le front de falaise. Cet objet vertical complique le paramétrage de l'acquisition¹⁰⁷. La stéréoscopie ou la tristéréoscopie classique qui consistent, au passage du satellite sur son orbite méridienne, à acquérir deux ou

¹⁰⁷ De plus, nous souhaitions acquérir les images à marée basse pour observer les mouvements gravitaires en pied de falaise. Cela n'a pas toujours été possible.

trois images sur la zone d'intérêt (images avant, nadir et arrière) s'avèrent ici inadaptées du fait de l'orientation du front de falaise : l'image arrière capturerait le plateau, et non le front de la falaise. Comme l'orbite du satellite change quotidiennement, nous avons imaginé une procédure d'acquisition originale : une acquisition multidade (sur plusieurs jours consécutifs) de deux images panchromatiques monodépointées (une dépointée *across-track* avec un angle d'incidence¹⁰⁸ jusqu'à 40° et une entre 0 et 10°) (Figure 2.16). Au total, 14 paires d'images stéréoscopiques (0-10° et 40°) ont été acquises : quatre en automne 2016, cinq durant l'été 2017 (Figure 2.16) et cinq durant l'hiver 2017-2018 (Tableau 2.6).

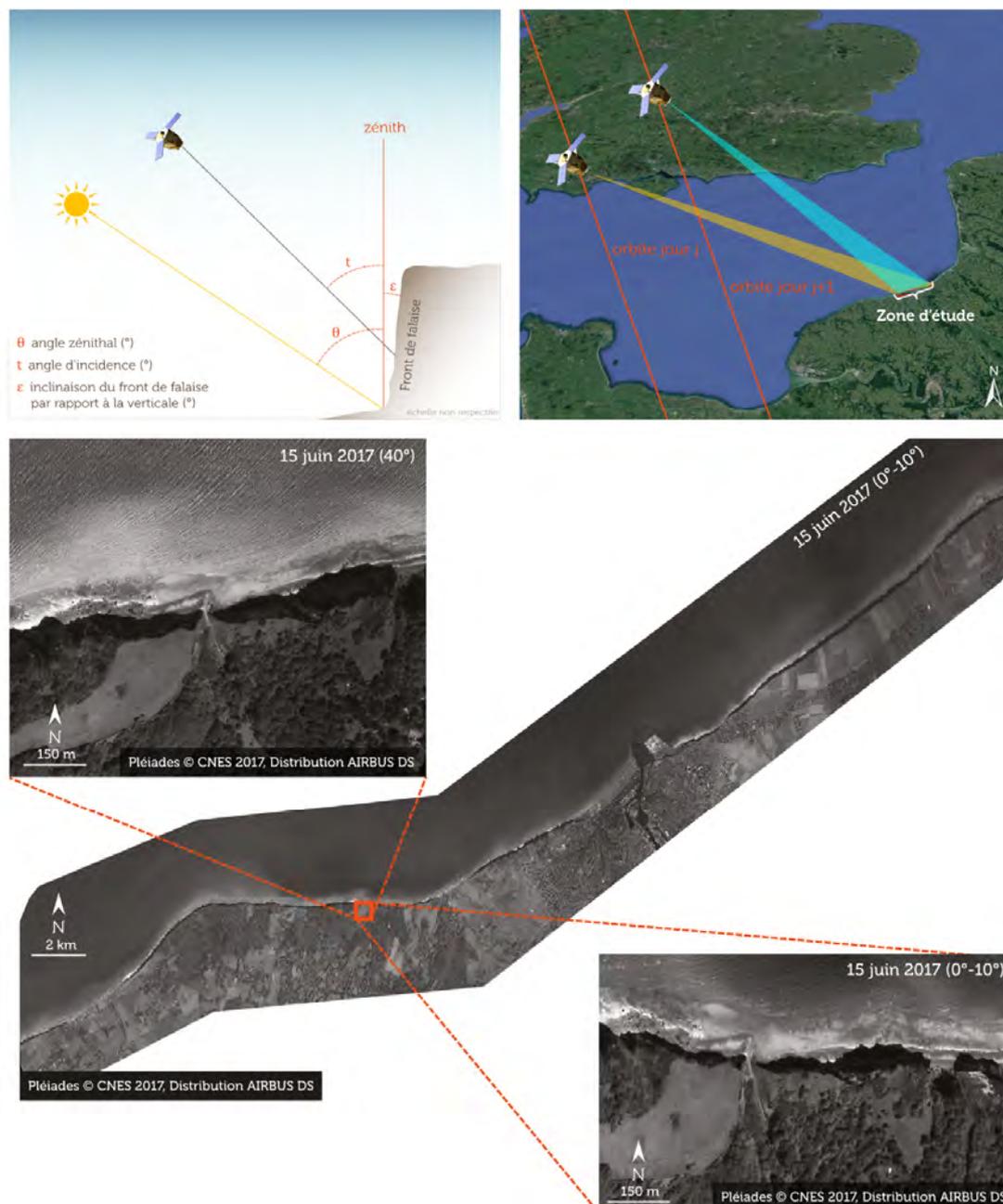


Figure 2.16 : Acquisition multidade d'images monodépointées (Letortu et al., 2020) et les différents angles dont l'angle d'incidence (Letortu et al., 2021).

Exemple de l'extension spatiale complète de l'image panchromatique du 15 juin 2017 entre Quiberville et Berneval-le-Grand (angle d'incidence 0-10°) et les paires stéréoscopiques découpées autour de Varengueville-sur-Mer (angles d'incidence 0-10° et 40°) (Letortu et al., 2021)

¹⁰⁸ L'angle d'incidence est différent de l'angle de vue en raison de la sphéricité de la Terre.

Date	Heure (UTC)	Nom du satellite Pléiades	Angle d'incidence demandé	Conditions météorologique	Angle de vue (tangage) (°)	Angle de vue (roulis) (°)	Angle d'incidence (tangage) (°)	Angle d'incidence (roulis) (°)	Distance oblique entre le satellite et la falaise (m)
05/10/2016	11h29	1B	0-10	Ensoleillé	2,25	29,16	12,96	-3,01	707 856
06/10/2016	11h21	1A	0-10	Nuageux	4,78	20,75	-11,50	-21,13	727 351
08/10/2016	11h06	1A	0-10	Ensoleillé	-0,70	0,90	0,74	-1,16	694 160
31/10/2016	11h29	1B	0-10	Ensoleillé	-1,06	29,28	-9,49	-31,98	700 857
10/06/2017	11h21	1B	0-10	Ensoleillé	9,65	20,60	-16,56	-19,65	743 652
15/06/2017	11h33	1B	0-10	Ensoleillé	1,01	32,83	-11,75	-35,9	703 506
18/06/2017	11h10	1A	0-10	Ensoleillé	3,07	6,47	-4,60	-5,39	698 687
06/07/2017	11h21	1B	0-10	Nuageux	9,13	20,45	-15,95	-19,64	742 090
21/07/2017	11h06	1A	0-10	Ensoleillé	9,71	0,17	-10,4	2,20	916 552
01/12/2017	11h32	1A	0-10	Nuageux	30,47	31,29	-11,75	-35,86	884 638
16/12/2017	11h17	1B	0-10	Nuageux	9,71	15,72	-14,78	-14,35	759 203
24/01/2018	11h17	1A	0-10	Nuageux	-0,66	16,09	-3,88	-17,54	731 573
12/02/2018	11h20	1A	0-10	Nuageux	9,15	20,34	-15,93	-19,51	742 410
17/02/2018	11h32	1A	0-10	Ensoleillé	5,91	32,44	-18,71	-33,79	720 932
05/10/2016	11h27	1B	40	Ensoleillé	40,65	26,65	-50,56	-15,94	1 023 748
06/10/2016	11h20	1A	40	Nuageux	30,39	19,35	-37,59	-11,93	884 387
08/10/2016	11h05	1A	40	Nuageux	34,15	0,70	-37,55	10,79	850 050
31/10/2016	11h28	1B	40	Brumeux	30,39	27,7	-40,49	-21,52	878 726
10/06/2017	11h20	1B	40	Ensoleillé	40,69	18,35	-48,5	-6,23	1 026 143
15/06/2017	11h31	1B	40	Ensoleillé	30,48	31,32	-42,09	-25,81	884 838
18/06/2017	11h08	1A	40	Ensoleillé	37,32	3,83	-41,92	7,65	890 433
06/07/2017	11h20	1B	40	Ensoleillé	30,46	19,22	-37,62	-11,77	885 380
21/07/2017	11h05	1A	40	Ensoleillé et nuages épars	39,24	1,42	-43,56	13,63	704 437
01/12/2017	11h31	1A	40	Nuageux	-1,03	32,79	-42,08	-25,74	703 402
16/12/2017	11h17	1B	40	Nuageux	30,43	14,50	-36,34	-6,60	896 286
24/01/2018	11h16	1A	40	Nuageux	30,48	14,46	-36,38	-6,57	896 897
12/02/2018	11h20	1A	40	Nuageux	30,46	19,11	-37,59	-11,67	885 643
17/02/2018	11h30	1A	40	Ensoleillé	36,03	30,63	-47,2	-22,92	954 538

Tableau 2.6 : Caractéristiques des images acquises lors du projet CNES EROFALITT (Letortu et al., 2020)

En raison de la géométrie d'acquisition (angle d'incidence et distance du satellite à la zone d'intérêt), la distance d'échantillonnage au sol (distance entre le point central de deux pixels consécutifs) est variable d'un jour à l'autre, variant par exemple de 0,27 m à 1,83 m pour des images à 40° d'angle d'incidence.

2.2.3.3 Sélection des images pour la reconstitution 3D

Pour limiter les différences induites par la configuration géométrique des images, la reconstruction stéréoscopique et tristéréoscopique à partir d'images acquises avec des angles d'incidence similaires (40° ou 0-10°) a été privilégiée.

Après différents essais, les deux ou trois dates choisies doivent 1) avoir une bonne qualité radiométrique (ciel dégagé, peu d'ombre sur le front de falaise), 2) être espacées au maximum de quelques jours pour l'érosion (changements), 3) avoir un coefficient d'aplatissement du pixel limité. Les images panchromatiques

ont été utilisées, car leur résolution spatiale est plus fine (0,7 m) que celle des images multispectrales (2,8 m). La sélection, sur un terrain difficile comme la Seine-Maritime, a été drastique avec sept meilleurs paires ou triplets sélectionnés (Letortu et al., 2020, 2021) (Tableau 2.7).

Dates des images	Heures de passage du satellite (UTC)	Angles zénithaux (°) des images	Angle(s) d'incidence des images (°)
10 et 15/06/2017	11h20 et 11h31	62,1 et 62,9	40
10 et 15/06/2017	11h21 et 11h33	62,2 et 62,7	0-10
10/06/2017	11h21 et 11h20	62,2 et 62,1	0-10 et 40
15/06/2017	11h33 et 11h31	62,7 et 62,9	0-10 et 40
15/06 et 06/07/2017	11h31 et 11h20	62,9 et 61,5	40
15/06 et 06/07/2017	11h33 et 11h21	62,1 et 61,5	0-10
10, 15 et 18/06/2017	11h20, 11h31 et 11h08	62,1, 62,9 et 61,7	40

Tableau 2.7 : Les meilleures images pour reconstruire en 3D le front des falaises de Varengeville-sur-Mer (d'après Letortu et al., 2021)

2.2.3.4 Méthode de reconstitution 3D du front de falaise

a. Logiciels choisis

Les images acquises en *pushbroom* combinées à l'originalité des paramètres d'acquisition (images dépointées et multidates) et de l'objet d'étude (le front de falaise subvertical) limitent considérablement le nombre de logiciels utilisables. Parmi les logiciels adaptés (par exemple, ASP, ERDAS Imagine, S2P¹⁰⁹, MicMac, etc.¹¹⁰), nous avons souhaité utiliser des logiciels libres et bien documentés pour éviter toute boîte noire au cours du traitement et pour une science ouverte. Nous avons ainsi sélectionné les logiciels ASP (Shean et al., 2016 ; <https://stereopipeline.readthedocs.io/en/latest/introduction.html>) et MicMac (Rupnik et al., 2017 ; <https://micmac.ensg.eu/>) pour reconstruire le front de falaise.

b. Chaînes de traitements testées

La chaîne de traitement d'images de chaque logiciel suit les étapes traditionnelles de la restitution stéréoscopique pour les reconstructions 3D : données d'entrée, données découpées, alignement des images, corrélation et génération de nuages de points 3D (NASA, 2019 ; Rupnik et al., 2020). Dans l'étape de corrélation, l'algorithme de mise en correspondance constitue le cœur de la chaîne de traitement. Afin d'identifier le meilleur logiciel pour traiter nos images obliques, une analyse de sensibilité a été menée (algorithmes (associés à la fonction de coût¹¹¹ sur ASP) et les paramètres reliés à cette étape (la taille de la

¹⁰⁹ Ames stereo pipeline, Earth resource data analysis system et Satellite stereo pipeline

¹¹⁰ Metashape d'Agisoft ne permettait pas, au moment de l'étude, de traiter des images avec des « *rational polynomial coefficients* » (RPC), fichiers fournissant une représentation d'une géométrie sol-image permettant un traitement photogrammétrique sans nécessiter un modèle physique de caméra. C'est désormais possible avec des résultats bien supérieurs aux logiciels libres évoqués ci-dessus (publication en cours).

¹¹¹ ASP permet de choisir les configurations à utiliser durant l'étape de corrélation (*normalized correlation coefficient* (fonction de coût 2), *census transform* (fonction de coût 3), *ternary census transform* (fonction de coût 4)) (NASA, 2019).

fenêtre de corrélation¹¹², la régularisation¹¹³) sur les meilleures images satellites à notre disposition (Figure 2.17, pour plus de détails : Letortu et al., 2021).

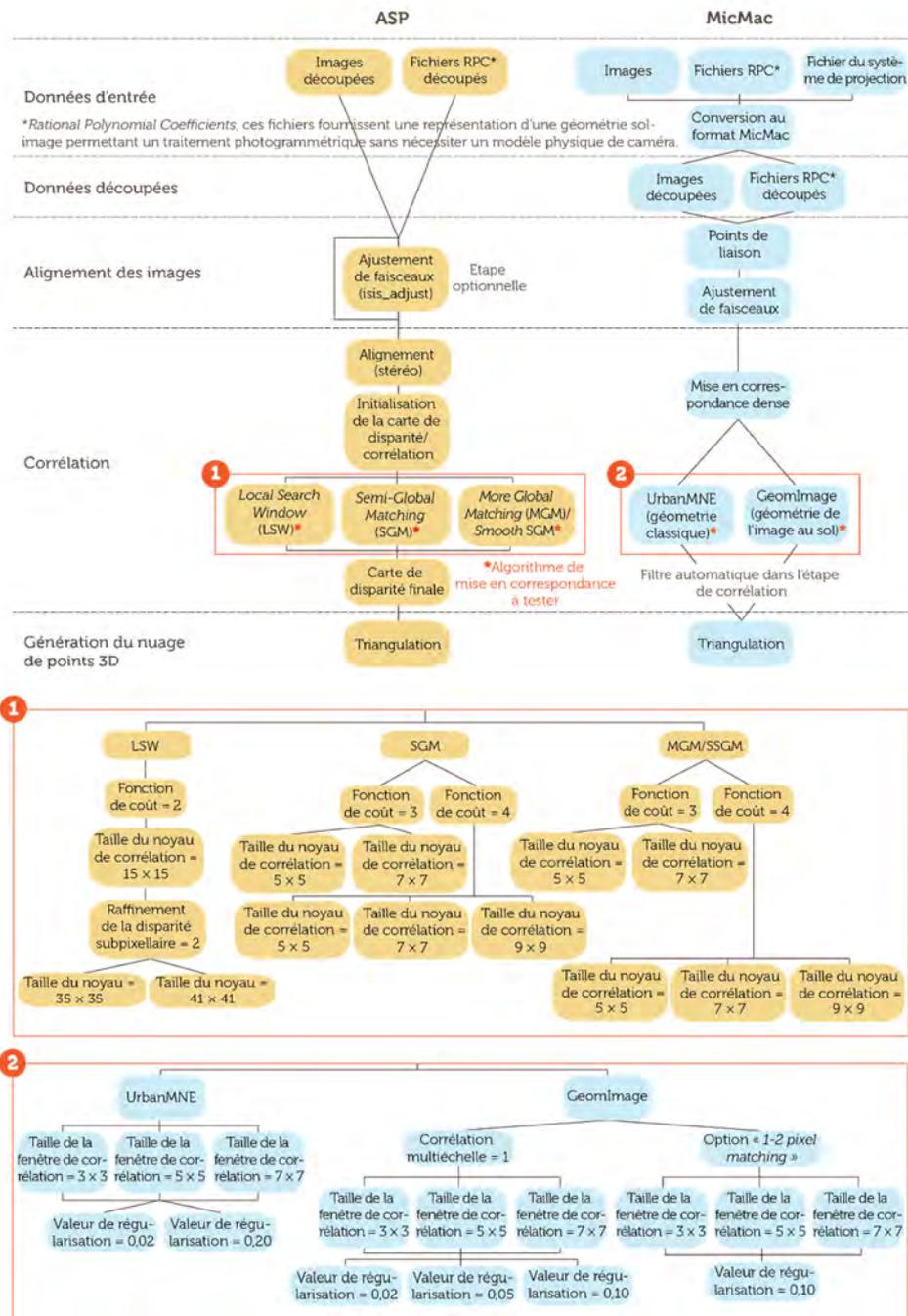


Figure 2.17 : Chaînes de traitements d’ASP et de MicMac pour obtenir un nuage de points (NASA, 2019 ; Rupnik et al., 2020) et les différents tests réalisés à l’étape de corrélation pour déterminer le meilleur logiciel (Letortu et al., 2021)

¹¹² La stéréovision permet de déterminer l’information de profondeur d’une scène à partir de deux images de cette scène acquises à peu d’intervalles de temps, mais depuis des points de vue légèrement différents. L’étape de mise de correspondance permet de déterminer les paires de pixels homologues (un dans chaque image), lesquels sont les projections d’un même point de la scène réelle (Lefebvre et al., 2007). La mise en correspondance stéréoscopique se réalise par corrélation, en utilisant de fenêtres de corrélation bidimensionnelles. Sur MicMac par exemple, le carré minimal est de trois pixels de côté (<https://github.com/micmacIGN/Documentation/blob/master/DocMicMac.pdf>).

¹¹³ La régularisation représente le degré de lissage et varie entre 0 et 1 : une valeur élevée signifie un degré élevé de lissage.

c. Estimation de la qualité des reconstructions 3D

Un critère de précision est obligatoire afin d'évaluer la qualité de la reconstruction 3D et donc la pertinence de nos données pour effectuer des comparaisons monosourcées ou multisourcées (données satellites, TLS, drone). Grâce à la synchronicité des levés satellites et drone à Varengueville-sur-Mer (respectivement du 10 au 18 juin 2017 et le 26 juin 2017), les erreurs dues à l'érosion sont limitées. La précision des reconstructions 3D peut être estimée.

Pour ce faire, les reconstructions 3D issues des images Pléiades ont été filtrées (suppression des artefacts), découpées afin d'avoir la même étendue spatiale (53 700 m²). Quant au nuage de points acquis par drone, il a été sous-échantillonné à 5 cm pour pouvoir être facilement manipulable et avec une densité de points cohérente par rapport aux nuages de points satellites. Le géoréférencement et l'alignement sont faits de manière combinée par un alignement semi-automatique (ICP dans CloudCompare) par transformation *rigid body* des nuages de points Pléiades sur le maillage géoréférencé (Lambert-93 associé au RGF93 et au NGF-IGN69) du drone (considéré comme la référence). L'alignement est efficacement contraint verticalement (plate-forme littorale, plateau) et le long de la côte et les nuages de points sont ainsi géoréférencés. La qualité des reconstructions 3D issues des images Pléiades est évaluée en comparaison avec la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE en m) de l'alignement. La précision¹¹⁴ est évaluée dans la direction perpendiculairement à la falaise (qui est la direction de l'érosion sur la falaise), basée sur la distance relative (normale à la falaise) après ajustement. L'erreur de géoréférencement (erreur absolue, appelée exactitude¹¹⁵) est de moindre importance, car nous disposons fréquemment de levés parfaitement géoréférencés et de THRS (TLS, drone, photogrammétrie RTK) qui permettent d'aligner les nuages de points issus des images Pléiades (Figure 2.18).

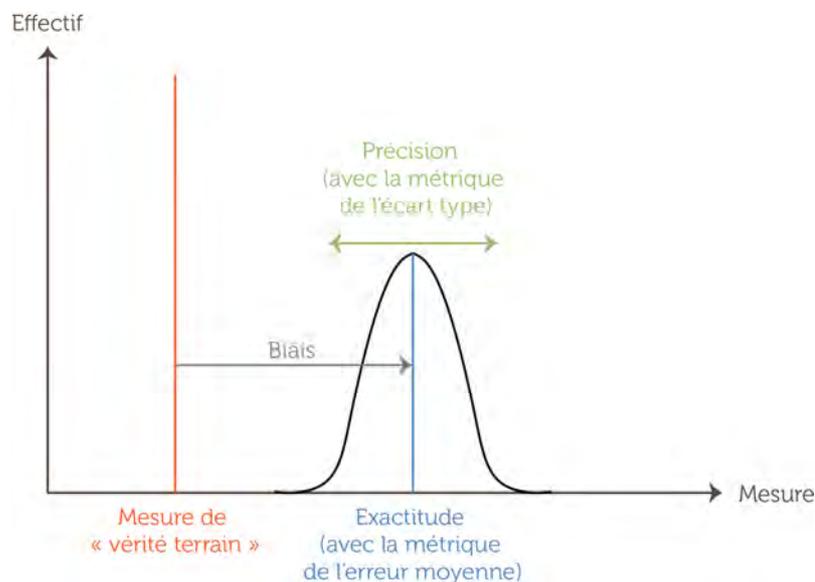


Figure 2.18 : Différence entre la précision et l'exactitude

¹¹⁴ La précision ou la fidélité (« *precision* ») correspond à « l'étroitesse de l'accord entre les indications ou les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées. La précision est en général exprimée numériquement par des caractéristiques telles que l'écart type, la variance ou le coefficient de variation dans les conditions spécifiées » (JCGM, 2012, p. 22).

¹¹⁵ L'exactitude (« *accuracy* ») correspond à « l'étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et une valeur vraie d'un mesurande » (JCGM, 2012, p. 21). L'exactitude est en général exprimée numériquement par des caractéristiques telles que l'erreur moyenne (parfois la distance moyenne en 2D).

2.3 Suivis multiparamètres et continus en pluridisciplinarité

2.3.1 En Bretagne

2.3.1.1 Instrumentation et données topographiques complémentaires

Dans le cadre du projet F3, l'instrumentation de la falaise de Plougonvelin (Figure 2.19 et Tableau 2.8), entre le 18 février et le 22 mai 2017, a consisté en un suivi (Letortu et al., 2017) :

1) de la microfracturation à l'échelle du front de falaise avec quatre géophones, deux extensomètres, deux inclinomètres et 20 fissuromètres. Trois géophones horizontaux ont été installés sur le front de falaise à différentes hauteurs en subsurface (à 0,9 m de profondeur dans le massif rocheux constitué d'orthoogneiss) tandis que le géophone vertical a été mis en place en haut de falaise (à 1 m de profondeur dans le sol). Cette configuration a permis de mesurer l'évolution de la microfracturation dans l'espace et dans le temps. Ainsi, les périodes de forte concentration de signaux électroacoustiques ont été analysées dans le but d'identifier le ou les agent(s) et le(s) processus responsable(s) de la réponse mécanique de la falaise (l'impact des vagues, le battement du toit de la nappe, etc.). A proximité des géophones positionnés sur le front de falaise, le suivi de l'évolution d'un certain nombre de failles et de diaclases en surface a été réalisé par les fissuromètres, les deux extensomètres et les deux inclinomètres ;

2) des facteurs et des processus marins comme le niveau d'eau (capteurs de pression) et l'impact des vagues sur la falaise (capteur de force et sismomètre à large bande) associés à une caméra vidéo. La disposition des quatre capteurs de pression le long d'un transect perpendiculaire au front de falaise a permis de connaître précisément le forçage par la houle et la mer du vent, notamment le niveau d'eau (intégrant les surcotes/décotes barométrique et anémométrique, le *swash runup* et le *wave setup*¹¹⁶), la hauteur significative des vagues (H_s ¹¹⁷), mais aussi la répartition spectrale de l'énergie incidente (par exemple, la proportion d'IG). La hauteur atteinte par les vagues sur le front de falaise a été estimée grâce au système d'acquisition vidéo positionné sur un pointement rocheux (analyse des niveaux atteints sur les images *a posteriori*). L'impact causé par la houle sur la falaise, ainsi que l'effet levier engendré par les IG (sous l'effet de la surcharge exercée par la colonne d'eau en pied de falaise), ont été mesurés respectivement par le capteur de force (disposé en pied de falaise) et le sismomètre à large bande (positionné en haut de falaise). Le premier a quantifié l'énergie dissipée lors de l'impact des vagues en pied de falaise. Le second a fourni les déplacements micrométriques enregistrés en haut de falaise. Le couplage sismomètre/géophones/caméra permet d'enregistrer la réponse mécanique de la falaise et de visualiser la rupture en temps réel, le cas échéant ;

¹¹⁶ Le *swash runup* est un effet hydrodynamique marqué par une surélévation du niveau d'eau liée au déferlement sur la plage. Le *wave setup* est également un effet hydrodynamique entraînant une surélévation liée à l'action de la houle avant le déferlement (accumulation d'eau à la côte). Le terme synthétique est le *runup* (la différence verticale entre le niveau maximum atteint par le jet de rive et le niveau moyen de la mer sans agitation) (Komar, 1998). Ces effets hydrodynamiques (terme général de *runup*) peuvent générer des niveaux d'eau extrêmes (Komar, 1998 ; Ruggiero et al., 2001 ; Cariolet et Suanez, 2013 ; Dodet et al., 2018) qui vont influencer sur les processus d'érosion côtière dès lors que le *swash* atteint le pied de la plage et de la falaise.

¹¹⁷ La H_s représente la moyenne des hauteurs (mesurées entre crête et creux) du tiers des plus fortes vagues. La hauteur significative des vagues peut être appréciée par une analyse temporelle (ou dite vague par vague), notée alors $H_{1/3}$ (moyenne du tiers supérieur des hauteurs d'un train de vagues) ou, estimée par analyse spectrale, notée alors H_{m0} (hauteur significative calculée à partir du moment d'ordre zéro de la densité spectrale). Dans notre cas, il s'agit de H_{m0} .

3) des facteurs et processus continentaux comme la circulation d'eau dans le massif rocheux (infiltration) et les variations thermiques grâce à la mise en place respectivement d'un piézomètre et d'une station météorologique équipée de sondes thermiques distantes. En complément des données disponibles dans les communes voisines¹¹⁸, les variations du toit de la nappe (et donc des pressions hydrostatiques au sein du massif rocheux) en fonction des précipitations et des marées ont été enregistrées grâce à un piézomètre installé dans un puits sur le plateau, à 350 m de la paroi rocheuse instrumentée. La station météorologique a été installée en haut de falaise tandis que quatre sondes thermiques ont été déployées sur le front de falaise en subsurface (10 cm de profondeur), sur deux lithologies différentes (orthogneiss et granodiorite). Ces sondes renseignent sur les variations thermiques des roches du front de falaise (en fonction du rayonnement solaire et de l'albédo) qui peuvent favoriser la thermoclastic.



Figure 2.19 : Environnement de l'instrumentation à Plougonvelin (côté ouest de la plage de Porsmilin) et présentation du matériel déployé (Letortu et al., 2017)

Ce suivi de trois mois a mobilisé, depuis l'installation des capteurs jusqu'au dernier relevé de données, environ 80 jours équivalent temps plein (ETP) (soit 27 jours ETP par mois d'instrumentation).

Entre mars et mai 2017, sept levés au dGPS ont été réalisés du front de falaise instrumenté à l'estran (en passant à proximité des capteurs de pression) afin de suivre l'évolution du profil de plage, en fonction des conditions d'agitation. Un levé drone (DRELIO 10) a été réalisé en mars 2017 pour obtenir une vue

¹¹⁸ www.ad.es.eaufrance.fr

d'ensemble de l'instrumentation et de son environnement proche (plage, falaise, plateau). Deux suivis TLS (RIEGL VZ400) ont été effectués (10 mars et 24 mai 2017) pour suivre l'éventuelle érosion du front de falaise.

Thématique	Instrument	Modèle (marque)	Nombre	Localisation	Fréquence d'échantillonnage (UTC)
Microfracturation	Géophone (massif rocheux)	Triaxial (IMS)	3	Front de falaise	4,5-100 Hz, déclenché par un événement
	Géophone (sol)	Triaxial (IMS)	1	Haut de falaise	4,5-100 Hz, déclenché par un événement
	Extensomètre	4420 VW, (Geokon)	2	Front de falaise	1 h
	Inclinomètre	6350 VW (Geokon)	2	Front de falaise	1 h
	Fissuromètre	Couple de vis	20	Front de falaise	Hebdomadaire
Facteurs et processus marins	Capteur de force	FN9620-M-10KN (TE connectivity)	1	Front de falaise	1 kHz, déclenché lorsque les vagues atteignent le capteur
	Sismomètre	Trillium Compact Posthole (Nanometrics)	1	Haut de falaise	0,01-100 Hz
	Capteur de pression	Wave gauge (OSSl)	4	Estran	10 Hz
	Caméra vidéo	Caméra P-1365-E (Axis)	1	Pointement rocheux sur l'estran	4 Hz, 1 920*1 080 pixels, de 2 h avant jusqu'à 2 h après chaque marée haute et 30 min à chaque marée basse
Facteurs et processus continentaux	Sonde de température	Sonde de température en acier inoxydable avec terminaison bifilaire, Vantage Pro 2 (Davis)	4	Front de falaise	1 h
	Station météorologique (incluant quatre capteurs d'humidité du sol)	Vantage Pro 2 (Davis)	1	Haut de falaise	1 h
	Piézomètre	CNR10R (Panatronic)	1	Haut de falaise	1 h

Tableau 2.8 : Instruments utilisés et caractéristiques d'acquisition des données entre le 18/02/2017 et le 22/05/2017 (modifié d'après Letortu et al., 2017)

2.3.1.2 Analyse des données

L'analyse des facteurs et processus continentaux était classique et a été réalisée partiellement, en équipe avec K. Laute et E. Augereau. L'analyse des facteurs et processus marins a été menée par E. Augereau, N. Le Dantec, F. Floc'h et J. Ammann (Geo-Ocean). Le suivi de la microfracturation a été réalisé par K. Laute, E. Augereau et moi. Cette instrumentation a été innovante par l'utilisation des géophones. Ce

signal électroacoustique est complexe à analyser et aucun de nous n'avions cette expertise. Nous nous sommes donc tournés vers l'équipe de l'institut de physique du globe à Strasbourg. La collaboration avec C. Hibert a permis de mettre en place une méthode de classification automatique des signaux enregistrés par les géophones par *machine learning*. Trois classes sont dissociées : « bruit » (contenant par exemple des pas de personnes ou d'animaux), « microséismes » et « classe particulière » (contenant potentiellement le déferlement de vagues).

a. Fracturation sur le front de falaise

Les données des deux extensomètres ont été corrigées pour éviter toute dérive instrumentale (mécanique et électronique) liée à la température du capteur. Les équations de calibration sont fournies par le constructeur Geokon pour chaque capteur¹¹⁹.

Les données des extensomètres mesurent un écartement par rapport à la position lors de la pose. Afin de savoir s'il y a mouvement sur les fractures existantes, une différence de position par rapport à l'état précédent est calculée. Par ailleurs, il existe un bruit instrumental à partir duquel le mouvement n'est pas jugé significatif. Après observation des données, notre bruit instrumental est estimé à 5 μm (filtre de seulement 7 valeurs avec le passage de 4 536 à 4 529 valeurs).

Les mouvements mesurés par les extensomètres ont été mis en lien avec les variables environnementales mesurées par nos capteurs pour mettre en évidence des corrélations.

b. Niveau d'eau enregistré par les capteurs de pression

Un capteur de pression mesure une pression totale composée de la pression atmosphérique, la pression statique due au poids de la colonne d'eau et la pression dynamique due à la vitesse du fluide. Le traitement des données vise à obtenir des niveaux d'eau (fonction du poids de la colonne d'eau) en fonction des bandes de fréquence (IG, SF, DF, HF). E. Augereau a effectué ce travail en reprenant le code de F. Floc'h, et en l'adaptant à notre étude avec l'aide de N. Le Dantec. Le traitement peut être résumé en cinq étapes successives :

- 1) le calcul de la pression atmosphérique pour enlever le poids de l'atmosphère (correction atmosphérique) ;
- 2) le calcul de la pression dynamique (liée au mouvement des vagues) pour n'avoir que la colonne d'eau (correction non hydrostatique) ;
- 3) le seuillage avec suppression des vagues levées (juste avant le déferlement) et des vagues déferlées pour avoir des hauteurs d'eau « pseudo hauteur au large » ;
- 4) la suppression du signal de marée ;
- 5) le calcul des H_s par analyse spectrale.

c. Microséismes enregistrés par les géophones

C. Hibert a classifié les signaux électroacoustiques (autour de 300 000) enregistrés par les géophones. Sur le jeu d'entraînement, la classification permet d'identifier à 94 % les signaux de « bruit », 96 % les

¹¹⁹ Un extensomètre avait, en plus, été testé *in situ* : il a été fixé à une surface peu déformable (béton) sur plusieurs jours en extérieur afin de s'assurer de la bonne correction en température.

« microséismes » et 74 % la « classe particulière » (soit un taux de bonne classification de 92 %). Cet entraînement est ensuite appliqué à l'ensemble des signaux : chaque signal est classifié, avec un score allant de 0 à 1 (plus la valeur est haute, plus l'algorithme est certain que le signal appartient à la classe). Les signaux incertains sont relativement nombreux en raison de l'environnement complexe (pas des randonneurs et d'animaux, vagues, présence d'arbres à proximité qui génèrent des signaux s'il y a du vent, etc.). Pour garantir une plus grande fiabilité du catalogue créé, C. Hibert a :

- rassemblé les signaux en événement lorsqu'ils se produisent durant la même seconde ;
- classifié ces derniers en fonction des différentes informations des géophones : si un événement est classifié comme « microséisme » par les quatre géophones, le score de 1 est attribué à cette classification, car la probabilité d'une classification correcte est très élevée ;
- conservé uniquement les événements classés comme microséismes ayant un score supérieur ou égal à 0,9 (moyenne des probabilités de chaque géophone d'une classification correcte en « microséisme ») permettant d'avoir un catalogue robuste, nommé cataeve, de 10 453 événements microsismiques (Figure 2.20).

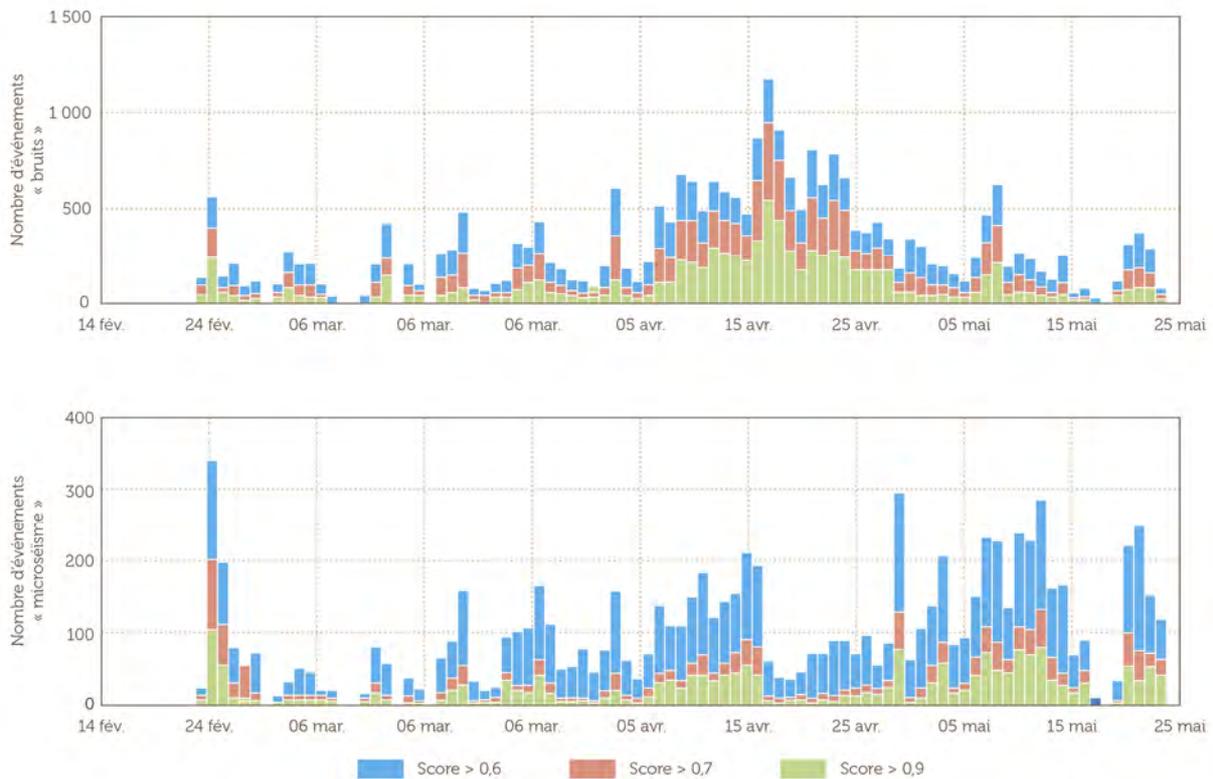


Figure 2.20 : Histogramme représentant les scores de classification durant l'instrumentation en fonction de la classe « bruit » et la classe « microséisme » (C. Hibert)

d. Combinaison des données grâce aux analyses statistiques

Grâce aux traitements des données et aux discussions avec K. Laute, E. Augereau et N. Le Dantec, j'ai pu réaliser les analyses statistiques pour répondre aux questions suivantes : qu'est-ce qui explique les mouvements des extensomètres ? Les microséismes sont-ils expliqués par un ou des facteur(s) spécifique(s) ? Si oui, quelles sont les conditions les plus propices au déclenchement de microséismes ? La présence et le nombre de microséismes sont-ils expliqués par un ou des facteur(s) spécifique(s) ?

Dans le cas des mouvements enregistrés par les extensomètres, une analyse bivariée a été suffisante pour mettre en évidence le lien entre les mouvements et la température.

Dans le cas des microséismes enregistrés par les géophones, des analyses statistiques bivariées et multivariées (ACP, CAH et test du χ^2) ont été nécessaires. Des méthodes statistiques bivariées et multivariées sur le logiciel libre R ont permis d'analyser notre jeu de données entre février et mai 2017. L'échantillonnage temporel étant différent d'un instrument à l'autre, l'échantillonnage temporel le plus faible (1 h, pour la station météorologique) constitue notre référence. Les séries de données de tous les autres instruments ont donc été rééchantillonnées à 1 h.

Grâce à une matrice de corrélation, les variables environnementales redondantes ont été éliminées. Les six variables environnementales synthétiques (marines et continentales) retenues sont : le niveau d'eau moyen (marée et surcote/décote, m), le maximum de la H_s (m), le coefficient de marée, la vitesse du vent (m/s), la somme des précipitations (mm, cumul sur 1 h) et la température de la roche sur le front de falaise (°C). Nous avons également ajouté deux variables quantitatives supplémentaires : les mouvements mesurés par chacun des deux extensomètres pour savoir si les conditions favorables aux microséismes étaient celles favorables aux mouvements des extensomètres. Les périodes présentant des lacunes sur l'une des variables (en raison d'une défaillance de l'instrument) ont été supprimées.

L'ensemble de données de 28 février au 22 mai 2017 est composé de 1 492 individus (périodes de 1 h avec et sans microséismes) : 449 présentant des microséismes (individus actifs) et 1 043 ne présentant aucun microséisme (individus supplémentaires). La population d'individus actifs est suffisamment importante pour réaliser des analyses statistiques. Les données ont été standardisées. Les analyses statistiques sur les individus actifs et supplémentaires permettent d'identifier les facteurs environnementaux (continentaux, marins) qui discriminent les périodes de 1 h avec et sans microséismes. Autrement dit, il s'agit d'identifier les principaux facteurs environnementaux qui provoquent les microséismes.

Le détail des analyses statistiques est présenté dans le Tableau 2.9, avec des méthodes statistiques multivariées (analyse en composantes principales (ACP), classification ascendante hiérarchique (CAH)) et bivariées (test du χ^2), qui ont été séquencées en quatre étapes :

1) une ACP a été réalisée pour visualiser les liens entre les variables et l'existence de groupes d'individus et de groupes de variables (Saporta, 2006). Cette structure met en évidence le/les facteur(s) *a priori* le(s) plus pertinent(s) pour synthétiser les conditions marines et continentales qui caractérisent les individus ;

2) la deuxième étape est une CAH (distance euclidienne, méthode de Ward), pour laquelle nous avons utilisé les résultats de l'ACP : les variables des individus sont leurs coordonnées ACP sur les trois premières composantes. Cette étape permet de différencier les individus (périodes de 1 h) en fonction des facteurs marins et continentaux qui leur sont associés, ce qui conduit à la typologie des conditions marines et continentales provoquant ou non des microséismes ;

3) la troisième étape a consisté en une analyse des moyennes des classes de la typologie donnant les caractéristiques moyennes des conditions marines et continentales entraînant, ou non, des microséismes ;

4) dans la quatrième étape, des informations complémentaires sur les microséismes ont été prises en compte (présence/absence de microséismes et fréquence des microséismes). Deux tests du χ^2 (test d'indépendance, valeur p respectivement de $1,1 \cdot 10^{-5}$ et $6,8 \cdot 10^{-7}$, couplée à un niveau α de 0,05 %) ont ainsi

été réalisés pour vérifier si certains types de conditions marines et continentales génèrent préférentiellement des microséismes, et ce, avec une fréquence particulière de microséismes (0 ; 1 à 2, 3 et plus).

Méthodes	Microséismes enregistrés par les géophones
<p>1^{re} ETAPE ACP</p> <p>Visualise les liens entre les variables, la présence de groupes d'individus et de groupes de variables</p>	<p>Variables marines et continentales : niveau d'eau moyen, coefficient de marée, maximum de la H_s, vitesse du vent, cumul des précipitations, température de surface sur la roche</p> <p>Individus actifs : périodes de 1 h avec microséismes Individus supplémentaires : périodes de 1 h sans microséismes</p>
<p>2^e ETAPE CAH</p> <p>Différencie les caractéristiques continentales et marines des périodes de 1 h et crée une typologie</p>	<p>Individus : coordonnées des périodes de 1 h sur les composantes de l'ACP</p>
<p>3^e ETAPE Moyenne des classes sur les coordonnées factorielles et les variables</p> <p>Caractérise les conditions marines et continentales par classe</p>	<p>Individus : périodes de 1 h avec ou sans microséismes Variables : comme à la 1^{re} étape</p>
<p>4^e ETAPE Test du χ^2</p> <p>Identifie les relations entre les types de conditions marines et continentales et les microséismes</p>	<p>Deux tests :</p> <ul style="list-style-type: none"> - types de conditions marines et continentales/ présence ou absence de microséismes - types de conditions marines et continentales/ nombre de microséismes (0 ; 1-2 ; 3 et plus)

Tableau 2.9 : Etapes des analyses statistiques multivariées et bivariées menées sur les périodes de 1 h avec ou sans microséismes

2.3.2 En Normandie

Dans le cadre de la tâche 5.1 (coordonnée par N. Le Dantec) du projet RICOCHET, cette section reprend en grande partie les éléments développés dans l'article de Letortu et al. (2022).

2.3.2.1 Instrumentation

L'instrumentation comprenait 44 capteurs de neuf types différents (dont une grande partie provient de l'instrumentation menée en Bretagne) qui ont été installés du 21 novembre 2018 au 12 janvier 2020, au sommet de la falaise, sur le front de la falaise et sur la plate-forme (Figure 2.21, Tableau 2.10) pour enregistrer :

- la réponse mécanique de la falaise (sismomètres, géophones, extensomètres, fibre optique) ;
- les facteurs et processus marins (capteurs de pression, caméra vidéo) ;
- les facteurs et processus continentaux (station météorologique, capteurs de température, fibre optique, piézomètre).

La plupart des instruments utilisés sont disponibles dans le commerce, mais ont subi quelques modifications pour cet usage particulier. Tous les instruments (sauf la caméra vidéo) ont été déployés sur le même plan transversal à la côte, comprenant le plateau, le front de falaise et la zone intertidale (Figure 2.21A, E). Le système d'acquisition vidéo a été déployé sur un pointement rocheux (Figure 2.21A), à une distance d'environ 105 m de l'emplacement des instruments, ce qui a permis de surveiller la falaise, du point d'observation jusqu'au blockhaus, et la partie supérieure de la plage (Figure 2.21D).

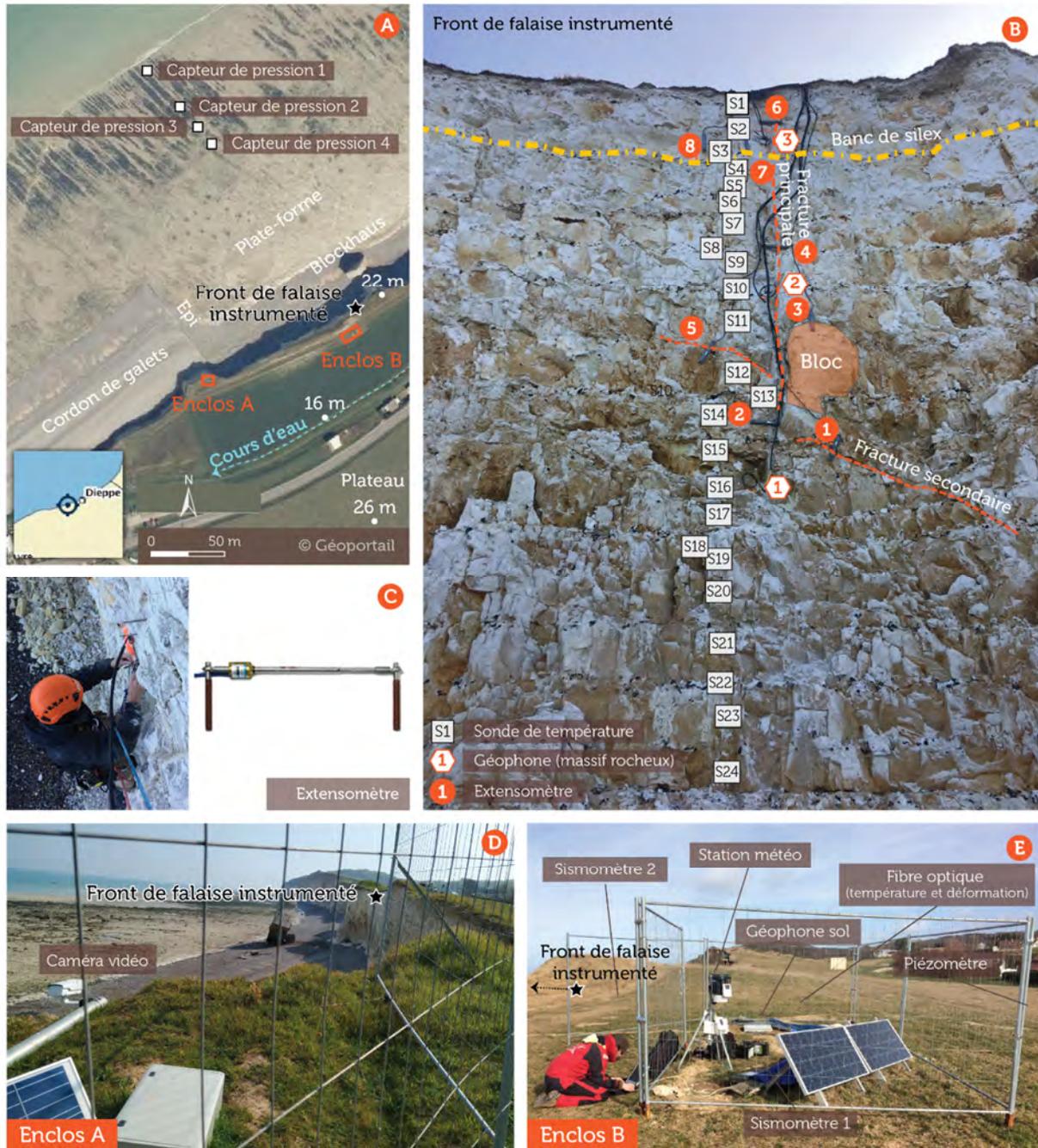


Figure 2.21 : A) Localisation des capteurs en haut de la falaise et sur la plate-forme et quelques éléments structurants du site de Sainte-Marguerite-sur-Mer, B) falaise surveillée (vue depuis la plage) et l'aspect visuel de la craie sur le front de falaise, C) extensomètre et installation sur le front de falaise, D) capteurs situés dans l'enclos A en bordure de la falaise, E) capteurs situés dans l'enclos B et à proximité, sur le plateau (Letortu et al., 2022)

Par rapport à l'instrumentation en Bretagne, hormis la durée du déploiement beaucoup plus importante (13 mois), les nouveautés étaient :

1) la mise en place d'un deuxième sismomètre (0,05-100 Hz), installé en octobre 2019 entre le bord du sommet de la falaise et le sismomètre 1 (Figure 2.21E), pour a) examiner la déformation de la falaise par opposition au déplacement, b) permettre de localiser les sources de signaux sismiques, c) évaluer les propriétés mécaniques de la falaise en ce qui concerne la propagation des signaux sismiques ;

2) la configuration des extensomètres a été adaptée à un certain nombre de fractures existantes à la surface du front de la falaise pour a) examiner si les déplacements enregistrés au sommet de la falaise provoquent la microfracturation et éventuellement la rupture de la falaise, b) étudier l'évolution et le rôle des fractures existantes dans la réponse mécanique de la falaise. Pour cela huit extensomètres (plage d'extension de ± 12 mm) ont été installés. Les extensomètres 4 et 6 ont été positionnés sur la fracture oblique principale identifiée sur la paroi de la falaise tandis que les extensomètres 1 et 5 ont été disposés sur une fracture secondaire. L'extensomètre 3 a été placé sur un bloc bien identifié et le 7 à cheval sur un banc de silex. L'extensomètre 8 a été positionné sur la craie, au-dessus du banc de silex de l'extensomètre 7, tandis que le 2 était mis sur de la craie peu fracturée (Figure 2.21B) ;

3) des mesures de déformation à l'intérieur du massif ont également été collectées sur le plateau (près de l'enclos B) sur deux sessions continues d'environ 12 h (en mai 2019 et novembre 2019) avec un dispositif utilisant la fibre optique (collaboration avec L. Longuevergne et J. de La Bernardie, Géosciences Rennes), permettant une résolution spatiale de 2 cm le long du câble à fibre optique avec une résolution temporelle de 20 secondes (Figure 2.21E, Tableau 2.10). L'objectif était d'étudier la réponse mécanique de la falaise sur toute sa hauteur, et pas seulement au sommet de la falaise. Le suivi continu (verticalement) de la déformation, induite par la combinaison de facteurs et processus marins et continentaux, peut permettre d'identifier des zones potentielles de déformation maximale à certaines hauteurs de la falaise, en fonction de sa géométrie, de sa lithologie et de son hydrologie. Les deux sessions d'acquisition de données ont eu lieu pendant les marées de vives-eaux, au printemps et à l'automne 2019 ;

4) une caméra vidéo qui fournit, à partir d'un pointement rocheux depuis le sommet de falaise (Figure 2.21D), des observations qualitatives sur les conditions de surface de la mer au niveau du haut de plage et du pied de la falaise, mais aussi des informations sur les impacts individuels des vagues sur le cordon de galets et sur la falaise (caractérisation du type de déferlement des vagues et une évaluation vague par vague des hauteurs d'eau contre la falaise). La caméra vidéo peut également être utilisée pour suivre l'évolution morphologique de la falaise et de la plage, l'occurrence des événements de rupture, et pour fournir un horaire précis de l'événement. L'enregistrement vidéo de la partie supérieure de la plage peut fournir des informations quantitatives sur l'évolution de la morphologie du cordon de galets en calibrant les images de la caméra et en utilisant les mesures de niveau d'eau des capteurs de pression pour obtenir l'élévation de la ligne d'eau sur les images empilées dans le temps. Grâce aux mesures combinées de la réponse mécanique de la falaise, aux données sur le forçage hydrodynamique et à l'évolution morphologique de la plage et de la falaise, il est possible d'examiner les interactions entre les vagues, la falaise et la plage (voir chapitre 4) ;

5) l'utilisation de plus de sondes de température (un réseau de 24 capteurs de température), enfoncées à 15 cm de profondeur dans la falaise (à l'écart des fractures) le long d'un profil vertical allant de 50 cm sous le sommet de la falaise (21 m IGN69) à la base de la falaise (9,5 m IGN69), espacées de 50 cm (Figure 2.21B). La surveillance de la température toutes les 30 min en subsurface permet d'examiner les fluctuations

de température à court terme dans la craie, ainsi que les conditions de surface de la mer et la marée, y compris les effets des embruns. Grâce à la distribution spatiale des capteurs de température, les processus dépendant de la hauteur le long du front de falaise peuvent être étudiés (l'exposition du front de falaise étant nord, l'illumination est indirecte) ainsi que la propagation des fronts thermiques liés à l'infiltration des pluies et aux fluctuations du niveau des eaux souterraines ;

Thématique	Instrument	Modèle (marque)	Quantité	Localisation	Durée	Fréquence d'échantillonnage (UTC)
Réponse mécanique de la falaise	Géophone (massif rocheux)	Triaxial (IMS)	3	Front de falaise	Novembre 2018-janvier 2020	4,5-100 Hz, déclenché par un événement
	Géophone (sol)	Triaxial (IMS)	1	Haut de falaise	Novembre 2018-janvier 2020	4,5-100 Hz, déclenché par un événement
	Extensomètre	4420 VW (Geokon)	8	Front de falaise	Novembre 2018-janvier 2020	30 min
	Sismomètre	NoeMax (Agecodagis) 0,033-200 Hz	1	Haut de falaise	Octobre 2019-janvier 2020	200 Hz
	Sismomètre	Trillium Compact Posthole (Nanometrics), 0,0083-100 Hz	1	Haut de falaise	Novembre 2018-janvier 2020	100 Hz
	Fibre optique pour des mesures de déformation	Deux sessions de mesure de 12 h, résolution spatiale de 2 cm	1	Massif crayeux, dans un forage	Novembre 2018-janvier 2020	20 s
Facteurs et processus marins	Capteur de pression	Wave gauge (OSSl)	4	Plate-forme	Novembre 2018-janvier 2020	5 Hz
	Caméra vidéo	Camera P-1365-E (Axis)	1	Pointement rocheux en haut de falaise	Novembre 2018-janvier 2020	30 min/h en journée
Facteurs et processus continentaux	Sonde de température	Flying Lead Thermistor Probe (Tinytag)	24	Front de falaise	Novembre 2018-janvier 2020	1 h
	Station météorologique (incluant deux capteurs d'humidité du sol)	Vantage Pro 2 (Davis)	1	Haut de falaise	Novembre 2018-janvier 2020	2 h
	Fibre optique pour des mesures de température	Deux sessions de mesure de 12 h, résolution spatiale de 25 cm	1	Massif crayeux, dans un forage	Novembre 2018-janvier 2020	1 min
	Piézomètre	CNR10R (Panatronic)	1	Haut de falaise	Novembre 2018-janvier 2020	1 h

Tableau 2.10 : Instruments utilisés et caractéristiques d'acquisition des données et d'alimentation électrique à Sainte-Marguerite-sur-Mer (Letortu et al., 2022)

6) une seconde fibre optique a été utilisée pour collecter des mesures de température distribuées dans le massif crayeux, avec une résolution spatiale de 25 cm le long du câble et une résolution temporelle de 1 min, pendant les deux mêmes sessions d'environ 12 h que les mesures de déformation (Figure 2.21E, Tableau 2.10). Le câble a été déployé dans le même forage et avec une configuration bidirectionnelle similaire à celle du câble pour les mesures de déformation. Les données de température au sein du forage complètent les

mesures de température en subsurface enregistrées sur le front de falaise pendant toute la période de surveillance. En particulier, il est possible de distinguer les processus thermiques superficiels se produisant en surface de la falaise des processus affectant l'ensemble du massif, et également d'établir un lien plus fort entre l'hydrologie et la déformation (en supposant que les gradients de température le long du forage sont liés à la circulation des eaux souterraines et indiquent des variations dans les propriétés mécaniques de la craie).

Ce suivi de treize mois a mobilisé, depuis l'installation des capteurs jusqu'au dernier relevé de données, environ 515 jours ETP (soit 40 jours ETP par mois d'instrumentation).

2.3.2.2 Données complémentaires : caractérisation géophysique du site et suivis topographiques et thermiques du front de falaise

Avant et pendant la période d'instrumentation, d'autres données ont été collectées :

- un relevé géophysique pour caractériser les propriétés du sol de subsurface sur le site étudié. L'étude géophysique, couplant des mesures de radar à pénétration de sol (GPR) et de tomographie de résistivité électrique (ERT), a été réalisée en mars 2018 afin d'évaluer l'homogénéité de la craie sur ce site et de fournir quelques informations sur sa structure interne et ses propriétés (méthodologie décrite dans Fauchard et al., 2013). L'étude a consisté en : a) un profil ERT longitudinal, le long du sommet de falaise (256 m de long) et deux profils transversaux, allant du plateau jusqu'au cordon de galets sur la plage (96 m de long) en incluant le front de falaise (un le long du transect où l'instrumentation a été installée par la suite tandis que le second a été réalisé au niveau de l'épi) ; b) un profil GPR longitudinal au même emplacement que le profil ERT longitudinal. Le premier sismomètre (enclos B sur la Figure 2.21E) a été placé à 102 m (de l'extrémité NE) le long du profil longitudinal mesuré par GPR et ERT ;

- treize relevés topographiques entre novembre 2017 et janvier 2020 (tous les trois mois, sauf en automne et en hiver de la période 2018-2019 où la périodicité des relevés était mensuelle) pour quantifier l'évolution morphologique du front de falaise par TLS ;

- six relevés de la température de surface entre novembre 2017 et janvier 2020 à l'aide d'une caméra infrarouge (FLIR T650sc 45°) de la section du front de falaise (125 m de long) pour compléter le suivi localisé de la température de subsurface.

2.3.2.3 Analyse des données

L'analyse des données entre novembre 2018 et mars 2019 a nécessité un travail collectif important, car le volume de données est considérable. C. Fauchard et R. Antoine (CEREMA à Rouen) ont travaillé sur la caractérisation géophysique du site, N. Le Dantec, E. Augereau et S. Caron-Sautejeau sur les données sismométriques, E. Augereau, Y. Gratacap et moi sur les données mesurées par les extensomètres et j'ai ensuite mené l'analyse statistique pour connaître les facteurs environnementaux impliqués dans les mouvements (contraction/extension) sur les fractures existantes, mesurés par les extensomètres.

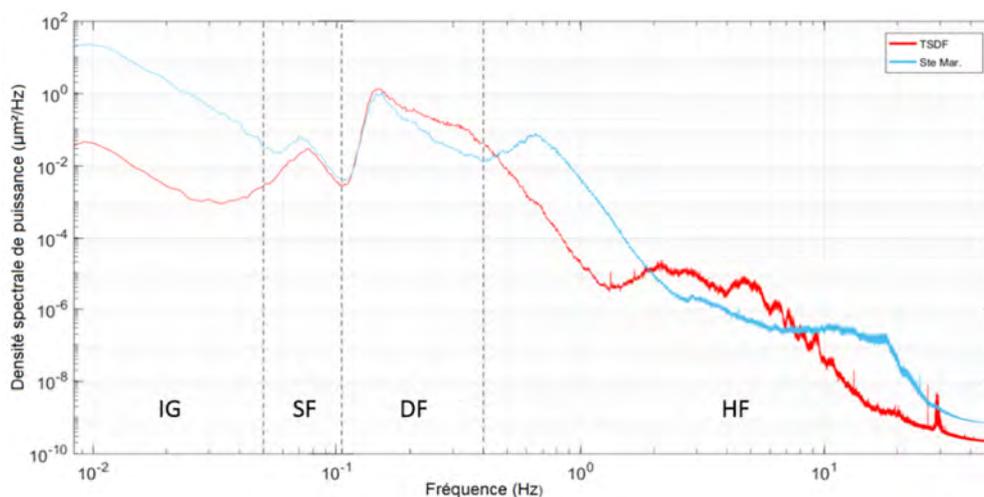
a. Caractérisation géophysique du site

Selon la méthodologie décrite dans Fauchard et al. (2013), les mesures ERT ont été inversées à l'aide du logiciel Res2Dinv (Loke, 2002, 2004). Le nombre d'itérations et la moyenne quadratique étaient respectivement de 7 et 0,22 %. Ces deux valeurs assurent le meilleur ajustement entre le modèle calculé et les résistivités mesurées au sens des moindres carrés. Les mesures GPR ont été effectuées avec un SIR 3000

et une antenne bowtie (GSSI) et les mesures ont été traitées avec le logiciel Reflex (Sandmeier Geophysical Research, 2019) en utilisant une chaîne de traitement standard (incluant la suppression de l'arrière-plan, un filtre passe-bande Butterworth et un gain ajusté pour une meilleure visualisation).

b. Mouvement du sol en sommet de falaise mesuré par le sismomètre à large bande

Les données verticales¹²⁰ du sismomètre 1 (large bande, 120 s-100 Hz) ont été analysées. Le Graphique 2.1 montre un exemple de spectre de puissance du déplacement vertical pour le 13 novembre 2018, jour de conditions hydrodynamiques légèrement énergétiques. Les niveaux d'énergie dans la bande DF sont cohérents entre notre sismomètre en haut de la falaise et la station de référence à l'intérieur des terres. L'énergie totale de déplacement est calculée dans chacune des quatre bandes de fréquence.



Graphique 2.1 : Densité spectrale de puissance du déplacement du 13/11/2018 en fonction des bandes de fréquence, en comparant la station sismométrique côtière de Sainte-Marguerite-sur-Mer (Ste Mar.) et celle intérieure de Thoiré-sur-Dinan (TSDF) (Letortu et al., 2022)

c. Analyses statistiques pour connaître les facteurs marins et continentaux impliqués dans les mouvements (contraction/extension) sur les fractures existantes mesurés par les extensomètres

Les données des huit extensomètres ont été filtrées (passage de 12 576 à 1 809 valeurs), en ne considérant comme déplacements significatifs que les évolutions absolues supérieures à $5 \mu\text{m}$ (les valeurs inférieures à $\pm 5 \mu\text{m}$ sont dans la marge d'erreur des capteurs et ont été mises à zéro). A partir de ces données, il s'agit de répondre à plusieurs questions :

1) Quel(s) facteur(s) génère(nt) les mouvements sur les fractures existantes ? Il s'agit de déterminer si ce(s) dernier(s) est/est le résultat d'un facteur unique ou d'une combinaison de facteurs.

2) La présence, le nombre et l'intensité des mouvements sont-ils expliqués par un ou des facteur(s) spécifique(s) ?

¹²⁰ Seuls les déplacements verticaux sont analysés, car les déplacements horizontaux sont sujets à caution. En effet, les sismomètres à large bande sont sensibles à l'inclinaison du sol qui contribue à une partie de l'accélération gravitationnelle (entraînant des mouvements apparents du sol), impactant de manière significative les composantes horizontales de déplacement (Rodgers, 1968).

3) Y a-t-il une direction préférentielle des mouvements en fonction de ce(s) facteur(s) ?

Des méthodes statistiques bivariées et multivariées ont été appliquées sur l'ensemble du jeu de données entre novembre 2018 et mars 2019. Le logiciel libre R est utilisé. L'échantillonnage temporel étant différent d'un instrument à l'autre, l'échantillonnage temporel le plus faible (2 h, pour la station météorologique) est notre référence. Les séries de données de tous les autres instruments ont donc été rééchantillonnées à 2 h.

Grâce à une matrice de corrélation, les variables environnementales redondantes ont été éliminées (les facteurs avec une corrélation de Pearson supérieure à 0,65 ont été enlevés). Les six variables environnementales synthétiques (marines et continentales) retenues sont : le niveau d'eau moyen (marée observée et surcote/décote, mesurées par le capteur de pression 1, m), le maximum de la H_s (mesuré par le capteur de pression 1, m), le coefficient de marée, la vitesse du vent (m/s), le cumul des précipitations (mm) et la température moyenne (°C) (moyenne des 15 capteurs de température en subsurface positionnés sur la partie supérieure du front de falaise). Les périodes présentant des lacunes sur l'une des variables (en raison d'une défaillance de l'instrument) ont été supprimées.

L'ensemble de données de novembre 2018 à mars 2019 est composé de 1 229 individus (périodes de 2 h avec et sans déplacements) : 576 présentant des déplacements significatifs (individus actifs) et 653 ne présentant aucun déplacement significatif (individus supplémentaires). La population d'individus actifs est suffisamment importante pour réaliser des analyses statistiques. Les données ont été standardisées.

Les analyses effectuées sur les deux populations (les individus actifs et supplémentaires ; uniquement les individus actifs) :

a) les analyses statistiques sur les individus actifs et supplémentaires permettent d'identifier les facteurs marins et/ou continentaux qui discriminent les périodes de 2 h avec et sans déplacements. Autrement dit, il s'agit d'identifier les principaux facteurs qui provoquent le mouvement des fractures, et si certains facteurs induisent des caractéristiques particulières de déplacements (en fréquence et en intensité) ;

b) les analyses effectuées sur la seule population d'individus actifs examinent plus précisément les caractéristiques des déplacements avec la direction du déplacement en fonction des conditions marines et continentales identifiées comme propices au mouvement des fractures.

Le détail des analyses statistiques est présenté dans le Tableau 2.11, où la ligne verticale en pointillé est utilisée comme séparation pour distinguer les deux analyses susmentionnées. Dans les deux cas, nous avons utilisé des méthodes statistiques multivariées (ACP, CAH) et bivariées (test du χ^2), qui ont été séquencées en quatre étapes :

1) une ACP a été réalisée pour visualiser les liens entre les variables et l'existence de groupes d'individus et de groupes de variables (Saporta, 2006). Cette structure met en évidence le/les facteur(s) *a priori* le(s) plus pertinent(s) pour synthétiser les conditions marines et continentales qui caractérisent les individus ;

2) la deuxième étape est une CAH (distance euclidienne, méthode de Ward), pour laquelle nous avons utilisé les résultats de l'ACP : les variables des individus sont leurs coordonnées de l'ACP sur les deux premières composantes. Cette étape permet de différencier les individus (périodes de 2 h dans la première analyse, ou déplacements significatifs dans la seconde analyse) en fonction des facteurs marins et continentaux qui leur sont associés, ce qui conduit aux typologies des (a) conditions marines et continentales provoquant ou non des déplacements significatifs, (b) conditions marines et continentales provoquant des déplacements significatifs ;

3) la troisième étape a consisté en une analyse des moyennes des classes de chaque typologie, donnant les caractéristiques moyennes des conditions marines et continentales entraînant ou non un déplacement des fractures, ou les caractéristiques environnementales moyennes des déplacements significatifs ;

4) dans la quatrième étape, des informations complémentaires sur les déplacements ont été prises en compte (intensité, nombre de déplacements et direction du déplacement). Des tests du χ^2 (test d'indépendance, valeur p entre 0,003 et 0,07 couplée à un niveau α de 0,05 %) ont été réalisés pour vérifier si certains types de conditions marines et continentales génèrent préférentiellement des déplacements avec une intensité donnée et avec un nombre donné d'extensomètres montrant des déplacements significatifs. De plus, en considérant chaque déplacement (toutes les 30 min) au lieu d'une période de 2 h, et en associant les déplacements à leur type, il est possible d'examiner si certaines conditions déclenchent une direction spécifique des déplacements (contraction ou extension des fractures).

Méthodes	Déplacements significatifs mesurés par les extensomètres	
<p>1^{re} ETAPE ACP</p> <p>Visualise les liens entre les variables, la présence de groupes d'individus et de groupes de variables</p>	<p>Variables marines et continentales : niveau d'eau moyen, maximum de la H_s, coefficient de marée, vitesse du vent, cumul des précipitations, température moyenne</p> <p>Individus actifs : périodes de 2 h avec déplacements Individus supplémentaires : périodes de 2 h sans déplacements</p> 	
<p>2^e ETAPE CAH</p> <p>Différencie les caractéristiques marines et continentales des périodes de 2 h ou des déplacements et crée une typologie</p>	<p>Individus : coordonnées des périodes de 2 h sur les composantes de l'ACP</p>	<p>Individus : coordonnées des périodes de 2 h sur les composantes de l'ACP La typologie est intégrée aux déplacements, ces derniers devenant des individus.</p>
<p>3^e ETAPE Moyenne des classes sur les coordonnées factorielles et les variables</p> <p>Caractérise les conditions marines et continentales par classe</p>	<p>Individus : périodes de 2 h avec ou sans déplacements Variables : comme à la 1^{re} étape</p>	<p>Individus : déplacements Variables : comme à la 1^{re} étape</p>
<p>4^e ETAPE Test du χ^2</p> <p>Identifie les relations entre les types de conditions marines et continentales et les caractéristiques des déplacements</p>	<p>Deux tests :</p> <ul style="list-style-type: none"> - types de conditions marines et continentales/intensité des déplacements (0 ; < 0,01 mm ; entre 0,01 exclu et 0,03 mm inclus ; > 0,03 mm) - types de conditions marines et continentales/nombre d'extensomètres avec déplacements (0 ; 1-2 ; 3 et plus) 	<p>Un test :</p> <p>types de conditions marines et continentales/direction du déplacement (contraction ; extension)</p>

Tableau 2.11 : Etapes des analyses statistiques multivariées et bivariées menées sur les deux populations (séparées par la ligne pointillée) à partir des données des extensomètres et des conditions environnementales (Letortu et al., 2022)

2.4 Projets coconstruits en recherche opérationnelle et en pédagogie

2.4.1 OSIRISC

Ce travail est issu d'un travail collectif réalisé dans le cadre du projet Fondation de France OSIRISC entre 2016 et 2020, coordonné par A. Hénaff. Intégrée à cette équipe grâce à ce dernier, j'ai été chargée de coordonner la tâche sur la composante « aléas ». Les travaux présentés ici pour cette composante ont été rédigés par mes soins, en fin de projet (2020), mais s'intègrent dans une réflexion collective des membres du projet. Certains travaux ont déjà fait l'objet de publications (Meur-Férec et al., 2020 ; Le Berre et al., 2022).

2.4.1.1 Contexte

Les chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs, qui composent l'équipe de recherche du projet OSIRISC, ont, à travers plusieurs projets de recherche dans le Nord et en Bretagne (par exemple, les projets Région Bretagne EROCOVUL (2001-2004) et ANR COCORISCO¹²¹ (2011-2014)) développé et assis le concept de vulnérabilité systémique aux risques côtiers avec les quatre composantes (aléas, enjeux, gestion, représentations). Mais ces projets ont considéré la vulnérabilité de manière statique, comme outil de diagnostic territorial. Or, dans l'optique du montage d'un observatoire intégré des risques côtiers en Bretagne, le suivi des évolutions de chacune des quatre composantes, par des évaluations régulières, permettrait d'améliorer leur connaissance et d'éclairer les stratégies de gestion. Le projet OSIRISC (2016-2020), en étroite relation avec les gestionnaires et les décideurs (DREAL Bretagne, département du Finistère, parc naturel régional du golfe du Morbihan, EPCI, communes, office national des forêts, CEREMA), a travaillé sur le suivi de la trajectoire de vulnérabilité systémique des territoires côtiers.

Résultant de la combinaison de quatre composantes interdépendantes, la vulnérabilité systémique exprime la fragilité d'un territoire dans son ensemble (Becerra et Peltier, 2009 ; Metzger et D'Ercole, 2011 ; Hénaff et Philippe, 2014). Son analyse nécessite par conséquent une approche multicritère, reposant sur les caractéristiques conjoncturelles (aléas) et structurelles (enjeux, gestion et représentations) du territoire considéré. A la fois construction sociale et « réalité » objective (Morrow, 1999 ; Kienberger et al., 2009), la vulnérabilité revêt une certaine complexité qui peut constituer un écueil, tant dans la description et l'analyse, que dans son application opérationnelle à la compréhension et à la gestion des risques côtiers.

Pour composer avec ces difficultés, un cadre méthodologique commun à toutes les composantes a été défini à partir de bibliographies méthodologiques disciplinaires, du travail de terrain et d'une étroite collaboration avec les gestionnaires des risques côtiers (les services de l'Etat et les collectivités territoriales), rassemblés au sein du comité de suivi du projet OSIRISC (Meur-Férec et al., 2020). Dans le cadre conceptuel de la vulnérabilité systémique, cette démarche s'attache en premier lieu à décrire chaque composante par un ensemble cohérent de variables. La transformation de ces variables en indicateurs par un système de cotation compatible entre toutes les composantes permet leur combinaison sous forme d'indices de plusieurs types, afin d'aboutir à la construction de la vulnérabilité systémique et d'en suivre la trajectoire spatio-temporelle. Cette méthode vise également à faciliter la déconstruction de cette notion complexe pour

¹²¹ EROCOVUL pour érosion côtière et vulnérabilité du trait de côte en Bretagne, COCORISCO pour connaissance, compréhension et gestion des risques côtiers

identifier les composantes contribuant le plus à la vulnérabilité globale et comprendre les relations qui le lient.

2.4.1.2 Mise en place des variables et des indicateurs pour la composante « aléas »

Les variables des aléas côtiers étant produites à partir de métriques variées, principalement collectées sur le terrain, elles doivent être rapportées à un référentiel commun permettant de les comparer et de les analyser conjointement. Les variables deviennent alors des indicateurs. La recherche d'indicateurs pertinents et opérationnels pour établir un diagnostic et un suivi de la vulnérabilité est donc la première étape indispensable d'une démarche systémique de gestion durable des risques côtiers (Barnett et al., 2008 ; Meur-Férec et al., 2020).

Le travail se décompose en trois étapes (Figure 2.22) :

- un état de l'art des métriques (par exemple, valeur d'érosion en cm) et des variables (vitesse en m/an) possibles à partir de recherches bibliographiques et de l'expertise de l'équipe de recherche impliquée (Lendre, 2016) ;

- une première sélection des variables pertinentes par l'équipe de recherche et les gestionnaires (sachant que ces derniers sont aussi forces de proposition pour ajouter des variables) : les aléas possèdent de nombreuses métriques et variables (Bulteau et Garcin, 2011 ; Cocquemont et al., 2019). Mais, ces dernières peuvent concerner l'aléa, mais aussi parfois les forçages générateurs des aléas ou bien des facteurs de prédisposition. Or, nous nous focalisons sur la sélection de variables sur les aléas (et non sur la susceptibilité) ;

- le choix final réalisé par l'équipe de recherche sur des critères à la fois de pertinence scientifique et de faisabilité. En effet, la variable choisie doit posséder trois qualités : 1) posséder des données t_0 homogènes, pertinentes et libres de droits à l'échelle nationale pour le calibrage, rendant possible le passage de la variable à l'indicateur, 2) une granularité¹²² suffisante des données de base à disposition par rapport à l'échelle spatiale envisagée au sein de l'observatoire, 3) la facilité de mise à jour.

Au sein de la composante et entre composantes, les métriques et variables associées peuvent avoir différentes échelles (les sites (centaine(s) de m), les communes et intercommunalités) et des formats variés (points, lignes, surfaces, mailles). Afin de permettre leur combinaison, toutes les données ont été rapportées à la même granularité. La granularité adressant donc des questions pouvant concerner les libertés individuelles, le choix initial retenu est une granularité de 200 m reposant sur la production d'un référentiel maillé à cette résolution (Marcel et al., 2018), conforme avec la donnée carroyée de l'INSEE, ainsi qu'avec le maillage préconisé par la directive européenne INSPIRE (*infrastructure for spatial information in the European community*).

¹²² La notion de granularité concerne l'entité élémentaire de représentation de la donnée : elle dépend à la fois de la dimension spatiale des entités à laquelle la donnée brute est accessible et du niveau de détail auquel l'information aux utilisateurs est restituée (Marcel et al., 2018).

1 Etat de l'art (extrait)

Thème de l'indicateur	Variable	Unité (métrique ou descripteur)	Détail/Intérêt	Source des données	Méthodologie (échelle spatio-temporelle)	Bibliographie
Evolution de la côte (suivi du trait de côte)	Taux d'accrétion	Vitesse (m/an)	Tendance d'une côte à avancer en lien avec les conditions hydrodynamiques et les processus d'accrétion	Coastal erosion information system - CEREMA - BRGM - EuroSION	Comparaison diachronique de photographies aériennes ou satellites	Abuodha et Woodroffe, 2007 ; Boruff et al., 2005 ; Dominguez et al., 2005 ; Doukakis, 2004 ; EUROSION, 2004(b), Gornitz et al., 1991 ; Hegde et Reju, 2007 ; Meur-Férec, 2006 ; PNUE, 2005 ; Szlafsztein et Sterr, 2007 ; Wigley, 2011
	Taux d'érosion		Tendance d'une côte à reculer à cause de la montée du niveau d'eau et des processus d'érosion			
	Bilan sédimentaire		Flux du stock sédimentaire (entrant, sortant, stationnaire)	Catalogue sédimentologique (CEREMA)	Cellule hydro-sédimentaire	Meur-Férec, 2006
	Mode d'évolution	Typologie	Engraissement ou amaigrissement continu, discontinu, épisodique, etc.	Catalogue sédimentologique (CEREMA)	Cellule hydro-sédimentaire	Meur-Férec, 2006

2 Première sélection des variables pertinentes par l'équipe de recherche et les gestionnaires

Aléa	Objet	Variable	Nom fiche
Erosion côtière	Côtes d'accumulation et d'ablation	Distance érodée par km linéaire	AL-ERO-DIST
Erosion côtière	Côtes d'accumulation et d'ablation	Surface érodée par km linéaire	AL-ERO-SURF
Erosion côtière	Côtes d'accumulation et d'ablation	Volume érodé par km linéaire	AL-ERO-VOL
Submersion marine	Côte d'accumulation	Distance d'entrée des eaux à l'intérieur des terres	AL-SUB-DIST
Submersion marine	Côte d'accumulation	Hauteur de submersion	AL-SUB-HAUT
Submersion marine	Côte d'accumulation	Débit de submersion	AL-SUB-DEB
Submersion marine	Côte d'accumulation	Extension annuelle de submersion	AL-SUB-EXTEN
Migration dunaire	Côte d'accumulation	Taux de migration dunaire	AL-MIGR-TAUX
Migration dunaire	Côte d'accumulation	Volume de migration dunaire	AL-MIGR-VOL

3 Choix final

Aléa	Objet	Variable	Nom fiche
Erosion côtière	Côtes d'accumulation et d'ablation	Distance érodée par an par 100 m linéaires	AL-ERO-DIST
Erosion côtière	Côtes d'accumulation et d'ablation	Surface érodée par an par 100 m linéaires	AL-ERO-SURF
Erosion côtière	Côtes d'accumulation et d'ablation	Volume érodé par an par 100 m linéaires	AL-ERO-VOL
Submersion marine	Côte d'accumulation	Hauteur de submersion	AL-SUB-HAUT
Submersion marine	Côte d'accumulation	Linéaire exposé aux paquets de mer et aux écoulements	AL-SUB-PAQ
Submersion marine	Côte d'accumulation	Vitesse de migration dunaire	AL-MIGR-VIT

Figure 2.22 : Etat de l'art, la première sélection et le choix final des variables « aléas »

Outre la granularité, la description des variables adoptées pour caractériser les quatre composantes de la vulnérabilité systémique repose sur des métriques très variées produites par des méthodes diverses : mesures sur le terrain, recensement, inventaires, enquêtes, etc. Pour pouvoir les comparer, il est indispensable de les calibrer, c'est-à-dire d'établir une cotation en plusieurs classes par rapport à un référentiel commun, qui permettra, en fonction d'un seuil, de leur attribuer une cote : les variables deviennent des indicateurs. Cinq classes ont été choisies décrivant leur contribution à la vulnérabilité. Les indicateurs d'aléas contribuent à l'accroissement de la vulnérabilité systémique. Autrement dit, plus l'aléa est fort, plus la vulnérabilité augmente. Ainsi, la cotation de la variable est croissante : les indicateurs sont cotés « 1 » s'ils ont une contribution parmi les plus faibles et « 5 » si la contribution est parmi les plus fortes. La valeur « 0 » est attribuée lorsqu'il n'y a pas de données.

Pour avoir un calibrage robuste sur une maille de 200 m, nous avons choisi de le faire à l'échelle nationale. Ainsi, les dynamiques des aléas observées en Bretagne sont remises dans le contexte national. Cela peut permettre de relativiser les évolutions ou bien de montrer leur caractère exceptionnel. Cependant, ce travail de calibrage est difficile, car il faut 1) des données fiables, libres, homogènes sur l'ensemble du territoire français pour garantir la transparence et la reproductibilité de notre travail, 2) une méthode de calibrage relativement simple pour rester intelligible et aisément reproductible tout en garantissant une pertinence scientifique.

Pour les données relatives à l'érosion côtière, l'INEC a été choisi. Il fournit, sous format shapefile, des vitesses annuelles d'évolution de la position du trait de côte, calculées au 1/100 000 sur plusieurs décennies (de 50 à plus de 90 ans, en général entre les années 1950 et le début des années 2010). La valeur annuelle d'évolution est généralement représentative de la mobilité du trait de côte à 100 m de part et d'autre du point de calcul. Les données sont fiables, car validées par le conseil scientifique de l'axe A de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, avec une erreur estimée à 0,25 m/an (Hédou et al., 2015). A partir de ces données INEC en France métropolitaine, nous avons, par la méthode de discrétisation des seuils observés, défini des cotes pour les indicateurs relatifs à l'érosion.

Pour l'aléa submersion marine, la donnée disponible est probabiliste (estimation) alors qu'il aurait été préférable d'avoir des données observées comme celles de l'INEC. Autrement dit, c'est comme si nous avions, pour l'érosion, une vitesse maximale d'érosion observée lors d'un événement de probabilité de retour centennale, au lieu d'une vitesse moyenne annuelle (estimée sur au moins 50 ans). La base de données à l'échelle nationale (au 1/100 000), homogène, fiable et libre (disponible en format shapefile sur le site internet géolittoral) correspond aux zones basses pour un niveau marin centennal de référence (ZBNM100, données ayant pour sources l'IGN, le SHOM, et le centre d'études techniques maritimes et fluviales (CETMEF)). Cela correspond aux zones topographiques situées sous le niveau marin centennal estimé (niveau de référence retenu pour la France métropolitaine), sans prise en compte de l'élévation du niveau marin lié au changement climatique. Sa représentation cartographique est discrétisée en trois catégories : « fort » si la zone se situe à plus de 1 m sous le niveau marin centennal ; « moyen » si la zone se situe à moins de 1 m sous le niveau marin centennal ; « faible » si la zone est à plus de 1 m au-dessus du niveau marin centennal estimé (<http://www.geocatalogue.fr/Detail.do?fileIdentifiant=06dfc140-d120-4d01-82d8-0f68a78c03d1>). Des hauteurs d'eau sont également fournies par tranche de 1 m. Les données de l'attribut « NIVEAU_EAU » de la couche shapefile sont des données discrétisées de niveau d'eau potentiel, qui ne permettent donc pas d'accéder à une valeur brute. L'absence de données LiDAR topobathymétriques sur l'ensemble du territoire côtier métropolitain ne nous permet pas de générer ces hauteurs (« MNT - cote du

niveau marin centennal »). Le calibrage de la submersion marine est alors inspiré de la discrétisation existante, qui n'est pas optimal dans notre cas.

2.4.1.3 Des indicateurs aux protocoles

Une fois ces indicateurs créés, leur mise en œuvre opérationnelle, grâce à des protocoles, se pose avec trois questions principales :

- 1) Quels protocoles (associés à un ou plusieurs outil(s)) faut-il choisir ?
- 2) Quelle est la fréquence de mesure à réaliser ?
- 3) Quels sont les territoires de suivi ?

Le choix des protocoles ou des outils s'affine grâce aux mesures sur le terrain et en fonction de son caractère intelligible et accessible techniquement. La fréquence et les territoires de suivi des aléas sont fonction des événements météo-marins, du nombre de personnes voulant participer, des interactions scientifiques-gestionnaires.

Concernant les protocoles et outils, un inventaire a été réalisé dans le but d'avoir une vision globale de ce qu'il était possible de faire en termes de suivi des aléas côtiers en fonction du type de côtes rencontrées (côtes d'ablation, d'accumulation et artificialisées, qui n'ont pas la même définition du trait de côte), du coût, de la pertinence scientifique et de la simplicité.

Pour l'érosion, des travaux de synthèse (Bulteau et Garcin, 2011 ; Mallet et Michot, 2012) présentent des fiches synthétiques en fonction du terrain d'application, du type de données recueillies (profils, traits de côte ou MNT), de la fréquence d'un suivi de qualité, de la précision et de la résolution des données (cm, dm ou m) ainsi que du coût de réalisation et des compétences nécessaires de l'opérateur. Depuis, la photogrammétrie s'est développée, rendant l'acquisition accessible à des non-initiés (par exemple, Cariou et al., 2021 ; Pucino et al., 2021). Cependant, le traitement de ces jeux de données est rarement réalisé sur les logiciels libres tels que MicMac en raison de leur convivialité limitée (malgré les efforts avec l'interface du CEREMA¹²³) et donc d'accès restreint par le coût des logiciels conviviaux utilisés pour l'analyse. Par ailleurs, l'étude des méthodologies de suivi au sein des observatoires littoraux a fourni aussi des sources d'inspiration (notamment l'observatoire citoyen du littoral morbihannais avec CoastSnap, le projet CoCliCô¹²⁴ sur le littoral de la communauté de communes de la côte des Isles en Normandie, etc.), qui se basent sur les sciences citoyennes pour suivre l'évolution des littoraux. Cet aspect est important, car leurs protocoles sont simples et se basent sur l'utilisation d'éléments paysagers comme repères d'évolution pour permettre de sensibiliser et d'acculturer les citoyens. En sus de ce volet très important, cela permet d'avoir un suivi plus fréquent et avec parfois une couverture spatiale plus importante que les levés des professionnels (Billerey, 2018).

¹²³ <https://www.cerema.fr/fr/actualites/cerema-facilite-acces-photogrammetrie-3d-interface-creer>

¹²⁴ Collecte de clichés côtiers

Pour la submersion marine, la consultation des références bibliographiques disponibles (Gbégnon, 2019) a permis de recenser :

- des protocoles délimitant l'emprise de la submersion marine et, dans une certaine mesure, estimant les hauteurs d'eau à différents points à partir d'imagerie. Pour les images satellites ou celles provenant de photographies aériennes (drones, avions, hélicoptères), l'utilisation est souhaitable pour des zones inondées étendues en raison de leur résolution spatiale allant de quelques dizaines de mètres à l'inframétrique (par exemple, Kiage et al., 2005 ; Cariolet, 2011 ; Copernicus Emergency Service¹²⁵). Mais la couverture nuageuse est souvent un frein à l'acquisition de ces données et leur utilisation nécessite un investissement financier et des compétences élevées (acquisition et traitement). Par ailleurs, la photographie terrestre semble être un outil important, rapide et accessible à tous (Jaffé et Gelfenbaum, 2002 ; Wijetunge, 2006). Cet outil a été utilisé lors de la collecte des données après le passage de la tempête Johanna en Bretagne le 10 mars 2008 (Cariolet, 2011). Elle vient en appui aux outils de mesure de la hauteur d'eau atteinte. Dans certains cas, à partir de l'analyse de photos montrant la laisse d'inondation sur certains bâtiments ou ouvrages, elle peut permettre de mesurer indirectement la hauteur d'eau atteinte (Galiana et al., 2017). Il convient d'ajouter que l'imagerie vidéo peut aussi être mise à contribution pour l'observation qualitative et quantitative des risques côtiers (Bulteau et Garcin, 2011) ;

- des protocoles basés sur la reconnaissance de terrain lors des plus hautes eaux observées, car les traces d'évolution morphologique et les laisses d'inondation renseignent sur l'extension et la dynamique des écoulements (par exemple, Fletcher et al., 1995 ; Nott et Hubbert, 2005 ; Cariolet, 2011). Ces reconnaissances de terrain sont à réaliser de manière systématique, quelle que soit l'ampleur de l'événement, et le plus rapidement possible dès le retrait des eaux (Perherin et al., 2014). Les mesures effectuées sont horizontales et verticales. Des outils comme le mètre ruban, les échelles graduées et les GPS/dGPS sont utilisés pour mesurer les hauteurs d'eau et pour géolocaliser les différents repères afin de délimiter sur une carte l'emprise de la zone inondée ;

- des protocoles fondés sur le recueil de témoignages permettent de déterminer les limites maximales atteintes par l'eau, de matérialiser sur un support cartographique l'emprise de la submersion marine et de déduire, par endroits, les hauteurs d'eau atteintes. Il est préférable d'utiliser ces témoignages pour compléter les collectes d'informations déjà réalisées par d'autres moyens (Perherin et al., 2014). Les enquêtes sont faites auprès des riverains, des professionnels touchés par l'événement (agriculteurs, associations locales, entreprises, etc.) et des collectivités (municipalité, EPCI, conseil général, conseil régional, etc.) (Galiana et al., 2017). Les témoignages peuvent s'avérer être de bons outils dans la détermination des linéaires exposés aux franchissements de paquets de mer et à la délimitation de la surface submergée. Leur utilisation nécessite une intervention rapide sur le terrain, car plus le temps passe, plus les indices s'estompent et la mémoire des témoins perd en précision.

Les applications web et smartphones peuvent être utilisées pour réaliser les protocoles. Le CEREMA a développé un outil web, *µrex*, qui permet de mutualiser les informations sur les hauteurs d'eau atteintes, les témoignages, les dommages, etc. Ces informations sont ensuite cartographiées sur une couche Open Street Map afin de permettre un retour d'expérience sur les inondations. Cet outil web est interfacé avec l'application CRISI (outil de collecte et relevé d'informations suite à une inondation), développée également

¹²⁵ <https://emergency.copernicus.eu/>

par le CEREMA. CRISI est une application mobile Android permettant à l'utilisateur d'effectuer des relevés des plus hautes eaux, de laisses d'eau et de recueillir des témoignages sur le terrain. L'outil donne la possibilité d'associer à chaque relevé des témoignages audio et des photos. Chaque relevé est automatiquement géoréférencé à l'aide du GPS du smartphone de l'utilisateur.

Pour sélectionner les protocoles, des critères ont été établis. Un protocole est jugé bon :

- s'il est pertinent scientifiquement (satisfaisant les gestionnaires et les scientifiques) ;
- s'il est réalisable rapidement, y compris avec un matériel basique et peu coûteux ;
- s'il permet d'obtenir des données sans traitement lourd ;
- s'il est adapté à des opérateurs non spécialistes pour assurer la pérennité du suivi ;
- enfin, s'il peut être retranscrit dans un document de manière claire, simple, synthétique et illustrée.

Concernant la fréquence de mesure, les submersions marines ayant un caractère événementiel, il paraît adéquat de mesurer l'aléa à chaque événement. L'érosion, souvent chronique, nécessite de choisir des « périodes » adéquates pour mesurer l'évolution du trait de côte. Ainsi, nous préconisons un minimum de deux levés par an pour l'aléa érosion : une mesure en fin d'hiver (pour tenir compte des tempêtes hivernales) et une mesure en fin d'été (pour intégrer la période estivale, généralement plus calme en termes de conditions météo-marines mais où la fréquentation humaine est forte).

Quant aux territoires de suivi, pour l'aléa érosion, le caractère manuel du suivi ne nous permet pas d'étudier de longs linéaires côtiers, faute de temps disponible. Par pragmatisme, des transects jugés représentatifs de section d'une ou plusieurs centaines de mètres (en termes de morphologies côtières, de dynamiques d'évolution, etc.) constituent l'emprise spatiale choisie pour le suivi érosion. Pour l'aléa submersion marine, l'événement doit être mesuré sur l'ensemble de son emprise spatiale ou sur plusieurs points de mesure représentatifs permettant *a posteriori* de redéfinir l'aléa. Ces protocoles sont donc associés à des fiches complémentaires sur l'identification du trait de côte et des points de mesures préconisés sur le terrain, et des fiches « transects » définies à l'échelle communale.

2.4.1.4 Des indicateurs aux indices

Le projet OSIRISC visant à instaurer un suivi de la trajectoire de vulnérabilité systémique des territoires aux risques côtiers, il impose une approche multidimensionnelle. Cette approche passe par la combinaison des indicateurs en indices. En effet, cette combinaison des indicateurs va permettre de générer :

- des indices de composantes : par exemple, l'indice d'aléas combine les indicateurs d'érosion côtière et de submersion marine pour fournir une valeur globale d'exposition aux aléas ;
- des indices thématiques : par exemple, érosion côtière ou submersion marine ;
- des indices transverses qui visent à combiner plusieurs indicateurs de composantes différentes : par exemple, l'indice qui définit l'exposition aux risques côtiers combine les indices de composante aléas et enjeux *via* une matrice (Figure 2.23) ;
- l'indice de vulnérabilité systémique qui combine les quatre composantes : aléas, enjeux, gestion, représentations.

Pour créer ces indices, il faut déterminer la valeur à conserver pour chaque indicateur et lorsque plusieurs se combinent. De nombreux choix sont possibles : valeur moyenne, valeur médiane, valeur minimale, valeur

maximale au sein d'une maille pour chaque indicateur. Lors de la combinaison de plusieurs indicateurs entre eux, il est également possible de pondérer certains indicateurs par rapport à d'autres.

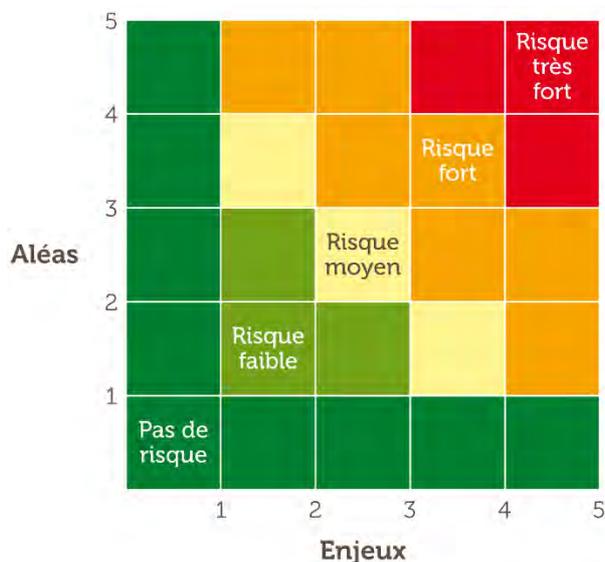


Figure 2.23 : Matrice des risques comme le résultat de l'intersection de l'aléa observé (érosion côtière) et/ou potentiel (zones basses sujettes aux submersions marines) et des enjeux (Le Berre et al., 2022)

2.4.2 Innovations pédagogiques dans la lignée d'OSIRISC

2.4.2.1 Précisions terminologiques et éléments de contexte

Depuis de longue date, les enseignements efficaces en termes d'apprentissage sont ceux où les apprenants doivent être actifs cognitivement (ils doivent se questionner, rechercher des réponses, etc.) et/ou physiquement (apprentissage par le faire). Fiorella et Mayer (2015) énumèrent différentes activités permettant ces apprentissages génératifs (également appelés apprentissages constructifs, Chi et Wylie, 2014) : résumer, cartographier, dessiner ou schématiser, s'autoévaluer, expliquer à autrui, agir physiquement. Il s'agit donc d'un enjeu majeur de l'enseignement.

Parallèlement, l'innovation pédagogique est prônée, faussement opposée à la pédagogie traditionnelle (encore faut-il savoir ce que recouvre cette notion ?). L'innovation semble parfois remettre au goût du jour des idées anciennes : « faire manipuler permet de mieux faire apprendre », « les élèves/étudiants apprennent mieux quand ils découvrent par eux-mêmes », « s'appuyer sur l'intérêt des apprenants améliore leur motivation et leur apprentissage », « les élèves/étudiants apprennent mieux en groupe » (Reuter, 2011). Ces idées consensuelles ne constituent pas la panacée, car elles doivent être mises en place selon des modalités précises pour être efficaces pédagogiquement (Tricot, 2017). Par exemple, il est préconisé de favoriser une pédagogie par projet. La pédagogie par projet permet un double questionnement « pourquoi apprend-on cette connaissance ? », mais aussi à « quel lien a-t-elle avec d'autres connaissances ? ». Le projet en pédagogie vise un but difficile à atteindre (c'est donc un problème à résoudre), présenté ici sous la forme d'un défi aux étudiants. Ils vont devoir élaborer une formulation opérationnelle permettant de « réussir » ce défi. Le projet est étalé dans le temps (plusieurs jours à plusieurs années), il nécessite d'être planifié, organisé puis régulé. Il implique aussi de rechercher et de mobiliser des connaissances et des méthodes diverses souvent issues d'autres disciplines que la leur. Ainsi, il va falloir favoriser la participation du groupe d'étudiants, mais aussi d'autres partenaires qu'il s'agit de trouver et d'intéresser pour qu'ils les aident. Le but atteint, la production,

est souvent visible : elle peut être présentée, montrée, argumentée, défendue et discutée (Kokotsaki et al., 2016). Ainsi, les connaissances sont mises conjointement au service d'un but de production, qui peut trouver sa légitimité dans le fait qu'il n'est pas strictement scolaire et peut aussi présenter une certaine « authenticité » (Thomas, 2000).

A la suite du projet COCORISCO (2011-2014), porté par A. Hénaff, un projet de MOOC¹²⁶ sur les sociétés littorales face aux risques côtiers, nommé FlotRisCo, a vu le jour en 2015. Pour la mise en place de ce cours, un poste d'ingénieur pédagogique a été créé permettant le recrutement de R. Ruault. Ce poste a été pérennisé en 2018 au sein d'ISblue, à l'IUEM. R. Ruault a permis d'ouvrir des discussions sur la pédagogie, notamment avec les enseignants-chercheurs du LETG-Brest.

En parallèle de ce poste, le consortium ISblue¹²⁷ a mis en place les appels à projets (AAP) Formation. Ils visent à encourager les pratiques pédagogiques en lien avec l'ingénierie pédagogique, notamment la pédagogie par projet transverse entre les disciplines et les structures du consortium ISblue.

Pour réaliser ces nouveaux formats, au sein du master 2 SML EGEL (expertise et gestion de l'environnement littoral) de l'IUEM (UBO), l'UE « Ateliers consacrés à la gestion de la zone côtière » (troisième semestre) s'avère particulièrement adaptée à la pédagogie par projet. Ces ateliers correspondent à des commandes rémunérées d'un tiers (entreprises, collectivités territoriales, instituts de recherche) auxquelles un groupe d'étudiants va répondre en un temps imparti (de septembre à février, soit 6 mois, 24 h par étudiant) avec une restitution présentée, argumentée et discutée. Il s'agit de mettre les étudiants dans une situation préprofessionnelle autour d'un projet. Les principaux concepts et outils relatifs au montage, au suivi et à la réalisation de projets devront être maîtrisés (du cahier des charges intégrant le devis à la réalisation du contrat et au rapport final et à sa présentation). Deux projets de formation par la recherche (d'une durée de trois ans chacun) ont été mis en place depuis 2019, favorisant la collaboration pluridisciplinaire avec l'IMTA et l'ENIB. Je développe ci-après le projet consacré à la création d'une application de sciences citoyennes pour le suivi des aléas côtiers (nommée CoastAppli) en lien avec l'IMTA (2019-2022), tandis que le second projet en lien avec l'ENIB sera développé dans le chapitre 4 (voir 4.3.2).

2.4.2.2 CoastAppli

a. Contexte et intérêts pédagogiques

Les aléas côtiers (érosion côtière, submersion marine et migration dunaire) et plus largement les risques côtiers sont étudiés par les scientifiques de l'UBO. Ces problématiques intéressent aussi les gestionnaires et les citoyens, et ce, d'autant plus que les questionnements sont nombreux sur l'avenir de nos littoraux dans un contexte de changement climatique. Le MOOC FlotRisCo (2015-2017) a mis en évidence l'intérêt des citoyens pour mieux comprendre les risques côtiers. En effet, lors de ce cours en ligne ouvert à tous, une application de cartographie participative a été mise en place avec plus de 500 participants sur sept semaines de cours. Par ailleurs, comme décrit précédemment, le projet de recherche OSIRIS a défini et mis en œuvre des indicateurs génériques des composantes de la vulnérabilité systémique (aléas, enjeux, gestion, représentations) en coconstruction (scientifiques/gestionnaires) (Philippe et al., 2021). Ces indicateurs sont

¹²⁶ *Massive open online course*

¹²⁷ ISblue regroupe six structures d'enseignement et de recherche : l'UBO, l'école nationale d'ingénieurs de Brest (ENIB), l'institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER), l'école nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique Bretagne Pays de la Loire (IMTA), l'école navale et l'école nationale supérieure de techniques avancées (ENSTA Bretagne).

adaptés à la fois à la recherche et à la gestion, et la méthode est reproductible et transposable à tout type de côtes (côtes d'accumulation, d'ablation et artificialisées).

Les indicateurs d'aléas, qui doivent être renseignés régulièrement sur le terrain, demandent du temps aux gestionnaires. Faciliter le renseignement des indicateurs grâce à une application smartphone ou tablette permettrait l'adhésion de plus de gestionnaires. De plus, elle pourrait aussi être utilisée par les citoyens permettant de suivre les dynamiques littorales et de mieux les comprendre. Cette meilleure compréhension permet une acculturation et potentiellement de meilleurs échanges entre citoyens/gestionnaires/élus sur l'évolution du littoral et la gestion actuelle et future du territoire (Whitelaw et al., 2003 ; Muro et Jeffrey, 2008 ; Conrad et Hilchey, 2011 ; Newman et al., 2011 ; Van Brussel et Huysse, 2019). De plus, elle pourrait permettre une plus grande fréquence temporelle des levés. Des applications pour smartphones existent pour le suivi du littoral (Rivages¹²⁸, CoCliCò¹²⁹ (Figure 2.24) ou I-REACT¹³⁰ ; pour une synthèse, Maspataud (2020)), mais celles-ci ne rassemblent pas différents protocoles de suivi pour différents aléas côtiers et pour différents types de côtes (d'ablation, d'accumulation, artificialisées).



Figure 2.24 : Déroulement du levé avec l'application CoCliCò (Thomas, 2016)

Nous avons donc réfléchi à une application citoyenne de suivi des aléas côtiers, CoastAppli, dans le cadre d'un projet de formation et de recherche, financé par l'AAP Formation d'ISblue. Cette application a pour objectifs :

- 1) de faciliter la prise de mesures afin d'intégrer un maximum de gestionnaires au suivi des aléas côtiers (y compris ceux de communes ayant peu de moyens) ;
- 2) d'intégrer les citoyens à ce suivi, ce qui permet d'acquérir de nouvelles compétences en apprenant par l'expérience sur les aléas côtiers pour pouvoir mieux cerner les problématiques et favoriser le dialogue avec les gestionnaires et les décideurs.

¹²⁸ <https://www.cerema.fr/fr/mots-cles/rivages>

¹²⁹ <https://projetcoclico.jimdo.com/>

¹³⁰ *Improving resilience to emergencies through advanced cyber technologies* (<https://cordis.europa.eu/project/rcn/203294/brief/fr>)

L'objectif pédagogique premier de ce projet était la coopération étudiants/enseignants-chercheurs/chercheurs/ingénieurs/gestionnaires/citoyens afin de mettre en place une application de sciences citoyennes pour le suivi des aléas côtiers. Dans cette coopération, il y a :

a) un renforcement de la pédagogie active (la démarche d'investigation, l'apprentissage par la découverte, la manipulation pour un meilleur apprentissage, expliquer à autrui par une interface pédagogique) ;

b) une dynamique de pédagogie par projet tant par les connaissances en sciences de la mer que peuvent apporter les étudiants du M2 EGEL que par les connaissances techniques de développement d'interface par les étudiants ingénieurs de l'IMTA (niveau master 1, dans le cadre de leur projet d'entreprise, avec 80 h par étudiant étalées sur quatre mois (septembre à décembre)). Ainsi, cette pédagogie par projet favorise le travail de groupe, l'interdisciplinarité avec la coopération entre différents cursus d'étudiants, mais aussi avec des universitaires (enseignants-chercheurs, chercheurs, ingénieurs), des gestionnaires et des citoyens ;

c) une interaction recherche-action-formation avec des échanges riches entre enseignants-chercheurs, gestionnaires, citoyens et étudiants.

b. Organigramme et coût du projet

Sur trois années universitaires (2019-2022), le projet avait pour objectifs de répondre à deux questions : quels seraient les apports de CoastAppli par rapport aux applications déjà existantes (par exemple CoastSnap) ? Si apport il y a, comment créer une application fiable et pérenne pour le suivi des aléas côtiers qui satisfasse scientifiques, gestionnaires et citoyens ?

Pour y répondre, différentes étapes ont été réalisées conjointement par les étudiants EGEL et de l'IMTA afin de favoriser l'interdisciplinarité (Figure 2.25).

L'année 2019/2020 s'est déroulée normalement avec l'obtention d'un cahier des charges de l'application. L'année 2020/2021 a été fortement impactée par la Covid-19, bloquant les travaux de groupe et les sorties terrain. Par ailleurs, le développement de l'application demande de maîtriser plusieurs langages informatiques, nécessitant, en parallèle du projet, la formation des étudiants *via* des MOOC. Cette difficulté a été mal évaluée et les aides locales n'étaient pas suffisantes pour développer le projet à la vitesse souhaitée. Lorsque la maquette a été finalisée, tout comme les outils, les protocoles, les sites et les niveaux d'utilisateurs, nous avons fait appel à un prestataire privé (Linaïa) pour développer CoastAppli, associé à un stagiaire de M1 (J.-M. Derval) afin de répondre aux différentes sollicitations des gestionnaires, citoyens et du prestataire pour la conception de l'application. Les dernières tâches 9) à 13) ont été laissées aux scientifiques du projet par manque de temps. En effet, la période de test de l'application a duré plus de six mois (pour capturer les éventuelles tempêtes hivernales 2021-2022 et les marées d'équinoxe en mars 2022), ne convenant pas au calendrier des étudiants.

Quels seraient les apports de CoastAppli par rapport aux applications déjà existantes ?

1. Etablir, lors de la première année, un état de l'art à l'échelle européenne sur les applications de sciences citoyennes sur les risques ou en domaine littoral ;
2. Contacter certains coordinateurs pour recueillir leur retour d'expérience et ainsi éviter le plus d'écueils ;
3. Lister des boîtes à outils utiles et libres ;
4. Choisir le format (application web ou smartphone/tablette) ;
5. Créer une 1^{re} maquette de l'application.



Création d'un cahier des charges de l'application adapté au contexte breton, mais potentiellement transférable



Année 2019/2020

Comment créer une application fiable et pérenne pour le suivi des aléas côtiers, qui satisfasse aussi bien les scientifiques, que les gestionnaires et les citoyens ?

1. Identifier la/les commune(s) où instaurer les premiers suivis en fonction des demandes des élus et des gestionnaires ;
2. Sélectionner les protocoles OSIRISC les plus intéressants (pour les élus, gestionnaires et citoyens) ;
3. Choisir avec les élus et les gestionnaires les sites de suivis ;
4. Trouver des instruments de mesure simples et fiables, en plus des outils de mesure classiques (mètre ruban, distance-mètre, etc.) ;
5. Transformer les protocoles au format papier destinés aux gestionnaires (projet OSIRISC) en des protocoles intelligibles et adaptés aux sites, au format numérique ;
6. Etablir des niveaux d'utilisateurs en lien avec la difficulté des protocoles ;
7. Former les utilisateurs ;
8. Tester régulièrement l'intelligibilité des protocoles auprès des utilisateurs ;
9. Estimer la fiabilité des données collectées ;
10. Mettre en place une stratégie pour le cycle de la donnée (collecte, stockage, traitement, valorisation) ;
11. Evaluer la fidélisation à moyen terme des utilisateurs ;
12. Collecter le retour des utilisateurs pour finaliser l'application ;
13. Mettre en service l'application.

Années 2020/2021/2022

Figure 2.25 : Organisation du projet CoastAppli sur trois ans avec les étapes réalisées par les étudiants EGEL et de l'IMTA

L'application a été développée pour Android¹³¹, car ce système d'exploitation mobile couvre plus des trois quarts du marché français au premier trimestre 2021 (76,6 % des parts de marché des systèmes d'exploitation mobile, suivi par iOS, avec 23,4 %, selon des données collectées par Kantar World Panel). CoastAppli fonctionne avec quatre éléments interconnectés : l'application, la base de données, le webAdmin et l'API¹³² (Figure 2.26). Le coût total de création de l'application a été de 36 962,60 € HT (payé à 73 % par ISblue et 21 % par le projet européen Interreg¹³³ AGE0 et 6 % pour le projet Sea-EU¹³⁴).

¹³¹ Ce choix est temporaire, car notre souhait est de rendre l'application disponible également aux smartphones et tablettes iOS (système d'exploitation d'Apple), d'autant plus qu'avec les modèles iPhone 13 et 14, le LiDAR intégré peut être un avantage vers une démocratisation d'outils plus précis pour le suivi des aléas côtiers par les citoyens.

¹³² « Interface de programmation d'application qui est une interface logicielle qui permet de « connecter » un logiciel ou un service à un autre logiciel ou service afin d'échanger des données et des fonctionnalités » (<https://www.cnil.fr/fr/definition/interface-de-programmation-dapplication-api>).

¹³³ Interreg est un programme européen visant à promouvoir la coopération entre les régions européennes et le développement de solutions communes dans les domaines du développement urbain, rural et côtier, du développement économique et de la gestion de l'environnement. Il est financé par le fonds européen de développement régional (FEDER).

¹³⁴ <https://nouveau.univ-brest.fr/sea-eu/fr>

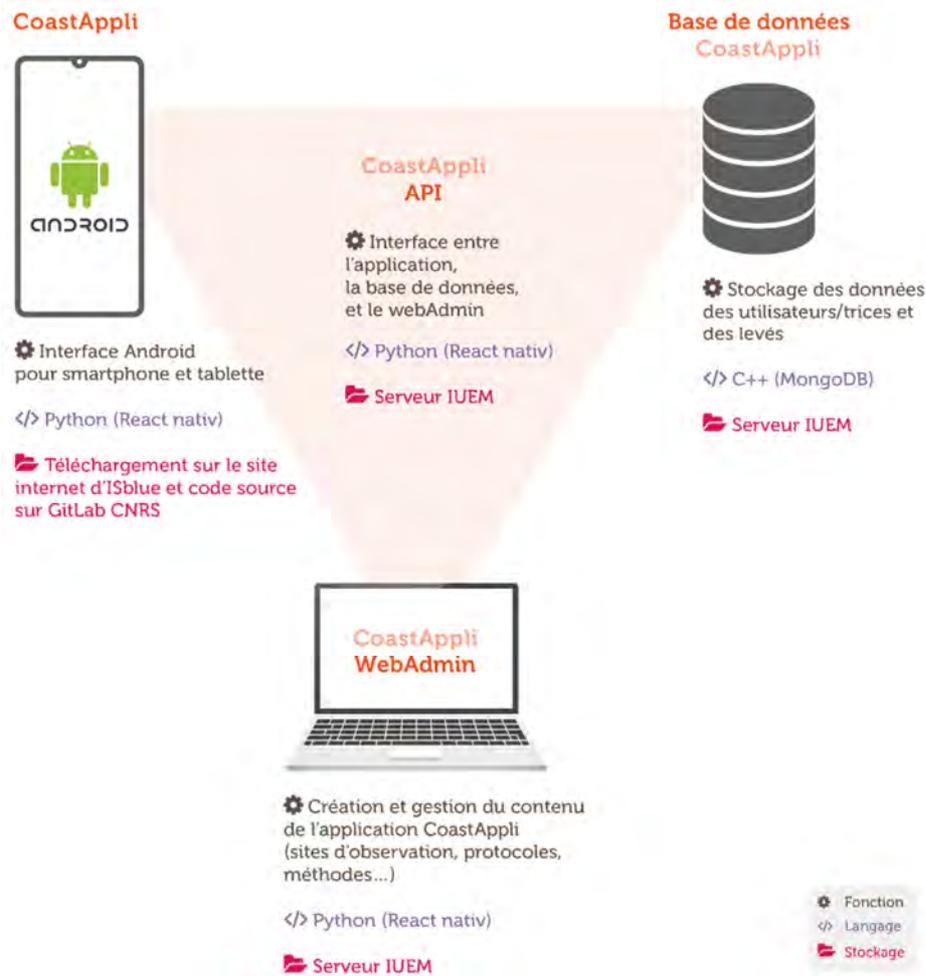


Figure 2.26 : Fonctionnement des éléments constituant CoastAppli

c. Méthodes utilisées

Lors de ce projet, les étudiants, aidés des ingénieurs et des enseignants-chercheurs ont fait appel :

- à la recherche bibliographique, que ce soit pour l'état de l'art à l'échelle européenne ou pour les boîtes à outils informatiques libres ;
- aux enquêtes (questionnaires et entretiens) pour recueillir les retours d'expérience des coordinateurs d'applications citoyennes, mais aussi pour consulter les élus et les gestionnaires sur le choix des sites et des protocoles, pour connaître l'intelligibilité des protocoles ;
- aux différents langages de programmation informatique (Python, C++, etc.) ;
- aux outils de gestion de projets (rédaction de cahiers des charges, diagramme de Gantt, Trello, comptes-rendus de réunion, relevés de décisions) ;
- à la collecte de données sur le terrain (dGPS, distance-mètre laser, décamètre, etc.) ;
- aux méthodes de créativité (*brainstorming*, *body storm*, *sketchstorm*) pour créer l'application et trouver des protocoles et des instruments de mesure réalisables et fiables sur le terrain ;
- aux méthodes de rédaction et de présentation orale de leurs travaux (posters scientifiques, création de supports visuels).

d. Déploiement sur la commune de Guissény

Lors du montage d'un projet européen fin 2020, coordonné par M. Sedrati de l'Université de Bretagne Sud (qui n'a pas été financé), nous avons sollicité la commune de Guissény pour tester CoastAppli. Ce choix s'explique par 1) l'exposition de nombreux enjeux de la commune aux aléas côtiers d'érosion et de submersion, 2) l'implication de ses élus et gestionnaires dans un suivi des aléas et des risques côtiers et dans la diffusion des connaissances auprès du grand public, 3) un historique long et fructueux de collaborations entre la commune et l'UBO (S. Suanez du LETG-Brest suit la plage du Vougo à une fréquence mensuelle depuis 2004). Grâce à l'accord des élus, nous avons pu entamer la démarche de collaboration.

Notre volonté d'aller vers le grand public a été facilitée par N. Loncle, chargé de mission Natura 2000 sur la commune de Guissény et N. Floch, responsable de la gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations (GEMAPI) à la CLCL. Ils nous ont permis 1) de recruter des habitants, *via* le bulletin d'information municipale et 2) d'intégrer les élèves du collège Diwan de Guissény, située à la plage de la Croix (Figure 2.27B), pour effectuer des mesures régulières et tester l'intelligibilité de l'application.

Le choix des sites de suivi intégrés dans CoastAppli a été décidé suite à des sorties sur le terrain avec les gestionnaires et l'aval du conseil municipal et de l'EPCI. Quatre sites ont été retenus (Figure 2.27) :

1) la plage de Nodéven subit des phénomènes d'érosion qui menacent des habitations (présence d'encrochements). Le site est aussi en zone submersible, à proximité de l'étang lagunaire du Curnic (zone humide Natura 2000) et de sa digue. La maison de la digue (sur les terrains du Conservatoire du Littoral) sera aménagée prochainement pour exposer l'évolution historique du niveau marin sur ce site, sur l'histoire de la digue et le site naturel derrière celle-ci. Le lieu sera donc touristique (avec des touristes sensibilisés à l'évolution des côtes) et devrait permettre une forte fréquence des levés (Figure 2.27A) ;

2) la plage de la Croix : dans l'estuaire du Quillimadec, ce site sableux évolue très rapidement. De manière générale, la sédimentation y est forte, mais certaines zones sont sujettes à l'érosion, en raison du piétinement. La première rangée de maisons est sujette aux submersions marines. Ce site dynamique est intéressant, car un projet de renaturation avec la destruction de l'ancien collège professionnel a été voté en juillet 2022 pour redonner de l'espace au littoral. Par ailleurs, cette plage est à proximité du collège Diwan, permettant une forte fréquence des levés par les élèves intégrés au projet (Figure 2.27B) ;

3) la plage du Vougo est (ou plage du Curnic), à proximité de la station des sauveteurs en mer, où l'érosion prédomine. Un suivi de ce site est effectué depuis 2004 par S. Suanez et son équipe. Un levé fin est donc inutile, mais des suivis qualitatifs de l'évolution des paysages permettraient de compléter le suivi ;

4) la plage du Vougo ouest, à l'ouest de la commune, où la dune est en accrétion et est suivie depuis juin 2011 par S. Suanez, en complément des premières radiales de la plage du Curnic de juin 2004. Là aussi, seul le suivi qualitatif est utile pour compléter les relevés quantitatifs de précision infradécimétrique.



Figure 2.27 : Sites suivis par CoastAppli à Guissény

Chapitre 3 Résultats majeurs et apports à la géographie

Grâce aux différentes méthodes et techniques utilisées, il s'agit de présenter les résultats majeurs de mes recherches en géographie, menés depuis en neuf ans au LETG à l'UBO. Ce chapitre, qui est le plus dense, présente des résultats inédits et d'autres publiés. Ces travaux s'enrichissent de mon expérience d'enseignante-chercheuse à l'UBO et réciproquement.

3.1 Vitesses, rythmes, modalités de recul (1966-2015) depuis un point de vue vertical et une proposition de cartographie PPRL intégrant le changement climatique (Normandie)

3.1.1 Tentative de réactualisation des vitesses de recul

3.1.1.1 Vitesses moyennes annuelles de recul entre 2008 et 2015

Avec le travail de J.-B. Suzanne, la vitesse moyenne de recul entre le cap d'Antifer et Le Tréport est de 0,27 m/an sur la période 2008-2015. Les variations locales sont fortes avec 0,07 m/an entre Dieppe et Le Tréport et 0,34 m/an entre Fécamp et Paluel (Tableau 3.1). L'erreur des résultats est élevée avec $\pm 0,17$ m/an, car la période étudiée n'est que de sept ans. Cela limite toute interprétation. Il est donc nécessaire de s'intéresser aux résultats entre 1995 et 2015.

Sous-cellule hydro-sédimentaire	Vitesse de recul (m/an) sur la période 2008-2015 (J.-B. Suzanne et al.) ($\pm 0,17$ m/an)
Cap d'Antifer/Etretat	0,14
Etretat/Etretat	0,24
Etretat/Fécamp	0,28
Fécamp/Paluel	0,34
Paluel/Saint-Valéry-en-Caux	0,22
Saint-Valéry-en-Caux/Dieppe	0,28
Dieppe/Penly	0,07
Penly/Le Tréport	0,17
Total général	0,27

Tableau 3.1 : Vitesses moyennes annuelles de recul par sous-cellule hydro-sédimentaire obtenues entre 2008 et 2015 ($\pm 0,17$ m/an)

3.1.1.2 Vitesses moyennes annuelles de recul entre 1995 et 2015

La vitesse moyenne annuelle de recul entre 1995 et 2015 est de 0,16 m/an le long du littoral de Seine-Maritime. Les variations locales sur 20 ans sont plus lissées avec 0,11 m/an entre Dieppe et Penly et 0,21 m/an entre le cap d'Antifer et Etretat (Tableau 3.2). Avec la résolution élevée de l'orthophotographie et l'écart de 20 ans entre les deux traits de côte, l'erreur des résultats baisse fortement ($\pm 0,06$ m/an).

Sous-cellule hydro-sédimentaire	Vitesse de recul (m/an) sur la période 1966-2008 (P. Letortu et al.) ($\pm 0,03$ m/an)	Vitesse de recul (m/an) sur la période 1995-2008 (P. Letortu et al.) ($\pm 0,09$ m/an)	Vitesse de recul (m/an) sur la période 1995-2015 (J.-B. Suzanne et al.) ($\pm 0,06$ m/an)
Cap d'Antifer/Etretat	0,10	0,21	0,21
Etretat/Etretat	0,09	0,18	0,18
Etretat/Fécamp	0,10	0,09	0,15
Fécamp/Paluel	0,12	0,12	0,17
Paluel/Saint-Valéry-en-Caux	0,18	0,13	0,16
Saint-Valéry-en-Caux/Dieppe	0,23	0,10	0,16
Dieppe/Penly	0,12	0,08	0,11
Penly/Le Tréport	0,18	0,14	0,18
Total général	0,15	0,11	0,16

Tableau 3.2 : Comparaison des vitesses moyennes annuelles de recul par sous-cellule hydro-sédimentaire obtenues pour les périodes 1966-2008 ($\pm 0,03$ m/an), 1995 et 2008 ($\pm 0,09$ m/an) et 1995 et 2015 ($\pm 0,06$ m/an)

La vitesse moyenne annuelle de recul de 0,16 m/an entre 1995 et 2015 est cohérente avec le recul moyen annuel estimé, lors de ma thèse, entre 1966 et 2008 avec 0,15 m/an (Tableau 3.1). Cependant, dans ces résultats réactualisés, certaines vitesses de recul par sous-cellule hydro-sédimentaire paraissent très élevées sur 20 ans, au regard de la faible erreur (0,21 m/an entre le cap d'Antifer et Etretat, 0,18 m/an à Etretat). En regardant en détail ces premières sections marquées par une côte au tracé déchiqueté, même si des mouvements de masse se sont effectivement produits, ce sont les caractéristiques radiométriques de l'orthophotographie qui posent problème. L'acquisition en 2015 a été réalisée à un horaire où l'ombre (propre et portée) nuit à la bonne interprétation du trait de côte¹³⁵ (Figure 3.1).



Figure 3.1 : Phénomènes d'érosion et d'ombre, ce dernier nuisant à la photo-interprétation du trait de côte « haut de falaise abrupt crayeux » entre le cap d'Antifer et Etretat

¹³⁵ Il est préférable que l'acquisition soit réalisée en milieu de journée estivale pour limiter l'ombre.

Ce problème d'ombre, absent sur l'orthophotographie de 2008, interroge sur la pertinence d'ajouter les nouvelles vitesses de recul (jusqu'en 2015) à celles de 1966-2008. Il paraît prudent d'attendre la prochaine mission orthophotographique avec une radiométrique de bonne qualité pour actualiser nos vitesses de recul. Par contre, l'orthophotographie de 2015 demeure utile pour continuer les travaux sur les rythmes et les modalités de recul, car ils couvrent les sections depuis Etretat jusqu'au Tréport (où le trait de côte a un tracé plus rectiligne) où les zones de départ et de dépôts sont visibles.

3.1.2 Répartition spatiale des éboulements/écroulements

L'objectif est de connaître les « points chauds » et « points froids » de l'érosion des falaises entre Etretat et Le Tréport, associés aux caractéristiques des mouvements de masse par sous-cellule hydro-sédimentaire.

3.1.2.1 Nombre d'éboulements/écroulements, sectorisation de l'érosion et densité d'éboulements/écroulements par km linéaire

Un total de 932 mouvements de masse a été recensé entre 1939 et 2015. Leur répartition se caractérise par une grande hétérogénéité spatiale (Tableau 3.3). Trois secteurs peuvent ainsi être identifiés :

- un secteur caractérisé par des éboulements/écroulements très fréquents entre Saint-Valéry-en-Caux et Dieppe (259 recensés, avec 17 missions entre 1939 et 2015) ;
- un secteur marqué par des éboulements/écroulements rares : 37 entre Paluel/Saint-Valéry-en-Caux (avec huit missions entre 1973 et 2015), 85 entre Etretat/Fécamp (avec 13 missions entre 1947 et 2015) ;
- les autres sections côtières (Penly/Le Tréport, Dieppe/Penly et Fécamp/Paluel) sont dans une position intermédiaire, avec 152, 190 et 209 éboulements/écroulements (avec 11 missions entre 1961 et 2015 ; avec 17 missions entre 1939 et 2015 ; avec 12 missions entre 1947 et 2015).

Année	Echelle	Marée	Qualité	Etretat/ Fécamp	Fécamp/ Paluel	Paluel/ Saint- Valéry- en-Caux	Saint- Valéry-en- Caux/ Dieppe*	Dieppe/ Penly	Penly/ Le Tréport	Total
1939	1/20 000	Haute	Faible				6	3		9
1947	1/25 000	Haute	Faible	5	3		12*			20
1952	1/25 000	Haute	Moyenne	2	9		10*	8		29
1957	1/25 000	Haute	Moyenne	1	1		7*	3		12
1961	1/25 000	Basse	Moyenne				6*	20	9	35
1973	1/25 000	Haute	Bonne	3	0	0	11*	12	9	35
1978	1/30 000	Haute	Bonne		12		2*	3		17
1982	1/30 000	Basse	Bonne	4						4
1983	1/15 000	Haute	Bonne				14*	8	18	40
1985	1/20 000	Haute	Bonne	2	17	0	2*	2	5	28
1989	1/30 000	Haute	Bonne				2*	17	7	26
1990	1/15 000	Basse	Bonne				6*	10		16
1992	1/30 000	Basse	Bonne	4	18	1				23
1994	1/30 000	Basse	Bonne	2			2*	6	7	17
1995	1/10 000	Basse	Bonne					1		1
2000	1 pixel = 0,5 m	Basse	Très bonne	2	29	10	37	11	5	94
2008	1 pixel = 0,5 m	Haute	Très bonne	29	40	15	36	19	35	174
2012	1 pixel = 0,5 m	Basse	Très bonne	8	30	5	32	24	34	133
2013	1 pixel = 0,5 m	Basse	Très bonne	16	32	4	36	30	14	132
2015	1 pixel = 0,2 m	Basse	Très bonne	7	18	2	38	13	9	87
Total				85	209	37	259	190	152	932

Tableau 3.3 : Nombre d'éboulements/écroulements par sous-cellule hydro-sédimentaire et par mission
(* : Quiberville/Dieppe)

La répartition de ces mouvements de masse entre 1939 et 2015 a été cartographiée en réalisant un lissage par la méthode des noyaux pour obtenir leur densité par kilomètre linéaire (Figure 3.2). Des zones de concentration importante (« point chaud » en noir) à faible (« point froid » en blanc) en passant par l'intermédiaire (gris) sont observables. Les concentrations les plus fortes peuvent atteindre la densité maximale de 90 éboulements/écroulements par kilomètre linéaire et se situent autour du cap d'Ailly. Il existe aussi une zone de forte concentration après Dieppe et après Penly. Il semble que ces deux dernières zones de concentration forte soient souvent disposées en aval-dérive des grands ouvrages transversaux (par exemple, une jetée portuaire ou une centrale nucléaire EDF). Ce dernier point est étudié en 3.1.4.

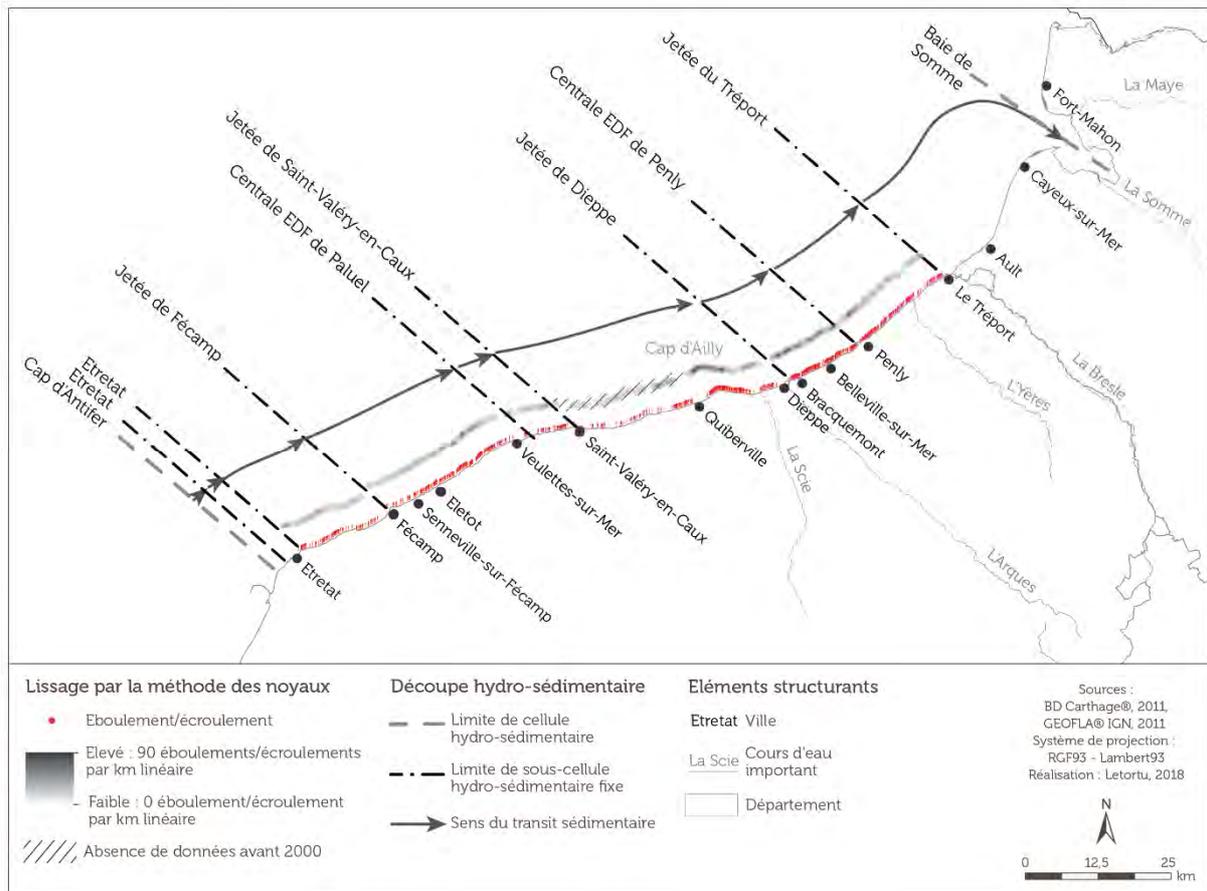


Figure 3.2 : Distribution et densité d'éboulements/écroulements recensés par kilomètre linéaire entre 1939 et 2015

3.1.2.2 Caractéristiques morphométriques des éboulements/écroulements : les volumes appréciés par les aires de départ et de dépôt

La digitalisation au 1/2 000 des aires de départ et de dépôt nous permet d'obtenir des informations concernant la taille des mouvements de masse. Même si l'aire n'est pas systématiquement une bonne estimation des volumes éboulés/écroulés, celle-ci donne un premier ordre de grandeur qui est intéressant à exploiter. Les aires peuvent renseigner sur une éventuelle répartition spatiale de l'intensité (volume) des mouvements de masse.

La digitalisation des zones de départ nécessite des séries photographiques de grande échelle (plus fine que 1/20 000) et de bonne à très bonne qualité (à partir de 1983). Pour tester cette méthode, trois secteurs jugés représentatifs ont été choisis, car on y trouve tous les types de falaises et les divers affleurements crayeux :

- 1) Fécamp/Eletot (falaises à piédestal résistant taillées dans le Cénomaniens jusqu'au Santonien) ;
- 2) Quiberville/Dieppe (falaises complexes taillées dans les craies du Santonien et du Campanien et recouvertes par des terrains d'âge tertiaire) ;
- 3) Dieppe/Criel-sur-Mer (falaises simples taillées dans les craies du Turonien et Coniacien).

L'analyse des aires de dépôt (932 cas) et de départ (413 cas) des mouvements de masse permet d'individualiser deux espaces distincts (Figure 3.3) :

- une section côtière (Paluel/Dieppe) marquée par des mouvements de masse d'ampleur relativement faible. Les trois quarts des aires de départ entre Quiberville et Dieppe sont inférieures ou égales à 331 m²

(recul moyen de 6,8 m en haut de falaise) et les aires de dépôt entre Paluel et Dieppe sont faibles (médianes autour de 350 m²) ;

- deux sections côtières (Etretat/Paluel et de Dieppe/Le Tréport) marquées par de plus gros mouvements de masse. Les trois quarts des aires de départ entre Fécamp et Eletot sont inférieures ou égales à 765 m² (recul moyen de 9 m en haut de falaise). Les aires de dépôt entre Etretat/Paluel et Dieppe/Le Tréport sont également beaucoup plus élevées (médianes allant de 508 à 729 m² et des valeurs maximales atteignant 55 057 m²). Dans le détail, ce sont les sections Fécamp/Paluel, Dieppe/Penly et Penly/Le Tréport qui connaissent généralement les aires de dépôt les plus importantes (médiane de 563 à 728 m²).

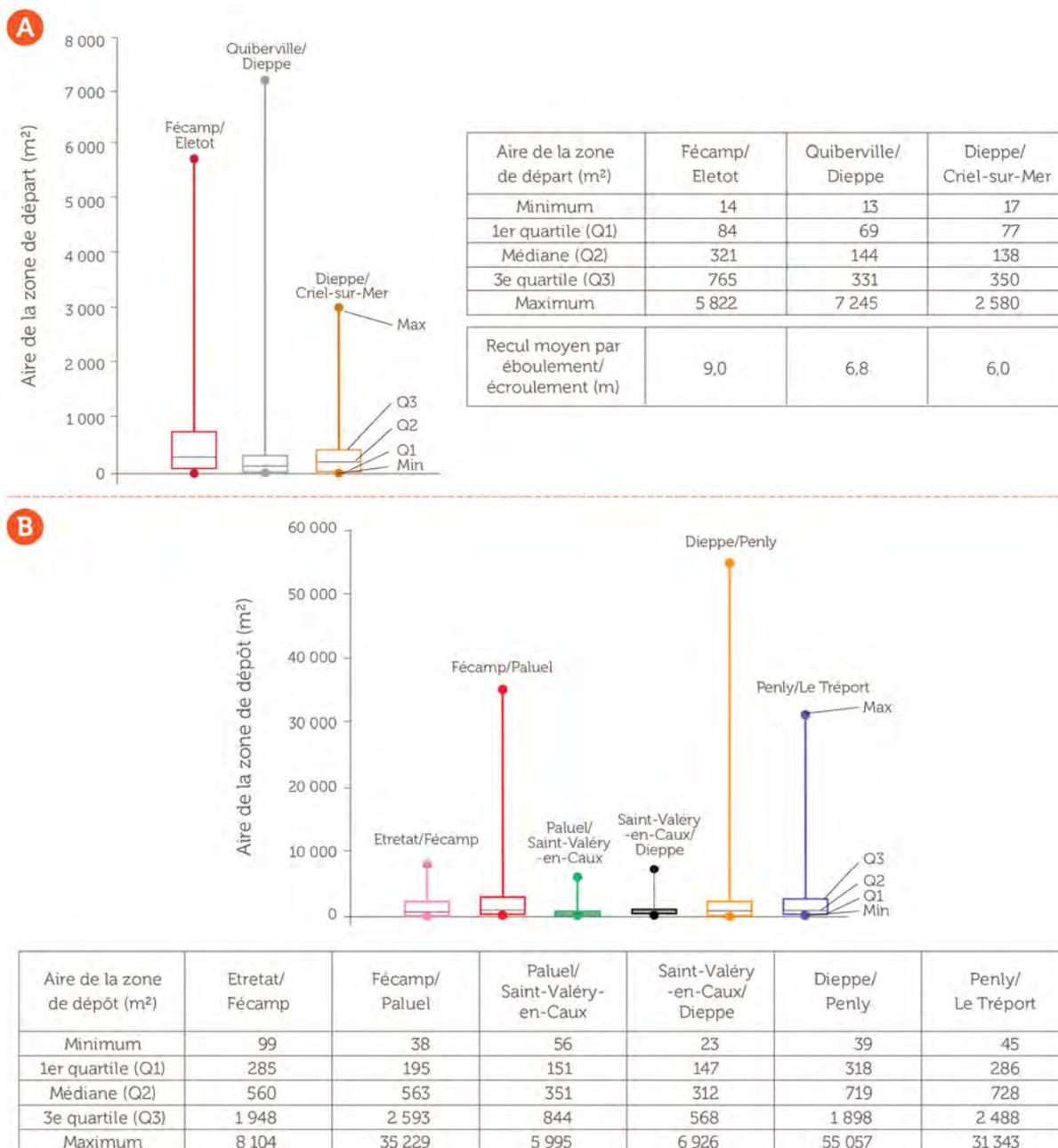


Figure 3.3 : Distribution de l'aire de départ (A) et celle de dépôt (B) des éboulements/écroulements de 1983 à 2015

Ces résultats fournissent une mise à jour quant à la fréquence et l'intensité du recul des falaises. Ils sont complémentaires aux résultats de vitesses de recul. Ces résultats confirment ceux précédents (Costa, 1997 ; Letortu, 2013) : le secteur à forts reculs (Saint-Valéry-en-Caux/Dieppe) est affecté par des éboulements/écroulements fréquents, mais peu volumineux tandis que les secteurs à plus faibles reculs sont marqués par des mouvements de masse plus rares et plus volumineux.

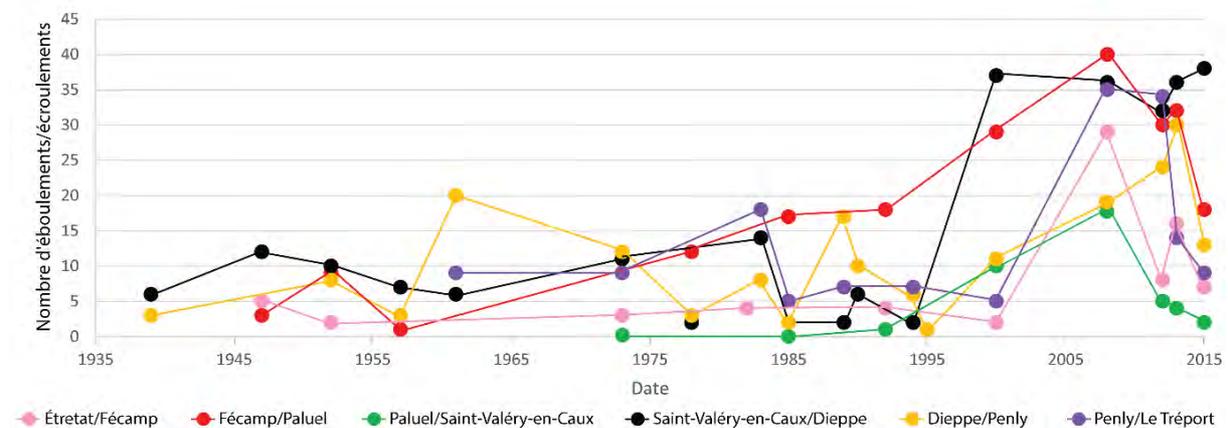
3.1.3 Répartition temporelle des éboulements/écroulements

L'objectif est d'identifier les « temps forts » et les « temps calmes » de l'érosion des falaises entre Etretat et Le Tréport et d'évaluer la récurrence des éboulements/écroulements de pan entier de falaise et les vitesses de déblaiement pour répondre aux problématiques de gestion du risque.

3.1.3.1 Evolution temporelle

L'un des objectifs de ce travail est de mettre en évidence une éventuelle évolution de la fréquence ou de l'intensité des reculs, comme évoqué par certains auteurs comme Moses et Robinson (2011). Le recensement des mouvements de masse, mené depuis 1939, peut apporter quelques éléments de réponse.

L'évolution temporelle du nombre d'éboulements/écroulements est marquée par une forte variabilité (Graphique 3.1). La quantification d'événements est fiable principalement depuis les années 2000 grâce aux orthophotographies de résolution inférieure ou égale à 0,5 m. Sans surprise, à partir de ce moment, le nombre d'éboulements/écroulements recensés est beaucoup plus important (autour de 100) (Tableau 3.3, Graphique 3.1). Cependant, sur les dernières missions (2008, 2012, 2013-2014 et 2015), deux secteurs semblent particulièrement touchés par un grand nombre de mouvements de masse, Fécamp/Paluel et, sans surprise, Saint-Valéry-en-Caux/Dieppe.



Graphique 3.1 : Nombre d'éboulements/écroulements par sous-cellule hydro-sédimentaire et par mission entre 1939 et 2015

3.1.3.2 Vers la définition de la récurrence des éboulements/écroulements

Dès lors que des mouvements de masse de pan entier de falaise se produisent successivement au même endroit, nous pouvons estimer la récurrence de ces derniers. Il s'agit en fait de calculer, grâce à l'inventaire diachronique des éboulements/écroulements, l'intervalle de temps entre 1) l'apparition d'un mouvement de masse de pan entier de falaise, 2) son évacuation, 3) la météorisation de la falaise, 4) l'apparition au même endroit d'un nouvel éboulement/écroulement de pan entier de falaise. Cette quantification apporte des éléments de réponse quant à la gestion du risque d'érosion.

En raison du caractère vertical des clichés, la période d'évolution a été calculée uniquement sur les éboulements/écroulements dont l'aire de dépôt est supérieure à 1 000 m², pour s'assurer une forte probabilité que la zone de départ corresponde bien à un pan entier de falaise. En effet, pour les mouvements de masse possédant une aire plus modeste, ils peuvent être observés au même endroit, mais provenir du pied, du milieu ou du haut de falaise, ce qui ne correspond qu'à des réajustements du profil de la falaise.

Les résultats sont (Tableau 3.4) :

- deux sections côtières présentent les récurrences les plus longues : Saint-Valéry-en-Caux/Dieppe (moyenne de 29 ans, étendue de 8-51 ans) et Dieppe/Penly (moyenne de 29 années, étendue de 10 à 51 ans) ;

- la section côtière Penly/Le Tréport est marquée par la récurrence la plus rapide suggérant des agents et des processus d'érosion et de déblaiement particulièrement efficaces : la durée moyenne entre deux éboulements/écroulements est de 10 ans (étendue de 5 à 17 ans) ;

- deux sections côtières sont marquées par des récurrences intermédiaires : Fécamp/Paluel (moyenne de 21 années, étendue de 6-51 ans) et Etretat/Fécamp (moyenne de 17 années, étendue de 6 à 23 ans).

	Etretat/ Fécamp	Fécamp/ Paluel	Paluel/ Saint- Valéry-en- Caux	Saint- Valéry-en- Caux/ Dieppe	Dieppe/ Penly	Penly/ Le Tréport
Succession d'éboulements/écroulements	2	12	0	6	10	5
Période de retour moyenne (en année)	17	21		29	29	10
Amplitude de la période de retour (en année)	6-23	6-51		8-51	10-51	5-17

Tableau 3.4 : Récurrence moyenne des éboulements/écroulements et amplitude de la récurrence en fonction des sous-cellules hydro-sédimentaires

Concernant la section Saint-Valéry-en-Caux/Dieppe, pour laquelle les récurrences seraient les plus longues (29 ans), de sérieuses réserves doivent être émises. Ces résultats sont peu cohérents avec ceux issus des suivis du « haut de falaise abrupt crayeux » et du front de falaise (notamment par TLS et photogrammétrie terrestre RTK (voir 3.2.1.1)). Les mouvements de masse, du fait de la petitesse des falaises, sont généralement très vite évacués. A titre d'exemple, au *Petit Ailly* à Varengeville-sur-Mer, trois éboulements/écroulements de pan entier de falaise se sont produits au même endroit sur une période de deux ans et demi (Figure 3.4).

Les limites de la méthode tiennent au fait que les éboulements/écroulements de faibles volumes (que l'on retrouve notamment entre Saint-Valéry-en-Caux et Dieppe) sont plus rapidement évacués que l'intervalle de temps entre deux missions aériennes. Ainsi, observer des éboulements/écroulements au même endroit par les photographies aériennes relève en partie de la chance. Cela peut donc diminuer la récurrence sur cette section côtière.

Pour le secteur de *Mesnil Val* (sous-cellule hydro-sédimentaire Penly/Le Tréport), Dewez et al. (2013) évoquent aussi une récurrence très courte. Un éboulement/écroulement majeur (ayant engendré un recul de 10 m en haut de falaise) a été précédé, quatre ans auparavant, par un éboulement/écroulement de pan entier

de falaise. Cette rapidité s'explique en partie par le fait que l'espace de 700 m étudié par les auteurs se localise juste en aval-dérive de l'épi de *Mesnil Val*, accentuant localement l'action des actions marines au pied de l'abrupt.



Figure 3.4 : Evolution rapide de la falaise au *Petit Ailly* (Varengville-sur-Mer) : trois éboulements/écroulements de pan entier de falaise au même endroit (Letortu, 2013)

Malgré une méthode de photo-interprétation minutieuse de la localisation des mouvements de masse, il y a peu de successions d'éboulements/écroulements de grande taille (35) sur la période étudiée (1939-2015). Cela peut s'expliquer par plusieurs raisons :

- les photographies prises à marée haute ne permettent pas le repérage des mouvements de masse successifs éventuels ;
- l'intervalle de temps entre deux missions est parfois important et suffisamment long pour qu'un deuxième éboulement/écroulement soit évacué sans avoir été repéré ;
- il est possible que la période étudiée (1939-2015) ne soit pas assez longue pour appréhender l'ensemble de l'évolution de la falaise (mouvement de masse/évacuation/météorisation/mouvement de masse).

3.1.3.3 Vitesse de déblaiement des éboulements/écroulements

L'inventaire des 932 mouvements de masse permet aussi d'estimer les vitesses de déblaiement des dépôts au niveau du cordon de galets, ce qui fournit des informations sur l'efficacité des actions marines en pied de falaise. La méthode est simple. Si un éboulement/écroulement est observé pour la première fois en 1961 et n'apparaît plus sur la photographie de la mission 1973, la vitesse de déblaiement sera de 12 ans. Il arrive que des séries de photographies fassent défaut. Si le déblaiement ne peut être identifié, l'éboulement/écroulement n'est pas pris en compte. De plus, dans ce travail, nous postulons que la date de déblaiement correspond à la date du cliché. Par ailleurs, l'ensemble des vitesses d'évacuation par secteur a été moyenné.

Tout d'abord, 599 éboulements ont été évacués (Tableau 3.5) sur les 932 identifiés entre 1939 et 2015 (Tableau 3.3). Les durées de déblaiement des éboulements/écroulements sont très disparates, allant de cinq ans (Paluel/ Saint-Valéry-en-Caux) à plus de 11 ans (Etretat/Fécamp). De manière générale, c'est entre Paluel et Le Tréport que les éboulements/écroulements sont évacués le plus rapidement (durées inférieures ou égales à sept ans). Ils sont moins rapidement déblayés entre Fécamp/Paluel et Etretat/Fécamp (durée autour d'une dizaine d'années). Cette spatialisation est assez conforme à celle des vitesses de recul. Il est

logique que les secteurs affectés par un retrait important, par des éboulements fréquents et peu volumineux, soient caractérisés par des vitesses de déblaiement rapide. C'est le cas des sections côtières Paluel/Saint-Valéry-en-Caux et Saint-Valéry-en-Caux/Dieppe. La réciproque s'observe sur la section côtière Etretat/Paluel, mais pas entre Dieppe et Le Tréport (Tableau 3.5).

Ces vitesses d'évacuation paraissent faibles au regard des observations de terrain et de la littérature. Hénaff et al. (2002) évoquent des volumes déblayés de l'ordre de 40 m³/jour, soit 14 500 m³/an. A Varengueville-sur-Mer (sous-cellule Saint-Valéry-en-Caux/Dieppe), grâce au suivi TLS, nous savons que l'éboulement du 15 ou 16 février 2014, estimé à 10 113 m³, était évacué au 1^{er} novembre 2017. La vitesse de déblaiement est en moyenne de l'ordre de 7,5 m³/jour, mais sans nul doute marquée par une forte variabilité en fonction, par exemple, du niveau de marée et des conditions d'agitation.

	Etretat/ Fécamp	Fécamp/ Paluel	Paluel/ Saint- Valéry-en- Caux	Saint- Valéry-en- Caux/ Dieppe	Dieppe/ Penly	Penly/ Le Tréport
Nombre d'éboulements/ écroulements évacués	26	115	31	187	130	110
Durée moyenne d'évacuation (en année)	11,6	9,1	5,0	7,0	7,0	5,9

Tableau 3.5 : Durée moyenne de déblaiement des éboulements/écroulements au niveau du cordon de galets par sous-cellule hydro-sédimentaire entre 1939 et 2015

Finalement, une forte variabilité spatiale des vitesses d'évacuation peut être observée. Au-delà de la qualité des photographies ou de l'intervalle de temps (parfois trop long entre deux missions), cette dernière s'explique par une multitude de facteurs qui influencent les modalités et l'efficacité du déblaiement (type de craie, cinématique des mouvements de masse, volume du mouvement de masse dépendant de la hauteur des falaises et de la fracturation des craies, volume et morphologie du cordon de galets, etc.).

3.1.4 Distribution spatio-temporelle des mouvements de masse : aléatoire ou organisée ?

Il est évoqué qu'après un mouvement de masse majeur, une succession d'autres mouvements gravitaires se réalise en aval-dérive (Hénaff et al., 2002). Le travail sur les vitesses de recul (Letortu, 2013 ; Letortu et al., 2014a) avait démontré l'accélération du recul de l'ordre de trois à quatre à l'aval-dérive des obstacles (naturels ou anthropiques) au transit des galets. Il s'agit de vérifier cette hypothèse grâce à l'observation de la répartition spatio-temporelle des mouvements de masse sur les photographies aériennes de l'IGN (1939-2015).

Pour répondre à cette interrogation, nous avons étudié trois obstacles majeurs au transit de galets à savoir : 1) l'éboulement du Chien Neuf à Senneville-sur-Fécamp daté de 1910, 2) la jetée de la centrale de Penly (construite en 1981), 3) l'épi majeur de Criel-sur-Mer rallongé en 1995.

La visualisation d'un déplacement progressif des éboulements/écroulements vers l'aval-dérive n'a pu être démontrée ici. La spatialisation des événements successifs semble correspondre à une structuration aléatoire, comme le démontre la localisation des barycentres (Figure 3.5, Figure 3.6, Figure 3.7). Par contre, concernant la concentration d'éboulements/écroulements en aval-dérive des obstacles, cette dernière est

toujours plus importante après les grands ouvrages transversaux de défense contre la mer ou les éboulements majeurs.



Figure 3.5 : Distribution spatio-temporelle des éboulements/écroulements et leur barycentre par année en amont et en aval-dérive de l'éboulement du Chien Neuf daté de 1910

A une échelle fine, l'éboulement du Chien Neuf de 1910 (Figure 3.5), la jetée de Penly de 1981 (Figure 3.6) et l'épi majeur de Criel-sur-Mer de 1995 (Figure 3.7) montrent très bien la densification dans l'espace, mais aussi dans le temps, du nombre d'éboulements/écroulements. Par exemple, le secteur de Penly est suivi de 1961 à 2015 avec, comme dates intermédiaires 1967, 1973, 1983, 1989, 1994, 1995, 2000, 2008, 2012, 2013. Une occurrence forte est observée sur les 1,5 km à l'aval-dérive de la centrale EDF. Sur un total de 37 mouvements gravitaires recensés sur ces 1,5 km entre 1961 et 2015, 32 se produisent entre 1983 et 2008, soit deux ans après la mise en place de la centrale. Cependant, les travaux ont commencé bien avant et ont perturbé le transit dès 1978 (Figure 3.6). Notre inventaire à proximité de l'épi majeur de Criel-sur-Mer montre aussi davantage de mouvements de masse qu'auparavant avec quatre mouvements de masse entre 2000 et 2013 (Figure 3.7). Ces résultats corroborent ceux de l'analyse du recul des falaises, obtenus par la comparaison des données photogrammétriques (1966 et 1995) et de l'orthophotographie de 2008.

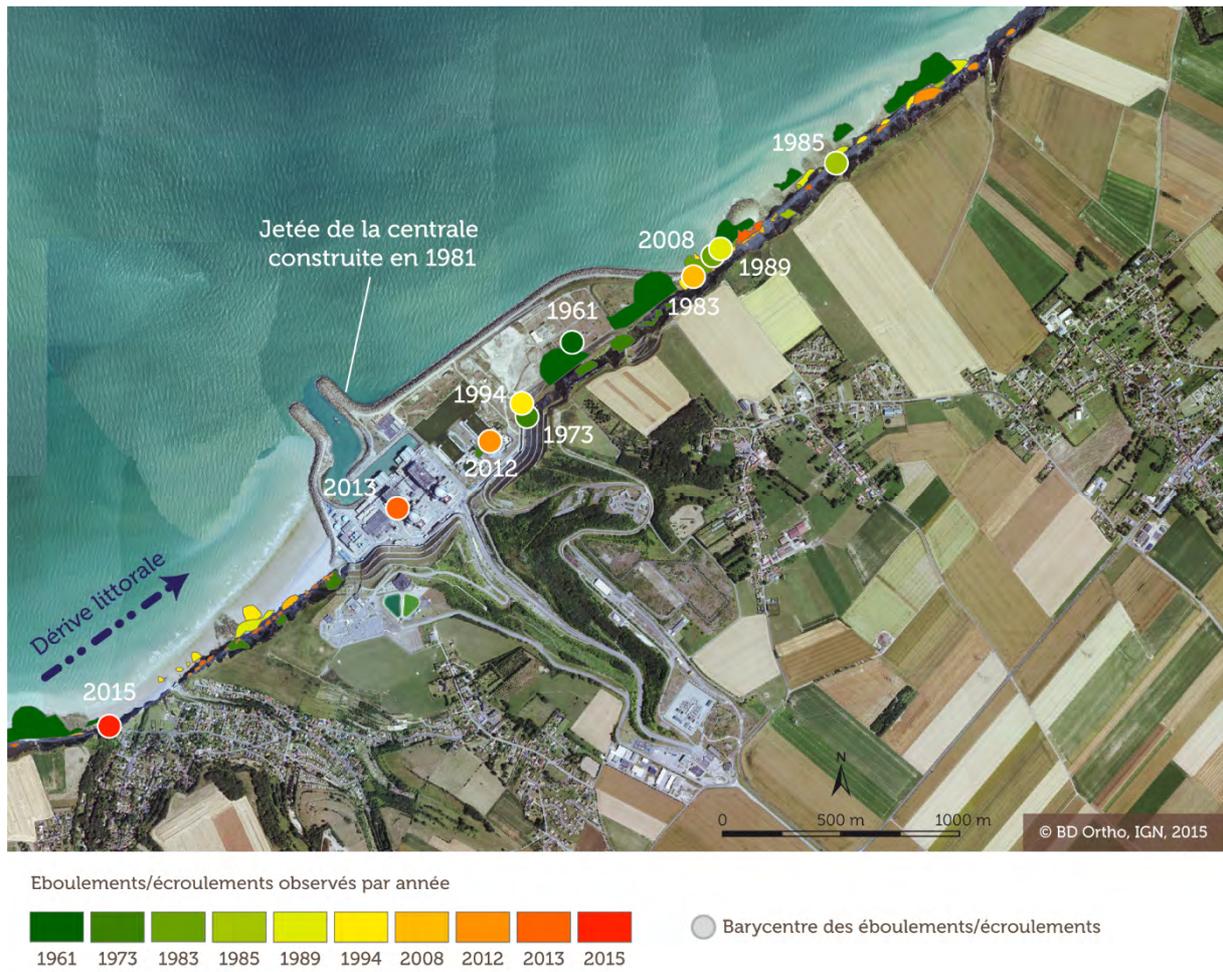


Figure 3.6 : Distribution spatio-temporelle des éboulements/écroulements et leur barycentre par année en amont et en aval-dérive de la jetée de la centrale EDF de Penly, construite en 1981

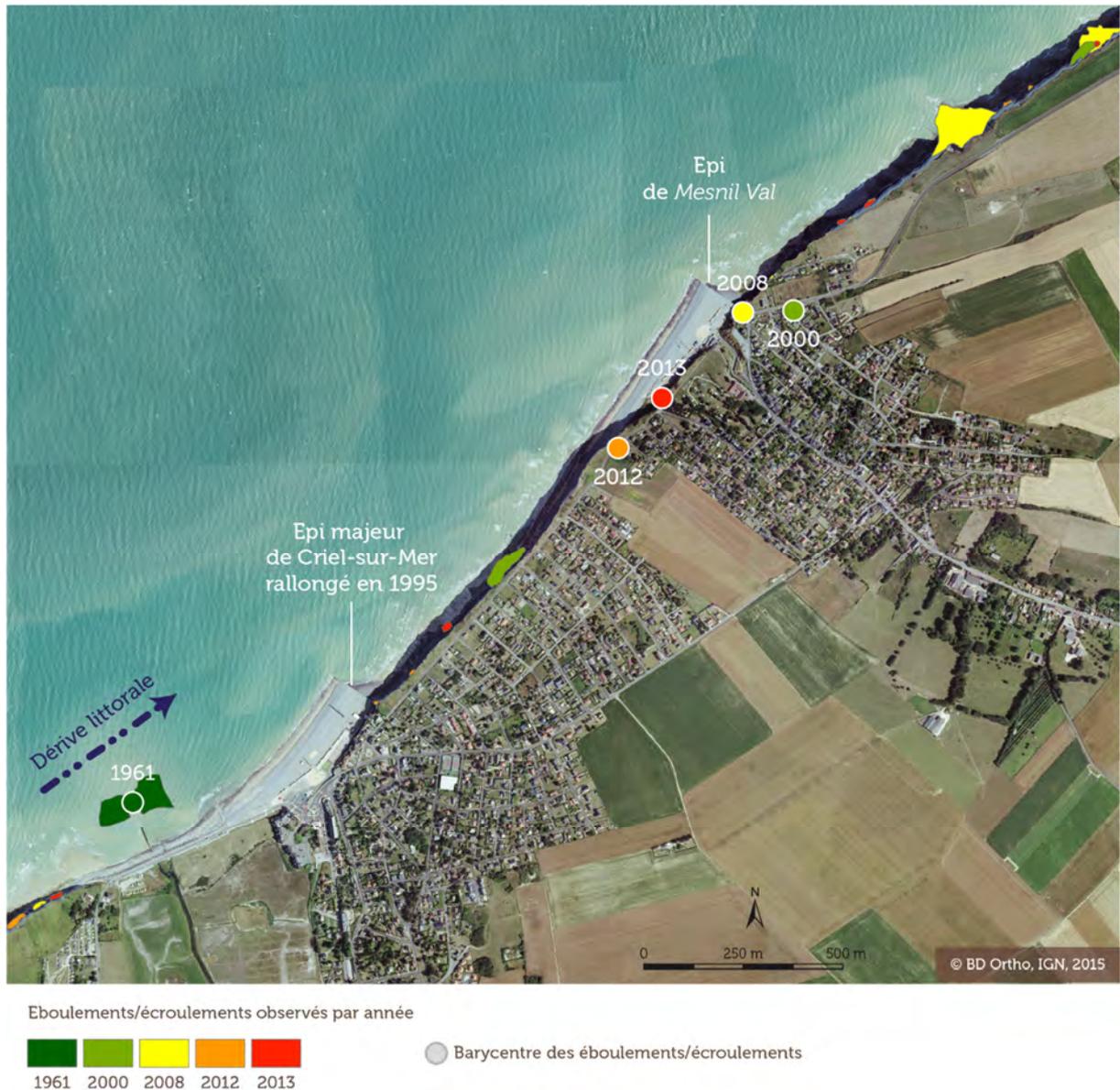


Figure 3.7 : Distribution spatio-temporelle des éboulements/écroulements et leur barycentre par année en amont et en aval-dérive de l'épi majeur de Criel-sur-Mer, rallongé en 1995

3.1.5 La définition du *Lmax* et la cartographie de l'aléa « recul des falaises » à l'échéance de 100 ans sur quatre territoires

3.1.5.1 *Lmax*: recul instantané maximal du trait de côte dû à un événement ponctuel majeur

Quatre sites à forts enjeux en haut de falaise ont été choisis pour mener cette cartographie de l'aléa (et qui correspondaient aux territoires 2 et 3 du projet RICOCHET) :

- 1) Quiberville (échelle communale) ;
- 2) la *côte aux Hérons* (ouest de Dieppe, échelle intracommunale) ;
- 3) *Puys* (est de Dieppe, échelle intracommunale) ;
- 4) Criel-sur-Mer (échelle communale).

La recherche du retrait maximal (L_{max}) s'est appuyée sur la digitalisation des zones de départ des éboulements/écroulements (de 1983 à 2015), tandis que les taux de reculs moyens annuels (T_x , 1966-2008 ; Letortu, 2013 ; Letortu et al., 2014a) sont issus de l'approche fondée sur l'aire (Tableau 3.6).

Certaines valeurs de L_{max} ont dû être corrigées (L_{max} final), car notre cartographie des zones de départ à partir de la photo-interprétation des images aériennes ne garantit pas que le L_{max} soit issu d'un événement unique et instantané. En effet, la digitalisation de la zone de départ peut être la succession de plusieurs réactivations après un événement majeur. C'est le cas de la *Côte aux Hérons*, où le glissement majeur survenu le 26 décembre 2012, d'une valeur de L_{max} de 40 m (Michoud et al., 2014), a subi de nombreuses réactivations pour atteindre un recul de 88 m. La valeur L_{max} de 88 m a donc été remplacée par celle de 40 m. Pour Criel-sur-Mer, le plan de prévention des risques naturels (MEDDE, Préfecture de Seine-Maritime et DDTM 76, 2016) a été consulté. Le L_{max} est estimé à 20 m pour une probabilité d'occurrence de 100 ans (zonage 1). Notre valeur de 30 m a donc été réduite à 20 m. Nos valeurs L_r pour le zonage de l'aléa « recul du trait de côte » vont de 25 m (*Puys*) à 62 m (*côte aux Hérons*) (Tableau 3.6).

Sites étudiés	Taux de recul annuel (m/an) (1966-2008) (T_x)	$100 \times T_x$ (m)	L_{max} initial (m)	L_{max} final (m)	L_r (m)
Quiberville	0,25	25	10	10	35
<i>Côte aux Hérons</i>	0,22	22	88	40	110
<i>Puys</i>	0,16	16	9	9	25
Criel-sur-Mer	0,17	17	30	20	47

Tableau 3.6 : Estimation du taux de recul annuel (T_x), $100 \times T_x$, du L_{max} initial et L_{max} final et du L_r à Quiberville, la *Côte aux Hérons*, *Puys* et Criel-sur-Mer

3.1.5.2 Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à l'échéance de 100 ans (en 2108) avec ou sans la prise en compte du changement climatique

Ces valeurs ont ensuite été cartographiées en se concentrant sur les zones à enjeux (bâti en haut de falaise à proximité de l'abrupt) sur les quatre sites étudiés. Le postulat de la cartographie est que le recul est strictement parallèle au trait de côte actuel et sans distinction du recul en fonction des ouvrages (falaise vive/morte).

Le Tableau 3.7 fournit les valeurs de l'aléa « moyen » et « fort » pour les deux scénarios sur les quatre sites. Pour le scénario 1 (sans la prise en compte du changement climatique), le cumul des niveaux d'aléa va de 34 à 71 m, tandis que pour le scénario 2 (avec la prise en compte du changement climatique) le cumul va de 50 à 93 m.

Définition	Taux de recul annuel à l'échéance de 100 ans	Valeur maximale du recul du trait de côte (événement brutal majeur)	Aléa fort (scénario 1)	Aléa moyen (scénario 1)	Cumul des niveaux d'aléas du scénario 1	Aléa fort (scénario 2)	Aléa moyen (scénario 2)	Cumul des niveaux d'aléas du scénario 2
Données (m)	$100 \times Tx$	L_{max}	$Lr = 100 \times Tx + L_{max}$	$100 \times 0,09$	$Lr + 100 \times 0,09$	$100 \times Tx \times 1,5 + L_{max}$	$((100 \times Tx \times 2 + L_{max}) - (100 \times Tx \times 1,5 + L_{max})) + 9$	$100 \times Tx \times 1,5 + L_{max} + ((100 \times Tx \times 2 + L_{max}) - (100 \times Tx \times 1,5 + L_{max})) + 9$
Secteurs								
Quiberville	25	10	35	9	44	47,5	21,5	69
Côte aux Hérons	22	40	62	9	71	73	20	93
Puys	16	9	25	9	34	33	17	50
Criel-sur-Mer	17	20	37	9	46	45,5	17,5	63

Tableau 3.7 : Calculs des zones d'aléas « fort » et « moyen » à Quiberville, la Côte aux Hérons, Puys et Criel-sur-Mer, à l'échéance de 100 ans (en 2108) pour les scénarios 1 (sans la prise en compte du changement climatique) et 2 (avec la prise en compte du changement climatique)

A Quiberville, à l'échéance 2108 (car les vitesses de recul sont étendues sur 100 ans à partir de la date du dernier trait de côte de 2008), le cumul des zones d'aléa « fort » et d'aléa « moyen » du scénario 1 (sans la prise en compte du changement climatique) est de 44 m (Figure 3.8), contre 69 m pour le scénario 2 (avec la prise en compte du changement climatique) (Figure 3.9). Sur la côte aux Hérons, à l'échéance 2108, le cumul des zones d'aléa « fort » et d'aléa « moyen » du scénario 1 est de 71 m (Figure 3.10), contre 93 m pour le scénario 2 (Figure 3.11). A Puys, le cumul des zones d'aléa « fort » et d'aléa « moyen » du scénario 1 est de 34 m (Figure 3.12), contre 50 m pour le scénario 2 (Figure 3.13) à l'échéance 2108. Enfin, à Criel-sur-Mer, à l'échéance 2108, le cumul des zones d'aléa « fort » et d'aléa « moyen » du scénario 1 est de 46 m (Figure 3.14), contre 63 m pour le scénario 2 (Figure 3.15).



Figure 3.8 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à Quiberville avec le scénario 1 (sans la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108)

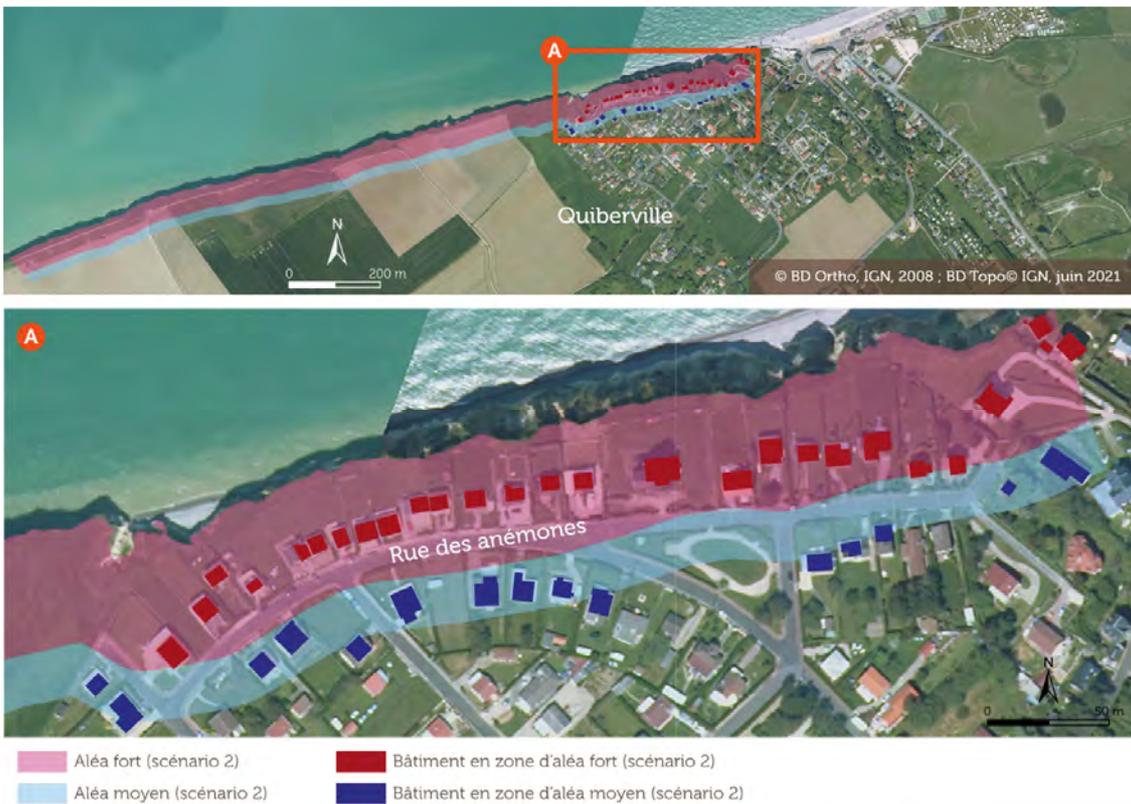


Figure 3.9 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à Quiberville avec le scénario 2 (avec la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108)



Figure 3.10 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à la Côte aux Hérons avec le scénario 1 (sans la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108)



Figure 3.11 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à la Côte aux Hérons avec le scénario 2 (avec la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108)

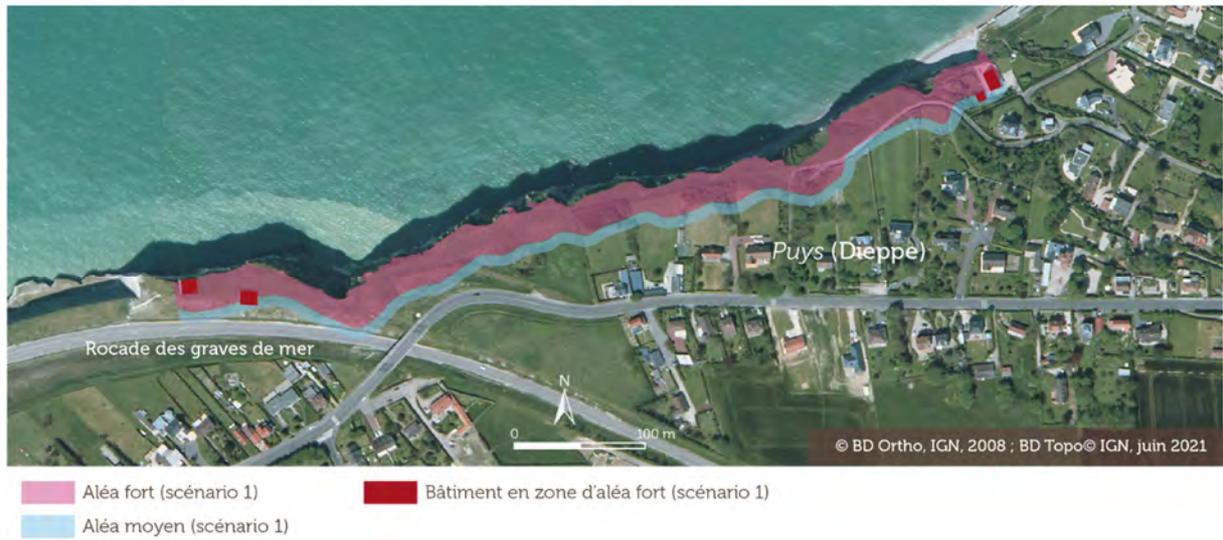


Figure 3.12 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à Puys avec le scénario 1 (sans la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108)

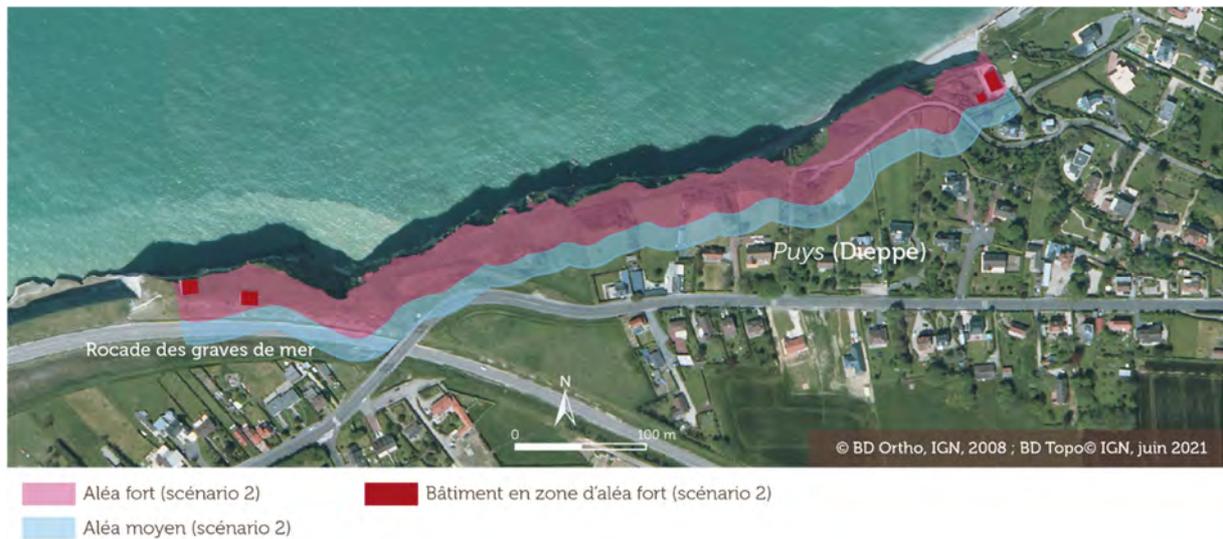


Figure 3.13 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à Puys avec le scénario 2 (avec la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108)

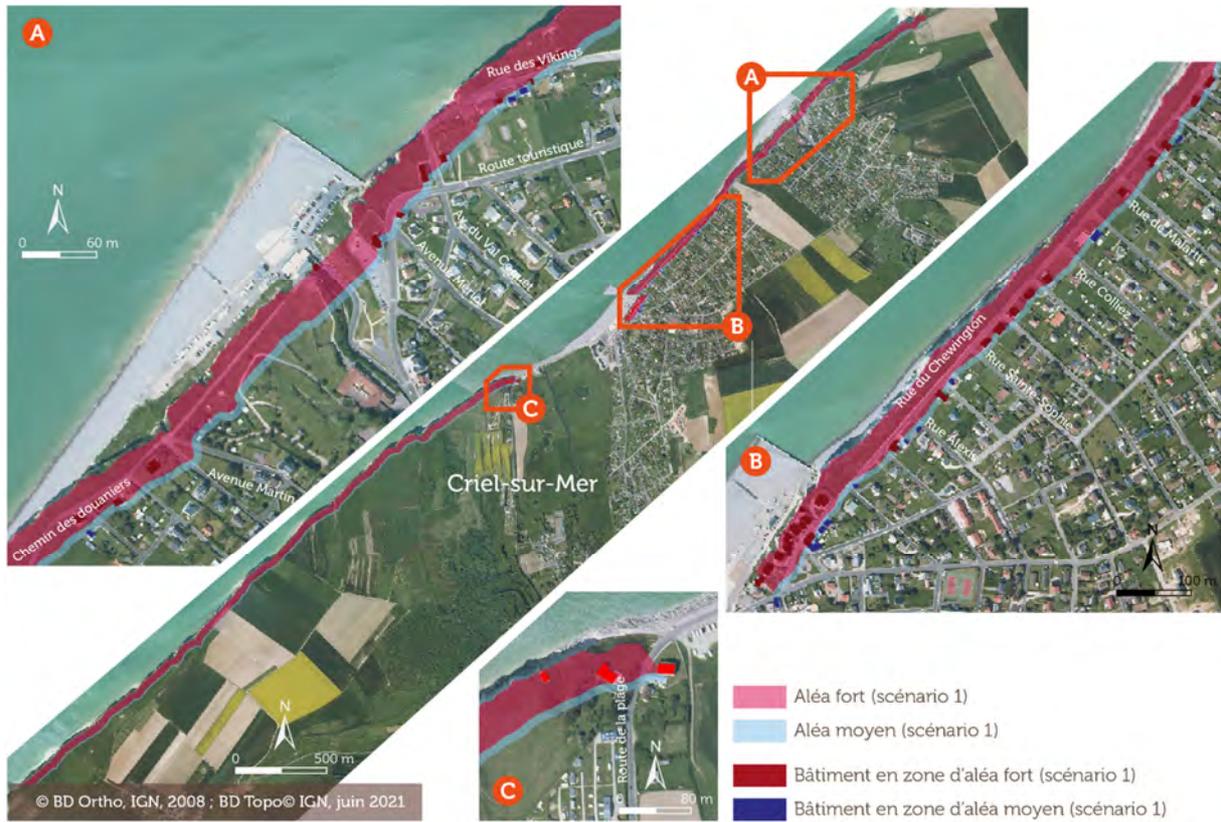


Figure 3.14 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à Criel-sur-Mer avec le scénario 1 (sans la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108)

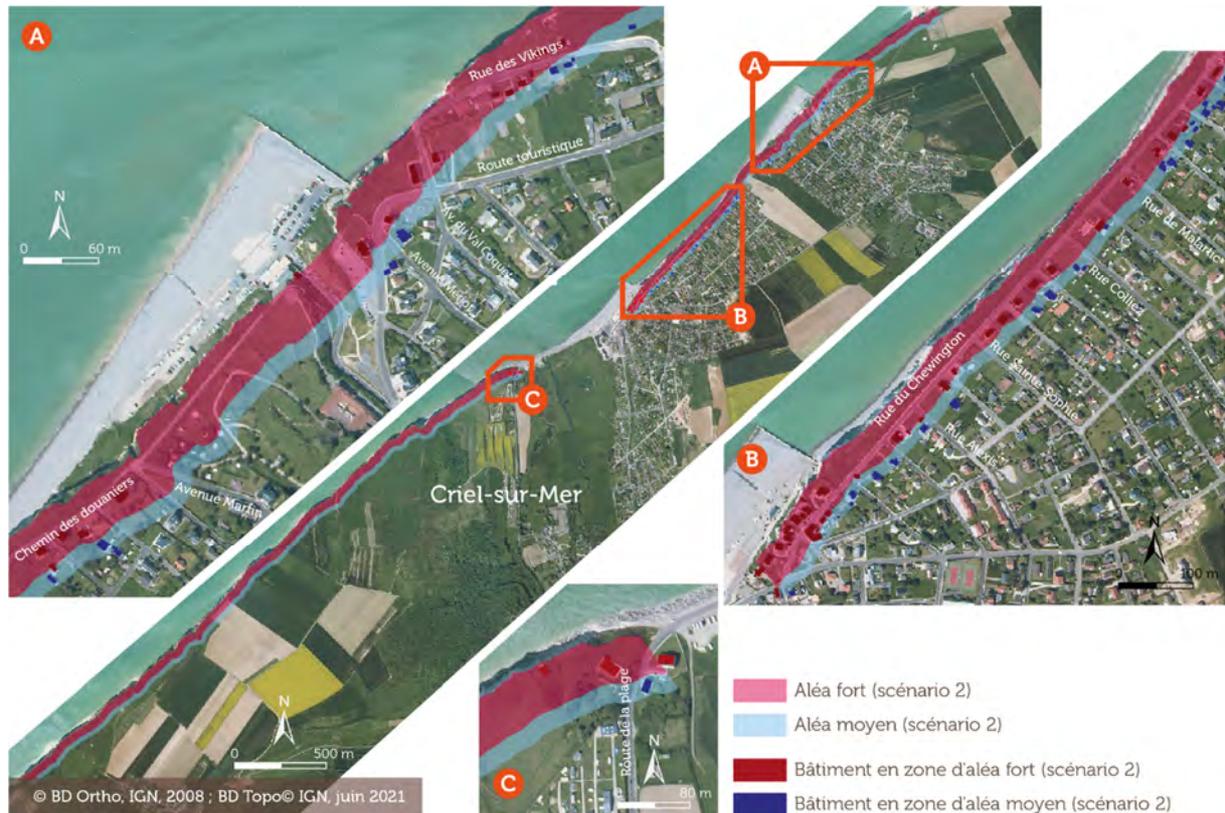


Figure 3.15 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à Criel-sur-Mer avec le scénario 2 (avec la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108)

3.1.5.3 Evaluation de la surface communale et du nombre de bâtiments concernés par l'aléa « recul des falaises » à l'échéance de 100 ans (en 2108), avec ou sans la prise en compte du changement climatique

En mettant en lien les limites communales (BD Carto IGN, 2019), les bâtiments (BD Topo IGN, juin 2021) et nos cartographies (scénarios 1 et 2), la surface communale ainsi que le nombre de bâtiments concernés ont pu être calculés (Tableau 3.8). L'objectif est de fournir un premier ordre de grandeur des impacts pour la planification spatiale de ces territoires.

Les surfaces communales concernées par le zonage du scénario 1 s'échelonnent de 40 315 à 270 887 m², et de 60 076 à 372 675 m² pour le zonage du scénario 2. Les pourcentages de surface communale concernés par le zonage varient de 0,3 à 2,3 % pour le scénario 1, contre 0,5 et 3,6 % pour le scénario 2. Quant au nombre de bâtiments intégrés dans le zonage, entre 8 à 62 bâtiments sont concernés dans le scénario 1, contre 11 à 102 pour le scénario 2 (Tableau 3.8).

Site	Scénario	Zonage de l'aléa	Surface communale (m ²)	Surface communale concernée par les différents zonages (m ²)	Total de la surface communale concernée par le zonage (m ²)	Pourcentage du zonage par rapport à la surface communale	Nombre de bâtiments concernés
Quiberville	1	Fort	3 383 334	62 316	77 325	1,8	38
		Moyen		15 009		0,4	2
	2	Fort		83 256	119 031	2,5	42
		Moyen		35 775		1,1	27
Côte aux Hérons	1	Fort	11 832 685	139 282	159 469	1,2	22
		Moyen		20 187		0,2	7
	2	Fort		164 335	209 363	1,4	30
		Moyen		45 028		0,4	8
Puis	1	Fort	11 832 685	29 371	40 315	0,2	8
		Moyen		10 944		0,1	0
	2	Fort		39 234	60 076	0,3	8
		Moyen		20 842		0,2	3
Criel-sur-Mer	1	Fort	20 970 662	218 465	270 887	1,0	46
		Moyen		52 422		0,2	16
	2	Fort		269 583	372 675	1,3	62
		Moyen		103 092		0,5	40

Tableau 3.8 : Evaluation de la surface communale et du nombre de bâtiments concernés par la cartographie de l'aléa « recul des falaises » (calcul des surfaces d'après la BD Carto IGN, 2019 ; calcul du nombre de bâtiments d'après la BD Topo IGN, 2021) à l'échéance de 100 ans (en 2108) avec (scénario 2) ou sans (scénario 1) la prise en compte du changement climatique

A la Côte aux Hérons, site caractérisé par les glissements de terrain liés à la vidange des entonnoirs de dissolution, le zonage du scénario 2 impliquerait la disparition à l'échéance de 100 ans (2108, Tableau 3.8) :

- de 38 bâtiments ;

- d'une partie des terrains sportifs aménagés dans les délaissés entre le lycée Jehan Ango et la nouvelle route départementale (RD) 75 ;

- d'une partie de la nouvelle RD 75 reliant la commune de Saint-Aubin-sur-Mer à la commune de Dieppe, dont le trafic est estimé à 3 000 véhicules par jour. En effet, la *Côte aux Hérons* a déjà fait l'objet de mesures d'expropriation et d'aménagements, suite au glissement du 26 décembre 2012. Une déviation de la RD 75 a donc été réalisée (pour un coût de 2,6 millions € TTC, déviation financée principalement par le département de la Seine-Maritime). Les infrastructures sportives furent aussi relocalisées avec 1) l'implantation des terrains de rugby du stade Méréault sur le complexe Delaune-Dasnias de Saint-Aubin-sur-Scie, 2) la reconstitution d'une piste d'athlétisme de 250 m et la création de locaux annexes (vestiaires, bureaux, salle de musculation, etc.) sur site, au sud de la future route (Figure 3.16). Cette relocalisation des infrastructures sportives a été estimée à plus de 4,7 millions d'euros (financée en partie par la région Normandie).

UN TRACÉ LISIBLE ET DES CARREFOURS AMÉNAGÉS

Le tracé de 650 m de long garantira une bonne lisibilité de l'itinéraire aux usagers. Des carrefours plans assuront des échanges sécurisés avec la cavée de Caudé-Côte le parking du lycée Jehan-Ango et l'accès pompier du gymnase des lycées.



Figure 3.16 : Travaux d'aménagement de la côte aux Hérons (Département de Seine-Maritime, 2016)

A Quiberville, d'après notre cartographie du scénario 2, 69 bâtiments sont susceptibles de disparaître. La rue des anémones est également menacée. A Puy, 11 bâtiments et la rocade des graves de mer sont menacés à l'échéance de 2108. Mais c'est à Criel-sur-Mer que le besoin de recomposition spatiale sera le plus fort, avec 102 bâtiments concernés par le scénario 2 et de nombreuses routes (alors que la surface ne représente de 1,8 % de la surface communale totale) (Tableau 3.8). La rue du Chewington, juste à l'aval-dérive d'une batterie d'épis, est fermée depuis janvier 2013 pour risque d'effondrement, soulignant que le danger peut arriver bien avant l'occurrence de 100 ans, surtout à l'aval-dérive d'ouvrages.

3.1.6 Discussion

Pour les vitesses de recul, la qualité radiométrique des orthophotographies s'avère essentielle, notamment lors des sections très déchiquetées, comme autour d'Etretat. Par exemple, l'orthophotographie littorale acquise durant l'été 2020 par le ROL de Normandie et des Hauts-de-France présente une excellente radiométrie permettant une prochaine mise à jour des vitesses de 1966 à 2020 (Figure 3.17).



Figure 3.17 : Comparaison de l'orthophotographie de 2015 (IGN) présentant une mauvaise qualité radiométrique et celle de 2020 (ROL de Normandie-Hauts-de-France) avec une excellente qualité radiométrique

Le suivi des mouvements de masse met en évidence un total de 932 éboulements/écroulements recensés entre Etretat et Le Tréport entre 1939 et 2015. Ce travail apporte des informations complémentaires sur les rythmes et modalités de recul des falaises :

- une augmentation du nombre de mouvements de masse entre 2000 et 2013 est perceptible, mais il s'avère difficile de dégager une éventuelle tendance. L'augmentation de la résolution des photographies permet d'observer davantage de mouvements gravitaires qu'auparavant. Cependant, entre 2010 et 2013, nos observations de terrain (corroborées par le nombre de procédures de mise en péril par les services de l'Etat) montrent un nombre grandissant de mouvements de masse. Cette augmentation est probablement à mettre en relation avec les grands abats d'eau et les coups de froid qu'ont connus les années 2010 à 2013 ;

- la concentration des éboulements/écroulements peut atteindre la densité maximale de 90 éboulements/écroulements par kilomètre linéaire entre 1939 et 2015. Ils sont souvent localisés en aval-dérive des grands obstacles au transit des galets et au cap d'Ailly ;

- la digitalisation de la zone de départ et de dépôt des éboulements/écroulements (depuis 1983, sur certains secteurs) nous permet d'apprécier leurs aires. Ces dernières sont particulièrement importantes sur

les sections côtières Fécamp/Paluel et Dieppe/Le Tréport (aire de dépôt maximale de 35 229 et 55 057 m², respectivement). Entre Saint-Valéry-en-Caux et Dieppe, les aires de dépôt sont faibles (6 926 m²).

L'analyse conjointe du recul des falaises par l'approche fondée sur l'aire et celle du recensement des mouvements de masse est riche d'enseignements et fait apparaître au moins deux secteurs aux dynamiques distinctes, conformément aux études précédentes (Costa, 1997, 2005 ; Letortu, 2013) :

- 1) l'un (cap d'Antifer/Paluel et Dieppe/Le Tréport) qui se caractérise par des vitesses de recul faibles à modérées où les éboulements/écroulements sont rares, mais volumineux ;
- 2) l'autre (Saint-Valéry-en-Caux/Dieppe), défini par des vitesses de recul plus importantes et des éboulements/écroulements plus fréquents, mais peu volumineux.

Au-delà d'un commandement lithologique, l'altitude des falaises (induite par des ondulations anticlinales et synclinales, Figure 1.17) est responsable de ce rapport fréquence/intensité. Les falaises sont particulièrement hautes dans les secteurs à faible recul. Ceci est probablement le résultat d'un long temps de séjour des mouvements de masse en pied de falaise, l'isolant temporairement des actions marines. Quelques nuances doivent être apportées, car ce schéma général d'évolution des falaises de Seine-Maritime (la hauteur des falaises générant d'importants mouvements de masse) ne se traduit pas systématiquement dans les résultats que nous avons trouvés, avec deux cas mis en évidence :

- pour le secteur de Quiberville/Dieppe, constitué des falaises les plus basses (de l'ordre de 40 m), le recul moyen par événement est plus important que pour les falaises du secteur Dieppe/Criel-sur-Mer où les abrupts ont une altitude de 60 à 100 m. Cette situation met en évidence les limites de notre méthode. En effet, l'inventaire des mouvements de masse sur les photographies aériennes de l'IGN permet uniquement l'observation des événements majeurs. Or, ceux du secteur Quiberville/Dieppe sont généralement de taille modeste et vite évacués. Ainsi, en raison de l'échelle des clichés et de l'intervalle de temps entre chaque mission, de nombreux mouvements de masse ne sont pas recensés (puisque vite évacués). Pour ce secteur, seuls les éboulements/écroulements les plus importants seraient donc retenus/observés, ce qui fausse l'interprétation et fournit des reculs moyens par événement surestimés (6,8 m) ;

- concernant les vitesses d'évacuation et la récurrence des éboulements/écroulements, les résultats semblent peu cohérents au regard de l'expérience terrain. Nos résultats pourront être grandement améliorés grâce aux données récurrentes haute résolution et menées à marée basse (levés LiDAR topobathymétriques du SHOM/ROL). Le premier levé topobathymétrique a été acquis en 2018, un levé topographique a été réalisé en 2020, et le prochain levé topobathymétrique aura lieu vers 2025. Ces méthodes et techniques permettront de prendre en compte les petits éboulements/écroulements (moins spectaculaires, mais plus fréquents), évacués parfois en quelques marées.

A propos de l'augmentation du nombre de mouvements gravitaires ces dernières années, évoquée notamment par Moses et Robinson (2011), nos résultats sont influencés par la qualité des orthophotographies de 2000 et 2015 qui permet d'identifier plus de mouvements de masse (notamment les plus petits) que sur les missions aériennes antérieures. Entre 2010 et l'été 2013, le nombre d'éboulements/écroulements de grande ampleur est assez exceptionnel. Ces trois années ont été marquées par de forts abats d'eau (instantanés et cumulés) et des périodes neigeuses et de gel importants qui peuvent expliquer cette forte activité érosive. Ce grand nombre d'éboulements/écroulements de grande ampleur ne se retrouve pas durant l'hiver 2013-2014 et en 2015, malgré des conditions d'agitation fortes et de

précipitations abondantes (Blaise et al., 2015) (peut-être une évacuation des éboulements/écroulements très rapides).

Ce travail sur les rythmes et les modalités de recul des falaises de Seine-Maritime nécessite d'être prolongé avec les nouvelles orthophotographies et de bénéficier d'améliorations. La valeur de L_{max} est probablement sous-estimée en raison de la représentativité temporelle limitée de nos données (digitalisation des zones de départ depuis 1983). De plus, les données utilisées possèdent une faible fréquence temporelle. Pour dépasser cette contrainte, l'utilisation des images Pléiades et Pléiades Neo (Letortu et al., 2020, 2021) pourrait être particulièrement pertinente en raison de leur répétitivité journalière et de leur THRS (respectivement, 0,70 m et 0,30 m au nadir, Astrium, 2012, <https://www.airbus.com/en/products-services/space/earth-observation/earth-observation-portfolio/pleiades-neo>).

A partir des travaux sur les vitesses, les rythmes et les modalités de recul, dans le cadre du projet RICOCHET (2017-2021), nous avons proposé une première méthode de cartographie de l'aléa « recul des falaises » intégrant le changement climatique à Dieppe (*côte aux Hérons* et *Puys*), Quiberville et Criel-sur-Mer. Ces cartographies intégrant un coefficient multiplicateur de 1,5 sur les vitesses de recul actuelles et une zone tampon permettent d'apporter des éléments de réflexion et de réponse aux décideurs chargés de la planification spatiale sur les côtes à falaises. Ce choix d'intégrer un coefficient multiplicateur aux vitesses de recul est d'ailleurs recommandé pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte pour les côtes d'ablation (Collectif (BRGM/CEREMA), 2022, p. 46) : « *en l'absence de modèle opérationnel, l'approche générique recommandée [...] fait intervenir une phase d'expertise visant notamment à majorer les vitesses d'évolution du trait de côte* ». Ces cartes fournissent un premier ordre de grandeur en raison de deux limites majeures inhérentes à notre site et à la prospective :

1) le postulat d'un recul linéaire à travers le temps n'est pas réaliste de par la variabilité dans l'espace des agents et des processus d'érosion, mais aussi des craies (lithologie, fracturation, etc.), des formations superficielles (notamment les entonnoirs de dissolution remplis de formations meubles), des sédiments en pied de falaise pouvant induire des dynamiques locales de recul. Par exemple, le recul par glissement à la *côte aux Hérons* dépend notamment de la localisation des entonnoirs de dissolution, distribués de manière hétérogène dans l'espace (largeur, longueur, profondeur). Cette distribution aboutit à une prévision de recul fortement variable (Pannet et al., 2015). Le trait de côte estimé pour le zonage des entonnoirs à 10 ans à la *côte aux Hérons* (Pannet et al., 2015) dépasse à quelques endroits le nôtre à l'échéance de 100 ans (Maquaire et al., 2021). Notre cartographie peut donc potentiellement sous-estimer localement l'aléa (Figure 3.18). Par ailleurs, les impacts des ouvrages sont également ignorés dans cette cartographie alors qu'ils font varier le recul ;

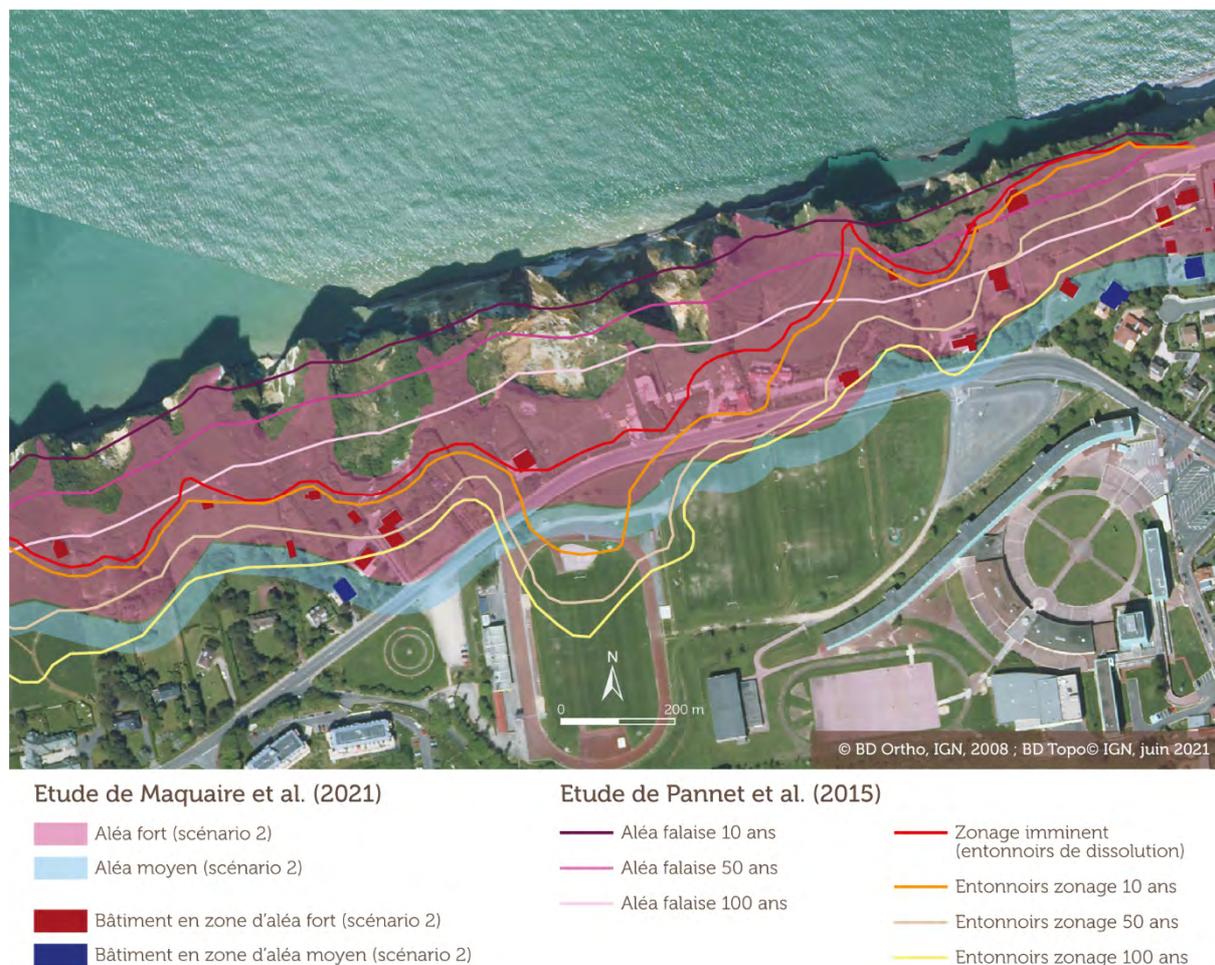


Figure 3.18 : Comparaison des zonages du projet RICOCHET (Maquaire et al., 2021) et du BRGM (Pannet et al., 2015) à l'échéance de 100 ans à la Côte aux Hérons à Dieppe en fonction de la prise en compte de l'aléa « recul des falaises » avec les entonnoirs de dissolution qui peuvent se vidanger rapidement (d'orange à jaune) ou sans les entonnoirs de dissolution (de violet à rose clair)

2) les impacts du changement climatique à l'échelle mondiale et sa déclinaison locale/régionale s'affinent progressivement (GIEC, 2021 ; scénarios régionalisés d'élévation du niveau de la mer (projets ERA4CS) : <https://sealevelrise.brgm.fr/sea-level-scenarios/#map>) pouvant rendre les exercices de prospective obsolètes (même si, pour le moment, les projections d'érosion côtière dans le rapport du GIEC (2022b) proviennent des travaux sur les côtes d'accumulation sableuses (par exemple, Vitousek et al., 2017)). Par ailleurs, l'article de Shadrick et al. (2022) démontre qu'une intégration des évolutions sur plusieurs millénaires du niveau marin à l'échelle locale pour calibrer les modèles d'évolution des falaises peut également apporter des éclairages sur l'adaptation des côtes au changement climatique contemporain.

3.2 Suivi du front de falaise (Normandie)

3.2.1 A THRS et haute fréquence temporelle depuis 2010

3.2.1.1 Vitesses, rythmes et modalités d'érosion

- a. Vitesses d'érosion du front de falaise entre les falaises vives et mortes et comparaison avec les vitesses de recul du haut de falaise

Notre suivi du front de falaise étant décennal, il peut être intéressant de comparer les vitesses d'évolution entre ce suivi du front de falaise et celui du haut de falaise (1966-2008). Bien évidemment, les périodes d'analyse, les méthodes et les précisions étant différentes, ces comparaisons sont à prendre avec précaution, mais elles peuvent cependant renseigner sur la cohérence des résultats obtenus (et donc sur le caractère modal de la période de 10 ans retenue) ou sur l'écart entre les vitesses issues de deux référentiels (Tableau 3.9).

Le site de falaise vive de Varengeville-sur-Mer présente des vitesses d'érosion du front de falaise de $0,51 \pm 0,02$ m/an (2010-2021) alors que le site de Dieppe évolue très peu sur la même période ($0,00 \pm 0,01$ m/an) (Tableau 3.9). Il convient de préciser qu'à Dieppe, il y a eu une érosion d'origine anthropique en mars 2012 avec des travaux de sécurisation des falaises (retrait des blocs en surplomb et mise en place de filets de protection) (Photographie 3.1). Cela a réduit la zone d'étude sur Dieppe 1 O (de $1\ 000\text{ m}^2$ à 500 m^2) et Dieppe 2 N (de $1\ 600\text{ m}^2$ à $1\ 100\text{ m}^2$). Ces actions anthropiques sont retirées de notre analyse de l'érosion.

Varengeville-sur-Mer	Période suivie	Linéaire de falaise étudié (m)	Vitesse d'érosion détaillée (m/an)	Vitesse d'érosion moyenne (m/an)
Suivi du front de falaise	2010-2021	250	$0,51 \pm 0,02$	$0,51 \pm 0,02$
Suivi du haut de falaise	1966-2008	50	$0,50 \pm 0,03$	$0,37 \pm 0,03$
	1966-2008	50	$0,45 \pm 0,03$	
	1966-2008	50	$0,42 \pm 0,03$	
	1966-2008	50	$0,34 \pm 0,03$	
	1966-2008	50	$0,29 \pm 0,03$	
	1966-2008	50	$0,21 \pm 0,03$	

Dieppe secteur 1 O	Période suivie	Linéaire de falaise étudié (m)	Vitesse d'érosion détaillée (m/an)	Vitesse d'érosion moyenne (m/an)
Suivi du front de falaise	2010-2021	30	$0,00 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,01$
Suivi du haut de falaise	1966-2008	50	$0,02 \pm 0,03$	$0,04 \pm 0,03$
	1966-2008	50	$0,06 \pm 0,03$	

Dieppe secteur 2 N	Période suivie	Linéaire de falaise étudié (m)	Vitesse d'érosion détaillée (m/an)	Vitesse d'érosion moyenne (m/an)
Suivi du front de falaise	2010-2021	80	$0,00 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,01$
Suivi du haut de falaise	1966-2008	50	$0,06 \pm 0,03$	$0,05 \pm 0,03$
	1966-2008	50	$0,03 \pm 0,03$	

Tableau 3.9 : Comparaison des vitesses d'érosion obtenues par le suivi du front de falaise et du haut de falaise à Varengeville-sur-Mer et à Dieppe

A Dieppe, les vitesses d'érosion du front de falaise sont inférieures à celles du haut de falaise ($0,00 \pm 0,01$ m/an contre $0,04-0,05 \pm 0,03$ m/an pour Dieppe 1 O et Dieppe 2 N), mais au regard de la précision, les résultats sont cohérents. Pour Varengeville-sur-Mer, les résultats sont différents. Le suivi du haut de falaise entre 1966 et 2008 met en évidence une valeur moyenne inférieure à celle du suivi du front de falaise (respectivement $0,37 \pm 0,03$ contre $0,51 \pm 0,02$ m/an). Notre suivi du front de falaise peut ici être influencé par des mouvements de masse fréquents qui ne sont pas lissés sur une période si courte et parce que le référentiel « front de falaise » inclut tous les mouvements, contrairement au référentiel « haut de falaise » (Tableau 3.9).



Photographie 3.1 : Travaux de sécurisation du site de Dieppe 1 O (à gauche) et Dieppe 2 N (à droite)

b. Saisonnalité de l'érosion à Varengeville-sur-Mer ¹³⁶ : « temps forts » généralement hivernaux et « temps calmes » plutôt estivaux

L'approche diachronique du front des falaises vives de Varengeville-sur-Mer met en évidence que les levés incluant toute ou partie de la période hivernale (de début septembre à fin février) sont marqués par des vitesses de recul fortes ($0,01$ à $1,69$ m/an). Hors de ces périodes (de début mars à fin août), les évolutions semblent plus faibles, mais non nulles (inférieures ou égales à $0,65$ m/an) (Tableau 3.10).

A ce titre, la période du 18/09/2012 au 11/02/2013 est marquée par une érosion très importante ($4\,138,9$ m³) qui, rapportée à la surface étudiée ($5\,643,8$ m²), représenterait un retrait total de $0,73$ m (Tableau 3.10). Cette période de quatre mois et demi de forte érosion aboutirait à une vitesse de recul moyenne annuelle de $1,96$ m.

De l'automne 2012 au printemps 2013, les mouvements gravitaires ont été particulièrement importants en volume et en fréquence. Les conditions pluviométriques exceptionnelles entre octobre 2012 et mars 2013 (cumul de $575,5$ mm à Dieppe (Météociel), soit une majoration de 29% par rapport à la normale 1971-2000), et notamment les mois d'octobre et décembre (respectivement $+159\%$, $+56\%$) peuvent expliquer la recrudescence de l'érosion.

La période de l'hiver 2013-2014 est également très parlante avec la succession de perturbations amenant des fortes conditions d'agitation et de précipitations (Blaise et al., 2015), avec des volumes perdus records

¹³⁶ Les falaises mortes à Dieppe évoluant peu, cette analyse ne peut être menée qu'à Varengeville-sur-Mer.

sur la décennie étudiée (16 651,3 m³ du 25/09/2013 au 11/03/2014). Cette période de cinq mois et demi de forte production de débris aboutirait à une vitesse de recul moyenne de 20,27 m/an.

Date du levé ancien	Date du levé récent	Nombre de mois entre les levés	Nom du différentiel	Surface (m ²)	Volume (m ³)	Evolution (± 0,03 m)	Vitesse d'évolution (m/an)
08/10/2010	24/02/2011	4,5	A	5 850,0	117,0	0,02	0,05
24/02/2011	27/09/2011	7,0	B	5 995,2	-546,4	-0,09	-0,16
27/09/2011	18/12/2011	3,0	C	6 010,1	-532,4	-0,09	-0,35
18/12/2011	21/03/2012	3,0	D	5 367,1	-346,5	-0,06	-0,26
21/03/2012	18/09/2012	6,0	E	5 855,8	-482,2	-0,08	-0,16
18/09/2012	11/02/2013	4,5	F	5 643,8	-4 138,9	-0,73	-1,96
11/02/2013	25/09/2013	7,5	G	6 046,8	-1 885,3	-0,31	-0,50
25/09/2013	12/02/2014	4,5	H	5 992,9	-6 538,5	-1,09	-2,91
12/02/2014	11/03/2014	1,0	I	5 987,4	-10 112,8	-1,69	-20,27
11/03/2014	09/07/2014	4,0	J	6 645,9	-88,6	-0,01	-0,04
09/07/2014	24/09/2014	2,5	K	6 891,2	-196,1	-0,03	-0,14
24/09/2014	26/02/2015	5,0	L	7 088,1	400,0	0,06	0,14
26/02/2015	08/06/2015	3,5	M	7 231,3	-73,3	-0,01	-0,03
08/06/2015	25/09/2015	3,5	N	7 183,7	-182,8	-0,03	-0,09
25/09/2015	28/01/2016	4,0	O	7 039,7	-115,2	-0,02	-0,05
28/01/2016	21/06/2016	5,0	P	7 128,4	-39,4	-0,01	-0,01
21/06/2016	27/10/2016	4,0	Q	7 402,3	-144,0	-0,02	-0,06
27/10/2016	25/01/2017	3,0	R	8 011,7	-460,4	-0,06	-0,23
25/01/2017	26/06/2017	5,0	S	9 903,8	-1 387,8	-0,14	-0,34
26/06/2017	02/11/2017	4,5	T	14 649,9	-3 004,8	-0,21	-0,55
02/11/2017	16/01/2018	2,5	U	14 475,1	-4 035,5	-0,28	-1,34
16/01/2018	29/03/2018	2,5	V	14 605,4	459,4	0,03	0,15
29/03/2018	06/07/2018	3,0	W	15 194,2	-9 804,9	-0,65	-2,58
06/07/2018	17/10/2018	3,5	X	15 959,8	288,1	0,02	0,06
17/10/2018	17/01/2019	3,0	Y	16 174,1	-419,7	-0,03	-0,10
17/01/2019	21/06/2019	5,0	Z	16 201,8	1 159,8	0,07	0,17
21/06/2019	02/09/2019	2,5	AA	15 795,1	-227,2	-0,01	-0,07
02/09/2019	16/01/2020	4,0	AB	15 742,6	-2 654,4	-0,17	-0,51
16/01/2020	14/04/2020	3,0	AC	15 923,2	-5 609,5	-0,35	-1,41
14/04/2020	22/10/2020	6,5	AD	16 197,9	138,8	0,01	0,02
22/10/2020	02/02/2021	3,5	AE	24 019,1	-243,4	-0,01	-0,03
02/02/2021	13/04/2021	2,0	AF	23 343,6	257,1	0,01	0,07
13/04/2021	09/07/2021	3,0	AG	24 031,5	28,4	0,00	0,00
Total		129,0			-51 251,3		

Tableau 3.10 : Erosion du front de falaise à Varengueville-sur-Mer entre le 08/10/2010 et le 09/07/2021 au *Petit Ailly* (en gris, les levés dépassant les ± 0,03 m d'imprécision)

Les « temps calmes » estivaux ne signifient pas une absence d'éboulements/écroulements. Or, en été, la fréquentation de la plage et de la plate-forme est importante avec les activités de loisirs, pouvant engendrer des risques, parfois mortels comme en août 2015 à Varengueville-sur-Mer, où un pêcheur à pied est décédé sous un éboulement (qui s'est produit à une centaine de mètres à l'ouest de la zone suivie, Figure 3.19).

Seine-Maritime : une falaise s'écroule, un pêcheur retrouvé mort

🕒 Lecture 1 min

Accueil • Faits Divers



Figure 3.19 : Accident mortel le 14/08/2015 à Varengeville-sur-Mer où un pêcheur à pied est retrouvé sous un éboulement (*Sud-Ouest*, agence France-Presse C. Triballeau)

c. Volumes érodés, mouvements de masse et mouvements individuels

Avec la nouvelle méthode de traitements des données sous CloudCompare, le volume perdu est estimé à $51\,251\text{ m}^3$ en cumulant les 29 différentiels intermédiaires¹³⁷ (Tableau 3.10). Grâce à la précision de la mesure, nous avons tenté de dissocier morphologiquement les éboulements/écroulements¹³⁸ (profonds de plus d'1 m et d'un diamètre supérieur à 1 m) et certaines chutes de pierres et de blocs¹³⁹ (peu profondes (jusqu'à ≈ 1 m) et circonscrites autour d'1 m de diamètre) (respectivement A et B sur la Figure 3.20). Dans les chutes de pierres, il convient d'ajouter le départ de matériel de faible épaisseur, mais sur de grandes surfaces, visible grâce à la très haute résolution spatiale et temporelle du suivi. Ces éléments d'ébouilisation, difficilement individualisables, sont quantifiés par déduction.

Entre le 08/10/2010 et le 09/07/2021, tout le front de falaise de Varengeville-sur-Mer a subi de l'érosion). Sur les 103 mouvements gravitaires identifiés, les 68 éboulements/écroulements identifiés sont responsables d'un volume perdu de $34\,900\text{ m}^3$ (précision¹⁴⁰ de $\pm 1\,222\text{ m}^3$) tandis que les 35 chutes de blocs et de pierres sont responsables d'une érosion de 158 m^3 ($\pm 17\text{ m}^3$) (Tableau 3.11). La part de mouvements de masse dans l'érosion totale est de 68,1 %, contre 0,3 % pour les chutes de blocs et de pierres, tandis que le reste des petits mouvements gravitaires représentent $16\,193\text{ m}^3$, soit 31,6 % de l'érosion totale. La valeur de l'ébouilisation dans l'érosion totale (31,9 %) est au-dessus des travaux de May et Heeps (1985), Hénaff et al. (2002) et Letortu et al. (2019) (10%, 11% et 2 % respectivement). Par contre, cette valeur se situe proche des résultats de 25 % dans Letortu et al. (2015c). Entre le 07/10/2010 et le 09/07/2021, les

¹³⁷ Quatre différentiels n'ont pas été intégrés, car l'imprécision des nuages de points du 24/02/2011 et 26/02/2015 dépasse $\pm 0,03$ m.

¹³⁸ Il est probable que dans ces éboulements/écroulements se trouvent des chutes de blocs, car les dépôts sont rarement visibles (fournissant des indices sur la nature cinématique et géométrique).

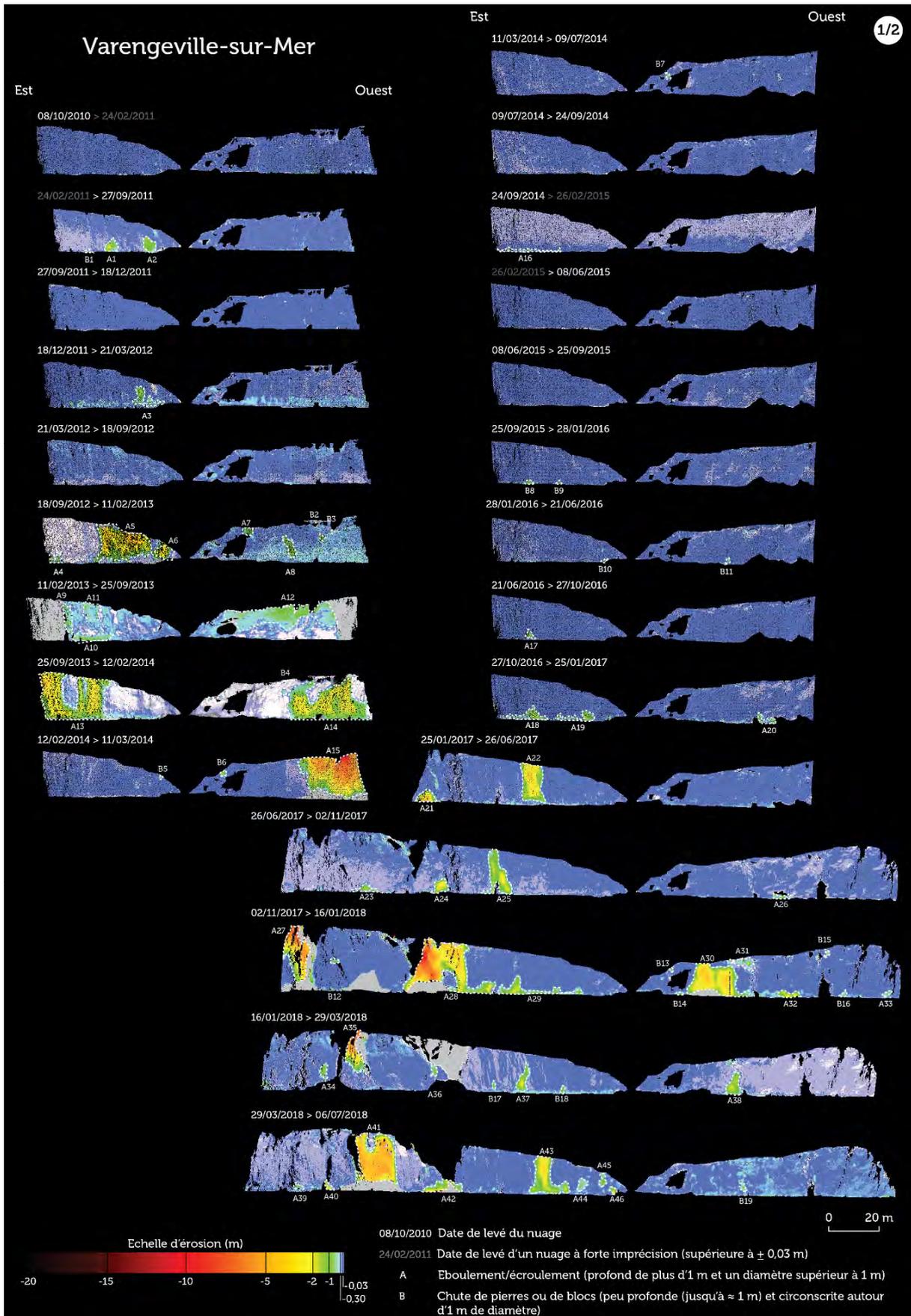
¹³⁹ Il est possible que, dans ces chutes de pierres individualisables, se trouvent quelques chutes de blocs.

¹⁴⁰ La précision des volumes est calculée en intégrant la surface du mouvement gravitaire multipliée par $\pm 0,04$ m (et non $\pm 0,03$ m) pour intégrer les effets de bord de l'outil « *volume calculation* » sur CloudCompare.

fronts de falaise de Dieppe 1 O et de 2 N sont affectés par aucun mouvement de masse (Figure 3.21). Pour les chutes de blocs et de pierres (éboulisation), respectivement aucune chute de pierres et six chutes de pierres sont observées (d'un total de $1,5 \text{ m}^3 \pm 0,3 \text{ m}^3$, observées à toutes les saisons). Pour rappel, l'érosion par les actions anthropiques de sécurisation des falaises n'a pas été comptabilisée (2 m^3 sur 19 m^2 pour Dieppe 1 O, et 142 m^3 pour 130 m^2 pour Dieppe 2 N). Le front de falaise évolue très lentement, car il est uniquement affecté par les agents et processus continentaux, qui semblent peu efficaces en termes d'érosion.

Eboulement/ écroulement (1)	Volume érodé (m^3)	Eboulement/ écroulement (2)	Volume érodé (m^3)	Chute de pierres ou de blocs	Volume érodé (m^3)
A1	24,7	A37	162,0	B1	(+)0,3
A2	97,9	A38	334,7	B2	14,8
A3	99,4	A39	1,5	B3	8,8
A4	8,5	A40	2,2	B4	8,7
A5	911,2	A41	977,8	B5	2,6
A6	364,9	A42	37,5	B6	7,4
A7	53,9	A43	732,0	B7	3,9
A8	24,3	A44	2,3	B8	2,3
A9	7,3	A45	31,4	B9	1,5
A10	44,4	A46	30,3	B10	2,6
A11	48,9	A47	82,5	B11	2,7
A12	783,6	A48	2,9	B12	1,6
A13	1 532,3	A49	46,9	B13	5,3
A14	3 978,6	A50	2,5	B14	7,6
A15	8 509,2	A51	11,6	B15	0,6
A16	9,8	A52	19,8	B16	9,3
A17	3,8	A53	31,1	B17	5,9
A18	31,8	A54	2 133,9	B18	4,1
A19	71,8	A55	315,5	B19	19,9
A20	31,5	A56	1,1	B20	0,4
A21	48,3	A57	30,0	B21	0,2
A22	720,3	A58	116,5	B22	0,3
A23	1,6	A59	2 341,3	B23	14,9
A24	73,5	A60	101,7	B24	0,4
A25	572,7	A61	1,4	B25	0,2
A26	31,6	A62	11,9	B26	2,5
A27	318,7	A63	336,8	B27	0,2
A28	3 763,1	A64	56,3	B28	0,3
A29	343,8	A65	1 326,6	B29	5,3
A30	2 836,4	A66	1,3	B30	4,2
A31	2,8	A67	113,6	B31	2,3
A32	157,2	A68	20,2	B32	4,4
A33	12,0	Total	34 900,4	B33	5,0
A34	1,5			B34	3,2
A35	79,4			B35	4,4
A36	5,3			Total	157,8

Tableau 3.11 : Type, numéro et volume des mouvements gravitaires observés entre le 08/10/2010 et le 09/07/2021 (en gris, les mouvements gravitaires issus de levés imprécis)



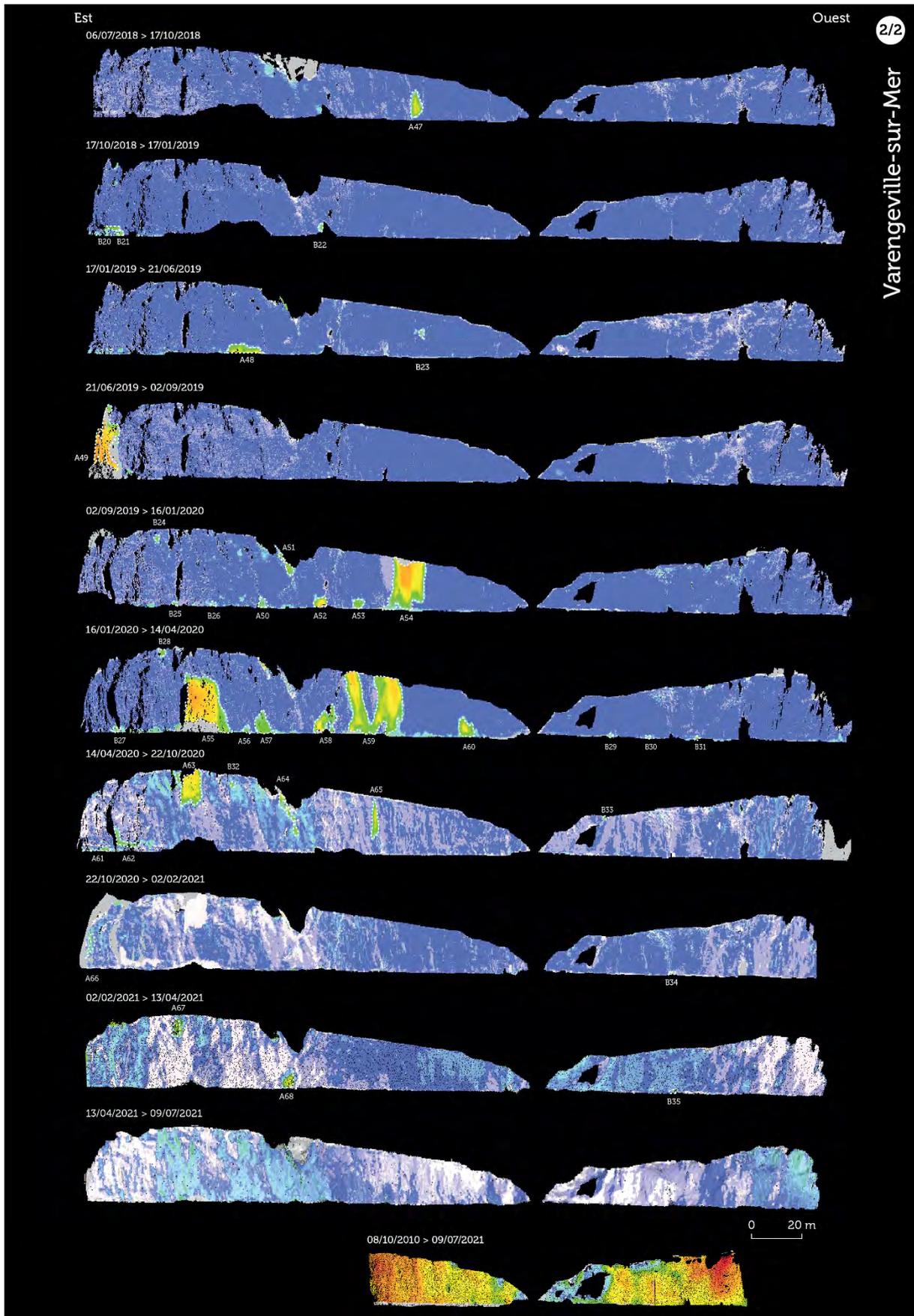
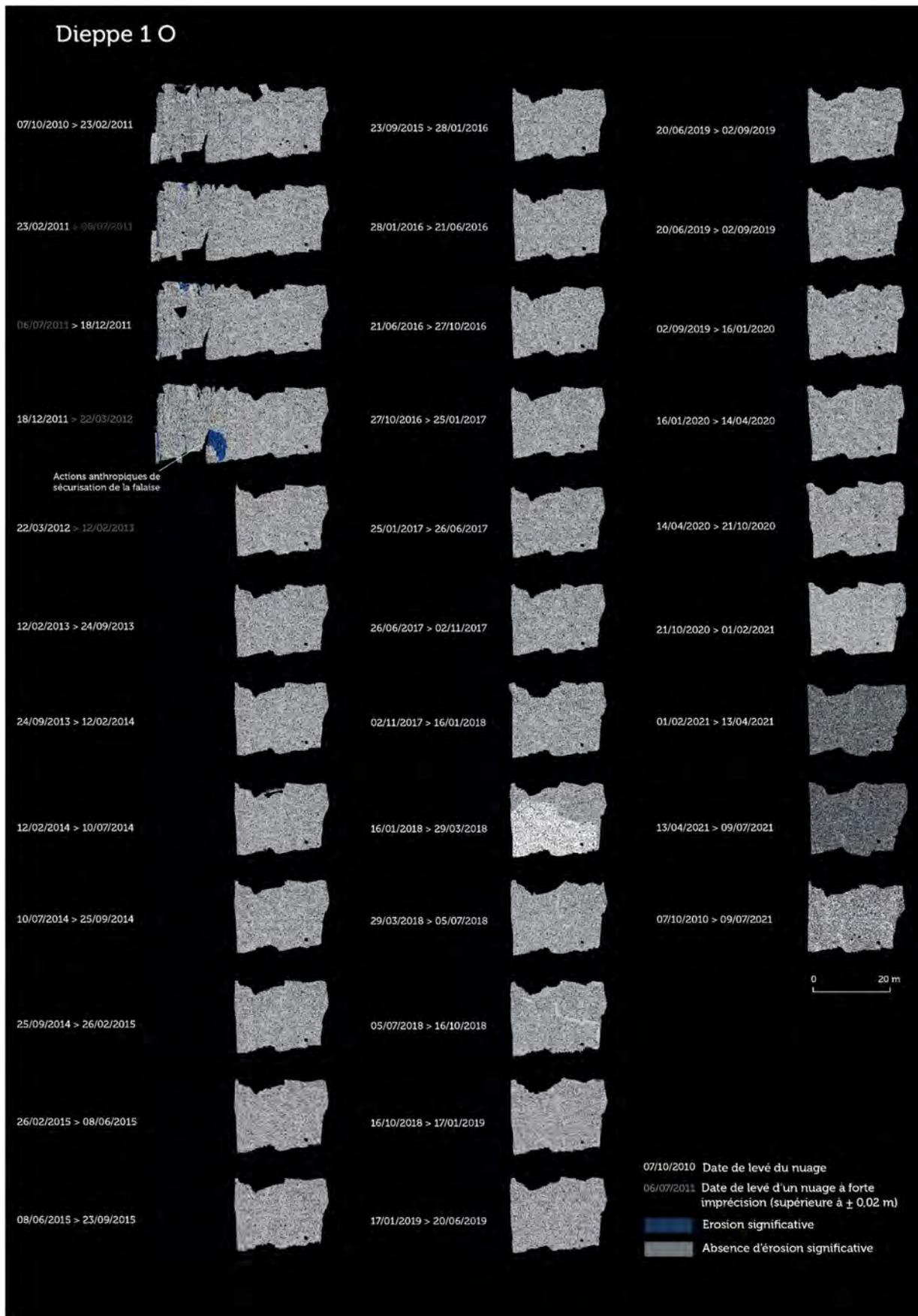


Figure 3.20 : Différentiels du front de falaise à Varengeville-sur-Mer entre le 08/10/2010 et le 09/07/2021



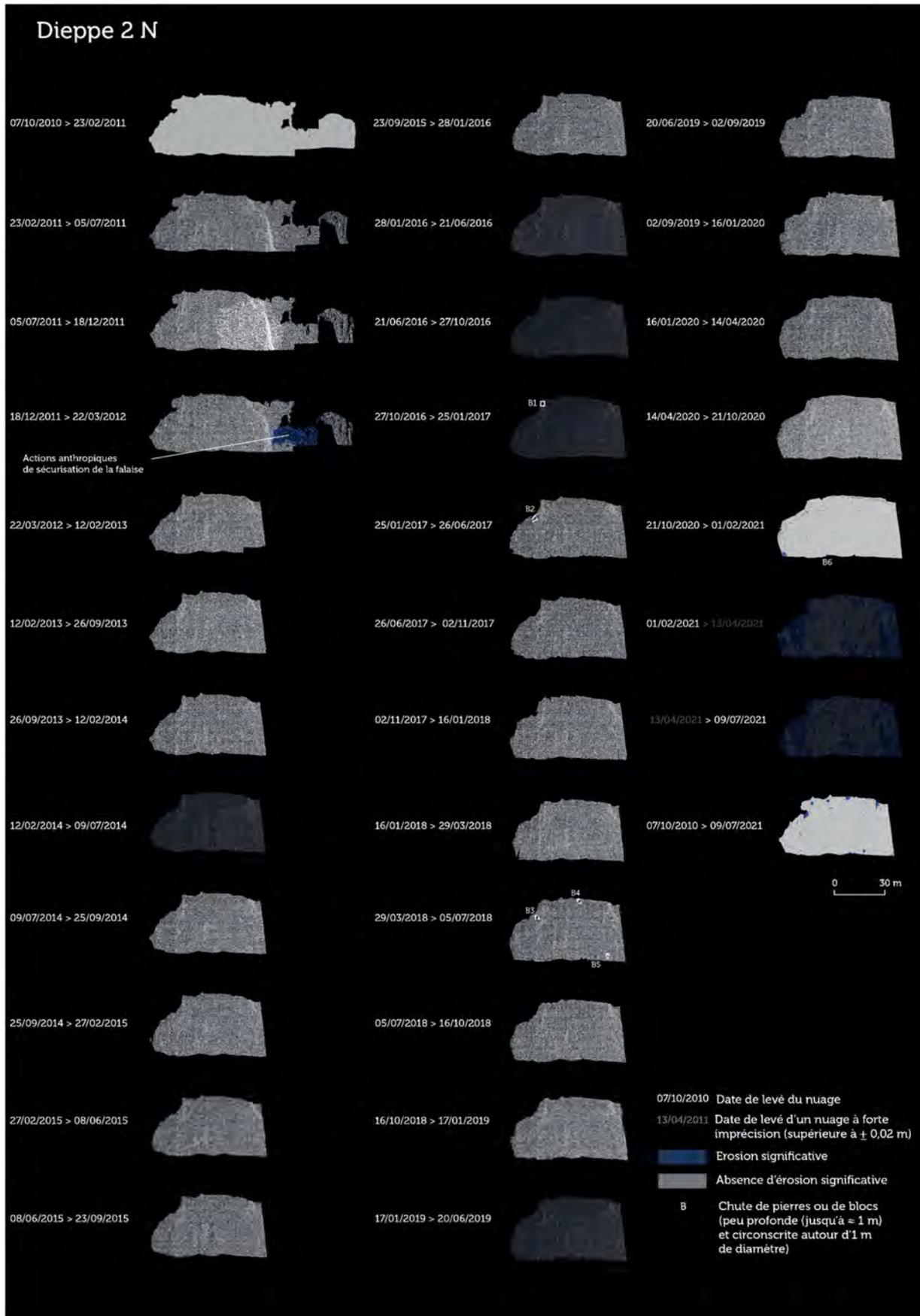


Figure 3.21 : Différentiels des fronts de falaise à Dieppe 1 O et Dieppe 2 N entre le 07/10/2010 et le 09/07/2021

d. Encoche basale générant l'instabilité complète du front de falaise

La Figure 3.20 montre l'une des modalités d'érosion précédemment décrites le long du littoral de Seine-Maritime (Costa et al., 2006b ; Dewez et al., 2013 ; Letortu et al., 2015c, 2019) : la création d'une encoche basale (de quelques décimètres à un peu plus de 2 m de profondeur) qui, par le surplomb généré sur la partie haute, va progressivement déstabiliser l'ensemble et générer un éboulement/écroulement (mouvement de masse) de l'ensemble du front de falaise. Neuf cas sont observés au cours des onze années de suivi à Varengeville-sur-Mer (Figure 3.20). Sur la partie ouest, deux cas sont observés avec le couple A14 ($3\,979,6 \text{ m}^3 \pm 66,9 \text{ m}^3$) et A15 ($8\,509,2 \text{ m}^3 \pm 60,3 \text{ m}^3$) et le couple B11 ($2,7 \pm 0,4 \text{ m}^3$) et A30 ($2\,836,4 \pm 29,4 \text{ m}^3$). Sept cas sont observables sur la partie est :

- 1) A2 (volume incertain), A3 ($99,4 \pm 5,3 \text{ m}^3$) et A5 ($911,2 \pm 27,6 \text{ m}^3$) ;
- 2) A10 ($44,4 \pm 5,9 \text{ m}^3$) et A13 ($1532,3 \pm 32,7 \text{ m}^3$) ;
- 3) A16 (volume incertain), B8 ($2,3 \pm 0,5 \text{ m}^3$), A17 ($3,8 \pm 0,6 \text{ m}^3$), A18 ($31,8 \pm 3,6 \text{ m}^3$) et A22 ($720,3 \pm 21,9 \text{ m}^3$) ;
- 4) A21 ($48,3 \pm 2,0 \text{ m}^3$), A24 ($73,5 \pm 6,2 \text{ m}^3$) et A28 ($3\,763,1 \pm 36,5 \text{ m}^3$) ;
- 5) A29 ($343,8 \pm 14,3 \text{ m}^3$) et A43 ($732,0 \text{ m}^3 \pm 21,3 \text{ m}^3$) ;
- 6) A37 ($162,0 \pm 9,6 \text{ m}^3$), A47 ($82,5 \pm 7,1 \text{ m}^3$) et A54 ($2\,133,9 \pm 33,1 \text{ m}^3$) ;
- 7) A53 ($31,1 \pm 2,4 \text{ m}^3$) et A59 ($2\,341,3 \pm 43,9 \text{ m}^3$).

3.2.1.2 Prévalence des agents et processus marins dans l'érosion des falaises vives

Emery et Kuhn (1982) ont montré que les variations de profil de falaise vive pouvaient renseigner sur l'efficacité des agents et processus marins et/ou continentaux. Par exemple, un profil vertical de falaise vive met en lumière l'efficacité des agents et processus marins en son pied, qui déstabilisent ensuite l'ensemble du versant, ne laissant pas le temps aux agents et processus continentaux d'éroder le haut de falaise (Figure 3.22). Entre 2010 et 2017, en combinant les informations d'érosion obtenues par TLS (falaises vives et mortes) et l'observation des profils de falaises développée par Emery et Kuhn (1982), les agents et processus prévalents dans l'érosion des falaises vives ont pu être identifiés (Letortu et al., 2019).

Pour les falaises vives de Varengeville-sur-Mer (craie santonienne), des changements de profils sont observés. Ces diverses configurations mettent en évidence la variabilité spatiale et temporelle des agents et processus marins et continentaux (Figure 3.23).

Sur front oriental de la falaise, le profil 1 met en évidence l'homogénéité lithologique et le rôle dominant des agents et processus marins dans l'érosion (Figure 3.23) :

- entre le 24/02/2011 et le 27/09/2011 : érosion du pied de la falaise probablement due aux agents et processus marins (car cela n'a pas été observé sur les falaises mortes de Dieppe) générant une encoche (jusqu'à 2,28 m de profondeur) et un surplomb sur la partie supérieure (110°) ;
- entre le 18/09/2012 et le 11/02/2013 : érosion du surplomb (il y a très peu de changement en pied de falaise) générant un profil subvertical ;
- entre le 25/09/2013 et le 12/02/2014 : érosion de l'ensemble du front de falaise générant un profil vertical.

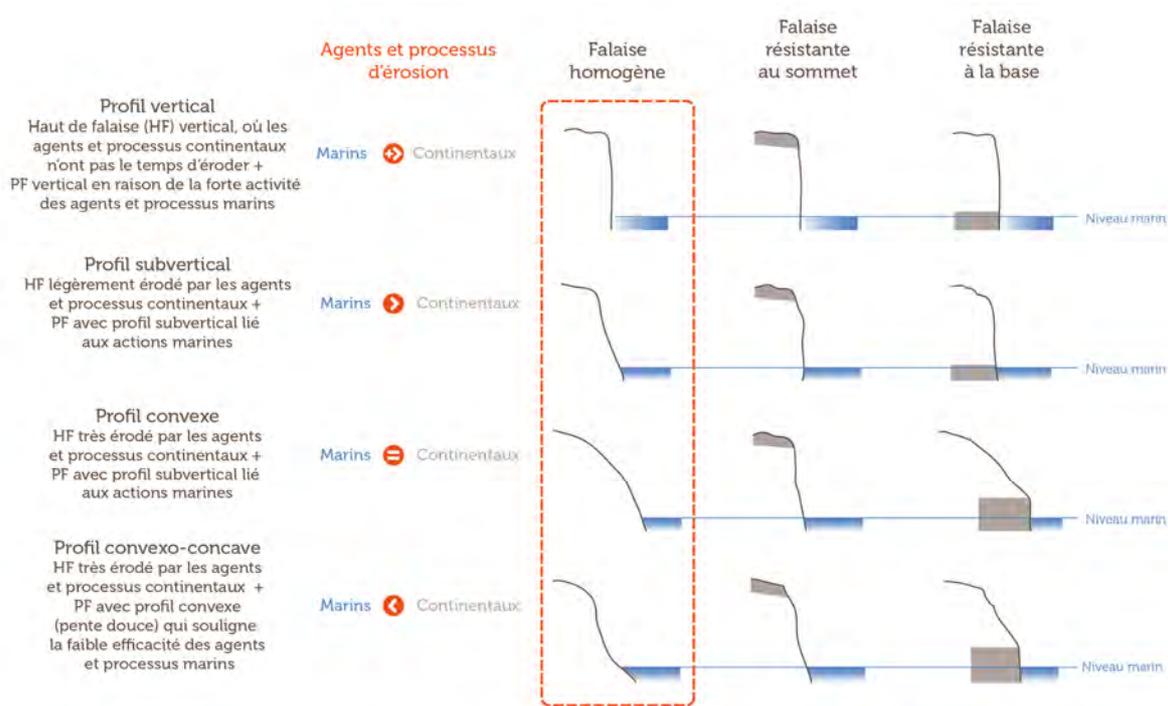


Figure 3.22 : Variation des profils de falaise en fonction de la résistance des roches et de l'efficacité des agents et des processus marins et continentaux (d'après Emery et Kuhn, 1982)

Sur le front de falaise ouest, le profil 2 met en évidence une différence d'érosion entre le pied et le sommet de la falaise qui semble être due à la combinaison d'agents et de processus marins et continentaux dans l'évolution du profil (Figure 3.23) :

- entre le 11/02/2013 et le 25/09/2013 : érosion du sommet de la falaise probablement par des agents et des processus continentaux (jusqu'à 0,62 m), car le pied de falaise est sujet à une érosion plus limitée (jusqu'à 0,21 m) ;

- entre le 25/09/2013 et le 12/02/2014 : érosion du pied de falaise probablement due à des agents et des processus marins (jusqu'à 1,49 m) et un mouvement de masse de l'ensemble de la falaise maintenant un profil vertical (érosion jusqu'à 2,08 m) ;

- entre le 12/02/2014 et le 11/03/2014 : érosion en sommet de la falaise probablement due aux agents et processus continentaux (érosion jusqu'à 5,82 m), car générant une pente plus « continentale » de 70°.

Au cours des sept années de suivi, les agents et processus marins semblent largement dominants sur les falaises vives en maintenant la verticalité du profil par l'action de sape et de déblaiement du matériel. Cependant, ils n'agissent pas seuls : les agents et processus continentaux contribuent également à l'érosion, mais dans une moindre mesure.

Sur les falaises mortes de Dieppe taillées dans la craie du Coniacien, les profils sont subverticaux (80-85°, Figure 3.23), demeurent stables dans le temps et homogènes spatialement confirmant la faible efficacité des agents et processus continentaux. La valeur de pente attendue pour un profil continentalisé est de 5 à 30° en climat tempéré (Pinot, 1998), mais la mort de la falaise au début des années 1980 est très récente à l'échelle des temps géomorphologiques et le « nettoyage » (travaux de sécurisation) anthropique perturbe l'évolution.



S2a,b,c : Partie inférieure, moyenne et supérieure du Santonien moyen (Seaford Chalk); S3 : Santonien supérieur (Newhaven Chalk) adapté par Hoyez (2008), à partir de Mortimore et al. (2001).

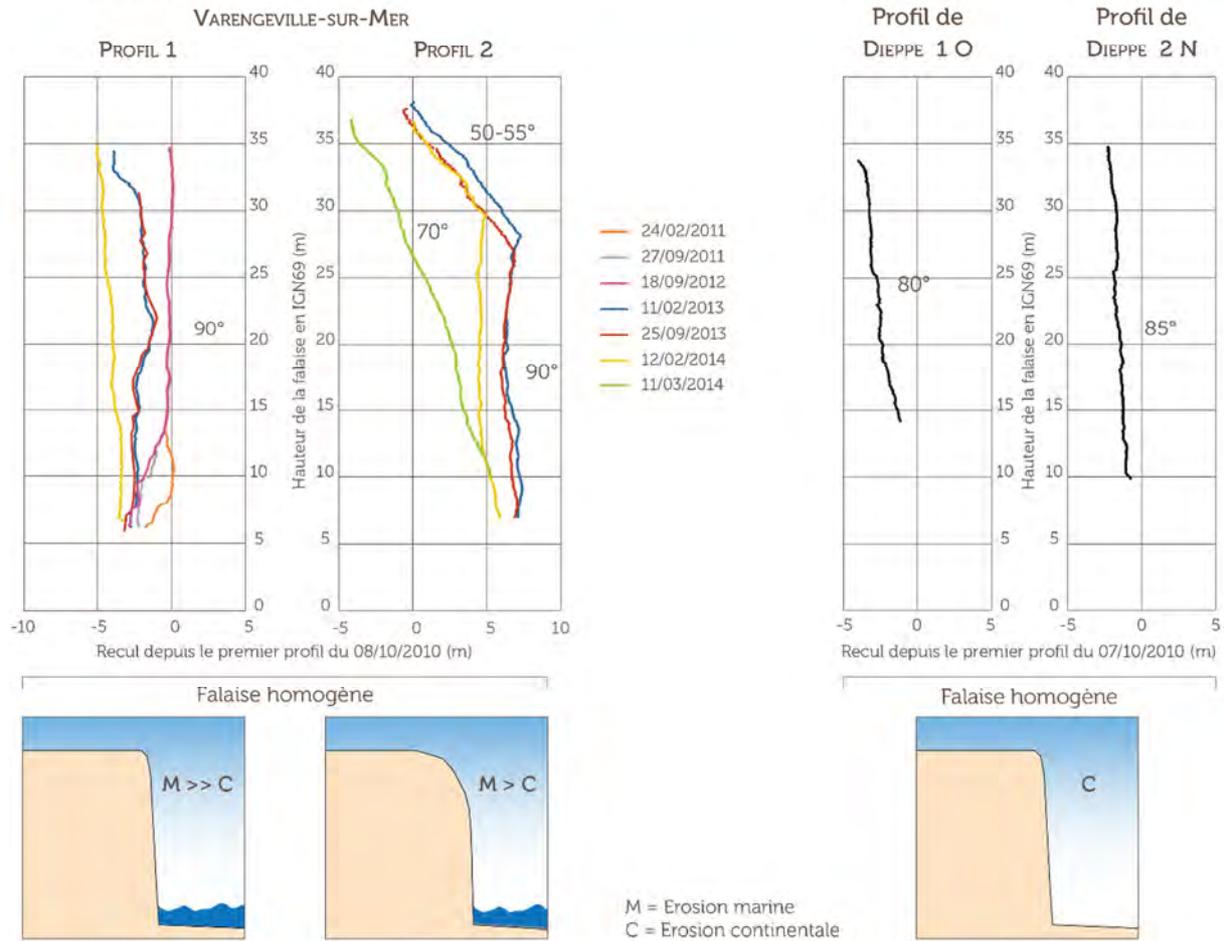


Figure 3.23 : Principales évolutions des profils de falaise à Varengville-sur-Mer et Dieppe entre 2011 et 2014 (modifié d'après Mortimore, 2001 ; Hoyez, 2008 ; Letortu et al., 2019)

En raison de la datation imprécise de l'érosion (fréquence temporelle de quatre à cinq mois), il n'est pas possible d'être plus explicite sur les principaux processus responsables de l'érosion. Gagner en résolution spatiale et temporelle sur les paramètres environnementaux et sur les mouvements gravitaires permettrait d'aller plus loin.

3.2.2 Première classification semi-automatique de l'érosion sur des nuages de points 3D du front de falaise

3.2.2.1 Réseau siamois KPConv performant sur les nuages de points des falaises de Varengeville-sur-Mer

Sans surprise, les grandes zones d'érosion sont reconnues (Figure 3.24). Mais le réseau est aussi pertinent pour classer correctement la majorité des petites zones d'érosion. Les classes « pas de changement » et « érosion » sont les mieux classées (IoU¹⁴¹ moyenne de 91,94 % et 83,86 %, Tableau 3.12). Les principales différences avec la vérité terrain apparaissent aux limites des zones érodées et dans certaines zones plus complexes à l'est (Figure 3.24B), où les classes « érosion », « pas de changement » et « pas de données à comparer » s'y combinent et où la morphologie des falaises est plus complexe (profil convexo-concave).

La classe d'accumulation obtient un score IoU plus faible (70,28 %, Tableau 3.12) par rapport à l'érosion, en raison du peu d'exemples d'accumulations disponibles dans l'ensemble du jeu de données (1,51 % des points pour l'accumulation contre 33,83 % des points pour l'érosion) (de Gélis et al., 2022). Les principales confusions pour cette classe apparaissent également à la limite de la zone d'accumulation et dans les zones « sans données à comparer » où il y a quelques points isolés prédits comme accumulation (Figure 3.24A).

En ce qui concerne la classe « pas de données à comparer », les résultats quantitatifs sont plus faibles (IoU de 32,22 %) même si les résultats qualitatifs ne semblent pas si éloignés de la vérité terrain (Figure 3.24). Il y a un peu plus de zones identifiées comme « pas de données à comparer » par le réseau, mais cette classe reste sujette à caution, car elle dépend de l'expertise de l'annotation¹⁴².

¹⁴¹ Pour rappel, cette métrique est utilisée pour comparer la région détectée « prédite » avec la région de la vérité terrain, de manière proportionnelle à la taille de l'objet recherché.

¹⁴² En effet, dans certaines parties, seuls quelques points permettent aux annotatrices (Z. Bessin, M. Jaud et moi) d'être sûres qu'il y a changement (ou non), alors que dans d'autres parties, l'identification du changement est hasardeuse, c'est pourquoi elle a été annotée comme « pas de données à comparer ».

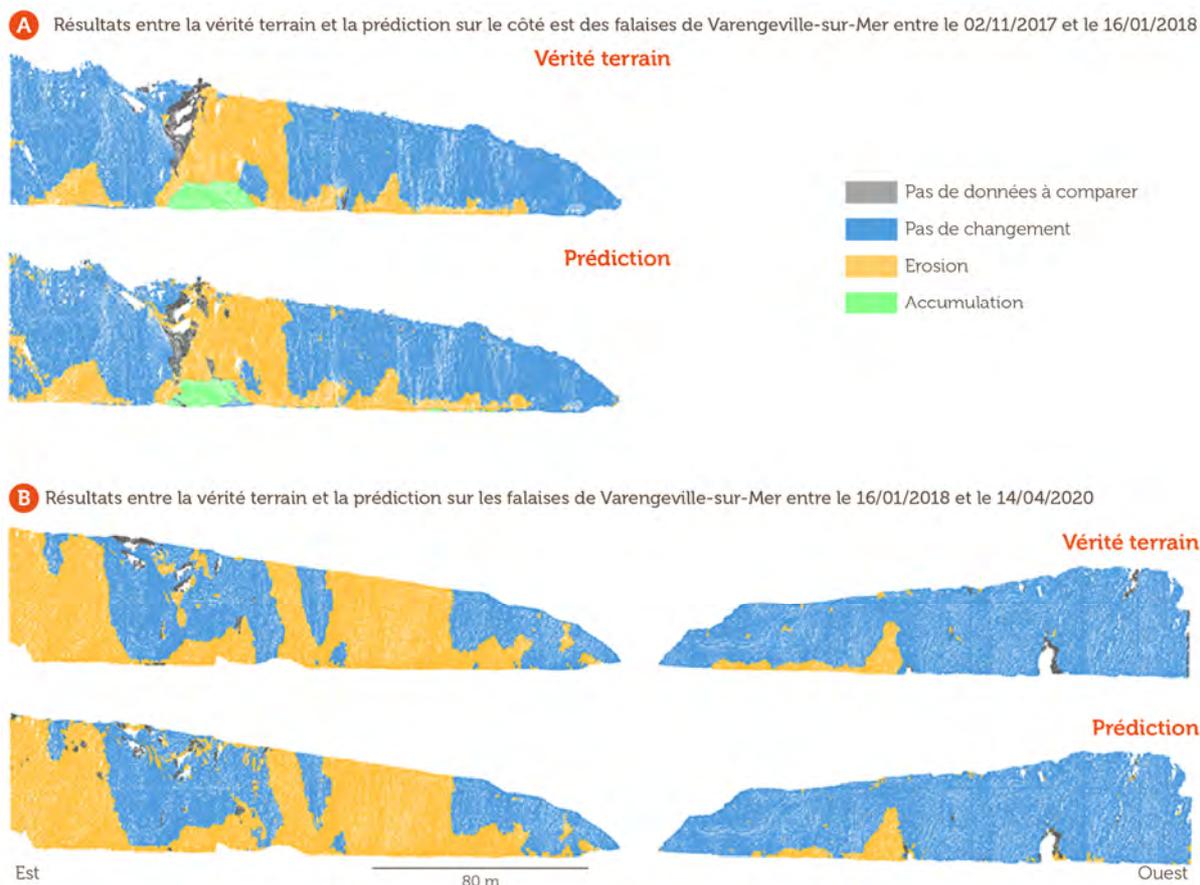


Figure 3.24 : Résultats entre la vérité terrain et la prédiction du réseau siamois KPConv pour les nuages de points du front de falaise à Varengueville-sur-Mer A) du 02/11/2017 et du 16/01/2018, B) du 16/01/2018 et du 14/04/2020 (d'après de Gélis et al., 2022)

Ainsi, les prédictions du réseau siamois KPConv sur notre jeu de test sont proches de la vérité de terrain (Figure 3.24), observables aussi bien avec la métrique quantitative (IoU moyenne de 82,03 % si la classe « pas de données à comparer » est enlevée, Tableau 3.12) que celle qualitative (exactitude moyenne de 78,6 %). La prédiction par le réseau siamois KPConv est donc prometteuse (de Gélis et al., 2022).

	IoU par classe			Moyenne de l'IoU
	Pas de changement	Erosion	Accumulation	
KPConv	91,94	83,86	70,28	82,03

Tableau 3.12 : Qualité de prédiction du réseau KPConv (avec la métrique quantitative IoU) pour la détection et la catégorisation des changements (de Gélis et al., 2022)

3.2.2.2 Retour d'expérience

Cette première collaboration avec des informaticiens a été très intéressante, car elle a permis d'apprécier les capacités de l'intelligence artificielle à effectuer une tâche difficile et répétitive (d'où l'intérêt de faire appel à ces méthodes). Notre retour d'expérience peut se décliner en quatre points :

1) l'annotation constitue une étape délicate, car il faut trouver le bon compromis entre la précision et le temps passé (respectivement, entre 0,2 et 0,5 m près, une semaine). L'annotation nécessite de l'expertise géomorphologique pour l'interprétation des données. Du fait de sa précision, elle peut manquer une partie

de l'ébouilisation (qui représente 31,9 % de l'érosion du front de falaise entre le 8 octobre 2010 et le 9 juillet 2021, voir 3.2.1.1) ;

2) de plus, ce travail d'annotation doit avoir lieu sur un grand jeu de données et qui doit contenir une proportion relativement équilibrée entre les différentes classes (dans la base de données, la classe « accumulation » et « pas de données à comparer » étaient sous-représentées, nuisant à l'apprentissage). Or, cette condition n'est pas toujours réalisable ;

3) par ailleurs, bien qu'il y ait quelques règles (par exemple, la taille du rayon de la sphère qui doit être égal à 50 fois le taux de sous-échantillonnage du nuage (Thomas et al., 2019)), le paramétrage du réseau et de la méthode reste affaire de spécialistes, tout comme l'accès aux ressources informatiques suffisantes ;

4) ce travail est long, même avec un ordinateur doté d'une GPU : une demi-journée pour préparer les données, une demi-journée pour le paramétrage du réseau et de la méthode, et trois semaines de traitement pour entraîner correctement le réseau et aboutir à des résultats satisfaisants (communication personnelle avec I. de Gélis).

Cependant, lorsqu'une méthode non supervisée sera opérationnelle, le gain de temps sera considérable et permettra de quantifier précisément l'erreur possible de classification. Ce domaine, en pleine expansion, suscite donc de l'intérêt, mais n'est, pour le moment, pas encore pleinement opérationnel et démocratisé.

3.2.3 Satellites THRS et agile : un nouveau moyen de suivi du front de falaise et de son érosion

3.2.3.1 Critères de classement des reconstructions

Dans le cadre du projet EROFALITT (2016-2020), sur la base de 146 tests réalisés avec ASP et MicMac sur différents couples d'images satellites Pléiades, nous avons trié nos résultats en fonction de :

- l'exactitude et la précision (exactitude mesurée par la métrique de la distance moyenne par rapport au maillage des données drone qui constitue notre vérité terrain ; la précision mesurée par la métrique de l'écart type pour évaluer la dispersion des points) ;

- la densité de points des nuages ;

- l'évaluation de la qualité des reconstructions (insatisfaisante, peu satisfaisante, satisfaisante) en tenant compte de l'homogénéité de la distribution des points reconstruits sur la paroi de la falaise, des artefacts et du bruit (Figure 3.25). Les reconstructions satisfaisantes permettent de visualiser les discontinuités structurales du pied de la falaise jusqu'au sommet de la falaise afin d'observer les mouvements gravitaires indépendamment de leur emplacement sur le front de falaise.

Sans surprise, c'est l'association d'images satellites dépointées à 40° qui permet les meilleures reconstructions du front de falaise (Letortu et al., 2020), car la géométrie d'acquisition permet d'avoir une bonne visibilité du front de falaise subvertical (Jaud et al., 2019a). Quel que soit le logiciel utilisé, les reconstructions satisfaisantes (48 sur 146) ont au minimum une image avec un angle d'incidence de 40°. Lorsque la reconstruction 3D utilise deux images avec des angles de 0° à 10°, la reconstruction de la falaise est, au mieux, évaluée comme « peu satisfaisante », c'est-à-dire avec du bruit, des artefacts ou des trous.

A Front de falaise reconstruit à partir des images acquises par drone (26/06/2017, projet RICOCHET)



B Reconstruction insatisfaisante (10/06/2017 et 15/06/2017 à 40°, MicMac, UrbanMNE, taille de la fenêtre de corrélation = 5 x 5, valeur de régularisation = 0,20)



C Reconstruction peu satisfaisante (10/06/2017 et 15/06/2017 à 40°, ASP, LSW, fonction de coût = 2, taille du noyau de corrélation = 15 x 15, taille du noyau lors du raffinement de la disparité subpixelaire = 41)



D Reconstruction satisfaisante (10/06/2017 et 15/06/2017 à 40°, MicMac, GeomImage, corrélation multiéchelle = 1, taille de la fenêtre de corrélation = 3 x 3, valeur de régularisation = 0,05)



Figure 3.25 : A) Front de falaise reconstruit à partir des images acquises par drone (26/06/2017) et classement de la qualité des reconstructions 3D à partir des images Pléiades : B) insatisfaisante, C) peu satisfaisante, D) satisfaisante (Letortu et al., 2021)

L'objectif était de sélectionner une reconstruction 3D satisfaisante, avec le meilleur compromis entre des valeurs faibles de distance moyenne et d'écart type, et une valeur de densité de points élevée. Parmi les 146 tests, la meilleure reconstruction 3D par paire d'images a été sélectionnée, soit dix meilleures reconstructions (Tableau 3.13). Si l'on ne tient compte que des valeurs de distance moyenne (exactitude) et d'écart type (précision), les reconstructions issues des jeux de données de 0-10° peuvent sembler meilleures que les couples stéréoscopiques de 40°. En réalité, cela est pondéré par le fait que la majorité des points reconstruits à 0-10° est située sur le sommet de la falaise et non sur le front.

Logiciel	Dates des paires d'images	Angle(s) d'incidence (°)	Algorithme de mise en correspondance	Spécifications de chaque logiciel : ASP : fonction de coût / taille du noyau de corrélation ; MicMac : taille de la fenêtre de corrélation / valeur de régularisation	Densité de points (nombre de points/m ²)	Exactitude avec la métrique de la distance moyenne (m)	Précision avec la métrique de l'écart type (m)	Qualité de la reconstruction 3D
ASP	10 et 15/06/2017	40	MGM/SSGM	3 / 7 × 7	0,93	0,01	2,97	Satisfaisante
	10 et 15/06/2017	0-10	MGM/SSGM	4 / 7 × 7	0,89	0,06	2,94	Peu satisfaisante
	10/06/2017	0-10 / 40	MGM/SSGM	4 / 7 × 7	0,49	-0,30	2,50	Satisfaisante
	15/06/2017 et 06/07/2017	40	MGM/SSGM	3 / 7 × 7	0,95	0,13	1,91	Satisfaisante
	15/06/2017 et 06/07/2017	0-10	MGM/SSGM	3 / 5 × 5	0,50	0,07	1,68	Peu satisfaisante
	10 et 15/06/2017	40	GeomImage (1-2 pixel matching)	3 × 3 / 0,1	1,70	-0,05	1,83	Satisfaisante
MicMac	10 et 15/06/2017	0-10	GeomImage (1-2 pixel matching)	3 × 3 / 0,1	1,46	0,06	1,21	Peu satisfaisante
	10/06/2017	0-10 / 40	GeomImage (1-2 pixel matching)	7 × 7 / 0,1	1,61	0,07	1,96	Satisfaisante
	15/06/2017 et 06/07/2017	40	GeomImage (1-2 pixel matching)	3 × 3 / 0,1	1,79	0,11	1,38	Satisfaisante
	15/06/2017 et 06/07/2017	0-10	GeomImage (1-2 pixel matching)	3 × 3 / 0,2	1,28	-0,06	1,72	Peu satisfaisante

Tableau 3.13 : Sélection des meilleures reconstructions 3D du front de falaise par paire d'images et par logiciel à partir des 146 tests (Letortu et al., 2021)

3.2.3.2 Analyse de sensibilité pour identifier les meilleures chaînes de traitements

Le jeu de données présenté est plutôt original et stimulant étant donné sa configuration inhabituelle (angle d'incidence élevé, dates multiples) et le fait que les images présentent des ombres sur la zone d'intérêt. Ainsi, ce travail permet donc d'apprécier l'adaptabilité des chaînes de traitement testées.

La comparaison est effectuée à partir des résultats jugés « satisfaisants » avec ASP et MicMac (Tableau 3.13). L'exactitude et la précision de la reconstruction du front de falaise sont légèrement meilleures avec MicMac qu'avec ASP (distance relative moyenne de 0,04 m et -0,05 m, respectivement ; écart type de 1,72 m et 2,46 m, respectivement). En outre, les nuages de points avec MicMac présentent une densité plus élevée (1,57 point/m² en moyenne) qu'avec ASP (0,75 point/m² en moyenne). Avec une meilleure exactitude et précision sur le front de la falaise et une densité de points plus élevée, la restitution 3D avec MicMac fournit ainsi le jeu de données le plus fiable. Les différences relatives entre la reconstruction 3D à partir des images Pléiades à 40° et celle à partir d'images issues du drone sont distribuées de manière aléatoire sur toute la face de la falaise (Figure 3.26). Il s'agit principalement d'artefacts ou de bruit qui n'ont pas été éliminés lors du filtrage manuel.

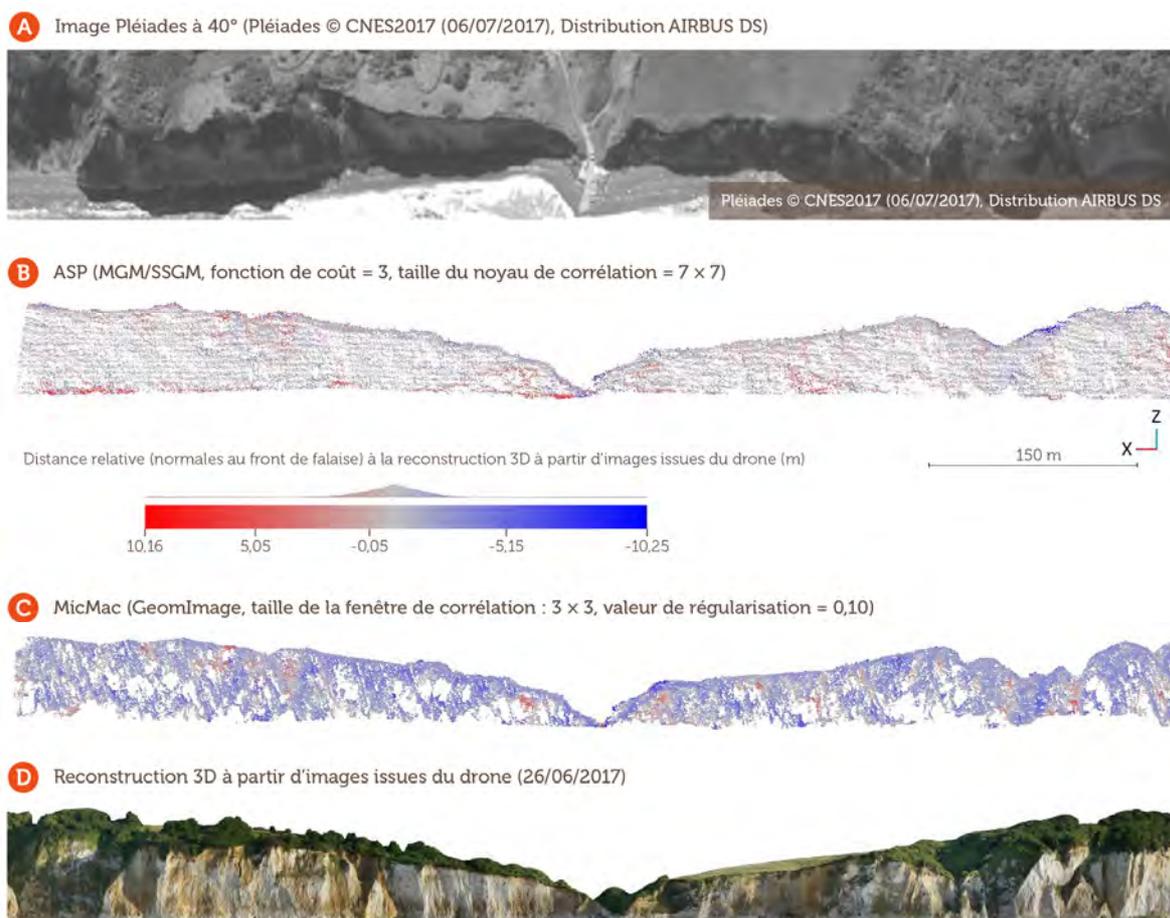


Figure 3.26 : Distance relative des normales au front de falaise (m) à Varengeville-sur-Mer entre les reconstructions 3D à partir d'images Pléiades (paire stéréoscopique du 15/06/2017 et 06/07/2017 à 40° (A) avec B) ASP et C) MicMac (Letortu et al., 2021)

Par logiciel, la meilleure chaîne de traitement est (Tableau 3.13, Figure 3.27) :

- pour ASP, l'algorithme de mise en correspondance MGM/SSGM, avec une fonction de coût 3 ou 4 et une taille de noyau de corrélation de 7 × 7 pixels ;

- pour MicMac, l'algorithme de mise en correspondance GeomImage (option « 1-2 pixel matching »), avec une taille de fenêtre de corrélation de 3×3 ou 7×7 pixels, associée à une valeur de régularisation de 0,10.

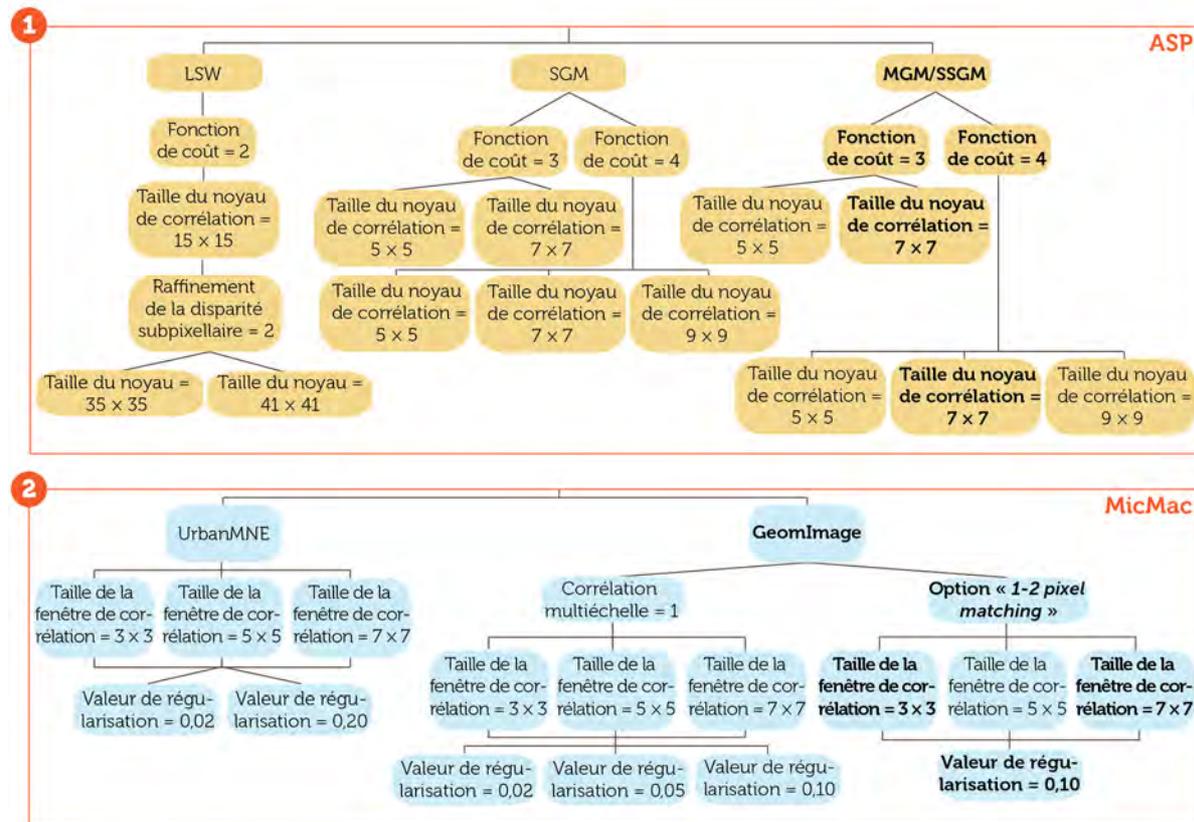


Figure 3.27 : Les meilleurs paramètres (en gras) pour les reconstructions 3D satisfaisantes du front de falaise de Varengenville-sur-Mer avec 1) ASP et 2) MicMac (Letortu et al., 2021)

Pour MicMac, l'algorithme de mise en correspondance GeomImage donne de meilleurs résultats que celui d'UrbanMNE en raison de la topographie de la falaise et de la géométrie d'acquisition. Comme l'illustre la Figure 3.27, les méthodes SGM fournissent de meilleurs résultats, car elles s'appuient sur des techniques de programmation dynamique multidirectionnelle, et n'imposent donc aucune contrainte. L'optimisation est donc réalisée le long de lignes de pixels indépendantes. Ces approches fournissent des reconstructions robustes dans un temps de traitement raisonnable (environ 30 min pour des images d'un million de pixels). Les surfaces reconstruites sont morphologiquement préservées, car les fenêtres de corrélation sont petites (3×3 et 7×7 pixels).

3.2.3.3 Potentiel de ces reconstructions dans le cadre d'un suivi diachronique multisource

A ce stade, une première quantification du volume érodé peut être estimée en utilisant une reconstruction satisfaisante de la falaise et un jeu de données plus ancien acquis en 2015 par TLS. La différence est calculée entre le nuage de points du couple stéréoscopique des 10 et 15/06/2017 à 40° et le maillage des données TLS du 25/09/2015. Sur la partie est de la falaise, où se trouve l'érosion, le volume perdu est de 796,5 m³ pour une surface s'étendant sur 4 752,5 m².

Ce calcul est ensuite comparé au résultat de la différence entre le maillage TLS (25/09/2015) et le nuage de points reconstruit à partir des images issues du drone (26/06/2017). Le volume érodé est de 1 134,4 m³

(sur la même surface, sachant que la surface affectée par l'éboulement est de 543 m^2) (Figure 3.28). La différence entre les deux estimations volumétriques démontre qu'il est possible de quantifier l'érosion du front de falaise en utilisant les reconstructions 3D à partir de Pléiades avec une erreur d'environ $0,07 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

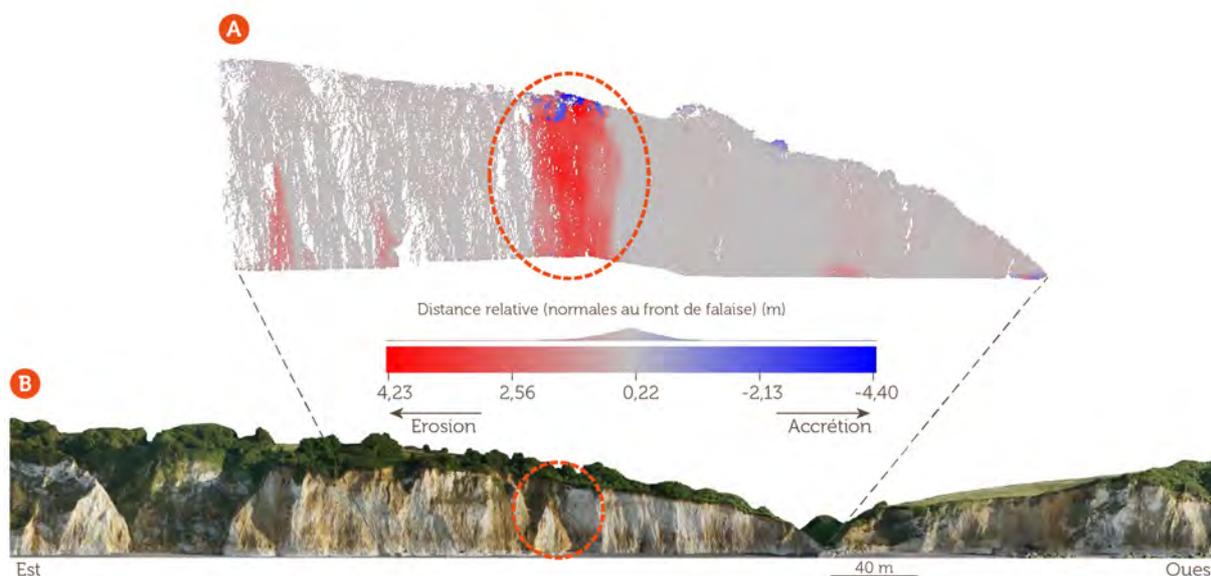


Figure 3.28 : A) Distance relative (m) du front de falaise entre le maillage TLS (25/09/2015) et B) les données du drone (26/06/2017) avec l'érosion détectée à Varengueville-sur-Mer (Letortu et al., 2021)

Pour les falaises soumises à des vitesses d'érosion moyennes annuelles pluridécimétriques, les images dépointées des satellites Pléiades fournissent de nouvelles données 1) pour une quantification de l'érosion d'un premier ordre de grandeur 2) sur de longs linéaires (en accord avec l'échelle de gestion qu'est la cellule hydro-sédimentaire), 3) avec une répétitivité potentiellement journalière, 4) une résolution inframétrique et une précision plurimétrique satisfaisantes, et 5) à faible coût (sous conditions). La méthode que nous proposons pour reconstituer le front de falaise à partir de ces images permet d'améliorer les connaissances sur l'érosion grâce au seuil de détection des mouvements gravitaires évalué à 100 m^3 , ce qui correspond à 69 % des éboulements recensés autour de la zone d'étude (d'après le recensement réalisé par l'association ESTRAN, Letortu et al., 2015a).

Les images obliques Pléiades constituent une opportunité pour la caractérisation et la quantification de l'érosion sur de grandes étendues côtières et pour la création d'une base de données sur les mouvements gravitaires ($> 100 \text{ m}^3$), qui peuvent être datés au jour près en cas de fréquence d'acquisition quotidienne (associée à un ciel dégagé). En effet, une telle base de données pourrait aider à mieux comprendre les rythmes et les modalités de recul, mais aussi alimenter le débat sur la contribution respective des facteurs marins et continentaux dans le déclenchement des mouvements gravitaires supérieurs à 100 m^3 .

3.2.3.4 Quid de la tristéréoscopie ?

MicMac donne les meilleurs résultats de reconstitutions 3D à partir d'images stéréoscopiques et, contrairement à ASP, il peut également être utilisé pour réaliser des reconstitutions 3D à partir d'images tristéréoscopiques. Dix-huit tests tristéréoscopiques ont été réalisés avec MicMac à partir d'images avec un angle d'incidence de 40° (10, 15 et 18/06/2017, Tableau 3.14) : ils sont pour la plupart satisfaisants (11/18).

Dates du triplet d'images à 40°	Algorithme de mise en correspondance					Qualité de la reconstruction 3D (la meilleure en gras)
	Taille de la fenêtre de corrélation / valeur de régularisation	Densité de points (nombre de points/m ²)	Exactitude avec la métrique de la distance moyenne (m)	Précision avec la métrique de l'écart type (m)		
10, 15 et 18/06/2017	UrbanMNE	3 × 3 / 0,02	0,48	0,38	4,18	Insatisfaisante
	UrbanMNE	3 × 3 / 0,20	0,38	0,15	2,82	Insatisfaisante
	UrbanMNE	5 × 5 / 0,02	0,45	0,42	3,11	Insatisfaisante
	UrbanMNE	5 × 5 / 0,20	0,35	0,78	3,99	Insatisfaisante
	UrbanMNE	7 × 7 / 0,02	0,47	0,20	2,71	Insatisfaisante
	UrbanMNE	7 × 7 / 0,20	0,39	0,25	2,94	Insatisfaisante
	GeomImage (corrélation multiéchelle)	3 × 3 / 0,02	2,31	0,31	3,21	Satisfaisante
	GeomImage (corrélation multiéchelle)	3 × 3 / 0,05	1,98	-0,05	2,45	Satisfaisante
	GeomImage (corrélation multiéchelle)	3 × 3 / 0,10	1,72	0,06	1,54	Satisfaisante
	GeomImage (corrélation multiéchelle)	5 × 5 / 0,02	1,71	0,08	1,51	Satisfaisante
	GeomImage (corrélation multiéchelle)	5 × 5 / 0,05	1,70	0,07	1,50	Satisfaisante
	GeomImage (corrélation multiéchelle)	5 × 5 / 0,10	1,98	-0,06	2,75	Satisfaisante
	GeomImage (corrélation multiéchelle)	7 × 7 / 0,02	1,66	0,09	1,54	Satisfaisante
	GeomImage (corrélation multiéchelle)	7 × 7 / 0,05	1,63	0,10	1,52	Satisfaisante
GeomImage (corrélation multiéchelle)	7 × 7 / 0,10	1,58	0,13	1,57	Satisfaisante	
GeomImage (1-2 pixel matching)	3 × 3 / 0,10	1,97	-0,35	3,31	Satisfaisante	
GeomImage (1-2 pixel matching)	5 × 5 / 0,10	1,72	0,05	1,74	Satisfaisante	
GeomImage (1-2 pixel matching)	7 × 7 / 0,10	1,89	-0,33	3,06	Peu satisfaisante	

Tableau 3.14 : Tests de reconstruction 3D basés sur la mise en correspondance tristéoscopique dans MicMac (triplet d'images : 10-15-18/06/2017) (Letortu et al., 2021)

Par rapport aux reconstitutions 3D à partir de couples d'images, la densité de points de la reconstitution est légèrement supérieure avec un triplet d'images (1,82 contre 1,70 point/m²), l'exactitude est meilleure (0,01 contre 0,04 m), mais la précision est moins bonne (écart type de 2,14 contre 1,72 m) en raison de la présence d'un plus grand nombre d'artefacts. Pour le moment, la stéréoscopie est donc préférée.

3.2.4 Discussion

Entre octobre 2010 et juillet 2021, l'érosion observée sur les fronts de falaise de Varengville-sur-Mer et Dieppe montre des dynamiques très différentes. Les falaises mortes de Dieppe, composées de craie coniacienne, uniquement affectées par les agents et processus continentaux (les actions anthropiques ayant été enlevées), montrent une relative stabilité (six chutes de pierres à Dieppe 2 N). La falaise vive de Varengville-sur-Mer, composée de craie santonienne et de terrains tertiaires sus-jacents et affectée par les agents et processus marins et continentaux, s'érode rapidement avec des mouvements de masse (68 éboulements/écroulements, qui représentent 68,1 % de l'érosion totale) et des mouvements individuels (31,9 % de l'érosion totale). La falaise morte de Dieppe évolue peu sur les 10 années de suivi, car les agents et les processus d'érosion semblent peu efficaces, mais aussi parce que les zones potentielles d'érosion avaient été prélevées lors des travaux de sécurisation des falaises. Actuellement, la météorisation continue et des fractures de détente sont observables sur les fronts de falaise à Dieppe, délimitant notamment un futur mouvement de masse (Figure 3.29). Si de nouveaux travaux de sécurisation du site de Dieppe ont lieu, il faudra s'interroger sur la pertinence de conserver ce site, car d'autres sites peuvent convenir (voir chapitre 4).



Figure 3.29 : Pierre tombée en pied de falaise de Dieppe 2 N (à gauche) et fracture de détente délimitant un mouvement de masse observable sur le front de Dieppe 2 N (à droite)

Le peu d'ébouilisation (seulement six chutes de pierres) sur le front de falaise à Dieppe, contrairement à Varengville-sur-Mer (35), interroge. Au-delà des actions marines, il est évident que la présence de nappes perchées sur les terrains tertiaires de Varengville-sur-Mer (Bignot, 1962) favorise, entre autres, l'humectation des craies par ruissellement depuis le haut de falaise, ce qui peut favoriser des processus d'érosion comme la gélifraction, générant des chutes de pierres. D'ailleurs, le front de falaise est souvent luisant à Varengville-sur-Mer alors que nous n'observons pas cela à Dieppe. A Dieppe, le haut de falaise

s'avère très fracturé. Est-ce que cela draine les eaux de surface *via* les réseaux karstiques et les tunnels réalisés lors de la Seconde Guerre mondiale ?

A Varengueville-sur-Mer, le front oriental paraît plus dynamique en nombre de mouvements (pas forcément en recul total) sur la décennie observée. Il serait intéressant de voir si cela se confirme sur les années suivantes. Le rôle de la descente à la mer comme épi, favorisant le nombre de mouvements gravitaires ou la fracturation de la craie, pourrait être une des explications.

Le suivi du front de falaise met en évidence une dynamique intense à Varengueville-sur-Mer et la prévalence des agents et processus marins par rapport à ceux continentaux, corroborant les récents travaux de chercheurs (par exemple, Earlie et al., 2015) et d'autres plus anciens (par exemple, Guilcher, 1954). Ces résultats doivent désormais être étayés avec un suivi de la magnitude des forçages continentaux et marins (et ce, dans un contexte de changement climatique), couplé à une meilleure datation des mouvements gravitaires. Pour ce faire, trois pistes complémentaires sont envisagées :

1) la mise en place d'un capteur de pression sur la plate-forme, avec le soutien du réseau DYNALIT (coordonné par X. Bertin), associé(s) à la caméra positionnée à *Pourville-sur-Mer* (Hautot-sur-Mer) permettant de travailler sur les niveaux d'eau (intégrant la surcote/décote, le *runup* et le *setup*), la répartition spectrale de l'énergie, le type de déferlement, mais aussi la morphologie du cordon de galets et de dater les éboulements/écroulements (les ingénieurs et enseignants-chercheurs associés dans le traitement de ces données sont S. Costa (IDEES-Caen), E. Augereau (UAR 3113) et I. Turki (Université de Rouen)). Ce capteur, installé avec IDEES-Caen depuis janvier 2023, est en phase de test sur 3 à 4 mois. Si les premiers résultats sont concluants, ce capteur sera installé à demeure ;

2) le suivi des mouvements des blocs de grès posés sur l'estran à Varengueville-sur-Mer grâce aux PIT tags¹⁴³ pourrait donner une indication indirecte de l'énergie des vagues disponibles en pied de falaise et par ailleurs nous renseigner sur une probable variabilité spatiale et temporelle des déplacements, car ces blocs de grès disposés sur la plate-forme modifient probablement très localement l'énergie des vagues.

3) le suivi de la température sur le front de falaise et la mise en place d'une station météorologique en haut de la falaise de Varengueville-sur-Mer, voire d'un piézomètre (si nous avons l'autorisation d'un propriétaire, ce qui semble compliqué au regard des précédentes tentatives). L'analyse par SIG du chevelu hydrographique sur notre zone d'étude, par le couplage des données LiDAR du plateau avec celle obtenue du front de falaise, devra être menée pour identifier les zones de ruissellement préférentielles sur le front de falaise.

Cependant, quatre sources principales de complexité demeurent dans cette détermination des agents et processus responsables de la rupture :

- premièrement, l'évolution non linéaire de l'environnement côtier peut limiter les relations directes de cause à effet. Les seuils, l'hystérésis, les synergies/combinaisons, les rétroactions positives et négatives, et l'effet de « purge » (décrit en détail dans Viles, 2013) compliquent l'analyse des relations. Par exemple, le rôle relatif des agents et processus marins et continentaux dans l'érosion des falaises peut changer avec le

¹⁴³ Le marquage par transpondeur passif intégré (PIT tag) permet d'obtenir un identifiant unique par marqueur. Leur petite taille, leur biocompatibilité et la fréquence à laquelle ils transmettent les informations en font des outils idéaux pour l'identification et le suivi environnemental. Ils sont notamment utilisés pour le suivi des galets sur les côtes ou en rivière depuis les années 2000 (par exemple, Lamarre et al., 2005 ; Allan et al., 2006).

temps, car les plates-formes s'élargissent progressivement sur de longues périodes, ce qui affecte la quantité d'énergie des vagues délivrée au pied de la falaise (rétroaction négative) ;

- deuxièmement, les conditions aux limites (niveau de la mer, climat, géologie, marée et vent-vague) modulent la domination des agents et des processus sur l'évolution de la côte en un lieu et un temps donnés, ce qui nécessite de joindre les échelles spatiales et temporelles. Par exemple, le pouvoir érosif de l'océan dépendra de l'équilibre relatif entre les climats des marées et des vagues (Kennedy et al., 2014b) ;

- troisièmement, la falaise est aussi l'héritière des changements environnementaux passés (Trenhaile, 2002) : dans notre compréhension des agents et processus actuels et de leurs impacts, il est important aussi d'intégrer aussi la dégradation de la roche à long terme (Griggs et Trenhaile, 1994 ; Swenson et al., 2006 ; Joyal et al., 2016) ;

- enfin, les études se concentrent souvent sur le front de falaise alors que la falaise appartient à un vaste système comprenant l'ensemble du versant de l'avant-côte à l'arrière-pays (Trenhaile, 1987; Pinot, 1998). Ces études sont susceptibles de ne fournir qu'une vision partielle du comportement de l'ensemble du versant. Obtenir et analyser des données simultanées sur l'ensemble du système constituent donc un défi scientifique majeur.

Le jeu de données sur l'évolution du front de falaise à Varengueville-sur-Mer acquis depuis 2010, de par la fréquence des levés, la durée d'observation et la centaine de mouvements individuels ou de masse observés, présente des atouts pour réaliser un modèle conceptuel de l'érosion saisonnière des falaises (comme réalisé dans la thèse de Roulland, 2022). Par ailleurs, ce jeu de données peut alimenter les algorithmes d'AP en vue de nous aider à faciliter l'étape d'analyse des données, notamment pour 1) identifier les zones d'érosion, 2) calculer le volume érodé. Cependant, bien que très à la mode, le recours à l'AP n'est pas encore pleinement démocratisé et opérationnel, ce qui nécessite des développements coûteux en expertise, en temps, et en ressources matérielles et énergétiques. Selon ma mince expérience, cet outil doit être utilisé avec frugalité et dans l'automatisation de certaines étapes de traitements de données uniquement, car il me semble important de continuer à traiter moi-même les données afin de les appréhender en détail.

Notre travail a été le premier à mettre en évidence que les images satellites dépointées et à THRS peuvent être utilisées dans le suivi du front de falaise et de son érosion. Les images avec un angle d'incidence de 40° permettent d'obtenir des résultats satisfaisants et prometteurs grâce au logiciel MicMac. Les reconstructions 3D du front de falaise ont une densité de points moyenne de 1,7 point/m², une distance moyenne par rapport aux données de vérité terrain du drone de 0,04 m et un écart type de 1,72 m. Ces caractéristiques de nuages de points utilisées dans une approche diachronique multisource (TLS et images Pléiades) permettent de détecter des éboulements supérieurs à 100 m³, ce qui inclut la grande majorité des éboulements de la zone d'étude (69 %) et permettrait de constituer un catalogue précieux de mouvements gravitaires pour des finalités de recherche fondamentale et appliquée. Cependant, les images satellites collectées sur Varengueville-sur-Mer ont mis en évidence la dépendance de la qualité de la restitution 3D aux paramètres environnementaux (orientation du front de falaise, variations de couleurs ou de texture). Par ailleurs, un certain nombre de verrous techniques ont été identifiés : 1) comme il existe très peu de travaux et d'outils logiciels adaptés aux images obliques (non orthorectifiées et non géoréférencées), des méthodologies inédites sont à développer ; 2) il serait notamment intéressant de repérer préalablement les zones d'érosion sur ces images, pour y optimiser les paramètres de traitement 3D ; 3) les volumes de données en jeu impliquent de développer des méthodes d'analyses semi-automatiques adaptées, mais, là encore, un

verrou devra être levé pour adapter ces méthodes à l'imagerie oblique. Le projet en cours CNES HIRACLES (décrit dans le chapitre 4) vise à développer de nouvelles approches pour optimiser la détection et la quantification de l'érosion des falaises à l'aide des images Pléiades, y compris la nouvelle constellation Pléiades Neo (deux des quatre satellites lancés en 2021, le reste ultérieurement¹⁴⁴).

3.3 Premiers résultats issus des bases de données multiparamètres et continues (Bretagne et Normandie)

La compréhension de la part respective des facteurs et processus dans la fatigue, voire la rupture des falaises, nécessite une surveillance continue de multiples paramètres. Les instrumentations mises en place en Normandie et en Bretagne, qui furent les premières aussi complètes à l'échelle mondiale, ont permis d'avoir des bases de données considérables sur les agents et processus continentaux et marins, sur la réponse mécanique de la falaise, sur l'évolution morphologique de l'estran et parfois celle de la falaise. Durant les instrumentations, il n'y a pas eu d'érosion sur la falaise de Plougonvelin et il y a eu de l'ébouilisation à Sainte-Marguerite-sur-Mer. Après l'acquisition des données, l'étape d'analyse de traitements s'est avérée ardue (temps de traitements, compétences requises, etc.). Les analyses présentées ici sont inédites pour la Bretagne (dans le prolongement des premiers travaux présentés en colloque (Laute et al., 2018)) et sont publiées pour la Normandie (Letortu et al., 2022).

3.3.1 Falaises de Plougonvelin (Bretagne)

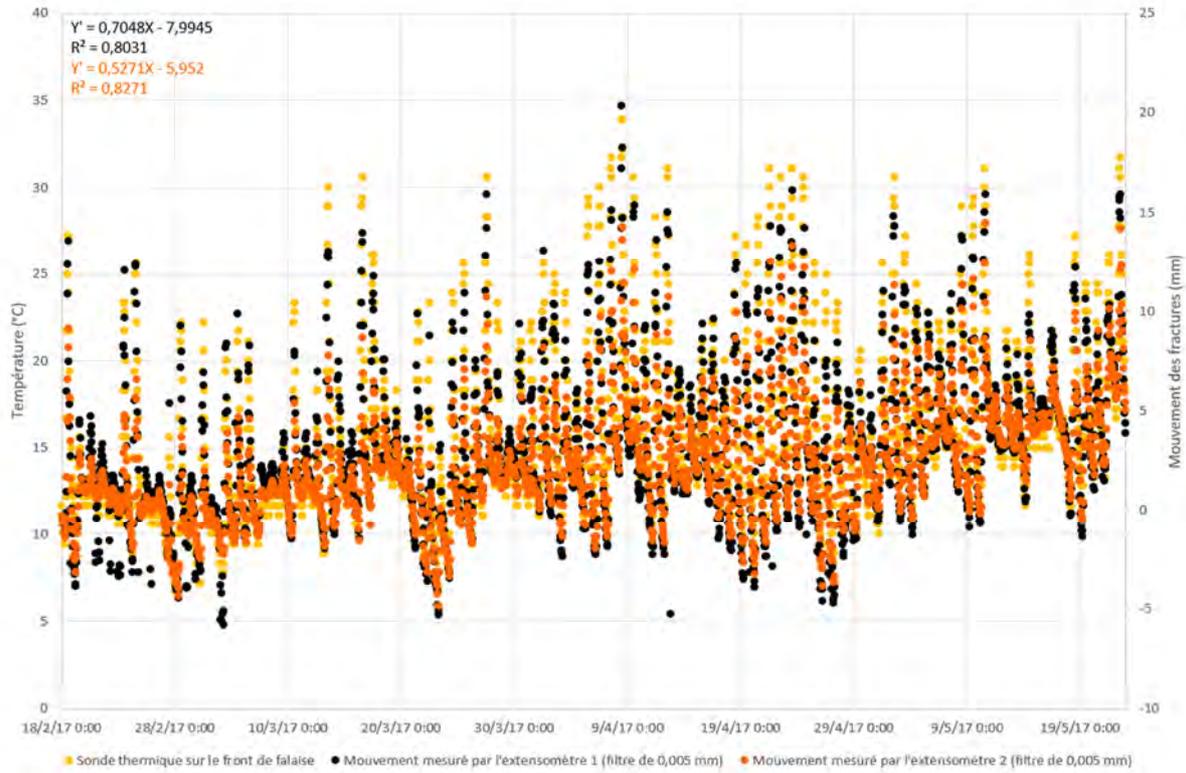
3.3.1.1 Mouvements des fractures existantes corrélés principalement à la température

Les mouvements significatifs¹⁴⁵ mesurés par les extensomètres sur le front de falaise de Plougonvelin durant l'instrumentation (18 février au 22 mai 2017) sont importants puisqu'ils oscillent souvent de part et d'autre -5,81 mm et +20,36 mm. Les mouvements y sont asymétriques avec une tendance à l'extension entre février et avril 2017. L'intensité des mouvements sur les fractures existantes mesurée par les deux extensomètres est, dans un premier ordre de grandeur, corrélée à la température du front de falaise taillé dans l'orthogneiss. Des températures supérieures ou égales à 17°C favorisent surtout des extensions au-delà de 5 mm. La part de l'information totale prise en compte par la relation est de 80 à 83 % (coefficient de détermination r^2 entre 0,80 et 0,83, Graphique 3.2).

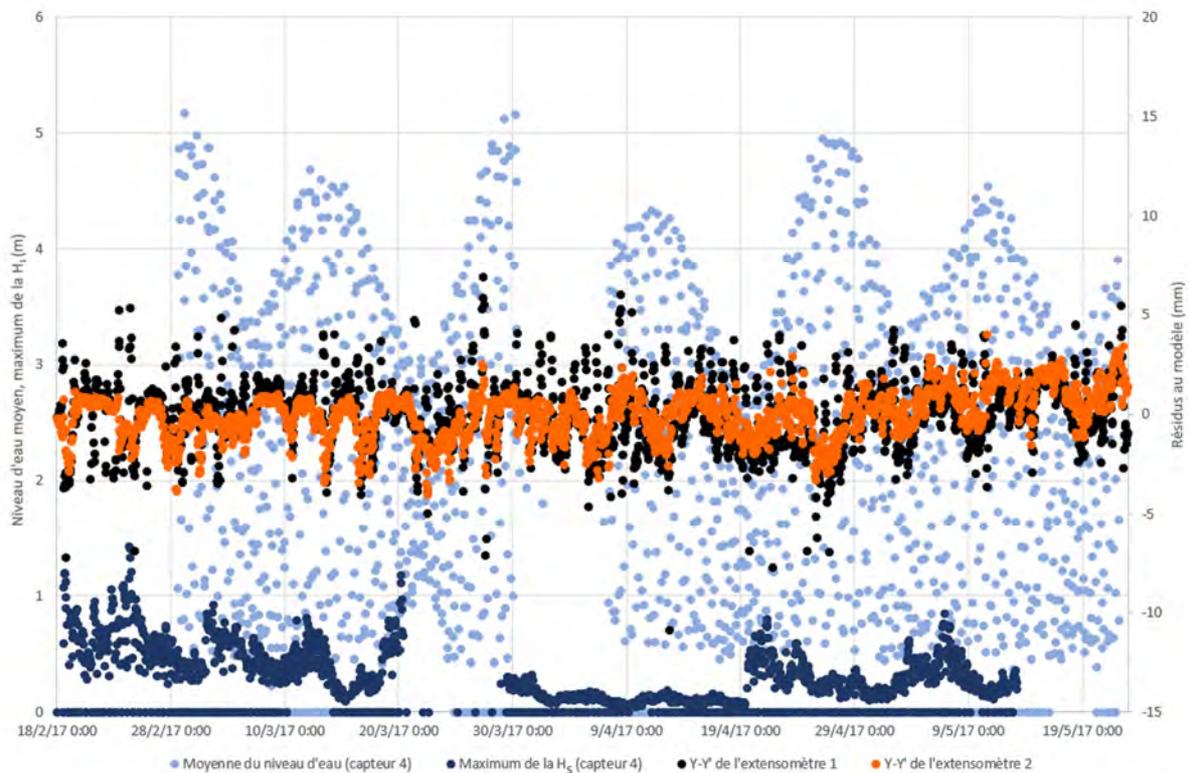
L'analyse des résidus aux modèles met en évidence un lien secondaire avec les conditions marines (niveau d'eau et H_s du capteur 4, le plus bas). Les résidus aux modèles les plus élevés correspondent à des niveaux d'eau élevés (autour de 3,5 m) et aux H_s autour de 1 m (Graphique 3.3).

¹⁴⁴ Une période ne peut être donnée, car le lanceur Vega-C portant les deux derniers satellites Pléiades Neo, a disparu quelques minutes après son décollage le 20 décembre 2022 (https://www.francetvinfo.fr/sciences/espace/la-fusee-vega-c-nouveau-lanceur-leger-europeen-rate-son-premier-vol-commercial_5556324.html).

¹⁴⁵ Le filtre de 0,005 mm a retiré seulement sept valeurs.



Graphique 3.2 : Mouvements des fractures mesurés par les deux extensomètres sur le front de falaise à Plougonvelin en lien avec la température du front de falaise, associés à leur équation de droite de régression (Y') et leur coefficient de détermination (la variable à expliquer (Y) étant les mouvements sur les fractures, et la variable explicative (X) étant la température)



Graphique 3.3 : Résidus aux modèles et leur relation avec la moyenne du niveau d'eau et le maximum de la H_2

3.3.1.2 Microséismes déclenchés par des températures chaudes, mais des conditions d'agitation et de marée moyennes

L'ACP met en évidence que la distribution des individus et des variables est dispersée. Cela signifie que les microséismes enregistrés par les géophones ne dépendent pas d'un seul, mais d'une combinaison de facteurs. L'opposition la plus significative dans les variables testées est le niveau d'eau et la température sur la composante principale 1 (synthétisant 26,2% de l'information totale), la vitesse du vent sur la composante principale 2 (synthétisant 19,5% de l'information totale) et la H_s et le coefficient de marée sur la composante principale 3 (synthétisant 17,6% de l'information totale).

Grâce à la CAH, à la moyenne des classes et aux tests du χ^2 , quatre types de conditions environnementales peuvent être identifiés comme étant responsables, ou non, des microséismes enregistrés sur le front de falaise (Figure 3.30, Figure 3.35) :

- un niveau d'eau moyen ($1,8 \pm 1,1$ m), une température chaude ($16,7 \pm 3,8$ °C), un vent fort ($2,6 \pm 1,0$ m/s), une H_s moyenne ($0,2 \pm 0,1$ m), un coefficient de marée moyen (63 ± 18) et des précipitations faibles ($0,0 \pm 0,5$ mm) (classe 2, Figure 3.30) constituent les conditions préférentielles pour des microséismes sur les périodes de 1 h, avec principalement un à deux microséismes (surreprésentation de déplacements dont la fréquence est de un à deux microséismes ; sous-représentation d'aucun microséisme).

- de manière surprenante, un niveau d'eau haut ($2,8 \pm 0,9$ m), une température moyenne ($11,5 \pm 2,5$ °C), un vent moyen ($1,3 \pm 0,7$ m/s), une H_s forte ($0,5 \pm 0,2$ m), un coefficient de marée moyen (60 ± 19), et des précipitations moyennes ($0,1 \pm 0,2$ mm) sont les conditions les moins favorables aux microséismes (classe 4, Figure 3.30).

- un niveau d'eau moyen ($1,9 \pm 1,3$ m), une température moyenne ($11,4 \pm 2,6$ °C), un vent faible ($1,2 \pm 0,6$ m/s), une H_s faible ($0,1 \pm 0,1$ m), un coefficient de marée fort (75 ± 21) et des précipitations moyennes ($0,1 \pm 0,3$ mm) sont les deuxièmes conditions les moins propices aux microséismes (classe 1, Figure 3.30). En tout premier lieu, il y a surreprésentation d'aucun microséisme, mais, lorsqu'il y a en a, cette classe possède une légère surreprésentation des microséismes nombreux (trois et plus).

- un niveau d'eau haut ($2,8 \pm 0,9$ m), une température moyenne ($11,5 \pm 2,5$ °C), un vent moyen ($1,3 \pm 0,7$ m/s), une H_s forte ($0,5 \pm 0,2$ m), un coefficient de marée moyen (60 ± 19), et des précipitations moyennes ($0,1 \pm 0,2$ mm) sont les troisièmes conditions les moins propices aux microséismes (classe 3, Figure 3.30).

Ces conditions favorables aux microséismes (classe 2) correspondent à celles favorables aux mouvements sur les fractures existantes mesurés par les extensomètres. Cela semble cohérent, car lorsque, en surface, des mouvements ont lieu sur le front de falaise, enregistrés par les extensomètres, ils sont également enregistrés en profondeur dans le massif rocheux par les géophones.

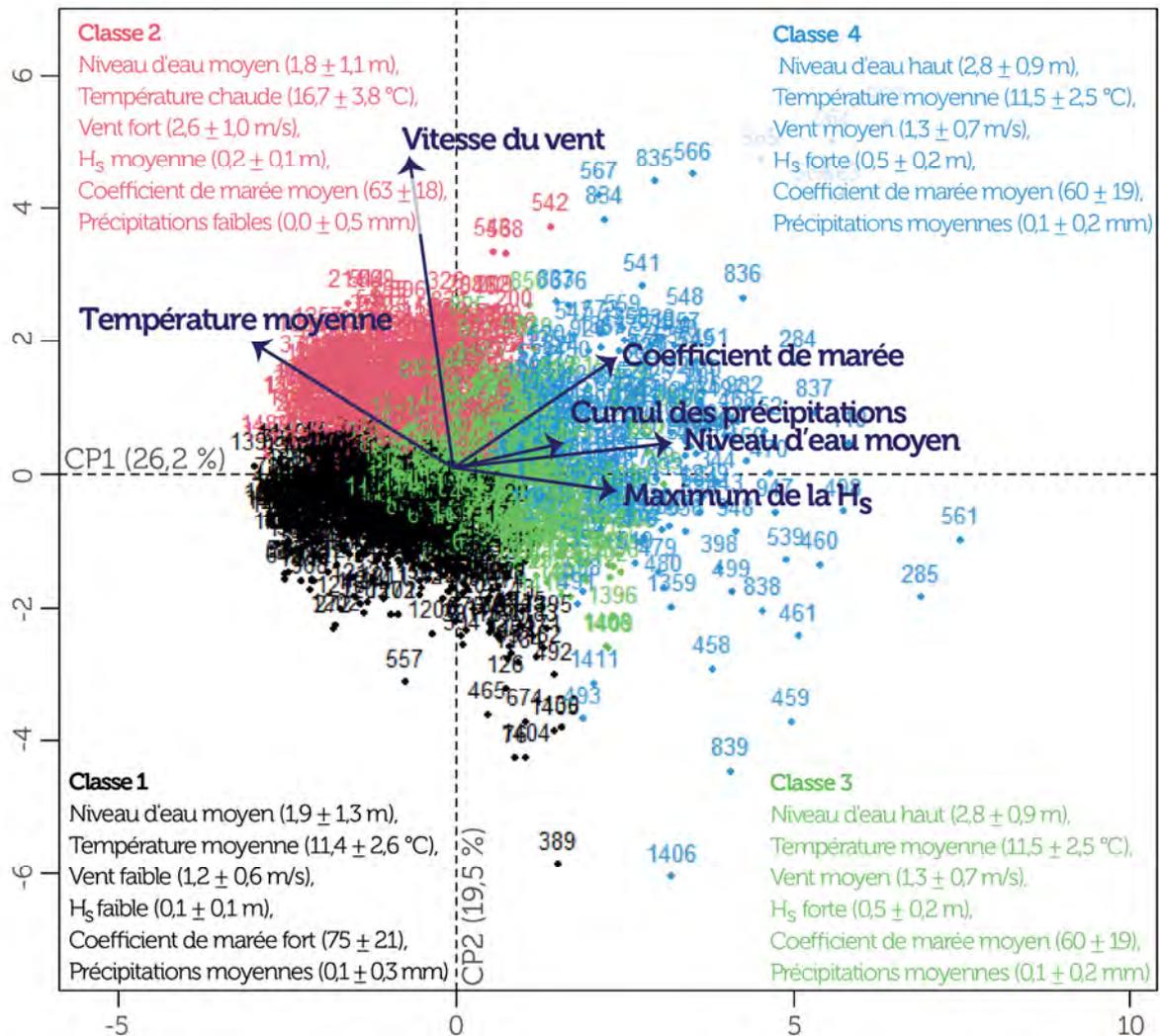


Figure 3.30 : Les deux premières composantes de l'ACP et les quatre groupes de la CAH sur la population des périodes de 1 h avec et sans microséismes (les variables supplémentaires que sont les déplacements mesurés par les deux extensomètres sur les fractures existantes se trouvent, sans surprise, autour de la variable de la température moyenne)

3.3.2 Falaises de Sainte-Marguerite-sur-Mer (Normandie)

3.3.2.1 Caractérisation géophysique du site : une craie sèche au sommet, saturée au pied

Les analyses ERT et GPR montrent une structure à deux couches de la falaise de Sainte-Marguerite-sur-Mer :

- la première couche, appelée partie supérieure de la craie, du sommet au pied de la falaise (environ 0 m IGN69), présente une craie sèche, mais qui présente, à une profondeur de 5 m depuis le sommet de falaise, un comportement hétérogène, probablement en raison de fissures ouvertes remplies d'air et d'argiles ;

- la deuxième couche, depuis 0 à -20 m IGN69, a une craie saturée de fluides (hautement conducteurs), correspondant probablement à de l'eau de mer s'infiltrant dans tout le pied de la falaise et se mélangeant aux eaux souterraines intérieures. Le signal radar souligne une forte homogénéité de la craie.

3.3.2.2 Période d'analyse : est-elle représentative des conditions environnementales moyennes ?

Bien que les conditions moyennes n'existent pas, cette question est légitime pour savoir si notre période d'analyse est représentative des conditions météo-marines classiques. Or, notre période d'analyse (de novembre 2018 à mars 2019) de ce jeu de données unique (de novembre 2018 à janvier 2020) est « particulière » par rapport à la normale climatique de Dieppe sur 30 ans (1981-2010), en raison :

- d'un automne et hiver beaucoup plus doux puisque la température minimale était plus élevée (+88 %) et il n'y a eu que 14 jours de gel (contre 29 habituellement) ;

- de moins de précipitations (-22 %) et une vitesse du vent (-10 %) plus faible.

Par ailleurs, l'absence de tempêtes ou d'événements d'érosion majeurs durant cette période est rare en hiver. Seuls des mouvements individuels de quelques cm^3 à m^3 ont été observés sur la paroi de la falaise instrumentée, principalement près du pied de la falaise (Figure 3.31).

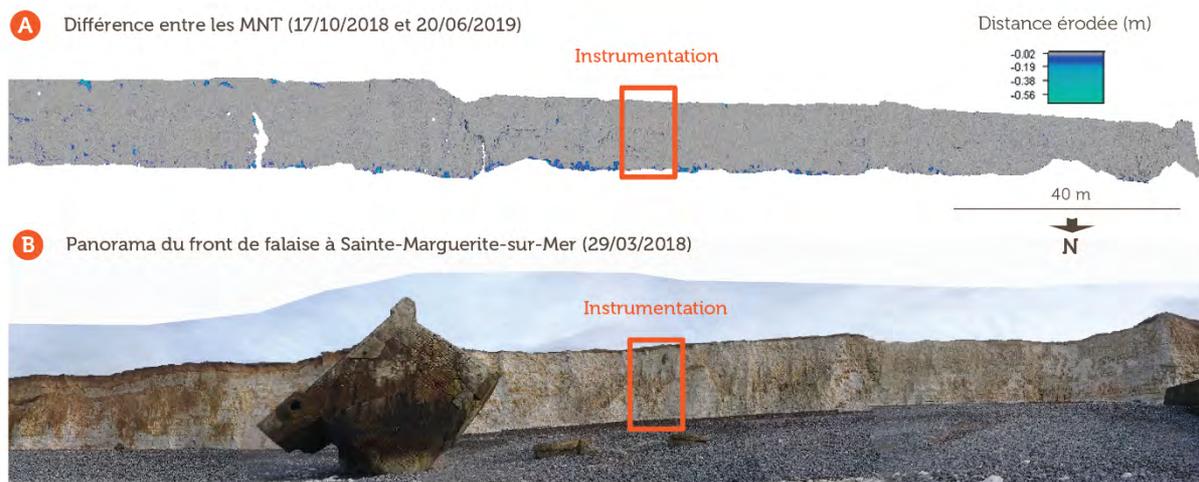


Figure 3.31 : Erosion du front de falaise (précision de $\pm 0,03$ m) entre le 17/10/2018 et le 20/06/2019 à Sainte-Marguerite-sur-Mer (Letortu et al., 2022)

3.3.2.3 Variations des températures de subsurface le long du front de falaise

Après avoir vérifié que les mesures des capteurs de température de subsurface sont cohérentes avec les valeurs de la station météorologique située au sommet de la falaise (23,5 m IGN69), nous avons observé une augmentation progressive des gradients de température à court terme (sur quelques heures) des 24 capteurs en fonction de la hauteur le long de la falaise, avec de légers écarts dans l'ordre des capteurs dus aux différences de profondeur d'insertion dans la falaise et d'altération de la craie.

Les gradients de température ont été calculés pour différentes périodes de temps pour les capteurs 3, 11 et 20 (Figure 3.32). Dans le cas d'une diminution de la température sur une semaine, du 8/12/2018 (21h00) au 15/12/2018 (05h00), les gradients des capteurs de subsurface 3, 11 et 20 sont respectivement de $-0,04$ $^{\circ}\text{C}/30$ min, $-0,04$ $^{\circ}\text{C}/30$ min, $-0,03$ $^{\circ}\text{C}/30$ min. Dans le cas d'une baisse rapide de la température extérieure sur une nuit, du 24/12/2018 (18h30) au 25/12/2018 (09h30), les gradients des capteurs de subsurface 3, 11 et 20 sont respectivement de $-0,13$ $^{\circ}\text{C}/30$ min, $-0,12$ $^{\circ}\text{C}/30$ min, $-0,10$ $^{\circ}\text{C}/30$ min. Dans le cas d'une augmentation de la température sur deux jours, du 15/12/2018 (17h00) au 17/12/2018 (15h30), la pente des capteurs de subsurface 3, 11 et 20 est respectivement de $0,07$ $^{\circ}\text{C}/30$ min,

0,06 °C/30 min, 0,05 °C/30 min. Dans le cas d'une augmentation de la température sur une journée, le 25/12/2018 (09h30-15h30), la pente des capteurs de subsurface 3, 11 et 20 est respectivement de 0,06 °C/30 min, 0,11 °C/30 min, 0,00 °C/30 min. Ce comportement met en évidence une diminution de l'inertie thermique du haut vers le bas de la falaise.

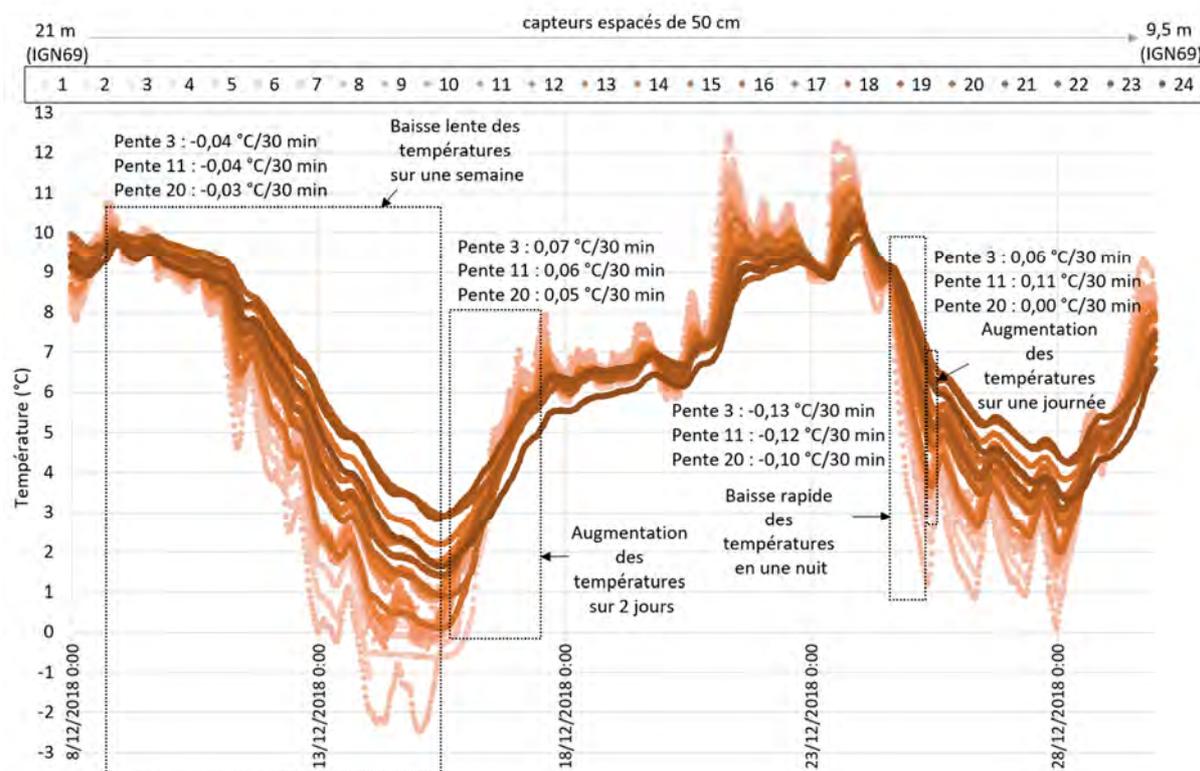


Figure 3.32 : Comparaison des 24 capteurs de températures du 08/12/2018 au 28/12/2018 (numérotation des capteurs depuis le sommet vers le pied du front de falaise) et calculs des gradients de température pour les capteurs 3, 11 et 20 (Letortu et al., 2022)

3.3.2.4 Micromouvements enregistrés par le sismomètre en sommet de falaise : élevés dans les bandes IG et SF des vagues

Sans surprise, les mesures sismométriques montrent des niveaux d'énergie de déplacement plus élevés dans les bandes IG et SF, par rapport à la station de référence à l'intérieur des terres, ce qui est cohérent avec les observations antérieures associant cette réponse à un mouvement de balancement de la falaise induit par l'action des vagues (par exemple, Adams et al., 2005 ; Young et al., 2011). Des déplacements allant jusqu'à 50 μm ont été enregistrés, ce qui est similaire aux études antérieures menées dans différents environnements, couvrant une large gamme de paramètres en termes de géologie, de morphologie côtière, de vagues et de climats météorologiques (Adams et al., 2005 ; Earlie, 2015).

La fonction de transfert entre les vagues et le mouvement du sol au sommet de la falaise (21,5 m IGN69) est analysée. La mesure de cette fonction est le rapport entre l'énergie du mouvement du sol au sommet de la falaise et la H_s . Sur une période d'un mois caractérisée par le passage d'un régime avec des vagues importantes à un avec des vagues plus petites (Figure 3.33, H_s obtenue avec les capteurs de pression), ce rapport est étudié dans les bandes IG et SF (Figure 3.33, panneau inférieur). Ce rapport est faible, car les vagues sont de l'ordre d'1 m et le mouvement du sol de l'ordre d'1 μm . Le transfert entre les vagues et les falaises est plus efficace (le rapport est environ 100 fois plus grand) dans la bande IG que dans la bande SF (noir et rouge, respectivement), ce qui est cohérent avec les observations précédentes (par exemple,

Young et al., 2011b, 2012 ; Earlie, 2015). Nous observons également une modulation du rapport entre l'énergie de déplacement de la falaise et la H_s , en fonction de la hauteur des vagues. Le transfert d'énergie semble être plus efficace pour les petites vagues (10 derniers jours sur la Figure 3.33) que pour les vagues plus importantes (20 premiers jours sur la Figure 3.33).

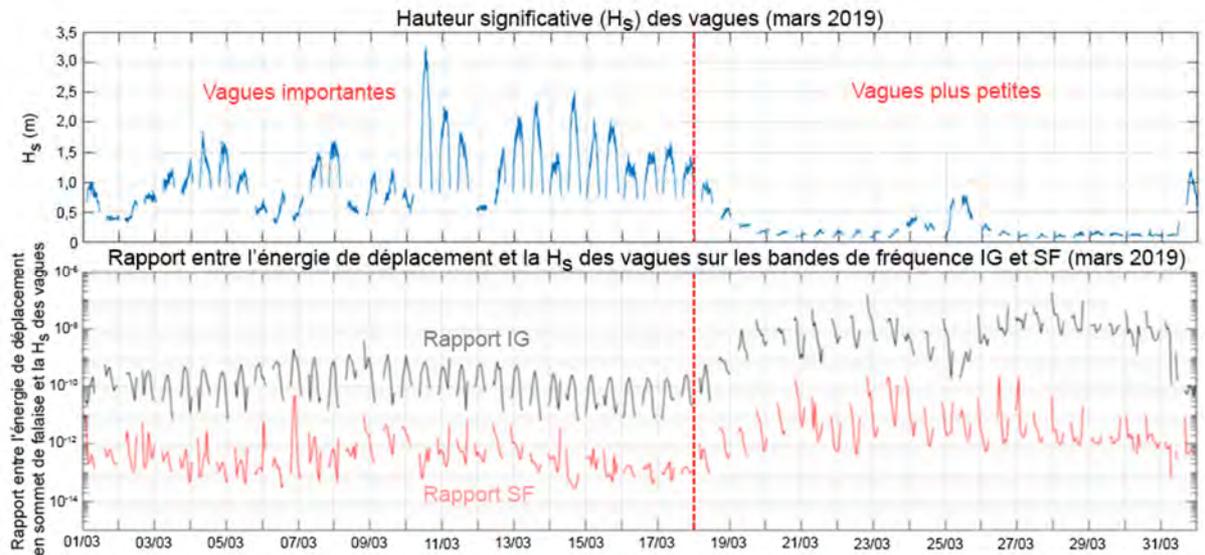


Figure 3.33 : Rapport entre l'énergie de déplacement au sommet des falaises et la H_s dans les bandes IG et SF en mars 2019 (Letortu et al., 2022)

3.3.2.5 Déplacements observés par les extensomètres sur le front de falaise

a. Influence du marnage

Les données des extensomètres montrent une corrélation avec les cycles de marée : les déplacements se produisent surtout durant les marées de vives-eaux. La corrélation n'est pas systématique, car il semble y avoir un seuil de l'ordre d'un niveau d'eau de 6 m à marée haute (un coefficient de l'ordre de 85) à partir duquel les déplacements sont plus nombreux et plus intenses. Dans certains cas (décembre 2019, janvier 2019), il y a un effet retard, supérieur à une journée, entre les pics des enveloppes de contraction et d'extension (Figure 3.34).

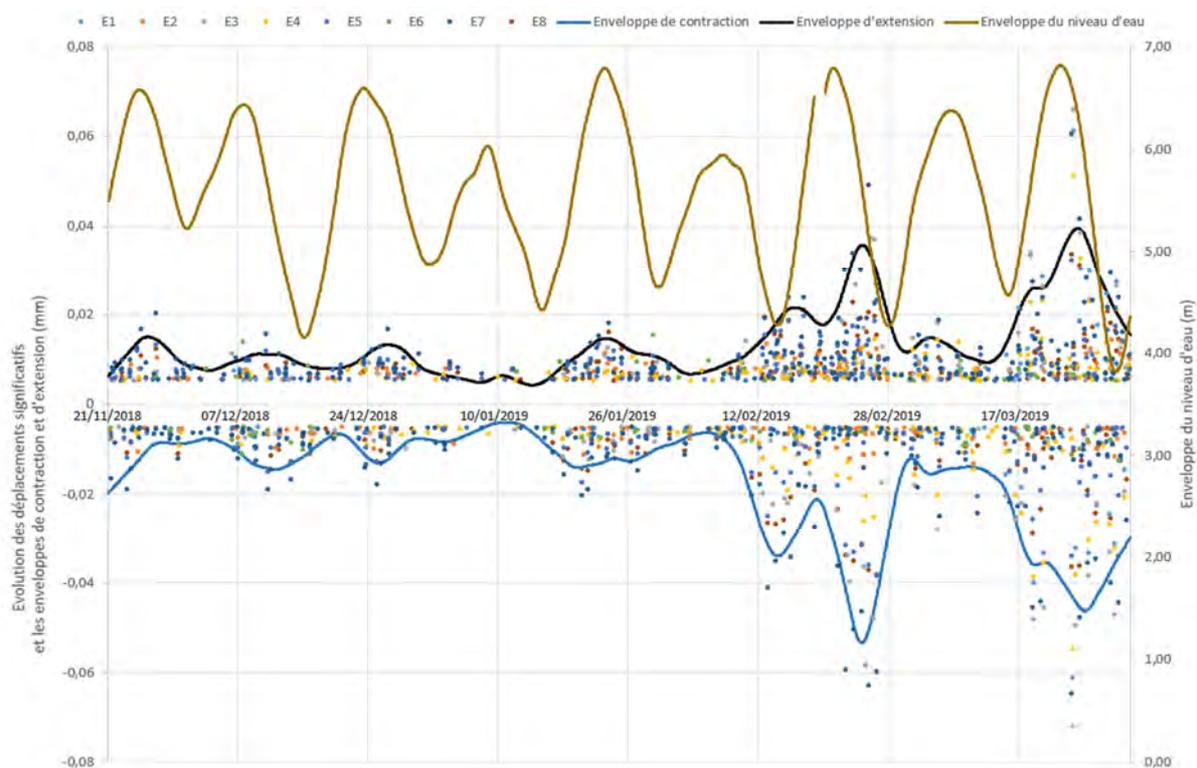


Figure 3.34 : Extrait des déplacements significatifs des huit extensomètres (E) (numérotation depuis le milieu (7 m IGN69) jusqu'au haut du front de falaise (15 m IGN69) depuis le 21/11/2018 (00h00) au 31/03/2019 (22h00), ainsi que les enveloppes de contraction, d'extension des extensomètres et du niveau d'eau (Letortu et al., 2022)

b. Résultats sur les deux populations de périodes de 2 h, avec ou sans déplacements

L'ACP met en évidence que la distribution des individus et des variables est dispersée. Cela signifie que les déplacements enregistrés sur le front de falaise ne dépendent pas d'un seul, mais d'une combinaison de facteurs. L'opposition la plus significative dans les variables testées est la H_s et le vent (sur la composante principale 1, synthétisant 34,5% de l'information totale) et le niveau d'eau et le coefficient de marée (sur la composante principale 2, synthétisant 20,6 % de l'information totale).

Grâce à la CAH, à la moyenne des classes et aux tests du χ^2 , trois types de conditions environnementales peuvent être identifiés comme étant responsables, ou non, du déplacement observé sur les fractures existantes sur le front de falaise à Sainte-Marguerite-sur-Mer (Figure 3.35) :

- une H_s moyenne ($0,4 \pm 0,2$ m), un vent faible ($3,0 \pm 1,6$ m/s), un niveau d'eau haut ($4,1 \pm 1,4$ m), un coefficient de marée fort (87 ± 17), des précipitations faibles ($0,0 \pm 0,1$ mm), une température moyenne ($5,8 \pm 2,3$ °C) (classe 1, Figure 3.35) constituent les conditions préférentielles pour des déplacements sur les périodes de 2 h, aussi bien en fréquence (surreprésentation de trois extensomètres et plus) qu'en intensité (surreprésentation de déplacements dont la valeur absolue est supérieure à 0,03 mm et sous-représentation des déplacements nuls) ;

- une H_s moyenne ($0,4 \pm 0,2$ m), un vent moyen ($4,1 \pm 2,1$ m/s), un niveau d'eau bas ($2,0 \pm 1,0$ m), un coefficient de marée moyen (57 ± 16), des précipitations moyennes ($0,1 \pm 0,3$ mm), une température moyenne ($6,0 \pm 2,4$ °C) (classe 2, Figure 3.35) est la deuxième classe la plus favorable aux déplacements

significatifs avec une forte intensité (surreprésentation de déplacements dont la valeur absolue est supérieure à 0,03 mm) ;

- les conditions les moins favorables aux déplacements correspondent, de manière surprenante à une H_s forte ($1,2 \pm 0,5$ m), un vent fort ($7,9 \pm 2,2$ m/s), un niveau d'eau haut ($3,6 \pm 1,5$ m), un coefficient de marée moyen (70 ± 16), de fortes précipitations ($0,3 \pm 0,8$ mm), une température haute ($8,4 \pm 1,9$ °C) (classe 3, Figure 3.35). Cependant, lorsqu'il y a déplacement significatif, il est caractérisé par une faible fréquence d'occurrence (surreprésentation d'un ou deux extensomètre(s)) et une faible intensité de déplacement (inférieure ou égale à 0,03 mm en valeur absolue).

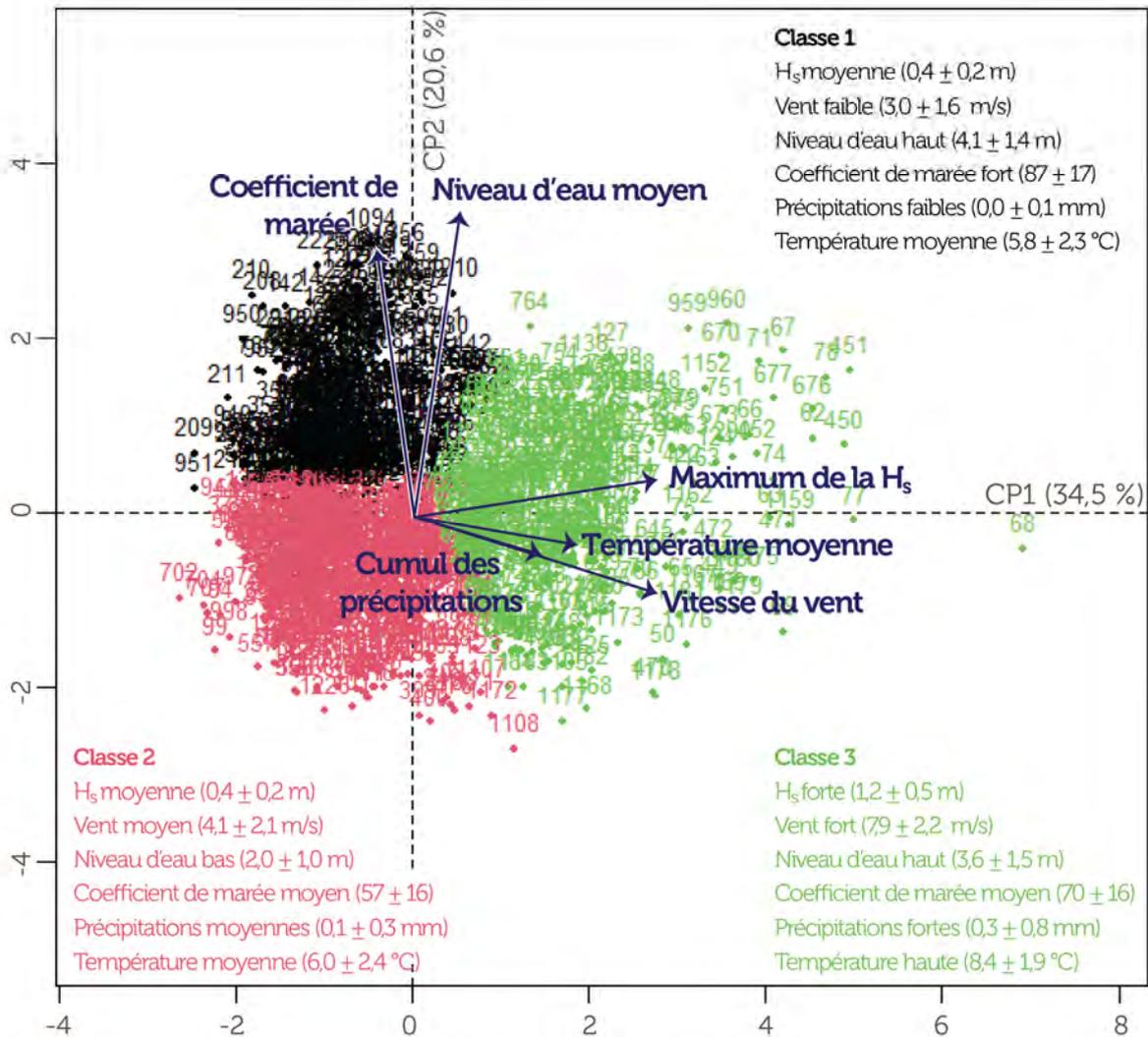


Figure 3.35 : Les deux premières composantes de l'ACP et les trois groupes de la CAH sur la population des périodes de 2 h avec et sans déplacements (Letortu et al., 2022)

c. Résultats sur la population des périodes de 2 h avec déplacements

Les résultats sur la deuxième population (1 409 individus considérés comme déplacements) confirment les résultats précédents et permettent d'aller un peu plus loin en reliant les conditions environnementales propices aux déplacements sur les fractures existantes à la direction de déplacement. La classe 1 (H_s moyenne, vent faible, niveau d'eau haut, coefficient de marée fort, précipitations faibles, température moyenne) représente les conditions les plus propices à l'extension. La classe 3 (H_s forte, vent fort, niveau d'eau haut,

coefficient de marée moyen, précipitations fortes, température haute) est la plus propice aux contractions. Nous avons tenté un test du χ^2 pour savoir si certaines conditions météo-marines entraînaient de déplacements localisés sur le front de falaise (fracture principale, fracture secondaire, bloc, banc de silex, craie), mais les différences n'étaient pas significatives.

3.3.3 Discussion

Ces deux instrumentations s'avéraient ambitieuses et prometteuses pour améliorer la compréhension des agents et processus responsables de la fatigue et de la rupture des falaises. Mais, durant nos deux périodes d'acquisition de données, l'absence de mouvements de masse limite la portée des analyses sur la rupture aux seuls mouvements individuels. Les jeux de données demeurent cependant intéressants pour explorer la réponse mécanique de la falaise sous l'effet des différents facteurs et processus, et en particulier les mécanismes de fatigue de la paroi rocheuse.

Ces suivis multiparamètres nous ont fourni de nombreux retours d'expérience (synthèse de N. Le Dantec dans Maquaire et al. (2022)), dont :

- la nécessité de majorer les étapes de préparation, calibration, déploiement, maintenance, déchargement des données, et démobilisation en raison de la multiplication des instruments différents (et souvent utilisés en dehors de leur configuration initiale) ;

- la limitation du nombre d'instruments pour suivre tous les paramètres d'intérêt, tout en garantissant une maintenance pour un suivi pérenne. En complément d'un suivi de l'évolution morphologique de la falaise, il apparaît nécessaire :

- 1) pour la réponse de la falaise, d'avoir deux sismomètres à large bande en sommet de falaise afin de mesurer les déformations et de permettre la localisation des sources ;

- 2) pour les facteurs et processus marins, un suivi par caméra vidéo ainsi qu'un capteur de pression en bas d'estran, ou si possible en zone subtidale, sont adaptés ;

- 3) pour les facteurs et processus continentaux, une station météorologique ainsi qu'un piézomètre sont nécessaires, sauf s'il en existe déjà à une distance assez faible pour que les données existantes soient exploitables pour le site d'étude.

- l'utilisation possible de géophones, notamment en mesures continues, pour exploiter les possibilités d'analyse du bruit ambiant et examiner par cette approche différentes conditions environnementales (le raccordement à une borne électrique étant indispensable pour éviter les pannes d'alimentation).

Le jeu de données sur la falaise de Plougonevelin n'est exploré que partiellement, car le contrat postdoctoral de K. Laute était court (18 mois) par rapport à la masse de données à exploiter. Les premières analyses montrent le rôle primordial des températures chaudes (≥ 17 °C) dans l'extension des fractures existantes, et dans un deuxième temps, le rôle des conditions du niveau d'eau et des conditions d'agitation. Quant au catalogue de microséismes enregistrés par les géophones couplé à une analyse statistique multivariée et bivariée, le caractère multifactoriel du déclenchement des microséismes est mis en évidence. Les conditions les plus propices correspondent à un niveau d'eau moyen ($1,8 \pm 1,1$ m), une température chaude ($16,7 \pm 3,8$ °C), un vent fort ($2,6 \pm 1,0$ m/s), une H_s moyenne ($0,2 \pm 0,1$ m), un coefficient de marée moyen (63 ± 18), et des précipitations faibles ($0,0 \pm 0,5$ mm), avec principalement un à deux microséismes (surreprésentation de déplacements dont la fréquence est d'un à deux microséismes, sous-représentation

d'aucun microséisme). Ces conditions sont cohérentes avec les conditions propices aux déplacements sur les fractures existantes. Cela signifie que les mouvements observés autour des blocs prédécoupés (mesurés par les extensomètres) sont bien le reflet de mouvements plus larges au sein du massif (enregistrés par les géophones). Tout mouvement, principalement lors de températures chaudes, dans le massif engendre un pivot qui se transmet à la paroi. De manière plus surprenante, l'absence de lien entre l'hydrodynamisme (agitation et coefficient de marée) et les géophones est surprenante. Une des pistes pourrait être la classification du catalogue cataeve, dont la classe 2 regroupe d'éventuels déferlements de vagues (116 cas), mais dont le score est toujours très incertain (0 à 0,33). Cette classe n'a donc pas pu être intégrée à notre analyse. Pour aller plus loin sur cette piste, explorer le lien avec les données du/des sismomètre(s) et les données des géophones sera essentiel pour connaître le comportement depuis le front au sommet de la falaise, en passant par l'intérieur du massif.

La sismologie environnementale s'avère être une approche très utile pour étudier les mouvements dans divers contextes (Provost et al., 2018). Sur les falaises, le mouvement microsismique observé en sommet de la falaise capture la signature complexe du climat local des vagues proches du rivage, y compris la transformation des vagues et le déferlement des vagues (fonction de la morphologie de la plate-forme, de la plage et du pied de la falaise), fournissant une mesure de l'énergie fournie aux falaises (Vann Jones et al., 2018). La décomposition de la fonction de transfert vague-falaise reste un défi. A Sainte-Marguerite-sur-Mer, les valeurs d'amplitude de déplacement du haut de falaise par le sismomètre à large bande sont relativement élevées (jusqu'à 50 μm) compte tenu des conditions plutôt calmes. Ceci pourrait être lié à l'élasticité de la craie de la falaise, qui a un module d'Young statique entre 3 000 et 16 000 MPa pour la craie sèche, et entre 740 et 4 500 MPa pour la craie saturée (Senfaute et al., 2005). Notre observation préliminaire sur la dépendance du rapport entre l'énergie de déplacement de la falaise et la H_s confirme la forte modulation de la fonction de transfert par le climat des vagues.

A Sainte-Marguerite-sur-Mer, nos résultats mettent en évidence que l'amplitude thermique sur le front de falaise est plus élevée au sommet qu'en pied. Les variations thermiques peuvent augmenter la fatigue et la fracturation de la craie, notamment avec l'orientation nord-nord-ouest du front de falaise. En effet, des études ont démontré qu'en climat tempéré humide (Aldred et al., 2016) et en climat désertique des latitudes moyennes (McFadden et al., 2005 ; Eppes et al., 2015, 2010), les fissures sont préférentiellement observées dans les parois rocheuses orientées nord-est. La fissuration liée à l'insolation est l'hypothèse principale, aidée par d'autres processus d'altération en jeu (Aldred et al., 2016), mais cela est impossible sur le secteur d'étude, car il n'y a pas de rayonnement direct (orientation nord-nord-ouest). Un mécanisme d'altération particulièrement efficace pourrait être celui des cycles de gel/dégel sur le site d'étude, car ils se produisent dans un environnement où l'humidité est disponible (Letavernier et Ozouf, 1987 ; Prick, 1995). L'altération par le gel conduit à deux processus : l'expansion volumétrique et la ségrégation de la glace (Matsuoka et Murton, 2008). Comme mentionné dans l'article de Dewez et al. (2015), en Normandie, les températures inférieures à 0 °C (pour l'eau douce) et inférieures à -2,5 °C (pour l'eau de mer) contractent la roche tandis que l'eau interstitielle gèle et se dilate, entraînant des contraintes changeantes sur le massif crayeux. Ces contraintes multidirectionnelles s'accumulent et donnent lieu à la rupture des parois des pores et à l'apparition de réseaux de microfissures dans la matrice rocheuse. La fracturation peut se produire rapidement dans une craie intacte. Robinson et Jerwood (1987), dans des expériences en laboratoire, ont visualisé la fracturation en 14 cycles de gel/dégel, tandis que Murton et al. (2006), en simulation, l'ont observée lors de 10 à 20 cycles successifs. Compte tenu de nos observations sur les variations thermiques, les mouvements gravitaires causés par les cycles de gel/dégel se produiraient alors préférentiellement au sommet

du front de falaise (autour du capteur de température 1 (21 m IGN69) jusqu'aux environs du capteur 11 (16 m IGN69)). Cependant, le degré d'altération de la craie est beaucoup plus avancé au pied qu'ailleurs le long du front de falaise. Cela est probablement dû à la saturation de la craie liée à la circulation d'eaux souterraines au pied et en dessous de la falaise (données géophysiques) et à l'action marine. Ceci est cohérent avec Aldred et al. (2016), qui ont observé que sur différents sites dans des climats tempérés humides, la disponibilité de l'humidité peut déterminer les taux de fissuration. La présence de la nappe phréatique pourrait également expliquer la diminution de l'inertie thermique en fonction de la hauteur de la falaise le long de l'affleurement. L'infiltration d'eau dans les masses rocheuses peut générer des anomalies thermiques visualisables par une caméra infrarouge (Frodella et al., 2017). Cependant, cette piste ne semble pas prometteuse, car lors des six relevés thermiques réalisés par caméra infrarouge durant le projet RICOCHET, aucune anomalie thermique n'a été observée au pied de la falaise. L'exploration des données thermiques mesurées par la fibre optique permettra de confirmer ou d'infirmer ces éléments.

Tandis que les déplacements sur le front de falaise de Plougonvelin (exposé sud) sont de grande ampleur (de -5 mm à 20 mm) et majoritairement contrôlés par la température (des températures chaudes entraînent une extension des fractures), les déplacements sur le front de falaise de Sainte-Marguerite-sur-Mer (exposé nord-nord-ouest) sont de faible ampleur (de -0,07 à 0,06 mm) et montrent un contrôle par le marnage, avec une réponse suite au franchissement du seuil de niveau d'eau de 6 m mesuré par le capteur de pression 4 (9 m en cote marine, coefficient de marée 85). Le suivi en Normandie montre que les déplacements des fractures existantes sur la falaise sont d'origines multifactorielles et complexes. Au-delà de la corrélation observée avec l'amplitude de la marée, les méthodes d'analyses statistiques multivariées et bivariées utilisées pour identifier les conditions les plus propices aux déplacements sur le front de falaise (sur une période de 2 h) fournissent des informations complémentaires. Alors que les H_s élevées, le vent fort et les fortes précipitations sont des conditions généralement considérées comme propices aux déplacements intenses et nombreux, ici elles s'avèrent les moins favorables aux déplacements. Bien que cela puisse être dû à l'absence de conditions météo-marines tempétueuses, ce résultat est surprenant. Les déplacements mesurés par les extensomètres sont très locaux, et probablement avec des effets cascades, ou des combinaisons de processus et/ou de phénomènes d'hystérésis. Pour exploiter au mieux les données des extensomètres, il serait nécessaire de détecter puis d'analyser les périodes où la majorité des huit extensomètres enregistrent simultanément des déplacements. A cette fin, des enregistrements continus auraient été souhaitables pour identifier les événements, au lieu des valeurs de déplacement intégrées sur 30 min. Il sera intéressant, entre autres, de poursuivre l'analyse des déplacements enregistrés par les extensomètres sur l'ensemble des 13 mois de suivi qui incluent des périodes avec des conditions plus énergétiques.

3.4 Résultats de recherche opérationnelle et de formation (Bretagne)

3.4.1 OSIRISC

3.4.1.1 Indicateurs

Durant le projet OSIRISC (2016-2020), un total de six variables (relatives aux aléas côtiers) a été retenu :

- trois pour l'érosion côtière : distance érodée/an/100 m linéaires, la surface érodée/an/100 m linéaires et le volume érodé/an/100 m linéaires ;

- deux pour la submersion marine : hauteur de submersion et linéaire exposé aux paquets de mer et aux écoulements ;

- une pour la migration dunaire : vitesse annuelle de migration.

Pour l'aléa érosion côtière, il s'agit de mesurer soit la distance (1D), soit la surface (2D), soit le volume (3D) qui a été érodé(e) perpendiculairement au trait de côte. Cette distance ou surface ou volume est mesuré(e) en mètres entre le trait de côte ancien et le trait de côte actuel. Afin d'homogénéiser les résultats et les rendre comparables, les valeurs sont standardisées en les rapportant à 100 m linéaires de côte et à la récurrence annuelle (pour s'affranchir des effets saisonniers).

Pour la submersion marine, la hauteur inondée est mesurée, à chaque événement, en différents points sur un territoire afin de pouvoir connaître l'extension globale de l'inondation. La submersion marine pouvant être par franchissement, un deuxième indicateur mesure le linéaire côtier exposé au franchissement de paquets de mer et le cheminement de l'eau vers l'intérieur des terres. Le linéaire exposé au franchissement se doit d'être exhaustif.

Quant à la migration dunaire, la vitesse (en m/an) de déplacement d'une accumulation dunaire est mesurée perpendiculairement à sa direction de propagation. Cette variable ne sera pas davantage développée ici, car elle est rare en Bretagne.

Pour qu'ils deviennent indicateurs, nous les avons cotés. A partir des données INEC en France métropolitaine, nous avons défini, par la méthode de discrétisation des seuils observés, des cotes pour les indicateurs relatifs à l'érosion en se basant sur la distance d'évolution (sachant que toute surface ou volume peut être rapporté(e) à une distance) (Tableau 3.15).

Critère des variables d'érosion côtière	Cote
Absence de données ou côte artificialisée	0
Valeur $\geq 0,00$ m/an (érosion non perceptible ou accrétion)	1
$[-0,05 ; 0,00$ m/an[	2
$[-0,20 ; -0,05$ m/an[	3
$[-0,60 ; -0,20$ m/an[	4
$\leq -0,60$ m/an	5

Tableau 3.15 : Critère et cote associée pour que les variables d'érosion côtière deviennent des indicateurs

Pour la submersion marine, la cotation s'est appuyée sur la bibliographie et sur la discrétisation préexistante aux données de hauteur potentielle de submersion si un événement d'occurrence centennale se produit. A partir de 2 m de hauteur d'eau, les personnes sont obligées de nager et risquent de se noyer (Lang et Claudet, 2005). Mais la valeur « 2 m » manque à notre jeu de données initial. La hauteur de 2,5 m correspond au plafond du bâti, la capacité à nager devient limitante et il devient impossible de sortir d'un bâtiment de plain-pied inondé. Le risque de se noyer devient alors très fort, d'où la cote maximum au-delà de 2,5 m (Tableau 3.16).

Critère des variables de submersion marine	Cote
Absence de données	0
Pas de submersion marine	1
]0 ; 0,5 m]	2
]0,5 ; 1,5 m]	3
]1,5 ; 2,5 m]	4
> 2,5 m	5

Tableau 3.16 : Critère et cote associée pour que les variables de submersion marine deviennent des indicateurs

Cette cotation a ensuite été intégrée au maillage et décrite dans des fiches méthodologiques (Figure 3.36). Ainsi, les cotes d'érosion côtière ont été initialement ajustées à la granularité de 200 m, qui correspond au carroyage INSEE (granularité minimale de certaines bases de données statistiques nationales utilisées dans OSIRISC). Cependant, l'attribution d'une cote à la maille a nécessité des travaux SIG correctifs, car la méthode SIG par défaut était incohérente : avant la correction, les mailles avaient pour cote la première valeur rencontrée lors de la jointure spatiale. L'application de la règle « attribuer la valeur discrétisée de 90 % du linéaire d'une maille à la maille, sinon lui attribuer la valeur discrétisée maximale » a permis d'actualiser les cotes d'érosion au sein du maillage (Gbégnon, 2019).

Ces premières cotations évolueront probablement avec l'ajout de données plus locales (dans le cadre de l'observatoire OSIRISC, mais aussi à l'échelle nationale en fonction des données à disposition comme les données LiDAR topo-bathymétriques) et avec le changement climatique. Les seuils seront certainement revus d'ici quelques années pour une meilleure adaptation aux façades étudiées. De plus, il s'agira de créer des cotations pour les autres indicateurs (linéaire exposé au franchissement de paquets de mer et aux écoulements et vitesse de migration dunaire).

Par ailleurs, la granularité de 200 m ne suffit pas toujours : il est parfois nécessaire d'effectuer une descente d'échelle pour un diagnostic plus fin de territoire. Grâce à l'accès aux données brutes, il est possible de réaliser un travail plus fin, comme ce fut le cas pour l'étude des falaises meubles avec la création de mailles de 50 m (Basara, 2019). C'est la raison pour laquelle ces deux échelles sont désormais utilisées depuis fin 2022 pour la visualisation sous OSI de l'indicateur « distance érodée/an/100 m linéaires ».

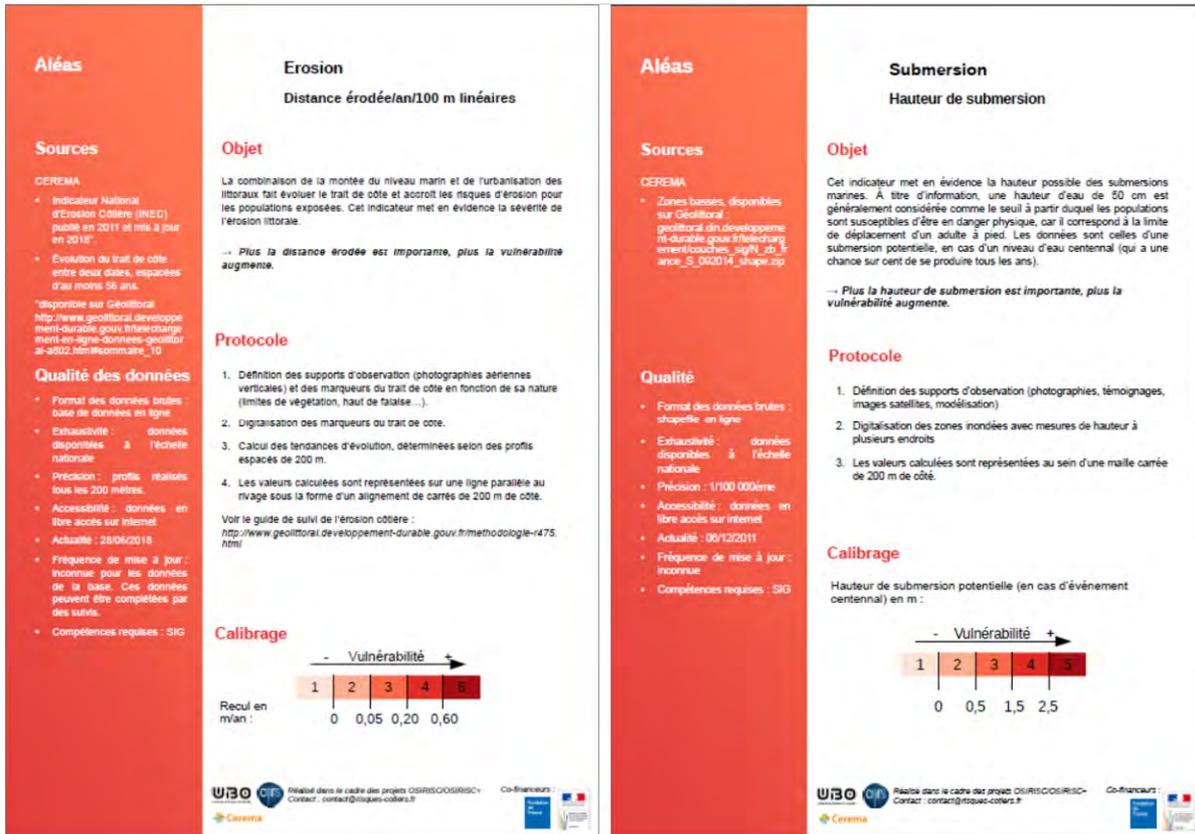


Figure 3.36 : Fiches méthodologiques des indicateurs « distance érodée/an/100 m linéaires » et « hauteur de submersion » (OSIRISC)

3.4.1.2 Protocoles

a. Du théorique...

Pour observer l'évolution dans le temps de la vulnérabilité systémique, les indicateurs doivent être remis à jour régulièrement. Or, le renseignement des indicateurs est tributaire du temps dont disposent les scientifiques et les gestionnaires, ce qui rend l'outil dépendant de ressources humaines dédiées (Le Berre et al., 2011). Cela impose des contraintes sur les méthodes d'acquisition des données et justifie, dans le cas des aléas, des mesures précises réalisées avec des protocoles « légers ». Dans ce cadre, nous avons réalisé 20 protocoles en fonction des indicateurs, du matériel et des compétences disponibles et en précisant leurs avantages et leurs inconvénients (Tableau 3.17) :

- onze pour l'érosion côtière (dont huit qui concernent l'indicateur « distance érodée/an/100 m linéaires » ; un qui s'intéresse à la « surface érodée/an/100 m linéaires » ; deux qui mesurent « le volume érodé/an/100 m linéaires ») ;

- neuf pour la submersion marine (huit qui suivent l'indicateur « hauteur de submersion » et quatre qui mesurent le « linéaire exposé au franchissement de paquets de mer et aux écoulements », car certains protocoles suivent les deux indicateurs).

Nom du protocole	Aléa	Indicateur concerné	Avantage(s)	Inconvénient(s)
Distance entre un repère et le trait de côte	Erosion côtière	Distance érodée/an/100 m linéaires	Faible degré de technicité	Disposer d'une liste de repères de mesure
			Tous les environnements côtiers	
			Coût modéré	
Mesure verticale sur le haut de l'estran	Erosion côtière	Distance érodée/an/100 m linéaires	Faible degré de technicité	Disposer d'une liste de repères de mesure
			Temps de collecte très court	Ne concerne que les plages
			Coût modéré	Doit être couplée à des protocoles de mesures horizontales
Mesure verticale sur le bas de l'estran	Erosion côtière	Distance érodée/an/100 m linéaires	Faible degré de technicité	Disposer d'une liste de repères de mesure
			Temps de collecte très court	Ne concerne que les plages
			Coût modéré	Doit être couplée à des protocoles de mesures horizontales
Suivi photographique	Erosion côtière	Distance érodée/an/100 m linéaires	Faible degré de technicité	Ne permet pas toujours de faire du quantitatif si les photos ne sont pas de bonne qualité
			Tous les environnements côtiers	Données dépendantes de la météo et de la fréquentation du site
			Coût faible (juste disposer d'un appareil photo ou un smartphone)	
			Temps de collecte très court	
Pente de plage	Erosion côtière	Distance érodée/an/100 m linéaires	Coût modéré	Disposer d'une liste de repères de mesure
				Fort degré de technicité
				Temps de collecte plus long (15 min)
				Disposer d'une liste de repères de mesure
				Doit être couplée à d'autres protocoles
Profil de plage par cordage gradué	Erosion côtière	Distance érodée/an/100 m linéaires	Faible degré de technicité	Disposer d'une liste de repères de mesure
			Coût faible	Temps de collecte plus long (15 min)
				Ne concerne que les plages
				Doit être couplé à d'autres protocoles
Profil de plage par télémètre, distance-mètre ou niveau	Erosion côtière	Distance érodée/an/100 m linéaires	Degré de technicité modéré	Disposer d'une liste de repères de mesure
			Temps de collecte très court	Ne concerne que les plages
			Coût modéré	Doit être couplé à d'autres protocoles
Profil de précision de plage par télémètre laser, dGPS ou tachéomètre	Erosion côtière	Distance érodée/an/100 m linéaires	Données de précision centimétrique	Temps de collecte plus long (de 15 à 45 min)
				Coût élevé du matériel
				Disposer d'une liste de repères de mesure
				Ne concerne que les plages
				Doit être couplé à d'autres protocoles

Surface érodée sur une côte rectiligne	Erosion côtière	Surface érodée/an/100 m linéaires	Temps de collecte très court	Disposer d'une liste de repères de mesure
			Faible degré de technicité	Ne convient qu'au trait de côte rectiligne
			Coût modéré	
Volume érodé sur un linéaire rectiligne	Erosion côtière	Volume érodé/an/100 m linéaires	Faible degré de technicité	Disposer d'une liste de repères de mesure
			Coût modéré	Temps de collecte plus long (15 min)
				Ne convient qu'au trait de côte rectiligne
Prise de vue quantitative d'un mouvement de terrain	Erosion côtière	Volume érodé/an/100 m linéaires	Faible degré de technicité	Données dépendantes de la météo et de la fréquentation du site
			Coût faible (juste disposer d'un appareil photo ou un smartphone)	Nécessite des traitements supplémentaires pour avoir des mesures et des données raffinées
			Temps de collecte modéré	
Hauteur d'eau par mesure verticale	Submersion marine	Hauteur de submersion	Faible degré de technicité	Disposer d'une liste de repères de mesure
			Coût modéré des outils	
			Temps de collecte court	
Hauteur d'eau par lecture sur échelle graduée	Submersion marine	Hauteur de submersion	Faible degré de technicité	Nécessite l'installation d'échelles graduées dans la commune
			Coût modéré	
			Temps court de collecte	
Hauteur d'eau par photographie	Submersion marine	Hauteur de submersion	Faible degré de technicité lors de la collecte	Des socles pour smartphone peuvent être installés dans la commune : cela peut engendrer des coûts supplémentaires selon le nombre de socles à installer (≈ 170 € HT par socle)
			Coût modéré (juste disposer d'un appareil photo ou un smartphone)	Nécessite quelques compétences en traitement des MNT
			Temps de collecte court	Limitée par l'absence de données Litto3D pour certaines communes
Emprise de la submersion par le levé des laisses de mer au GPS/dGPS	Submersion marine	Hauteur de submersion	Précision élevée des données (centimétrique)	Le traitement des données nécessite des compétences en SIG
				Coût élevé
				Degré de technicité élevé
Emprise de la submersion par le levé des laisses de mer avec une application mobile : géoportail, CRISI, GPS Tour, etc.	Submersion marine	Hauteur de submersion	Faible degré de technicité	Moins de précision que l'usage d'un dGPS
			Temps de collecte plus court que l'usage d'un dGPS	
			Applications libres de droits	
Linéaire exposé au franchissement de paquets de mer et le sens de l'écoulement par l'observation par webcam	Submersion marine	Linéaire exposé au franchissement de paquets de mer et aux écoulements	Tout opérateur non spécialiste peut collecter et traiter les données	Coût élevé du matériel
			Faible degré de technicité	Trouver un point de vue pertinent peut être difficile
			Sécurisant pour l'opérateur (pas besoin pour lui de se déplacer sur le terrain)	Peut nécessiter des autorisations pour les sites d'implantation

				Peut être limité par des textes juridiques et par l'autorisation des propriétaires des bâtiments
Recueil de témoignages par entretien	Submersion marine	Hauteur de submersion	Faible degré de technicité	Les témoignages peuvent exagérer ou minimiser la réalité
		Linéaire exposé au franchissement de paquets de mer et aux écoulements	Coût modéré	
Recueil de témoignages à distance	Submersion marine	Hauteur de submersion	Faible degré de technicité	Fiabilité des données collectées à distance
		Linéaire exposé au franchissement de paquets de mer et aux écoulements	Temps de collecte très court	Autorisation pour la collecte de données issue des réseaux sociaux
			Coût faible si les réseaux sociaux sont mis à contribution	
Recueil de témoignages par une application mobile	Submersion marine	Hauteur de submersion	Faible degré de technicité	Nécessite d'aller rapidement sur le terrain pour collecter les témoignages et photographier les éventuels impacts
		Linéaire exposé aux paquets de mer et aux écoulements	Application libre de droits	Peut prendre du temps

Tableau 3.17 : Liste des 20 protocoles mis en place pour suivre les différents indicateurs des aléas d'érosion côtière et de submersion marine, ainsi que les avantages et inconvénients de chaque protocole (d'après Billerey, 2018 ; Gbégnon, 2019)

Ces protocoles sont synthétisés en fiches pédagogiques avec une présentation simple, basée sur des illustrations pour faciliter leur reproduction sur le terrain (Figure 3.37). Le suivi de l'érosion côtière est structuré autour de lieux de mesure fixes, le plus souvent linéaires (transects), qui se veulent représentatifs des dynamiques érosives d'un tronçon de côte plus vaste (auquel les données mesurées seront attribuées). Ainsi, la matérialisation de points de repère fixes (au minimum deux, qui donne le lieu et la direction de mesure du transect) est indispensable pour uniformiser la collecte des données. Ces repères sont des éléments paysagers présents et bien identifiables sur les terrains d'étude et peuvent être de natures diverses (ganivelles, ouvrages côtiers, arbres, etc.). Pour les secteurs où aucun élément ne paraît durable, des jalons peuvent être posés et leur position GPS déterminée afin de pouvoir poser un repère fixe plus tard. Ces repères permettent de visualiser les axes transversaux, nommés transects ou profils, qui ont été sélectionnés pour leur représentativité d'une partie du linéaire côtier, mais aussi parce que ces secteurs présentaient des signes de « faiblesses » ou des enjeux importants.

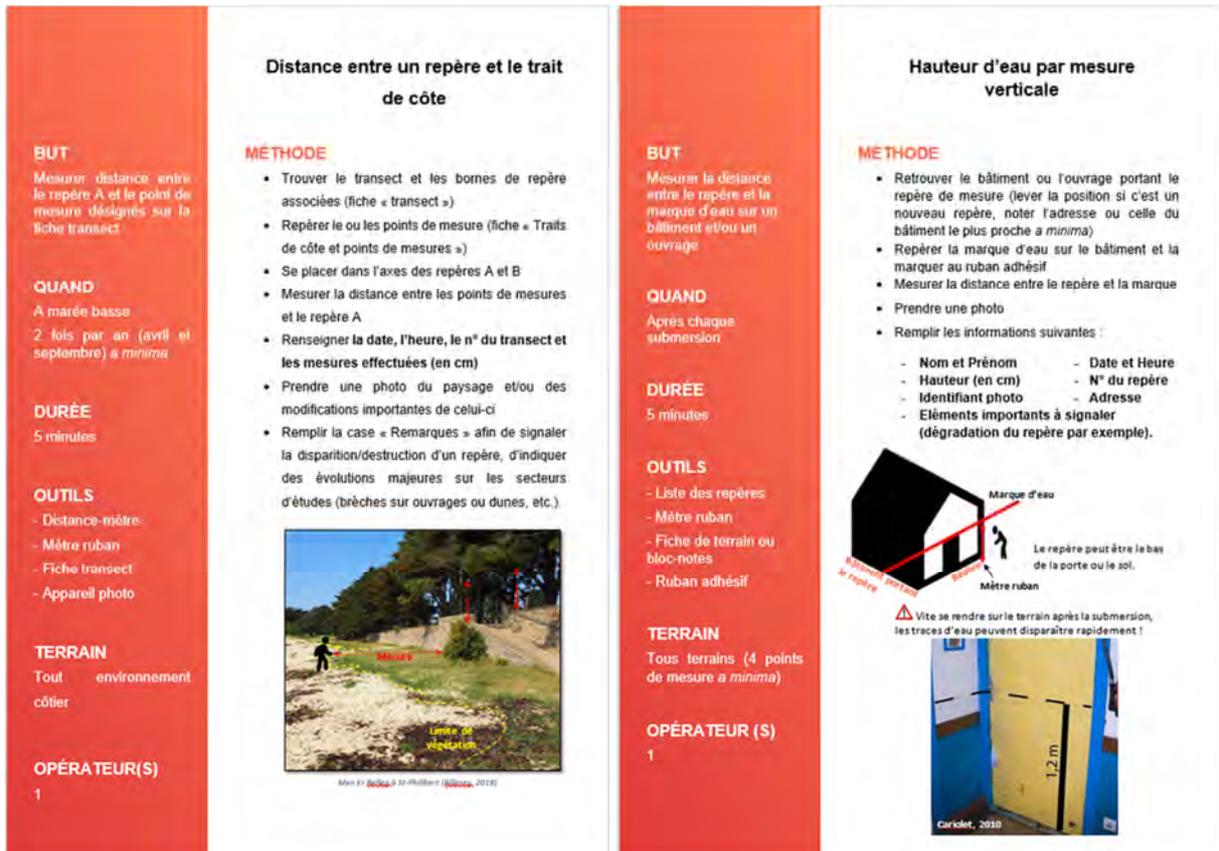


Figure 3.37 : Exemples des protocoles « distance entre un repère et le trait de côte » et « hauteur d'eau par mesure verticale » (d'après Gbégnon, 2019)

b. ...à l'opérationnel

Les questions du choix des méthodes à réaliser par les gestionnaires, de l'accès au matériel de mesure, de l'accompagnement technique et méthodologique requis pour former les personnes en charge de la collecte des mesures, de la mutualisation de ces données et de leur diffusion sont majeures pour la réussite d'un observatoire.

Pour réussir le passage du théorique à l'opérationnel, une méthodologie a été développée pour la mise en place des suivis de l'érosion côtière et de la submersion marine (Figure 3.38). Les différents supports ont été réalisés pour les communes-test de Saint-Philibert et Locmariaquer, dans le golfe du Morbihan (dans le cadre du projet OSIRISC+, financé par la DREAL Bretagne). La création de ces supports spécifiques aux communes nécessite un investissement important (un stage de M2 sur 4-6 mois, Billerey, 2018).

Il s'agit d'expliquer la marche à suivre pour 1) identifier les zones de suivi (transects), 2) choisir les protocoles en fonction des sites et des indicateurs, 3) identifier les points de repère pour faire les protocoles facilement, 4) collecter les données grâce à la fiche de terrain, 5) traiter les données et les diffuser.

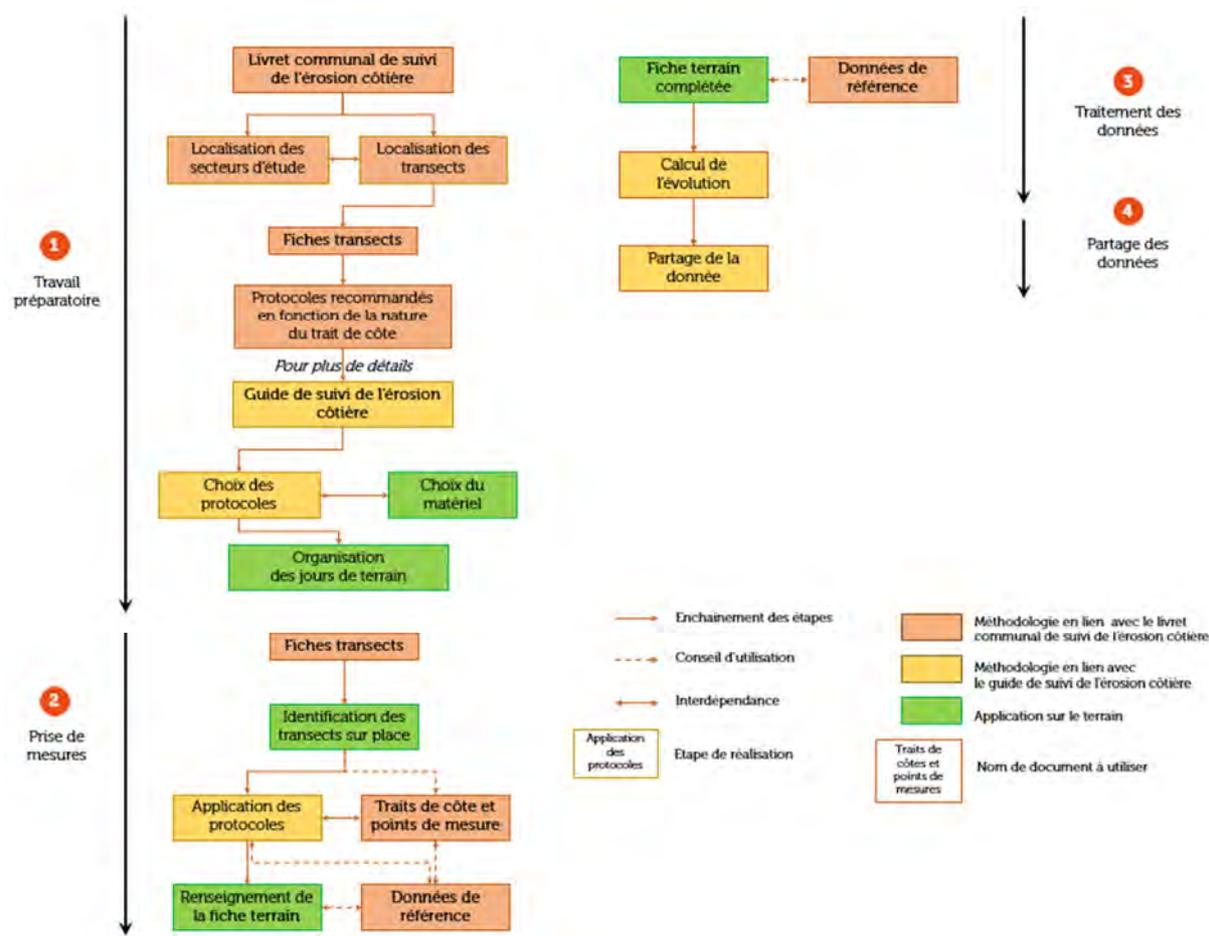


Figure 3.38 : Organigramme récapitulant les étapes pour un suivi des indicateurs d'érosion côtière (d'après Billerey, 2018)

Pour cela, plusieurs supports ont été imaginés pour aider les gestionnaires :

- deux guides généralistes (suivi de l'érosion côtière et celui de la submersion marine) récapitulant les différentes fiches et les différents protocoles à disposition (exemple de l'érosion côtière à partir du b) :

- les fiches « indicateurs » qui renseignent sur la nature de l'aléa étudié, sur l'intérêt de l'indicateur, les différents protocoles de mesure avec leurs références bibliographiques, la périodicité de suivi et l'échelle de suivi, son impact sur la vulnérabilité du territoire et les seuils permettant la cotation de l'indicateur ;
- les fiches « traits de côte et points de mesures », afin d'identifier la même limite mobile relative au trait de côte et de visualiser les points de mesure sur l'espace suivi ;
- les fiches « transects », avec la présentation du secteur d'étude, l'identifiant du transect, sa commune, sa localisation, les bornes de repères pour retrouver les transects sur le terrain, des points de mesures identifiables et des protocoles réalisables ;
- les fiches « terrain », qui regroupent les mesures réalisées sur le terrain. Elle sert de base aux calculs de vitesses de recul du trait de côte, ainsi qu'aux calculs de surfaces et volumes érodés ;
- les protocoles décrits « pas à pas », de la collecte aux traitements des données.

- le livret communal de suivi de l'érosion côtière (Figure 3.39) présente tous les documents nécessaires aux suivis des sites de la commune avec 1) la localisation des transects, 2) les protocoles adaptés aux sites,

3) le trait de côte et les points de mesures, 4) les données de référence (les premiers levés réalisés par l'équipe OSIRISC et qui constituent les états antérieurs du suivi).



Figure 3.39 : Extrait de la page 9 du livret communal de Locmariaquer avec l'exemple de la fiche transect 2 (Billerey, 2018)

L'organigramme (Figure 3.38) laisse une marge de manœuvre aux gestionnaires locaux en leur laissant choisir les protocoles en fonction du type de mesures et d'outils à disposition, de l'emprise spatiale du phénomène qu'ils souhaitent suivre, la périodicité des mesures, du personnel dédié à cette tâche.

3.4.1.3 Indices

Les indices présentés ici sont issus des travaux publiés de Le Berre et al. (2022) (Tableau 3.18). Pour les aléas, il nous a semblé opportun de conserver la valeur maximale des indicateurs avec une absence de pondération des indicateurs entre eux. Cela permet de mettre en évidence les mailles de 200 m les plus exposées. Par ailleurs, tout aléa étant égal par ailleurs, un indicateur de submersion marine a la même valeur qu'un indicateur d'érosion côtière et inversement.

Indice	Type d'indices	Description	Commentaire
Aléa « érosion »	Thématique	$A_{\text{éro}}$: distance érodée par 100 mètres linéaires	La surface ou le volume érodé(e) peut également être pris(e) en compte.
Aléa « submersion »	Thématique	A_{sub} : hauteur potentielle de submersion	
Aléas	De composante	$IC_{\text{Aléas}} = \text{fmax}(A_{\text{éro}}, A_{\text{sub}})$	L'aléa de migration dunaire, qui est très peu présent en Bretagne, pourrait être intégré à l'indice.

Tableau 3.18 : Indices thématiques et de composante pour les aléas (Le Berre et al., 2022)

Comme l'écrivent Le Berre et al. (2022), il y a une grande diversité d'exposition aux aléas qui découle d'une géologie complexe déterminant à la fois la disponibilité des stocks sédimentaires, la succession de pointes rocheuses et d'anses de dimensions variées, l'orientation des côtes par rapport aux vagues et aux vents. Cette complexité mène à une forte fragmentation et une faible emprise spatiale des espaces exposés aux aléas (en dehors de la baie d'Audierne et de la baie du Mont-Saint-Michel). Les régions basses ressortent cependant : au nord, la baie du Mont-Saint-Michel et Saint-Malo, le Haut-Léon et la côte des légendes ; au sud, le pays bigouden (entre l'anse de Combrit et l'embouchure de l'Odet) et de Fouesnant jusqu'à Concarneau, de Lorient à Etel, puis le golfe du Morbihan. Les aléas côtiers d'érosion et de submersion étant le plus souvent étroitement associés, ils ont été représentés sur la même carte (Figure 3.40).

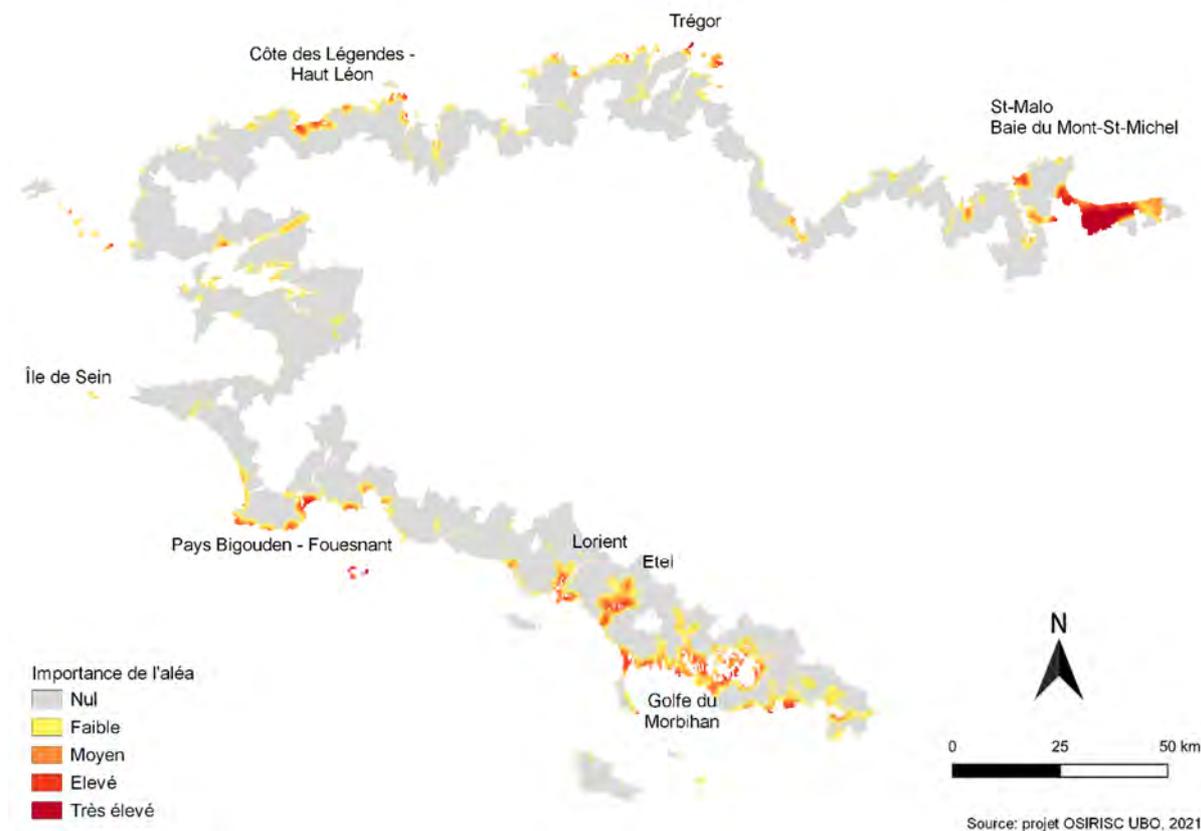


Figure 3.40 : Exposition du littoral breton aux aléas d'érosion côtière et de submersion marine, dans le cadre de l'observatoire OSIRISC (Le Berre et al., 2022)

3.4.1.4 Diffusion au sein d'une interface web-SIG, nommée OSI

Les indicateurs et indices sont visualisables au sein de l'interface web-SIG OSI (<https://osi.univ-brest.fr/>). Elle permet l'intégration et le catalogage des données des gestionnaires et des scientifiques dans une base de données cohérente et sécurisée. Elle permet la visualisation de l'inventaire complet des indicateurs, des indices et de leurs métadonnées. Enfin, elle propose un tableau de bord graphique et cartographique interactif permettant de visualiser et de suivre la vulnérabilité dans toutes ses dimensions spatiale, thématique et temporelle. Son architecture repose sur des solutions libres (Marcel et al., 2018) à partir desquelles l'interface fait l'objet de développements continus (Le Berre et al., 2022).

3.4.2 CoastAppli

3.4.2.1 Outils de mesure utilisés dans l'application

Dans le cadre de ce projet de formation et de recherche, initié en 2019, l'application smartphone et tablette Android CoastAppli¹⁴⁶ est pensée pour que le suivi se fasse simplement : avec des instruments de mesure (décamètre par exemple) permettant une saisie directe¹⁴⁷, mais aussi sans. Pour cela, les étudiants ont réfléchi à trois « outils » de mesure présents sur soi et qui permettent de faire des mesures verticales et horizontales (Figure 3.41) :

1) le pas (pour réaliser le « coefficient de pas ») : cela correspond à la distance d'une foulée moyenne de l'utilisateur de talon à talon (permettant de réaliser des mesures horizontales, de préférence plurimétriques) (Figure 3.41A) ;

2) l'index (pour faire les « index successifs ») : il s'agit de la distance du bout du doigt jusqu'au centre de la tête du métacarpe (permettant d'effectuer des mesures horizontales et verticales, de préférence inframétriques) (Figure 3.41B) ;

3) la personne étalon : c'est la hauteur de la personne prise en photo devant un objet d'intérêt (permettant de faire des mesures verticales) ; un autre utilisateur doit tenir le smartphone ou la tablette (Figure 3.41C).

Lors de l'inscription à l'application, au moins un de ces trois outils de mesure corporels doit être renseigné par l'utilisateur pour pouvoir réaliser les levés. La Figure 3.41A montre, par exemple, comment calculer son pas avec un décamètre posé au sol. Plusieurs valeurs peuvent être renseignées par outil de mesure, car l'utilisateur peut être accompagné lors des levés et faire participer d'autres personnes aux mesures.

Ces outils de mesure vont permettre de faire deux types de saisies (en complément de la saisie directe) :

- par répétition : en indiquant le nombre de pas ou d'index successifs compté pour mesurer une longueur ou une hauteur ;

- par comparaison : en photographiant la personne étalon sur le même plan que l'objet à mesurer, l'application utilise un système de réglettes pour déterminer la hauteur de l'objet d'intérêt. Ainsi, sur la photographie, une première réglette est à positionner pour déterminer la hauteur de la personne étalon. Cette hauteur étant préalablement entrée dans l'application, la taille moyenne d'un pixel peut être déduite.

¹⁴⁶ CoastAppli est téléchargeable sur <https://www.isblue.fr/pratiques-innovantes/coastappli/>.

¹⁴⁷ Une saisie directe est réalisée avec un instrument de mesure, type décamètre ou mètre ruban, qui fournit directement la valeur mesurée (donc considéré comme une mesure plus précise).

Une deuxième règle est ensuite à positionner sur l'objet d'intérêt à mesurer. En calculant le nombre de pixels nécessaires, la hauteur de l'objet d'intérêt est déterminée (Figure 3.41C).



Figure 3.41 : Outils de mesure présents sur soi qui sont intégrés dans CoastAppli (A : le pas ; B : l'index ; C : la personne étalon) (d'après Derval, 2021)

Ces outils (pas, index et personne étalon) et types de saisie (directe, par répétition et par comparaison) ont été mis en place pour permettre au grand public de collecter de la donnée. Il est évident que l'exactitude et la précision des données seront différentes en fonction des outils de mesure et des types de saisie. C'est la raison pour laquelle ces paramètres sont intégrés dans les métadonnées des mesures.

3.4.2.2 Protocoles à Guissény : en fonction des sites et du profil de l'utilisateur

Avec le projet OSIRISC, 20 protocoles étaient proposés pour mesurer les aléas côtiers (Philippe et al., 2021), mais ils n'étaient pas tous intégrables facilement dans une application smartphone et tablette. Après une étude de faisabilité par les étudiants et l'équipe du projet, seuls huit protocoles ont été sélectionnés (Tableau 3.19). Ils sont transposables sur les différents types de côtes (d'accumulation, d'ablation et artificialisées).

Le suivi photographique permet un suivi qualitatif des dynamiques paysagères. Il consiste à prendre des photographies selon un quadrillage et des repères fixes disposés sur ce dernier. Il permet ainsi un bon alignement des clichés et d'éviter la mise en place d'un support fixe sujet aux dégradations (retours d'expérience de CoastSnap, où cette étape d'alignement *a posteriori* est coûteuse en temps et où les supports fixes peuvent être détériorés). La mesure verticale sur le haut de l'estran vise à mesurer la hauteur de sédiments par rapport à un point fixe sur le haut de la plage. Cette mesure est associée à la mesure verticale sur le bas de l'estran afin de mesurer l'évolution des sédiments sur deux points de la plage (transect). Ces mesures sont particulièrement utiles pour suivre l'évolution des sédiments au niveau des ouvrages, où les données manquent (pas de données INEC par exemple). Pour suivre la mobilité du trait de côte, la distance entre un

repère et le trait de côte mesure la position du trait de côte (par exemple le référentiel de la dune blanche) par rapport à un repère fixe. La pente de plage s'appuie sur la mesure d'angle à chaque rupture de pente, à l'aide d'un inclinomètre.

Pour que l'application soit intelligible et donc adaptée aux connaissances de chacun, nous avons défini trois profils d'utilisateurs (débutant, habitué et gestionnaire¹⁴⁸) donnant accès à certains protocoles de mesure. Lors de l'inscription, l'utilisateur sélectionne son profil (qui peut être modifié ultérieurement) au regard des explications. Les protocoles les plus simples sont accessibles à tous les profils, et ceux, plus complexes tels que la pente de plage, réservés seulement aux gestionnaires. Cela permet d'avoir une application simple pour ceux qui la découvrent, de fidéliser l'utilisateur qui va découvrir de nouveaux protocoles au fur et à mesure de sa montée en compétences et de limiter les erreurs de mesure qui seraient dues à une mauvaise compréhension des protocoles (Tableau 3.19).

Protocole d'érosion côtière	Protocole de submersion marine
Suivi photographique	Hauteur d'eau par mesure verticale
Mesure verticale sur le haut de l'estran	Hauteur d'eau par lecture sur une échelle graduée
Mesure verticale sur le bas de l'estran	Hauteur d'eau par photographie
Distance entre un repère et le trait de côte	Emprise de la submersion par le levé des laisses de mer au GPS/dGPS
Pente de plage	Emprise de la submersion par le levé des laisses de mer par une application mobile
Profil de plage par cordage gradué	Linéaire exposé au franchissement de paquets de mer et le sens de l'écoulement par l'observation par webcam
Profil de plage par télémètre, distancemètre ou niveau	Recueil de témoignages par entretien
Profil de précision de plage par télémètre laser, DGPS ou tachéomètre	Recueil de témoignages à distance
Surface érodée sur une côte rectiligne	Recueil de témoignages par une application mobile
Volume érodé sur une côte rectiligne	
Prise de vue quantitative d'un mouvement de terrain	

Tableau 3.19 : Tri des protocoles du projet OSIRISC intégrables actuellement dans CoastAppli (un protocole est barré lorsqu'il n'est pas intégrable) et en fonction du profil de l'utilisateur (en blanc : pour les débutants, habitués et gestionnaires ; en marron clair : pour les habitués et gestionnaires ; en marron foncé : uniquement pour les gestionnaires)

Le choix des protocoles a, comme les sites de suivis, été coconstruit avec les élus et les gestionnaires. Suite à une sortie commune sur la côte de Guissény, nous avons identifié les protocoles réalisables sur ce territoire

¹⁴⁸ L'utilisateur est considéré comme « débutant » lorsqu'il ne connaît ni le territoire sur lequel il souhaite faire le suivi ni l'application CoastAppli. De ce fait, le nombre de protocoles est limité afin de se familiariser au territoire et au suivi des aléas côtiers d'érosion et de submersion marine. Un « habitué » connaît le territoire sur lequel il souhaite faire le suivi et a déjà utilisé CoastAppli. Une grande partie des protocoles associés au site lui sont accessibles. Le profil de « gestionnaire » correspond à un professionnel travaillant dans le suivi des aléas côtiers sur les territoires concernés. Le statut de gestionnaire dans CoastAppli est donné par le scientifique référent du site. Il ne présage pas de la qualité d'élu ou d'agent de collectivité de la personne concernée.

à l'aide de repères présents sur le terrain (pour ne pas altérer le paysage), ayant une bonne visibilité sur le terrain et demeurant fixes dans le temps (dans le cas de la création de transects, les repères doivent être alignés avec au moins deux repères fixes) comme des rochers, des cheminées de maison, des panneaux de signalisation (Tableau 3.20).

Site	Protocole d'érosion côtière	Protocole de submersion marine
Plage de la Croix	Suivi photographique	Hauteur d'eau par mesure verticale
	Mesure verticale sur le haut de l'estran	Hauteur d'eau par photographie
	Mesure verticale sur le bas de l'estran	
	Distance entre un repère et le trait de côte	
Plage de Nodéven	Suivi photographique	Hauteur d'eau par mesure verticale
	Mesure verticale sur le haut de l'estran	Hauteur d'eau par photographie
	Distance entre un repère et le trait de côte	
Plage du Vougo est	Suivi photographique	
Plage du Vougo ouest	Suivi photographique	

Tableau 3.20 : Protocoles d'érosion côtière et de submersion marine en fonction des sites de Guissény

Pour présenter l'application et pour bien comprendre la prise de mesures *via* les protocoles d'érosion côtière, une vidéo, réalisée par Q. Millière (médiateur scientifique) et R. Ruault (ingénieure pédagogique), est disponible sur <https://youtu.be/DnqKU5k7JDk>.

3.4.2.3 Badges pour engager les utilisateurs

Afin de favoriser l'engagement des utilisateurs, deux badges ont été mis en place dans l'application, car la ludification peut être un levier puissant (Monterrat et al., 2017). Ces badges sont attribués à l'utilisateur (visible sur son profil) en fonction 1) de la fréquence des mesures réalisées sur un seul site (badge « fréquence »), 2) du nombre de sites suivis par l'utilisateur (badge « explorateur »). Pour chaque badge, trois couleurs (bronze, argent, or) sont proposées selon des seuils définis par nos soins (Tableau 3.21). Par ailleurs, pour les scientifiques et les gestionnaires, il est possible de connaître les contributeurs les plus actifs et de pouvoir les contacter pour avoir des retours d'expérience sur l'application et leurs observations.

	Badge « fréquence »	Badge « explorateur »
Bronze	10 observations sur un site	3 sites de mesure ¹⁴⁹
Argent	25 observations sur un site	10 sites de mesure
Or	50 observations sur un site	20 sites de mesure

Tableau 3.21 : Couleurs de badge et les seuils associés

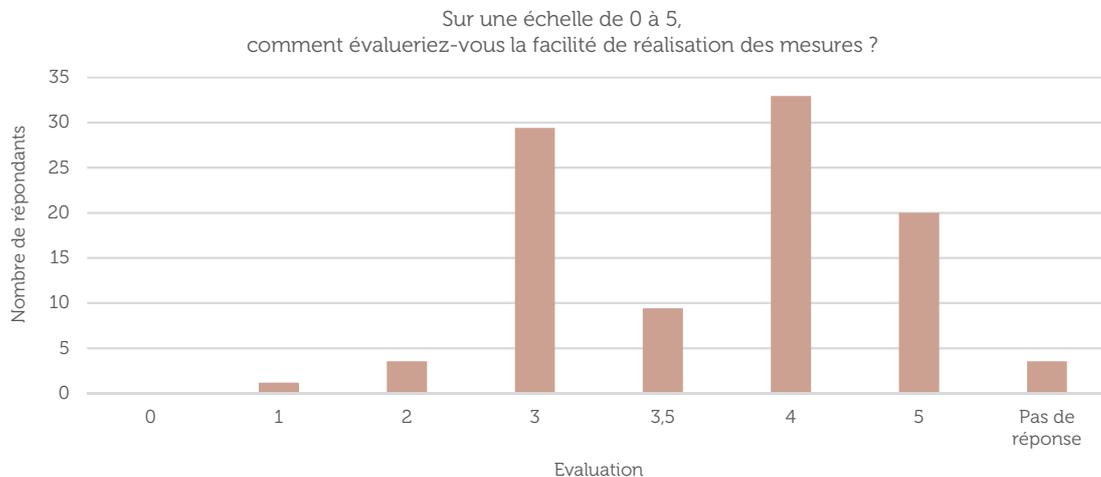
¹⁴⁹ Pour l'instant, seul le badge explorateur en bronze est atteignable, car nous n'avons que quatre sites de suivi.

3.4.2.4 Utilisateurs et leur retour d'expérience

La phase de test a duré de janvier à octobre 2022. Grâce à N. Loncle et N. Floch, nous avons recruté cinq habitants et nous avons pu travailler avec les élèves de 6^e, 5^e et 4^e du collège Diwan de Guissény (environ 80 collégiens au total), grâce à l'aide de V. Ar Gall et D. Chorlay, enseignants en mathématiques, physique et sciences de la vie et de la Terre.

Après une matinée de formation sur les aléas et risques côtiers (dispensée par N. Loncle et N. Floch) et sur la prise en main de l'application ou des carnets de terrain papier¹⁵⁰ (dispensée par R. Ruault, Q. Millière et moi), les utilisateurs étaient autonomes et pouvaient nous transmettre leur retour d'expérience par appel téléphonique ou courriel sur l'intelligibilité et l'ergonomie des protocoles de CoastAppli. Les difficultés pour chaque protocole (identifier le bon trait de côte ou repère, partir du bon endroit pour la mesure, etc.) ont donc été identifiées. De plus, à la fin de la phase de test, nous avons demandé aux utilisateurs de remplir un questionnaire d'une vingtaine de questions. La passation du questionnaire a duré de 15 à 45 min (les collégiens mettant plus de temps à répondre). Les 85 questionnaires ont été créés et analysés par R. Ruault et Q. Millière.

Les principaux résultats sont une bonne intelligibilité des protocoles et une ergonomie facile des mesures à réaliser pour l'application (Graphique 3.4). L'ergonomie conditionne grandement la durabilité de l'engagement. Pour les collégiens, associer des jeux sur l'application leur apparaît comme prioritaire sinon, ils n'utiliseront pas l'application dans le cadre personnel. Pour l'ensemble des catégories de répondants, la motivation d'utiliser l'application sur plus d'un an serait d'autant plus forte si l'application évolue en augmentant le nombre de sites suivis et si l'ergonomie est régulièrement améliorée.



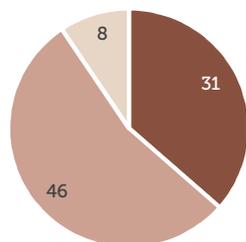
Graphique 3.4 : La facilité ou non de la réalisation de la mesure avec CoastAppli, d'après les 85 questionnaires analysés par R. Ruault et Q. Millière (0 : très difficile ; 1 : difficile ; 2 relativement difficile ; 3 : relativement facile ; 4 : facile ; 5 : très facile ; pas de réponse)

Par ailleurs, les discussions sur le thème des risques côtiers au sein des cercles familiaux et des groupes sociaux par l'entrée de l'application semblent mieux fonctionner que les entrées « classiques » (cours, informations au format papier) avec respectivement 44 répondants sur 85 (Graphique 3.5). Il convient de

¹⁵⁰ Pour les collégiens, les smartphones ne sont pas autorisés pendant les cours. Ainsi, des carnets de terrain s'appuyant sur des captures d'écran de CoastAppli sont utilisés pour réaliser les protocoles. Seul un smartphone, prêté par nos soins, est utilisé avec l'enseignant pour envoyer les données.

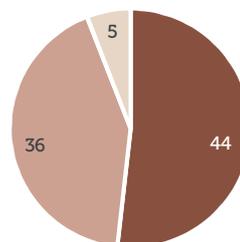
rester prudent, car il serait plus convaincant de comparer ces résultats avec ceux d'un groupe test n'ayant pas utilisé CoastAppli.

Avez-vous déjà discuté des risques côtiers avec votre famille ?



■ Oui ■ Non ■ Pas de réponse

Avez-vous déjà discuté de CoastAppli avec votre famille ?



■ Oui ■ Non ■ Pas de réponse

Graphique 3.5 : La diffusion d'information sur les risques côtiers et CoastAppli auprès des familles, d'après les 85 questionnaires analysés par R. Ruault et Q. Millière

3.4.2.5 Quantification de l'erreur des mesures

Pour que la donnée soit utile pour la production d'indicateurs ou l'analyse locale des évolutions du littoral, la quantification de l'erreur est essentielle (respect du protocole par les contributeurs, erreur de frappe, etc.). La quantification de l'erreur a été réalisée sur les mesures d'érosion côtière, car aucune submersion marine n'a eu lieu durant la période de test. La quantification de l'erreur (Tableau 3.22) s'appuie sur :

- une estimation de l'exactitude des mesures par rapport à la donnée « vraie » : la reconstitution photogrammétrique issue des images drone du 28 mars 2022 à la plage de la Croix (qui possède une erreur en 3D de $\pm 0,03$ m) et des mesures faites par nos soins au décimètre au même moment que les autres utilisateurs ;

- une estimation de la précision à travers la répétitivité de la mesure, notamment grâce à V. Ar Gall et D. Chorlay du collège Diwan. Ces derniers ont réalisé avec les élèves des mesures du 13 décembre 2021 au 17 mai 2022. D'autres mesures pour estimer la précision ont été réalisées lors de la sortie de vérité terrain le 28 mars 2022. N. Floch, gestionnaire, a également été sollicitée pour réaliser des mesures directes pour estimer l'exactitude et la précision de ses mesures.

Les profils « débutant » ou « habitué » utilisent la saisie directe, mais aussi celle par répétition et par comparaison. Le profil gestionnaire utilise uniquement la saisie directe. Pour les débutants et habitués, entre ces types de saisies, les erreurs sont différentes : l'exactitude est de 0,03 m et la précision de 0,10 m en saisie directe (soit une erreur globale¹⁵¹ de $\pm 0,11$ m), de 0,07 et 0,15 m en saisie par répétition (soit une erreur globale de $\pm 0,17$ m), et de 0,10 m et 0,25 m en saisie par comparaison (soit une erreur globale de $\pm 0,23$ m). Pour le profil « gestionnaire », le recours à la saisie directe et l'expérience améliorent l'exactitude et la précision à 0,03 m chacune (Tableau 3.22). L'erreur globale minimale ($\pm 0,04$ m) du côté gestionnaire souligne que les données acquises *via* l'application peuvent être complémentaires de celles des scientifiques

¹⁵¹ Selon la formule classique d'erreur globale : $E_g = \sqrt{\text{exactitude}^2 + \text{précision}^2}$

et alimenter le jeu de données utile pour répondre à des problématiques de gestion du littoral. Cette exactitude et cette précision sont un premier ordre de grandeur et devront être évaluées régulièrement, notamment la saisie par comparaison et sous diverses conditions météorologiques.

Erreur (m)	Type de saisies	Débutant ou habitué	Gestionnaire
Exactitude avec la métrique de l'erreur moyenne	Saisie directe	0,03	0,03
	Saisie par répétition	0,07	
	Saisie par comparaison	0,10	
Précision avec la métrique de l'écart type	Saisie directe	0,10	0,03
	Saisie par répétition	0,15	
	Saisie par comparaison	0,25	

Tableau 3.22 : Exactitude et précision des mesures sur CoastAppli pour les débutants, les habitués et les gestionnaires (données de V. Ar Gall, D. Chorlay, R. Ruault, Q. Millière, N. Floch)

3.4.2.6 Premiers résultats du suivi citoyen de l'érosion côtière

Du 17 janvier au 14 octobre 2022 inclus, l'application a reçu 359 contributions pour le suivi de l'érosion côtière (Tableau 3.23). Sans surprise, le suivi photographique a bien fonctionné à Guissény (142 contributions sur 359), car ce protocole est disponible sur les quatre sites, facile, rapide et ludique. En revanche, c'est la mesure verticale sur le haut de l'estran (disponible à la plage de la Croix et à celle de Nodéven) qui a été le protocole le plus utilisé avec 178 contributions, alors que l'engagement en compétence et en temps y est plus fort. La volonté de participer au suivi quantitatif (au-delà du qualitatif) semble donc importante. Les autres protocoles, distance entre un repère et le trait de côte (disponible à la plage de la Croix et à celle de Nodéven) et mesure verticale sur le bas de l'estran (disponible uniquement à la plage de la Croix), ont reçu respectivement 26 et 13 contributions (Tableau 3.24).

		Plage du Vougo ouest	Plage du Vougo est	Plage de Nodéven	Plage de la Croix	Total
Citoyens	Habitants	18	33	56	94	201
	Collégiens	0	0	0	151	151
Gestionnaires		0	0	0	7	7
Total		18	33	56	252	359

Tableau 3.23 : Nombre de contributions par site en fonction des utilisateurs (du 17/01/2022 au 14/10/2022)

Site	Suivi photographique	Mesure verticale sur le haut de l'estran	Mesure verticale sur le bas de l'estran	Distance entre un repère et le trait de côte
Plage du Vougo ouest	18			
Plage du Vougo est	33			
Plage de Nodéven	18	26		12
Plage de la Croix	73	152	13	14
Total	142	178	13	26

Tableau 3.24 : Nombre de contributions par site en fonction des protocoles d'érosion côtière (du 17/01/2022 au 14/10/2022)

Avec 151 contributions des collégiens, 94 des habitants et sept des gestionnaires, l'application a été particulièrement utilisée sur la plage de la Croix (Tableau 3.23). Sur ce site, tous profils confondus, 13 mesures verticales sur le bas de l'estran (accessible uniquement à marée basse), 14 mesures de distance entre un repère et le trait de côte, 73 suivis photographiques et 152 mesures verticales sur le haut de l'estran ont été réalisés (Tableau 3.25). Les premiers résultats de CoastAppli portent donc sur la plage de la Croix (Figure 3.42).

Plage de la Croix		Suivi photographique	Mesure verticale sur le haut de l'estran	Mesure verticale sur le bas de l'estran	Distance entre un repère et le trait de côte
Citoyens	Habitants	22	50	9	13
	Collégiens	49	99	3	0
Gestionnaires		2	3	1	1
Total		73	152	13	14

Tableau 3.25 : Nombre de contributions par protocole d'érosion côtière à la plage de la Croix en fonction des utilisateurs (du 17/01/2022 au 14/10/2022)

Le suivi a été régulier (tous les protocoles par site ont été levés au moins une fois par mois), ce qui correspond à une fréquence de levés importante, que les gestionnaires et les scientifiques ne pourraient atteindre actuellement. Le suivi qualitatif (photographies) met bien en évidence l'évolution de la plage et de la végétation (Figure 3.42). Les évolutions sont limitées, car l'hiver n'a pas été tempétueux et la position du site dans l'estuaire limite l'entrée des vagues de tempête. Les premiers levés quantitatifs traduisent un niveau de sable en haut de plage relativement stable (sauf sur le repère 2) et un niveau en bas de plage qui augmente après la période hivernale avec des évolutions significatives par rapport à l'exactitude et précision des mesures (erreur globale de $\pm 0,11$ m en saisie directe, Tableau 3.22). Mais ce suivi sur quelques mois ne nous permet pas d'aller plus loin. Seul un suivi sur plusieurs années nous permettra de renseigner l'évolution de ce site.

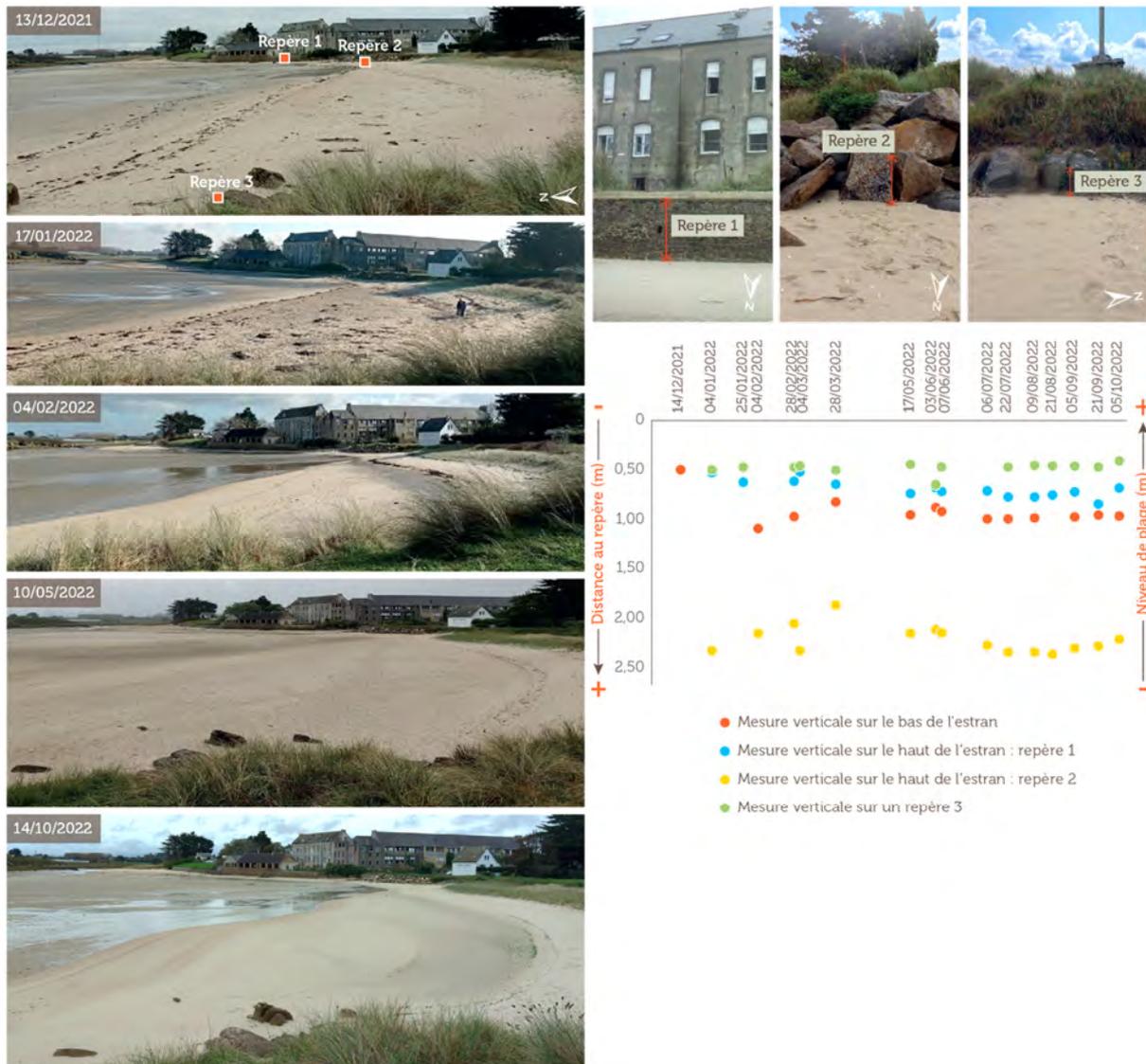


Figure 3.42 : Evolution de la plage de la Croix du 13/12/2021 au 14/10/2022 avec les données de CoastAppli (suivis qualitatif et quantitatif en saisie directe)

3.4.3 Discussion

Depuis des décennies, les scientifiques ne sont plus cantonnés à leur laboratoire et se trouvent souvent à l'interface avec les citoyens, notamment avec la recherche opérationnelle, d'autant que le grand public a une « confiance forte » dans les scientifiques (comparativement à d'autres acteurs de la société, comme les politiques ou les journalistes¹⁵²). Comme l'écrit Pielke (2007), il existe quatre rôles légitimes du scientifique : le scientifique pur et le scientifique arbitre qui produisent des connaissances scientifiques et se désintéressent de leur usage par la société, tandis le scientifique « engagé » (dans le sens de plaider) et « l'intermédiaire honnête » (*the honest broker*) partagent la connaissance scientifique et sont aussi prêts à s'investir dans le débat public. Lorsque le scientifique promeut une interprétation des résultats de la science en accord avec

<https://www.francebleu.fr/infos/sante-sciences/les-francais-ont-confiance-en-la-science-selon-une-etude-de-l-universite-de-lorraine-1637137684>

ses valeurs, il est considéré comme engagé, tandis que l'intermédiaire honnête élargit l'expertise¹⁵³ et propose une revue complète des savoirs concernant l'objet scientifique en question (Guilyardi, 2020). Dans le cadre d'OSIRISC, cette expertise, que nous espérons d'intermédiaire honnête, se veut de plus en plus souvent partagée, démocratisée, grâce à sa coconstruction avec de nombreux acteurs locaux. Cette coconstruction permet, sur le temps long, de générer une confiance et une compréhension mutuelle, d'échanger avec un vocabulaire commun, mais aussi de mieux appréhender les valeurs partagées qui président à la défense de l'intérêt général plutôt qu'à celles d'intérêts particuliers. Cependant, cette démocratisation de l'expertise doit s'appuyer sur un certain recul des scientifiques vis-à-vis des limites de la science dans la prise de décisions politiques, tout comme les élus et autres décideurs qui doivent assumer que leurs décisions relevant de l'éthique ou de l'intérêt général peuvent s'éloigner de fondements scientifiques (Bonneuil et Joly, 2013).

Cette recherche opérationnelle et sa mise à disposition pour et par une grande variété d'acteurs possèdent ainsi trois intérêts majeurs : 1) l'acculturation des élus, gestionnaires, citoyens aux thématiques de recherche, mais aussi celle des scientifiques aux problématiques opérationnelles de ces acteurs, 2) leur montée réciproque en compétence (concepts, indicateurs, mesures avec des protocoles et des outils variés, pédagogie, etc.), 3) une bonne diffusion par les médias et par les instituts de recherche, car le lien entre les scientifiques et les citoyens est souvent mis en avant (pour CoastAppli en 2022 : quatre articles ou vidéo de presse et une visite grand public dans le cadre de CNRS insolite). Les partenariats noués sont riches en retours d'expérience sur le suivi des aléas et des risques côtiers avec la proposition de nouvelles idées, par exemple sur les sites et sur les protocoles à intégrer au suivi.

Dans OSIRISC, la création d'un nombre limité d'indicateurs, qui seront combinés en indice, pour arriver à une analyse de la vulnérabilité systémique de l'érosion côtière et de la submersion marine conduit à une perte d'informations (Gallopín, 2006) et ne se substituent pas à la connaissance du terrain et à l'analyse approfondie des données et de la méthode qui les ont créées. Comme la signification accordée aux résultats et leur réception par les acteurs concernés se révèlent déterminantes (Nardo et al., 2005 ; Levrel et al., 2010), pouvoir déconstruire ces indicateurs pour accéder à ces « données brutes » et éviter un effet « boîte noire » demeurent essentiels (Turner et al., 2003 ; Balica et al., 2012).

La calibration des indicateurs d'érosion, actuellement faite à l'échelle de la Bretagne, pourrait être étendue à l'échelle nationale. En effet, avec la base de données INEC, une cotation des variables relatives à l'évolution du trait de côte (devenant indicateurs) en fonction des grandes façades littorales est proposable par la succession de quatre étapes :

1) le littoral métropolitain a été découpé en cinq façades en fonction de leur exposition aux paramètres côtiers et marins : façade nord (de la frontière belge au cap de la Hague, soit un linéaire côtier de 1 219 km) ; la façade bretonne nord (du cap de la Hague à la rade de Brest, 1 995 km) ; la façade bretonne sud (du goulet de Brest à l'estuaire de la Loire, 2 538 km) ; la façade atlantique (de l'estuaire de la Loire à la frontière espagnole, 2 064 km) et la façade méditerranéenne (3 423 km) ;

¹⁵³ L'expertise est entendue comme la traduction « *d'un ensemble de connaissances scientifiques au service de la société* » (Guilyardi, 2020, p. 8).

2) les côtes ont été classées par leur morphologie (les côtes artificialisées ne sont pas prises en compte) en s'appuyant sur la BD « Nature du trait de côte »¹⁵⁴ : côtes d'ablation et côtes d'accumulation ;

3) pour chaque morphologie, une répartition des côtes par leurs caractéristiques géologiques et sédimentaires est réalisée : pour les côtes d'ablation, on distingue trois catégories (roches très dures et résistantes : roches plutoniques, métamorphiques et volcaniques ; roches sédimentaires ; roches meubles composées de dépôts marins et continentaux) ; pour les côtes d'accumulation, trois catégories sont choisies (galets ; sable ; vase) ;

4) une discrétisation est ainsi possible, basée sur la distribution des valeurs d'évolution du trait de côte en fonction des façades, par type de côtes et caractéristiques géologiques et sédimentaires (Tableau 3.26).

Façade	Limite de la façade	Type de côtes	Cote	Seuils d'érosion côtière (en m/an)
Nord	De la frontière belge au cap de la Hague	Côte d'ablation dure	1	0
			2	[-0,05 ; 0,00[
			3	[-0,09 ; -0,05[
			4	[-0,12 ; -0,09[
			5	[-0,20 ; -0,12[
		Côte d'ablation meuble	1	0
			2	] -0,17 ; 0,000[
			3	] -0,25 ; -0,17[
			4	] -0,41 ; -0,25[
			5	] -0,51 ; -0,41[
		Côte d'ablation sédimentaire	1	0
			2	[-0,05 ; 0,00[
			3	[-0,09 ; -0,05[
			4	[-0,12 ; -0,09[
			5	[-0,20 ; -0,12[
		Côte d'accumulation de galets	1	0
			2	] -0,22 ; -0,00[
			3	] -0,63 ; -0,22[
			4	] -0,97 ; -0,63[
			5	] -1,49 ; -0,97[
		Côte d'accumulation de sable	1	0
			2	[-0,26 ; 0,000[
			3	[-0,57 ; -0,26[
			4	[-1,52 ; -0,567[
			5	[-5,28 ; -1,52[
Côte d'accumulation de vase	1	0		
	2	[-0,14 ; -0,00[
	3	[-0,30 ; -0,14[
	4	[-0,42 ; -0,30[
	5	[-0,65 ; -0,42[

Tableau 3.26 : Extrait des seuils de cotation de l'indicateur de l'érosion côtière en fonction des types de côtes pour la façade nord (modifié d'après Billerey, 2018)

¹⁵⁴ La « Nature du trait de côte » est catégorisée selon la nomenclature européenne EUROSION (*a European initiative for sustainable coastal erosion management*), mais reportée sur le trait de côte Histolitt de France métropolitaine (V2 IGN-SHOM 2009 ; données disponibles sur géolittoral).

L'intérêt des sciences citoyennes ne fait plus débat et la qualité des publications met en exergue le potentiel de la relation « scientifiques-citoyens » (apports mutuels, reconnaissance, dialogue, valorisation) dans le cadre du suivi du littoral (notamment l'exactitude et la précision des données, explicitées par exemple dans Pucino et al., 2021). L'application CoastAppli permet de collecter de la mesure qualitative, mais aussi quantitative dont la précision, l'exactitude, la fréquence temporelle sur le bas et le haut de l'estran ouvrent de belles potentialités sur le suivi des dynamiques littorales sur tous les types de côtes. Par ailleurs, les sciences citoyennes, au-delà de l'observation et l'acculturation, permettent aussi d'attirer l'attention des médias sur les problématiques des aléas et risques côtiers, comme le soulignait R. Kerguillec (coordinateur de l'OR2C, communication personnelle).

Quant à la mobilisation des utilisateurs, les gestionnaires N. Loncle et N. Floch ont peu participé à la collecte de nouvelles données (sept contributions sur 359). Leur intérêt est réel, mais leur implication fut limitée, car 1) leur planning très chargé leur laisse peu de temps pour aller tester l'application, 2) d'autres levés sont réalisés avec le dGPS et le drone (partenariat notamment avec l'UBO) ne nécessitant pas l'utilisation de CoastAppli. Le partenariat avec le collège Diwan a montré toute sa pertinence, avec des levés mensuels. Ce partenariat effectué sur l'année scolaire 2021/2022 a été reconduit, à leur demande, cette année. Les habitants poursuivent également la collecte de données, ce qui montre un attachement fort à ce projet. Cela permettra de répondre à nos questionnements sur la pertinence de l'application en termes de public, de mesures et de valorisation : l'engagement citoyen est-il durable ? Comment intégrer les citoyens dans les parties « analyse des données » et « interprétation des résultats » ? Comment souhaitons-nous valoriser (entre concertation et implication active du grand public) les résultats de cette recherche ? Le projet de formation et de recherche s'est terminé en 2021, mais le projet continue. Les perspectives de CoastAppli sont développées dans le chapitre suivant (voir 4.3.1).

Chapitre 4 Perspectives de recherche et d'enseignement

Ce chapitre dresse les différentes perspectives en géographie, discipline dont j'apprécie la richesse. Elles sont le fruit de réflexions personnelles et collectives, que ce soit avec les collègues de géographie ou d'autres disciplines, en France, en Grèce ou au Canada (Québec). Les perspectives de recherche et d'enseignement en continuité de projets sont rapidement évoquées tandis que celles correspondant à de nouvelles orientations sont décrites en détail, d'autant plus si elles ont fait l'objet d'un montage de projet. Ainsi, les perspectives concernent parfois les trois prochaines années avec un développement méthodologique très concret, tandis que d'autres sont issues de réflexions plus larges (dans le temps et l'espace) et nécessitent davantage de maturation (intellectuelle et méthodologique).

4.1 Poursuivre l'acquisition de données fiables, homogènes, pérennes, à bas coût, pour tous, pour le suivi et la compréhension des côtes à falaises (France, Grèce)

4.1.1 Point de vue vertical pour les vitesses, les rythmes et les modalités de recul des falaises

4.1.1.1 Mise à jour les vitesses de recul (1966-2020) et export de la méthode en Bretagne

a. Contexte

La loi « Climat et résilience » et ses décrets introduisent des outils et des dispositions¹⁵⁵ pour adapter les territoires littoraux au recul du trait de côte. Ils se basent en grande partie sur les estimations futures de la position du trait de côte (à partir des vitesses de recul passées). De plus, de nouvelles données pouvant alimenter les études sur les vitesses d'évolution du trait de côte sont disponibles (nombreuses et souvent d'excellente qualité). La mise à jour des vitesses de recul est donc un enjeu majeur.

A l'échelle nationale, la mise à jour de l'INEC est souhaitée et coordonnée par le CEREMA. Il s'agit d'avoir quatre traits de côte au minimum entre 1950 et 2020¹⁵⁶ (et non deux comme dans la première version), avec des données d'évolution tous les 50 m (et non tous les 200 m comme initialement), et avec pour les côtes à falaises marquées par un recul rapide, la méthode de casiers¹⁵⁷ (similaire à l'approche fondée

¹⁵⁵ Citons, par exemple, la carte locale d'exposition au recul du trait de côte, le droit de préemption spécifique accordé aux communes, le bail réel d'adaptation à l'érosion côtière, etc.

¹⁵⁶ Les dates souhaitées par le CEREMA sont :

- 1950 (± 10 ans) à partir de la BD Ortho Historique ;
- 2000 (± 2 ans) principalement sur la base de l'Ortholittorale V1 ou de la BD Ortho ;
- 2010 (± 2 ans) principalement sur la base de l'Ortholittorale V2 ou de la BD Ortho ;
- 2020 (± 2 ans) principalement sur la base d'orthophotographies les plus récentes disponibles au moment de l'étude (BD Ortho HR ou Ortholittorale V3) (Hédou, 2022).

¹⁵⁷ La faisabilité de création et d'utilisation de casiers, avec le logiciel MobiTC du CEREMA, fera l'objet de développement (pour le moment, seule la méthode des transects/traces est disponible : <https://github.com/CEREMA/dtermed.MobiTC>).

sur l'aire). Cette mise à jour s'appuierait sur les données des structures d'observation du trait de côte (une majorité fédérée au sein du réseau national des observatoires du trait de côte), quand il y en a à l'échelle départementale, régionale ou interrégionale (Hédou, 2022).

En Normandie, la BD Ortho HR de 2019 de l'IGN (résolution 0,2 m) ou l'orthophotographie littorale acquise durant l'été 2020 par le ROL Normandie-Hauts-de-France sont disponibles. Cette dernière, qui présente une excellente radiométrie, pourrait être intégrée à la mise à jour de l'INEC¹⁵⁸. Au-delà de cette intégration au travail national de la mise à jour INEC, ce nouveau trait de côte permettra de mettre à jour les vitesses de recul (1966, 1995, 2008 et 2020) tous les 50 m avec l'approche fondée sur l'aire (en collaboration avec IDEES-Caen). Un premier travail des étudiants du master environnement, risques et diagnostics territoriaux à Caen (2022), encadré principalement par S. Costa, a permis de digitaliser le haut de falaise en 2020.

Par ailleurs, dans le cadre de l'observatoire OSIRISC, des vitesses d'évolution du trait de côte en Bretagne (tous types de côtes) à échelle fine (tous les 50 m) sont souhaitées pour alimenter la composante « aléas » de la vulnérabilité systémique (maille minimale du web SIG OSI) et pour des problématiques de gestion du littoral. Par ailleurs, la nouvelle ortho-littorale V2 disponible depuis 2022 (<https://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/acces-aux-donnees-et-metadonnees-a1108.html>) fournit des données de bonne qualité. Le calcul des vitesses serait également réalisé par l'approche fondée sur de l'aire, tous les 50 m, avec la même découpe de polygones pour pouvoir comparer les évolutions d'une période à une autre, tous les 50 m¹⁵⁹.

b. Objectif

L'objectif est d'étendre la période de suivi des vitesses de recul des falaises entre le cap d'Antifer et le Tréport de 1966 à 2020 (au lieu de 1966-2008). Pour la Bretagne, il s'agit de mettre en place cette approche fondée sur l'aire sur QGIS, entre 1952 et 2009 pour ensuite pouvoir y ajouter les traits de côte ultérieurs.

c. Méthode

Avec une partie de l'équipe OSIRISC (principalement T. Lami, Q. Ruaud, A. Hénaff, N. Le Dantec, L. David et J. Pierson), la méthode est réalisable sur QGIS de manière semi-automatisée, mais non sans difficulté.

La méthode pour calculer un recul moyen entre deux traits de côte nécessite plusieurs étapes, qui font l'objet d'ajustements pour son automatisation :

- 1) ajouter aux traits de côte, les champs « période » (valeurs : « ancien » et « récent »), ainsi que les dates des levés (AAAA-MM-JJ) et les renseigner ;
- 2) générer des transects perpendiculaires au trait de côte le plus ancien grâce à un trait de côte simplifié (permettant de générer un seul jeu de transects qui sera réutilisable et permettra de comparer les évolutions sur 50 m d'un trait de côte à l'autre) avec l'outil « densifier par le nombre d'intervalles » (intervalle de 50 m) ;
- 3) sélectionner les traits de côte et les découper entre eux ;

¹⁵⁸ La digitalisation pour l'INEC se fait à l'échelle 1/2 500 (contre 1/1 000 dans mon cas). Pour la mise à jour, il semblerait que la BD Ortho IGN de 2019 soit préférée à l'orthophotographie littorale de 2020 (Hédou, 2022).

¹⁵⁹ Alors que les limites des polygones n'étaient pas fixes entre la comparaison des traits de côte deux à deux lors de ma thèse.

- 4) découper les traits de côte obtenus avec les transects pour obtenir des segments ;
- 5) sélectionner les traits de côte découpés obtenus, et calculer la longueur dans la calculatrice de champs (expression = \$length) pour avoir pour chaque segment la valeur de longueur ;
- 6) densifier les traits de côte découpés (rajouter un sommet avec l'outil « densifier par le nombre de sommets ») puis en extraire le sommet période par période. Les points obtenus doivent au minimum contenir la longueur, la période et l'année (qui vont servir de base aux calculs des surfaces) (étape à renouveler pour chaque date) ;
- 7) fusionner les couches « trait de côte » (trait de côte simplifié, densifié et continu) et « transects » (outil « fusionner des couches vecteurs ») ;
- 8) transformer la couche en polygone (outil « mise en polygone ») ;
- 9) calculer la surface du polygone avec l'expression « \$area ». Si des côtes d'accumulation ont été levées, il faut aller chercher les polygones qui peuvent être en accrétion (remplir un champ accrétion et y renseigner « + ») ;
- 10) pour avoir le toponyme, la date et la longueur (information du point), utiliser l'extension « NNjoin » sur chaque fichier de points pour joindre les valeurs attributaires aux polygones (sans cocher « *approximate by centroids* »), ce qui permet de distinguer la date ancienne et la date récente ;
- 11) utiliser la calculatrice de champs : 1) pour le temps écoulé : « year("recent_date" - "ancien_date") », 2) pour la longueur moyenne de trait de côte entre le trait de côte ancien et récent : « mean("ancien_length", "recent_length") », 3) et pour le résultat en distance de recul : surface/longueur moyenne/temps écoulé.

d. Résultats attendus

Les résultats attendus sont :

- d'avoir des données réactualisées sur les vitesses de recul des falaises du cap d'Antifer au Tréport (entre 1966 et 2020), permettant peut-être d'apprécier une accélération des vitesses de recul liée au changement climatique ;
- d'obtenir des vitesses d'évolution comparables pour tous les types de côtes en Bretagne et utilisant les mêmes découpages de polygones pour les différentes mises à jour de la position du trait de côte ;
- d'automatiser au maximum la méthode de calcul des vitesses de recul par l'approche fondée sur l'aire avec la création d'un modèle, voire d'une extension sur QGIS ;
- de comparer nos résultats avec ceux de l'INEC, voire d'intégrer à nos traits de côte, pour la Normandie, celui ancien de la mission orthorectifiée de 1947 du ROL Normandie Hauts-de-France (utilisé par l'INEC, avec les traits de côte de 2014 et 2011-2012) pour vérifier la cohérence des méthodes.

4.1.1.2 Statistiques spatiales pour l'analyse des éboulements/écroulements

a. Contexte

L'arrivée au LETG-Brest de F. Audard, géographe théoricien, et de Julie Pierson, ingénieure d'étude CNRS spécialisée en géomatique, a permis de relancer les recherches sur la distribution aléatoire (ou non) des éboulements/écroulements observés par photo-interprétation (voir 3.1.4), car mes compétences en

statistiques spatiales sont, actuellement, limitées. Cette section est donc le fruit de discussions collégiales avec F. Audard, L. David, J. Pierson et S. Costa.

Sur les 20 séries photographiques disponibles depuis 1939, cette recherche se concentre sur les éboulements/écroulements des orthophotographies IGN entre Etretat et Le Tréport¹⁶⁰ de 2000 à 2015 (soit quatre séries, Tableau 4.1) qui présentent une méthodologie d'acquisition semblable¹⁶¹ garantissant l'homogénéité des données.

Année d'acquisition	Nom (source)	Résolution planimétrique (m)	Nombre d'éboulements/écroulements
2000	BD Ortho (IGN)	0,5	94
2008	BD Ortho (IGN)	0,5	174
2012	BD Ortho (IGN)	0,5	133
2015	BD Ortho HR (IGN)	0,2	87

Tableau 4.1 : Orthophotographies sélectionnées pour l'étude de la distribution spatiale et temporelle des éboulements/écroulements entre 2000 et 2018

Pour rappel, le recensement des 488 éboulements/écroulements a eu lieu à l'échelle 1/2 000 en veillant à ne pas reprendre d'une mission à l'autre les mouvements de masse demeurant longtemps en pied de falaise (Tableau 4.1). Cette base de données sera fréquemment mise à jour (orthophotographies et éventuellement données satellites disponibles), ce qui pourra renforcer cette analyse.

b. Objectif

L'objectif est d'expliquer l'évolution spatiale et temporelle des éboulements/écroulements. Notre hypothèse de départ est que ce phénomène se diffuse dans le sens de la dérive littorale : les mouvements de masse constatés à un instant (t) peuvent trouver une part d'explication dans les éboulements/écroulements survenus à un instant (t-x) dans un voisinage, prédéfini comme impactant, et selon une orientation (la dérive littorale est parallèle au trait de côte, allant du SO au NE). Autrement dit, il s'agit de savoir si la distribution des éboulements/écroulements est aléatoire dans le temps et l'espace (le long de la côte, dans le sens de la dérive littorale) ou non ; sinon, quelle est sa structure spatiale et temporelle ?

c. Méthode

La présence/absence d'un éboulement/écroulement (Y) à l'instant considéré est un événement booléen (qualitatif binaire : présence ou absence). Il est dépendant de variables quantitatives exogènes (X) qui caractérisent les mouvements de masse passés dans le voisinage (la surface (et donc une estimation approximative du volume) et la vitesse de déblaiement des éboulements/écroulements), issues de séries temporelles et que notre hypothèse initiale envisage comme spatialement autocorrélées. La méthode pour réussir à mesurer ce phénomène serait une régression logistique binomiale spatiale avec des algorithmes

¹⁶⁰ Dans cet exercice, la durée moyenne d'évacuation des éboulements/écroulements est nécessaire à notre travail. Or, elle est seulement déductible à partir de missions aériennes anciennes (plus de 30 ans de recul sont souvent nécessaires). Il conviendra de mettre à jour prochainement la section Antifer/Etretat et Etretat/Etretat, lorsque nous aurons plus recul temporel.

¹⁶¹ Les images de l'ortholittorale n'ont pas été utilisées, car l'acquisition des clichés s'est faite sur deux années : été 2012 et été 2013.

dédiés (algorithme « *expectation-maximisation* », algorithme par importance récursive) ou des modèles de statistiques conditionnelles (méthodes des moments généralisés dans leur version linéarisée ou non).

Pour atteindre notre objectif, nous devons isoler les variables explicatives des mouvements de masse en séparant les facteurs spatiaux des facteurs de variables supposées exogènes. Différentes difficultés apparaissent :

1) les variables exogènes ne le sont pas réellement : les termes d'erreur¹⁶² sont *a priori* corrélés entre eux, car issues de séries temporelles, souvent interdépendantes. Ce problème n'est que statistique, puisque c'est le principe même de cette méthode qui nous amène à réaliser ces différents traitements. Si nous admettons que ces phénomènes se diffusent dans le temps, cette autocorrélation temporelle est donc la traduction directe du principe de diffusion temporelle. Il faudra simplement en tenir compte dans les traitements en tant que variables autocorrélées temporellement ;

2) le voisinage est ici très spécifique puisqu'il est « orienté ». L'hypothèse à tester est que ce phénomène se diffuse en suivant une orientation (suivant la dérive littorale, orientée SO/NE, parallèlement au trait de côte d'Étretat au Tréport). Il faut donc définir une nouvelle méthode de constitution d'une matrice de voisinage suivant une orientation de trait de côte, sans choix imposé d'orientation ;

3) la méthode de traitement de ces données existe (McSpatial 2.0 développé pour R par McMillen¹⁶³) et a été appliquée à plusieurs thématiques (Case, 1992 ; Klier et McMillen, 2008 ; LeSage et al., 2011 ; McMillen et Soppelsa, 2015), mais jamais avec une diffusion orientée. Sa mise en pratique nécessite l'élaboration d'algorithmes spécifiques.

Les étapes que nous avons définies sont donc de :

1) créer une base de données (avec des mailles tous les 50 m et numérotées selon l'orientation du trait de côte) recensant les éboulements/écroulements par année et en affectant les vitesses de déblaiement des dépôts par sous-cellule hydro-sédimentaire (voir 3.1.3.3) ;

2) identifier le degré d'autocorrélation spatiale¹⁶⁴ de nos variables : calcul du I de Moran et du I de Moran local (Anselin, 1995, 1996) ;

3) définir une matrice de voisinage, en fonction d'un noyau et d'une bande passante (Figure 4.1). Si ces deux critères sont fixés au départ, une démarche itérative nous amènera à les modifier pour tester différentes configurations et trouver les valeurs optimisant le pouvoir explicatif de nos variables spatiales ;

4) mettre en application une régression logistique binomiale spatiale, reposant sur les variables explicatives identifiées (surface, vitesse de déblaiement) et leurs variables décalées (dans le temps et dans l'espace) correspondantes. Les rares applications de cette méthode n'ont pas testé les différentes possibilités

¹⁶² Appelées aussi « résidus » dans les statistiques appliquées aux sciences sociales, mais ceux-ci sont considérés comme une nouvelle variable qu'on traite comme telle, le terme idoine est « erreur ».

¹⁶³ <https://www.rdocumentation.org/packages/McSpatial/versions/2.0>

¹⁶⁴ « L'autocorrélation mesure la corrélation d'une variable avec elle-même, lorsque les observations sont considérées avec un décalage dans l'espace (autocorrélation spatiale). [...] Les indices d'autocorrélation spatiale permettent de mesurer la dépendance spatiale entre les valeurs d'une même variable en différents endroits de l'espace. Plus les valeurs des observations sont influencées par les valeurs des observations qui leur sont géographiquement proches, plus l'autocorrélation spatiale est élevée » (Salima et Bellefon, 2018, p. 53-54).

de décalage de variables. Nous espérons tester à la fois un modèle d'autorégression simultanée¹⁶⁵ (SAR), un modèle Spatial Lag X^{166} (SLX) et un modèle de panel spatial de Durbin¹⁶⁷ qui permettent l'identification d'effets spatiaux locaux (pour une synthèse, Kopczevska, 2020) afin d'envisager des variables décalées sur les variables explicatives et/ou sur la variable à expliquer, et ce, à plusieurs échelles. Dans ce cadre, la création d'une variable décalée sur une variable qualitative reste à imaginer.

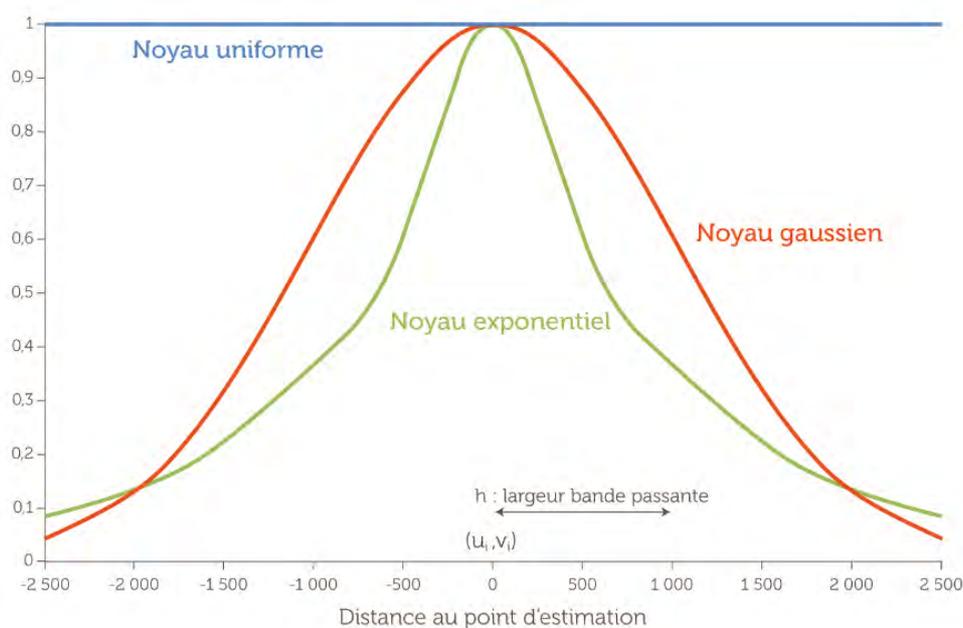


Figure 4.1 : Critères de définition d'une variable décalée spatialement (Loonis et Bellefon, 2018)

d. Résultats attendus

Les résultats que nous souhaiterions obtenir seraient de :

- grâce au calcul du pseudo r^2 , déterminer sur les différents modèles, noyaux et largeur de bande testés, l'échelle de voisinage, la forme du noyau et la largeur de la bande passante les plus pertinentes pour notre jeu de données ;

- calculer l'indice de Moran et les LISA (*local indicators of spatial autocorrelation* ou indicateurs locaux d'association spatiale, Figure 4.2A) pour connaître l'autocorrélation spatiale de nos données à l'échelle globale et aux échelles locales, respectivement ;

- calculer les résidus : si ceux-ci ne sont pas structurés, cela mettrait en évidence que le voisinage joue un rôle et que tout a été expliqué. Si les résidus sont structurés, cela signifie que d'autres variables doivent être prises en compte et cela peut permettre d'aider à la formulation d'autres variables ;

- connaître, pour chaque variable explicative, leur valeur-p pour estimer si elles sont significatives ou non (Figure 4.2B).

¹⁶⁵ Cela permet de créer une variable décalée sur la variable à expliquer (mouvement de masse passé ou pas, Y).

¹⁶⁶ Cela permet de créer une variable décalée sur les variables explicatives (surface, vitesse de déblaiement, X).

¹⁶⁷ Cela permet de créer une variable décalée sur les variables X et Y .

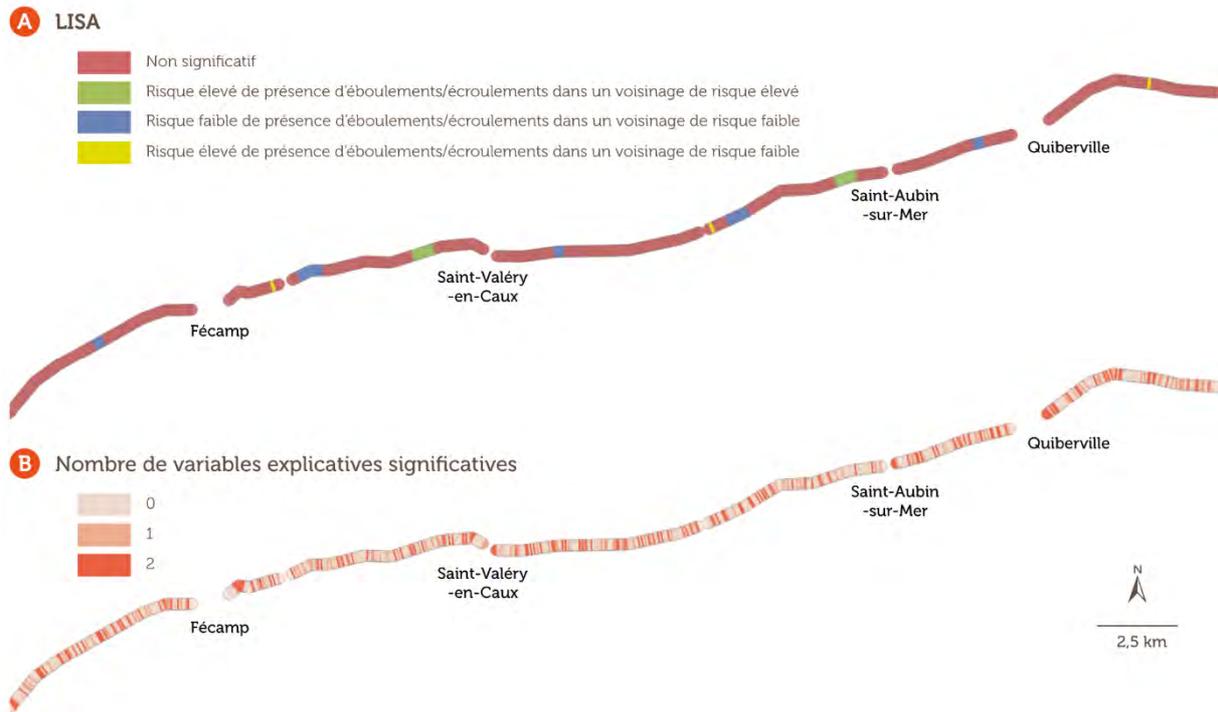


Figure 4.2 : Exemples A) de LISA et B) du nombre de variables explicatives significatives sur les données d'éboulements/écroulements en Seine-Maritime (maille de 50 m)

4.1.2 Point de vue horizontal ou oblique pour le suivi multiscale de l'érosion du front de falaise

4.1.2.1 Echelle du site (quelques centaines de m) : augmenter la couverture spatiale du suivi en améliorant la méthode d'acquisition des données

a. Contexte

La photogrammétrie terrestre RTK nous a fait gagner un temps précieux sur le terrain (voir 2.2.1). Le projet Centipède¹⁶⁸ vise à créer un réseau de bases RTK ouvertes et disponibles pour toute personne se trouvant dans la zone de couverture (territoire métropolitain et au-delà, Figure 4.3). Les constellations de satellites captés sont les traditionnels Galileo, Glonass et GPS.

Alors que les dGPS classiques sont onéreux (autour de 11 000 € HT en tarif éducation pour un Trimble R8 base et mobile, en 2017), ce à quoi il faut ajouter un abonnement à des logiciels dédiés (autour de 800 € HT en 2017), Centipède propose des solutions d'équipement à coûts réduits (en fabriquant soi-même son équipement (base et mobile) ou en se fournissant auprès de vendeurs) et l'accès à des bases GNSS¹⁶⁹ RTK ouvertes permettant de connecter son mobile et d'atteindre une précision de mesure centimétrique. En 2021, le coût complet de l'équipement Centipède était de 1 610 € HT (725 € pour la base et 885 € pour le mobile avec smartphone et forfait internet) (Figure 4.4).

¹⁶⁸ Ce projet est développé par J. Ancelin, avec le soutien financier de l'institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) et bénéficiant de moyens mutualisés entre des instituts de recherche, des organismes publics, des agriculteurs et des entreprises privées (<https://docs.centipede.fr/>).

¹⁶⁹ *Global navigation satellite system*

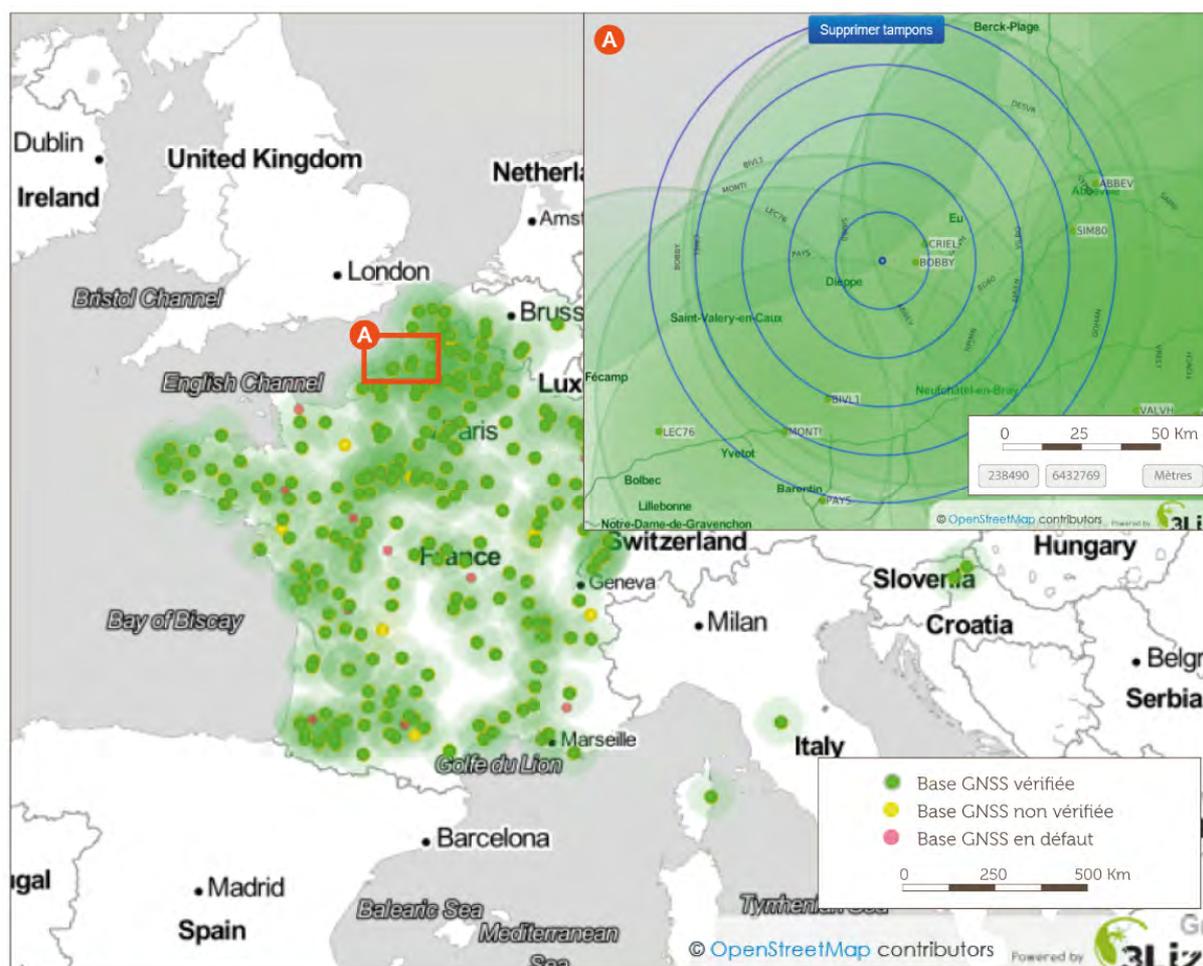


Figure 4.3 : Réseau collaboratif de bases GNSS RTK ouvertes, installées en France et A) autour de Penly (avril 2022, <https://docs.centipede.fr/>)

Dans le cadre du projet européen AGEO et du financement d'ISblue au titre de la formation, des antennes (base et mobile) ont été acquises. De nombreuses bases ont été installées en Bretagne (Auray, Plouzané, Quimper, etc.) et l'utilisation de ce dGPS à bas coût s'est développée au sein du laboratoire LETG et Geo-Ocean, notamment au service de l'observatoire OSIRISC grâce à l'aide de M. Rouan et M. Jaud (<https://www.risques-cotiers.fr/connaitre-les-risques-cotiers/connaitre-les-aleas/centipede/>).

b. Objectifs

Dans le suivi de l'érosion des falaises, l'utilisation du mobile dGPS Centipède peut permettre :

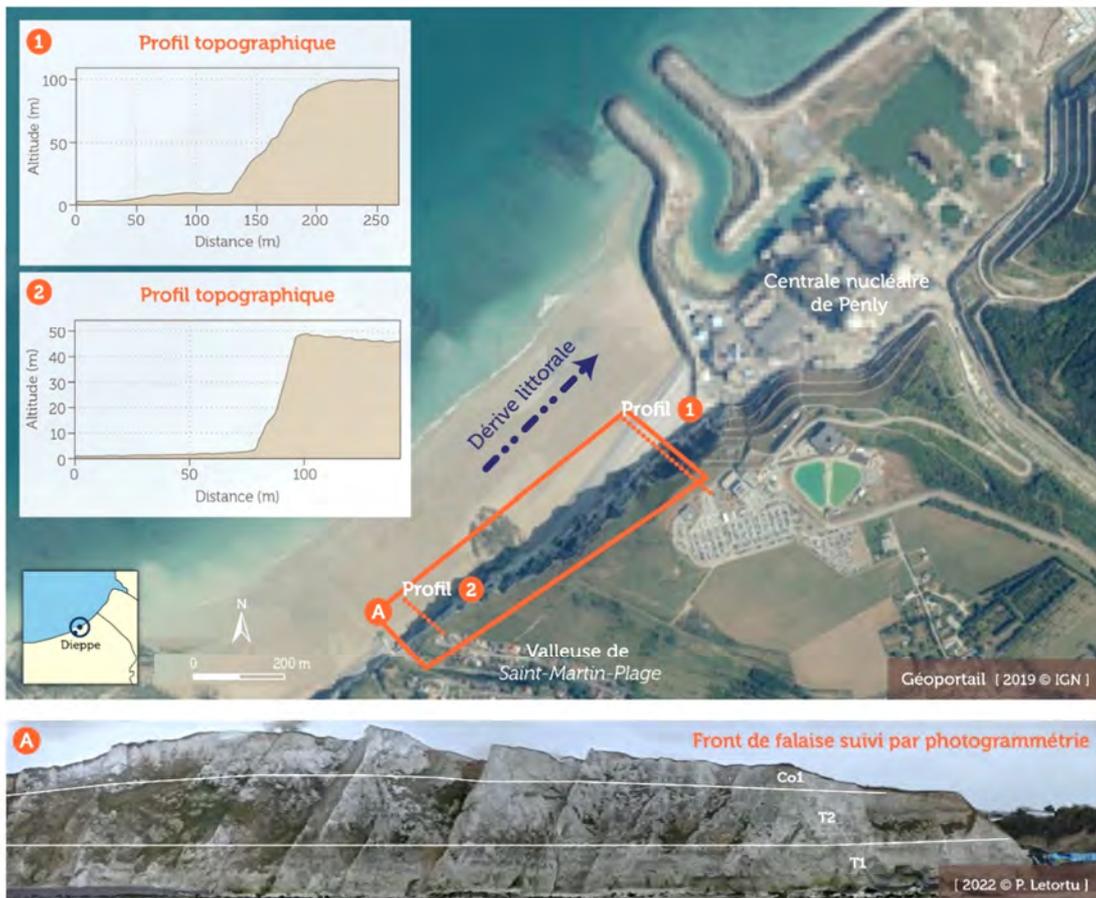
- 1) d'être plus rapide sur le terrain, car il n'y a pas besoin d'installer la base (elle est déjà installée de manière pérenne) (Figure 4.3) ;
- 2) d'alléger encore plus le protocole d'acquisition de données (pas de base, 1 kg au total pour l'antenne mobile reliée au module RTK¹⁷⁰ et le smartphone qui sert de carnet de terrain contre 3 kg pour le Trimble, Figure 4.4) ;

¹⁷⁰ Il existe désormais une nouvelle alternative au RTK surveyor et son antenne mobile : le RTK facet qui permet de combiner les deux instruments dans un monobloc plus résistant et avec une meilleure autonomie (<https://www.sparkfun.com/products/19984>).



Figure 4.4 : Instruments de la partie « mobile » nécessaires à la photogrammétrie terrestre RTK (modifié du tutoriel de M. Jaud) et l'exemple de son déploiement à Penly pour le suivi de l'érosion des falaises

3) de multiplier les mobiles et donc de lever de grande zone en une seule marée, ou bien faire deux sites proches en une seule marée (intégration d'un nouveau site de falaises vives : Penly à 9 km au nord-est de Dieppe).



Craies turonienne et coniacienne : L ≈ 750 m ; H ≈ 70 m, orientation : 320°N

T1 : Turonien inférieur (Holywell Chalk); T2 : Turonien (Holywell Chalk et New Pit Chalk); Co1 : Coniacien inférieur (Lewes Chalk).
adapte par Hoyez (2008), d'après Mortimore (2001)

Figure 4.5 : Présentation du site de Penly suivi par photogrammétrie terrestre RTK depuis janvier 2022 (d'après Mortimore, 2001 ; Hoyez, 2008)

c. Méthode

Le réseau Centipède fonctionne bien sur les côtes normandes, car de nombreuses bases y ont été installées par divers acteurs, notamment pour la pêche (Figure 4.3). Ces bases, contrairement au Finistère, n'ont pas été installées par les ingénieurs de l'IUEM et donc peuvent être sujettes à caution (modèle de la base, lieu et protocole d'installation). La distance optimale à la base est de moins de 10 km, permettant d'avoir une correction fine (centimétrique) en temps réel. Autour de Penly, nous avons au moins une base située à moins de 10 km à notre disposition, tandis que pour les sites de Dieppe et Varengeville-sur-Mer, nous sommes autour de 30 km (Figure 4.3A).

En fonction de la configuration des satellites, les falaises peuvent générer un masque important. Des tests préalables sont donc essentiels. Au regard d'une exactitude demandée à 0,05 m pour la reconstitution photogrammétrique, les valeurs en x, y et z mesurées par Centipède à Penly sont satisfaisantes et très proches de celles d'un dGPS classique (Trimble M3). Seule la composante x possède une exactitude un peu moins bonne, avec 0,04 m pour Centipède contre -0,02 m pour le Trimble (Tableau 4.2).

Exactitude mesurée par rapport à la base de Penly post-traitée (réseau GNSS permanent) (m)	X	Y	Z
dGPS Trimble	-0,021	0,020	0,020
dGPS Centipède	0,038	-0,018	0,025

Tableau 4.2 : Ecart du dGPS Centipède par rapport à la base de Penly post-traitée avec le réseau GNSS permanent

Pour les autres sites (Dieppe et Varengeville-sur-Mer), l'éloignement à la base n'est pas optimal, car la correction est moins fine (décimétrique) en temps réel. Sur le site de Dieppe falaise, quel que soit le modèle dGPS utilisé, le masque créé par la falaise est important, car nous sommes bloqués en pied de falaise par les grillages de la gare portuaire. Cette configuration particulière ne permet pas de capter de nombreux satellites. Sur cette zone, le tachéomètre demeure la meilleure solution d'acquisition des coordonnées cartographiques.

d. Résultats attendus

Grâce à ce gain de temps, depuis janvier 2022, un nouveau site est suivi par photogrammétrie tous les quatre à cinq mois (après accord de la centrale, obtenu par S. Costa). Entre la vailleuse de *Saint-Martin-Plage* et la centrale nucléaire de Penly (commune de Petit-Caux), les falaises subverticales de craie y sont hautes de 10 à 90 m environ et taillées dans les craies du Turonien avec un prédécoupage structural des blocs. Ce site de suivi, nommé Penly, se situe juste en amont-dérive de la centrale nucléaire EDF (Figure 4.5, Photographie 4.1).



Photographie 4.1 : Evolution du stock de galets en pied de falaise et ses effets sur le profil des falaises à Penly (la centrale nucléaire est à l'arrière-plan)

La section étudiée présente deux avantages :

- à l'échelle du site, la falaise est caractérisée par une progressive continentalisation avec la constitution d'un stock de galets en amont-dérive de la jetée de la centrale nucléaire, sur les 300 mètres les plus à l'est du site suivi. Ainsi, sur les 700 m étudiés, 400 m sont affectés par les actions marines (profil entre 80 et 90°) les 300 autres mètres ne le sont plus (profil de 70°) (Photographie 4.1). Le rôle précis des actions marines et continentales dans l'érosion peut donc être quantifié à l'échelle intrasite ;

- les caractéristiques lithologiques sont différentes, mais plus proches de celles des falaises mortes de Dieppe (Turonien pour Penly, Coniacien pour Dieppe, et sans les terrains tertiaires présents à Varengeville-sur-Mer), permettant de connaître, pour les agents et processus continentaux, le rôle de prédisposition de la lithologie. Par son intérêt scientifique, ce site pourrait être intégré au suivi DYNALIT.

4.1.2.2 Echelle de la cellule hydro-sédimentaire : exploiter tout le potentiel des satellites THRS et agiles à l'aide de l'AP (France, Grèce)

a. Contexte

Le projet EROFALITT (2016-2020) a montré le potentiel des images obliques et THRS Pléiades pour la reconstitution 3D du front de falaise et donc le suivi de l'érosion autour de Varengeville-sur-Mer. Mais certains verrous pour une généralisation de cette approche ont été soulignés : 1) la dépendance de la qualité de la restitution 3D aux paramètres environnementaux (orientation du front de falaise, variations de ses couleurs ou de texture, conditions météorologiques), 2) la difficulté d'optimiser les paramètres de traitements 3D sur l'ensemble de la zone. Ainsi, il serait intéressant de repérer les zones d'érosion sur ces images, pour y optimiser les paramètres de traitement 3D. Le projet HIRACLES (2021-2024), financé par le CNES, vise à lever ces verrous.

b. Objectifs

Ce projet vise à développer une nouvelle approche pour optimiser la détection et la quantification de l'érosion du front de falaise à partir d'images Pléiades dépointées sur des côtes à falaises variées. Il s'agit :

1) de travailler, en plus du site normand de Varengeville-sur-Mer (orienté N, collaboration avec S. Costa, R. Davidson, O. Maquaire) et du site breton de Pléneuf-Val-André (orienté NO, collaboration avec A. Hénaff et N. Le Dantec, Photographie 4.2), sur la côte ouest de l'île de Zakynthos (orientée SSO, collaboration avec N. Evelpidou et E. Vassilakis, Photographie 4.3) afin d'avoir des conditions de texture et d'orientation du front de falaise associées à des conditions météorologiques optimales pour l'acquisition d'images Pléiades (Tableau 4.3). La collaboration avec les collègues grecs de l'Université nationale et kapodistrienne d'Athènes permet de bénéficier de leur expertise scientifique et d'acquérir des données de vérité terrain sur ce site ;

2) d'identifier préalablement les zones de changement sur le front de falaise afin d'identifier les zones d'érosion (utilisation du *pansharpening*¹⁷¹ pour cette étape). L'étape de détection de l'érosion semi-automatique par AP ciblera les zones d'intérêt (d'emprise plus restreinte), ce qui permettra a) d'optimiser le paramétrage des traitements par (tri)stéréorestitution, et donc d'améliorer la qualité des résultats, b) tout en réduisant le temps de calcul, car nous travaillons en 3D (et non en 2,5D comme les approches classiques de MNT) ;

3) d'utiliser des images entre 20 et 30° qui s'avèrent être un bon compromis entre a) la distance du satellite à l'objet d'intérêt (front de falaise) b) et la distance d'échantillonnage au sol et sur le front de falaise (Jaud et al., 2019a).



Photographie 4.2 : Site des Vallées à Pléneuf-Val-André (Côtes-d'Armor)

¹⁷¹ Processus d'association d'une image panchromatique (trois bandes) très haute résolution (0,70 m au nadir pour Pléiades) à une image multispectrale de moins bonne résolution (2,8 m au nadir pour Pléiades), mais contenant plus d'informations (quatre bandes) pour créer une image couleur très haute résolution et riches d'informations (Astrium, 2012 ; Al Smadi et al., 2021).



Photographie 4.3 : Site de Porto Vromi sur la côte ouest de Zakynthos

Site	Caractéristiques des falaises	Orientation	Hauteur (m)	Pente du front de falaise (°)	Données de vérité terrain
Varengueville-sur-Mer (Normandie)	Rocheuses	N	30	70-90	Collaboration avec l'Université de Caen Normandie et l'UBO
Côte ouest de l'île de Zakynthos (Grèce)	Rocheuses	SO	100	70-90	Collaboration avec l'Université d'Athènes et l'UBO
Pléneuf-Val-André (Bretagne)	Meubles	NO	20	60-80	UBO

Tableau 4.3 : Caractéristiques des trois sites de falaises étudiés dans le projet HIRACLES

c. Méthodes

Pour atteindre ces objectifs, nous identifions trois tâches principales au cours de deux années à venir (Tableau 4.4) : 1) l'acquisition des données, 2) le prétraitement des images, 3) le développement d'une méthode d'identification des zones d'érosion.

Une thèse menée par Z. Bessin (codirection avec C. Delacourt et M. Jaud) est actuellement en cours à Geo-Ocean et LETG-Brest (financement du GIS BreTel et de l'UBO). L'inclusion des images Pléiades « non orthorectifiées » du front de falaise (et non des nuages de points 3D comme de Gélis et al., 2022) dans le réseau profond siamois est possible, grâce à l'aide précieuse de S. Lefèvre et C. Pelletier (IRISA, Vannes) et de T. Corpetti (LETG-Rennes). La section sur le prétraitement des images et sur le développement d'une méthode d'identification des zones d'érosion repose principalement sur les réflexions menées par Z. Bessin.

Tâche	Méthodologie
1 Acquisition des données	<ul style="list-style-type: none"> • Programmation des acquisitions d'images mono et tristéréo Pléiades sur les trois sites • Missions de photogrammétrie RTK par voie terrestre, par bateau et/ou par drone (données de vérité terrain)
2 Prétraitement des images	<ul style="list-style-type: none"> • Préparation (formalisation) des jeux de données d'entraînement et de test pour l'AP • Augmentation du jeu de données d'entraînement par transfert de style : utilisation d'un GAN (réseau antagoniste génératif ou <i>generative adversarial network</i>) permettant de générer de la nouvelle donnée et d'évaluer sa fidélité par rapport à la réalité • Exploration de la super-résolution pour améliorer l'augmentation de données • Test de réseaux d'AP pour la détection de zones d'érosion • Evaluation de l'efficacité de l'AP dans la détection de l'érosion à partir des images Pléiades
3 Développement d'une méthode d'identification des zones d'érosion	<ul style="list-style-type: none"> • A l'aide d'un réseau d'AP, deux approches testées : <ul style="list-style-type: none"> a) multidate (réseau siamois) : à partir d'une comparaison entre deux images à deux dates différentes, classification des zones d'érosion potentielles observées sur le front de falaise (détection de changement) b) monodate : par une approche de réseau neuronal convolutif (<i>convolutional neural network</i>, CNN) plus classique, classification des zones d'érosion à partir d'une seule image en entrée d'un réseau • Extraction de ces zones d'érosion potentielles dans les images Pléiades • Optimisation des paramètres pour la (tri)stéréorestitution 3D de ces zones d'érosion • Différentiels entre les nuages de points 3D (CloudCompare) obtenus par (tri)stéréorestitution sur les images Pléiades • Evaluations de la résolution et de la précision des changements détectés à partir des images Pléiades par rapport aux données de référence (vérité terrain) issues de la photogrammétrie RTK (CloudCompare)

Tableau 4.4 : Tâches du projet HIRACLES

Concernant la deuxième étape (Tableau 4.4), l'utilisation de réseaux profonds nécessite beaucoup de données, car pour évaluer l'apprentissage sans biais méthodologique les données sont divisées en trois jeux de données (un jeu d'entraînement, un jeu de validation et un jeu de test). Or nos images Pléiades dépointées ont des configurations inhabituelles, donc rares. Il est donc nécessaire d'augmenter les données en générant par AP des données simulées.

Plusieurs méthodes d'augmentation de données vont être développées et testées pour les sites étudiés (Varengeville-sur-Mer, Pléneuf-Val-André et Porto Vromi à Zakynthos). La première méthode d'augmentation de données qui sera testée est une méthode dite de « transfert de style », visant à simuler des images Pléiades à partir d'archives existantes et à partir d'images issues d'autres capteurs (images issues d'autres satellites, levés photogrammétriques aériens (archives IGN, levés drone), photogrammétrie terrestre, etc.). Plus précisément, une approche à l'aide d'un GAN sera étudiée. Cette méthode repose sur deux réseaux antagonistes (faussaire/expert) : le premier réseau (le faussaire) simule de la donnée fausse (l'image générée n'est pas issue de la réalité, donc fausse), la sortie de ce réseau devient l'entrée du second réseau qui doit discriminer s'il s'agit d'une image réelle ou simulée (l'expert). L'objectif est, d'une part, que le faussaire trompe au mieux l'expert, d'autre part, que l'expert discrimine bien le réel du simulé, car cela permet au faussaire de s'améliorer : un équilibre entre faussaire et expert doit être trouvé (Figure 4.6).

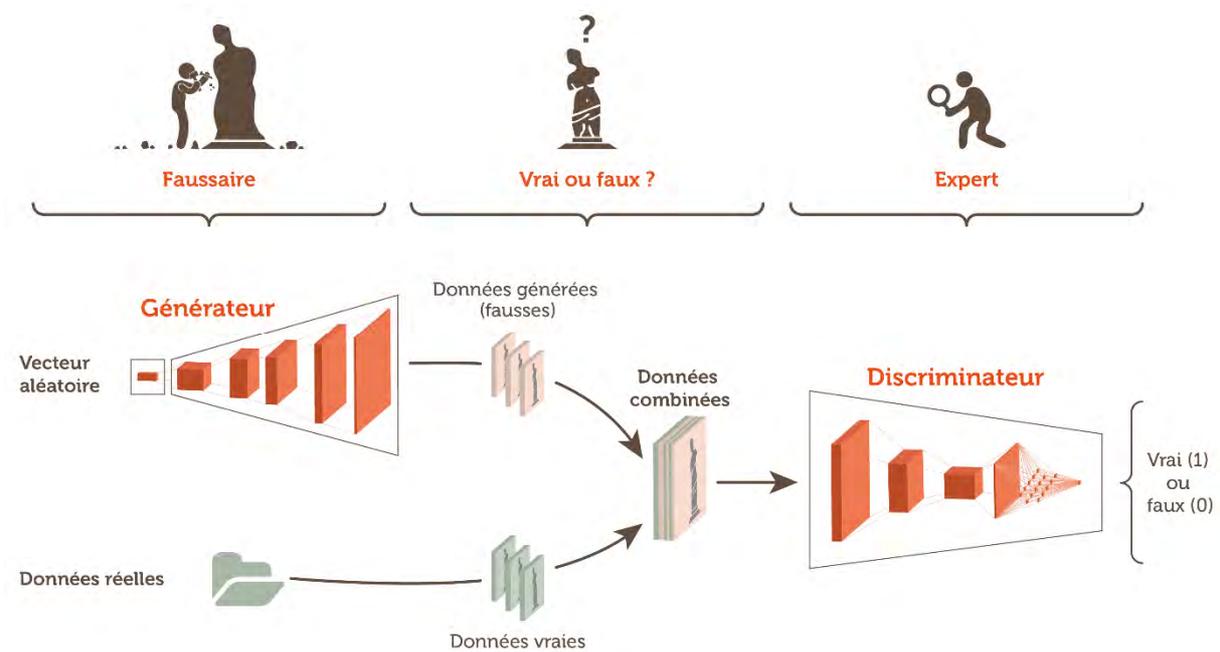


Figure 4.6 : Principe du GAN (modifié d'après le cours en ligne FIDLE¹⁷² du CNRS
https://www.youtube.com/watch?v=kVBJQw_erAY)

La méthode pix2pix (Isola et al., 2017) sera adaptée et testée sur notre jeu de données afin d'augmenter sa taille (augmentation de données). Plusieurs scénarios seront testés pour obtenir des images simulées de type Pléiades en utilisant des images aériennes, des images d'autres capteurs satellites (Sentinel 2 par exemple), des images drone, des captures d'écran de Google. Il sera alors intéressant d'identifier si un jeu de données concentré seulement sur les trois sites d'étude est suffisant. Dans le cas contraire, nous testerons si l'intégration d'images de falaises en dehors de ces trois sites permet d'obtenir des résultats satisfaisants d'images simulées de type Pléiades, sur lesquelles apparaît un front de falaise. D'autres tests sur l'utilisation d'images au nadir ou dépointées seront également effectués et la super-résolution¹⁷³ sera également étudiée pour améliorer l'augmentation de données.

Concernant la troisième étape (Tableau 4.4) qui vise à identifier les zones d'érosion dans les images obliques Pléiades (réelles ou simulées), deux approches d'apprentissage profond seront étudiées :

- la détection de changement par réseau siamois, prenant en entrée deux images Pléiades de dates différentes ;
- la détection de changement par réseau de convolutions basé sur une seule image en entrée.

Dans le cadre de l'approche par réseau siamois, deux échelles de détection de changement seront explorées à : 1) l'échelle du patch (c'est-à-dire une sous-partie de l'image brute dont la taille est définie par l'utilisateur), 2) l'échelle du pixel. S'intéresser à l'échelle du patch consiste à classer les patches comme « avec changement » ou « sans changement » en considérant ici uniquement un changement de type érosion. L'échelle du pixel offre la même information, mais à une résolution beaucoup plus fine. Une partie du jeu

¹⁷² Formation d'introduction au *deep learning*

¹⁷³ La super-résolution est un processus qui vise à augmenter la résolution spatiale d'une image.

de données sera annotée 1) à l'échelle du patch et 2) à l'échelle du pixel respectivement afin d'entraîner le réseau siamois à la détection du changement « érosion ».

Pour la mise en œuvre à l'échelle du patch (qui nous semble l'échelle la plus prometteuse), les deux méthodes développées par Caye Daudt et al. (2018), inspirées des travaux de Zagoruyko et Komodakis (2015) seront testées et adaptées au jeu de données Pléiades. La première méthode, intitulée « *early fusion* », consiste à concaténer les deux images (chacune à une date, « *input 1* » et « *input 2* » dans la Figure 4.7) en entrée du réseau. Cette image concaténée est ensuite intégrée dans une série de sept couches convolutionnelles (*convolutional layers*) et deux couches entièrement connectées (*fully connected layers*). La dernière couche applique une fonction de classification (*Softmax*) pour obtenir deux sorties correspondant aux classes de changement et de non-changement (Caye Daudt, 2020, Figure 4.7A).

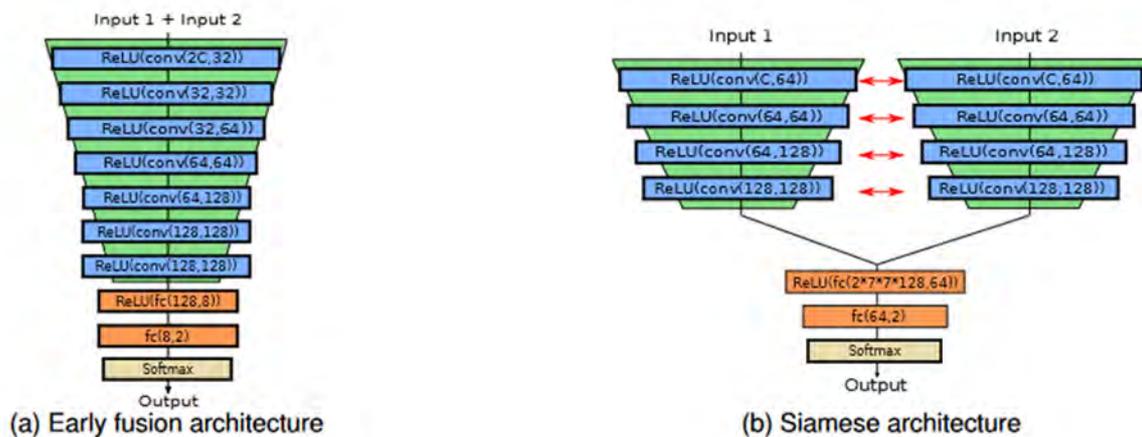


Figure 4.7 : Architectures de réseaux de neurones A) *early fusion* B) *Siamese* pour la détection de changement à l'échelle du patch (Caye Daudt, 2020)

La seconde méthode, intitulée « *Siamese* », conserve deux branches en entrée du réseau, permettant d'ajouter des poids partagés¹⁷⁴ entre celles-ci et de traiter les deux images en parallèle. Chaque branche est composée de quatre couches convolutionnelles avec des poids partagés. Les sorties des deux branches sont ensuite concaténées avant d'appliquer deux couches entièrement connectées. Enfin, comme précédemment, la fonction de classification *softmax* est appliquée pour dégager deux classes (changement et non-changement) (Figure 4.7B).

De par les contraintes du jeu de données Pléiades (non orthorectifié et non géoréférencé), une approche plus conventionnelle, sans comparaison de deux dates, sera également étudiée. Il s'agira alors pour le réseau d'AP de déterminer les caractéristiques propres à une zone d'érosion à partir d'une seule image en entrée, et ainsi de classifier l'image avec les mêmes classes qu'auparavant (« changement » et « pas de changement »). Cette approche repose sur les variations de couleurs, d'ombre, de texture et de forme notamment. Pour cette stratégie, l'objectif sera d'aller vers des méthodes faiblement supervisées afin de limiter la quantité de données à annoter pour l'entraînement du réseau de neurones convolutifs. Une comparaison des performances pourra être initiée entre une approche multodate (réseaux siamois, deux images en entrée) et une approche monodate (une image en entrée).

¹⁷⁴ Un partage des poids est notamment intéressant lorsque les deux images en entrée ont de caractéristiques proches (même capteur par exemple), ce qui limite le nombre de calculs et donc le temps de traitement.

d. Résultats attendus

Ce projet s'insère pleinement dans les nouveaux défis pour l'action publique territoriale face aux risques naturels côtiers, notamment les préconisations du rapport parlementaire de S. Buchou (2019) avec l'impératif de la connaissance et la nécessité du partage des données sur la dynamique littorale. Les résultats attendus seront :

- d'ordre méthodologique, à travers le développement de nouveaux outils de détection et d'analyse de l'érosion à partir des images satellites (ici Pléiades, mais transposables à Pléiades Neo et à la constellation optique en 3D (CO3D¹⁷⁵) par exemple) dont une partie serait automatisée grâce à l'AP (que ce soit dans l'identification des zones d'érosion en amont de la reconstruction 3D ou dans la classification automatique de l'érosion et de l'accumulation dans les nuages de points 3D (de Gélis et al., 2022)). Cela permettra un gain de temps considérable dans les traitements et la diffusion des codes et des résultats auprès des élus, des gestionnaires et du grand public ;

- d'ordre thématique, à savoir le recensement, la quantification du volume érodé et la datation de la grande majorité des mouvements de masse (datation au jour près si la répétitivité des acquisitions est journalière) et les éventuels patrons de diffusion de l'instabilité sur la paroi. Ces connaissances amélioreront la compréhension du fonctionnement des falaises et pourront également servir à la mise à jour des données utiles comme la valeur *L_{max}*.

Par ailleurs, ce projet permettrait d'étendre et de structurer un réseau scientifique international sur les côtes à falaises avec l'intégration de nos collègues grecs, entre autres. A terme, des projets de recherche internationaux sur l'évolution des falaises carbonatées (grâce au suivi à THRS et temporelle de l'érosion) seront développés selon un transect N/S pour identifier plus clairement le rôle respectif des agents et des processus dans le déclenchement des mouvements gravitaires, chose finalement peu aisée en milieu tempéré océanique.

4.2 Exploiter en pluridisciplinarité les bases de données multiparamètres et continues pour mieux comprendre la part respective des facteurs responsables de la fatigue et du déclenchement de l'érosion et pour alimenter les études prospectives (France, Canada)

4.2.1 Analyses des données F3 et RICOCHET par l'approche systémique « avant-côte/plate-forme/plage/falaise/plateau »

4.2.1.1 Contexte

La sous-estimation du temps de préparation des campagnes et de la maintenance des instruments durant les projets F3 et RICOCHET a pénalisé le temps imparti à l'analyse. Or, la quantité de données à analyser et la variété des expertises à mobiliser nécessitent un temps important pour y parvenir.

¹⁷⁵ <https://www.intelligence-airbusds.com/newsroom/press-releases/airbus-to-develop-co3d-earth-observation-programme-for-cnes/>

L'analyse et la valorisation de ces jeux de données ne sont que très partielles et sont toujours en cours. Cela devrait prendre quelques années, avec l'aide des partenaires de ces deux projets. La titularisation en janvier 2023 d'E. Augereau, ingénieur d'études à l'UAR 3113, permet de travailler sur la détection mouvements gravitaires à partir de la caméra à Sainte-Marguerite-sur-Mer (analyse d'images pour détecter le changement sur des pas de 5 min¹⁷⁶, en commençant par de gros volumes perdus (Figure 1.10) pour tester progressivement le seuil de détection). Ces mouvements gravitaires serviront ensuite à l'analyse des mécanismes de fatigue et de rupture.

Un des points d'entrée pour mieux comprendre comment les facteurs environnementaux modifient le comportement de la falaise est l'analyse des données des géophones (qui enregistrent les mouvements dans la falaise). Malheureusement, nous n'avons pas l'expertise en interne. Des docteurs avaient montré leur intérêt dans l'analyse de ces données, mais nos demandes de bourses postdoctorales Marie Skłodowska-Curie n'ont pas abouti. Suite à ma mobilité au Québec, une collaboration avec l'équipe du laboratoire de géomorphologie et de gestion des risques en montagne de l'Université du Québec à Rimouski est envisagée. En domaine montagnard et continental, l'équipe de F. Gauthier, B. Giroux et A. Morin travaille sur la détection d'événements sismiques grâce à des géophones triaxiaux disposés sur le front du versant rocheux du Gros-Morne (Haute-Gaspésie, Canada), afin de discriminer les signaux sismiques reliés à l'activité géomorphologique de ceux provenant de l'activité anthropique (considérés comme « bruit »). Dans le cadre de la maîtrise d'A. Morin, les jeux de données breton et normand pourraient être ajoutés à celui acquis au Gros-Morne. Une classification des signaux (microséismes, bruit, déferlement des vagues) pourrait ainsi être établie avec cette méthode sur les deux jeux de données (Plougonvelin et Sainte-Marguerite-sur-Mer) permettant par la suite la comparaison des sites en lien avec les facteurs marins et continentaux, mais aussi les actions anthropiques, jusqu'ici inexplorées. D'autres équipes pourraient être sollicitées comme celles de Lausanne (M. Jaboyedoff), du BRGM Orléans (C. Lévy), de l'Université de San Diego (A. Young), de l'Université d'Auckland en Nouvelle-Zélande (M. Dickson, C. Thompson) et de l'Université de Durham en Angleterre (E. Vann Jones) pour participer à l'encadrement d'un post-doctorant ou d'un doctorant.

4.2.1.2 Objectifs

Les défis qui semblent les plus intéressants pour effectuer un emboîtement d'échelles concernent par ordre chronologique :

- 1) l'étude des périodes de rupture de falaise (éboulisation) en lien avec les facteurs environnementaux et l'analyse fine des mécanismes préalables de fatigue ;
- 2) l'analyse des microséismes mesurés par les géophones (réponse à haute fréquence) et leur transfert en sommet de falaise (à travers les mouvements mesurés à plus basse fréquence par les sismomètres et les informations de la fibre optique (déformation)). Cela permettrait d'étudier les échanges entre le centre du massif et son sommet. En analysant les conditions environnementales, l'examen des modes de déformation, de la réponse mécanique et la localisation des sources seraient possibles ;
- 3) à l'inverse de ce premier défi, d'abord l'identification des périodes de mesures de plusieurs jours représentatives de différents types de conditions environnementales (périodes d'agitation marine, périodes chaudes, périodes froides, etc.) puis l'observation de l'ensemble de la réponse spectrale des microdéplacements (enregistrés par le sismomètre en haut de falaise) et de la réponse haute fréquence des

¹⁷⁶ Il s'agit du pas de temps choisi pour limiter les changements de luminosité.

géophones intégrée sur ces courtes fenêtres temporelles. Cela permettrait d'analyser la contribution respective des facteurs marins et continentaux ;

4) l'exploration de la réponse mécanique de la plate-forme et de la falaise à l'action des vagues en fonction du niveau d'eau, de la morphologie et la position topographique du cordon de galets, et du type de déferlement à l'instar des travaux de certains chercheurs (Earlie et al., 2018 ; Kennedy et al., 2018 ; Vann Jones et al., 2018 ; Masteller et al., 2020). Cela est possible grâce aux données des capteurs de pression, de la caméra vidéo, des géophones, de la fibre optique (déformation) et des sismomètres.

4.2.1.3 Méthodes

A l'échelle de l'événement (qui est soit un signal sismique (sismomètre), soit électroacoustique (géophone)), différentes analyses pourraient être menées (localisation des sources, déformation en sommet de falaise, vitesses de propagation) :

1) pour les géophones : si la synchronisation des horloges est bonne et s'il est possible de suivre le même événement avec les quatre capteurs, les géophones peuvent permettre de suivre l'événement (un microséisme par exemple) d'un capteur à l'autre au sein du massif et au sommet avec le géophone sol, d'extraire des vitesses de propagation des ondes (qui permettent de caractériser le comportement mécanique de la falaise), et d'identifier les sources (données F3 et RICOCHET) ;

2) avec les deux sismomètres (installés sur les deux derniers mois de l'instrumentation RICOCHET), suivre le même événement, l'analyse de la déformation (en sus des déplacements) en sommet de falaise sera réalisable ;

3) pour le ou les sismomètre(s) : la possibilité de localiser la source, car l'origine est très contrainte (cavité en pied de falaise), comme cela a été réalisé à *Mesnil Val* (Criel-sur-Mer) par C. Lévy (BRGM) (données F3 et RICOCHET).

Par la suite, à Plougonvelin, grâce aux capteurs de pression, la caméra vidéo, les géophones et le sismomètre, il serait possible de faire un suivi vague par vague depuis la plate-forme¹⁷⁷ jusqu'au cordon de galets, puis de caractériser son impact sur la falaise avec les géophones et le sismomètre, pour estimer la réponse mécanique de la falaise, notamment si la vague pénètre dans une cavité¹⁷⁸. La quantité d'énergie reçue par la falaise peut être calculée à partir des capteurs de pression et du capteur de force soit à partir d'équations empiriques ou par modélisation numérique. Cela permettrait de mieux comprendre le rôle du type de déferlement sur la réponse mécanique de la falaise (données F3).

L'analyse combinée des différents facteurs environnementaux et de la réponse mécanique de la falaise bénéficiera de l'expertise en statistiques de mes collègues au sein du LETG-Brest, F. Audard et J. Pierson. Cela permettra 1) d'aller plus loin sur le nombre de cycles de mise en contrainte nécessaire pour déclencher la fatigue puis l'érosion et les seuils associés, 2) de mieux intégrer la composante spatiale dans les analyses.

¹⁷⁷ Malheureusement, c'est impossible à l'avant-côte, car il n'est pas faisable de suivre une vague depuis le large même si on avait une bouée au large.

¹⁷⁸ Lors du projet RICOCHET, il n'y a pas de vagues qui ont atteint la falaise ; par contre, dans le projet F3, quelques vagues ont impacté la falaise.

4.2.1.4 Résultats attendus

Ces méthodes permettraient de :

- connaître la réponse mécanique de la falaise en fonction des types de temps météo-marins ou d'événements (microséismes par exemple) pouvant générer de la fatigue et *in fine* le déclenchement d'un mouvement gravitaire ;
- mieux apprécier les interrelations plate-forme/plage/falaise ;
- obtenir les données d'entrée pour alimenter une modélisation de la falaise (développée ci-après) avec l'identification des seuils de fatigue, des seuils de rupture et le nombre de cycles de mise en contrainte nécessaires pour déclencher la fatigue puis l'érosion.

4.2.2 Modélisation de la falaise et de son évolution en intégrant le changement climatique

4.2.2.1 Contexte

Une modélisation de la falaise crayeuse est envisageable en raison des différentes données à disposition (ou prochainement) qui pourraient l'alimenter : 1) les données géotechniques sur les craies de notre secteur d'étude (par exemple, Laignel, 2003), 2) les levés géophysiques effectués lors du projet RICOCHET (mesures GPR et ERT), 3) les résultats attendus de la section précédente sur le site de Sainte-Marguerite-sur-Mer (notamment la fibre optique renseignant sur le réseau de fracturation interne au massif crayeux) 4) le projet actuel Defhy3geo¹⁷⁹, qui étudie la fracturation des falaises littorales sous l'influence de l'hydrologie marine et de plateau.

En premier lieu, une modélisation rocheuse adaptée à la lithologie en place (comportement mécanique qui aboutit à la chute de pierres, de blocs, des éboulements/écroulements) pourrait être réalisée sur le profil de falaise crayeuse instrumentée à Sainte-Marguerite-sur-Mer. En second lieu, y ajouter une modélisation hydromécanique serait un atout, car la falaise possède des caractéristiques hydrogéologiques particulières liées à la topographie : l'inversion près de la côte (pente montante vers la mer) modifiant les écoulements et donc le fonctionnement classique de la nappe phréatique. Le modèle rocheux, associé à celui hydromécanique, permettrait de réfléchir aux effets du changement climatique sur les falaises, en projetant différents scénarios du GIEC, comme l'a fait G. Thirard sur le glissement littoral à Villerville (Thirard, 2022). Cette modélisation pourrait être effectuée grâce à l'aide de collègues modélisateurs et géotechniciens à Caen, Rouen et Brest.

D'après les projections réalisées (Beauvais et al., 2019 ; DREAL Normandie, 2020 ; Beauvais, 2021), les falaises normandes subiront les effets du changement climatique avec quelques paramètres-clés :

- la hausse du niveau marin, entre 0,32-0,62 m (RCP 2.6) et 0,98-1,81 m¹⁸⁰ (RCP 8.5) à l'horizon 2100 (GIEC, 2022a), devrait accélérer l'érosion des falaises puisque la fréquence et l'efficacité de l'attaque des vagues augmenteront avec le rapprochement vers la falaise du point de déferlement des vagues

¹⁷⁹ Ce projet est financé par le FEDER et la région Normandie, et piloté par R. Antoine du CEREMA à Rouen (<http://lmi.insa-rouen.fr/134.html>).

¹⁸⁰ Pour information, l'étude de Grinsted et al. (2015) modélise une hausse de 0,78 m pour le XXI^e siècle pour la ville du Havre avec la RCP 8.5. Mais cette ville présente un contexte estuarien, donc très spécifique.

(Trenhaile, 2011 ; Costa et al., 2021). La hausse du niveau marin pourrait aussi se traduire par une extension du biseau salé (Chang et Clement, 2012), créant des surpressions interstitielles dans les falaises et ainsi une élévation des nappes aux alentours ;

- le climat de vague à l'échelle locale (état de mer) sera combiné au niveau marin pour permettre une meilleure évaluation des changements de conditions hydrodynamiques et des impacts à la côte (Dissanayake et al., 2021). Parmi les simulations existantes (Laugel, 2013 ; Bricheno et Wolf, 2018 ; Morim et al., 2019, 2020), celle de Bricheno et Wolf (2018) présente le climat de vagues en Atlantique Nord (incluant la Manche) jusqu'en 2100 selon les RCP 4.5 et 8.5, avec une résolution de 10 km. Entre Calais et Cherbourg, pour les deux profils RCP en 2100, la H_s moyenne baisserait de l'ordre de 5 %, tandis que la H_s moyenne maximale augmenterait de l'ordre de 5 %. Ce dernier résultat serait lié à l'influence des vagues de tempêtes atlantiques qui augmenteraient, elles aussi, mais les résultats sont moins robustes, car soumis à davantage de variabilité en raison du bassin semi-fermé qu'est la Manche ;

- la hausse des températures entre 1,8 (RCP 2.6) et 4,4 °C (RCP 8.5) à l'échéance de 2100 (GIEC, 2022a), en cohérence avec les modélisations en Normandie (Beauvais et al., 2019), qui limitera le nombre de cycles gel/dégel qui sont considérés comme particulièrement efficaces en termes d'érosion (Letortu et al., 2015a) ;

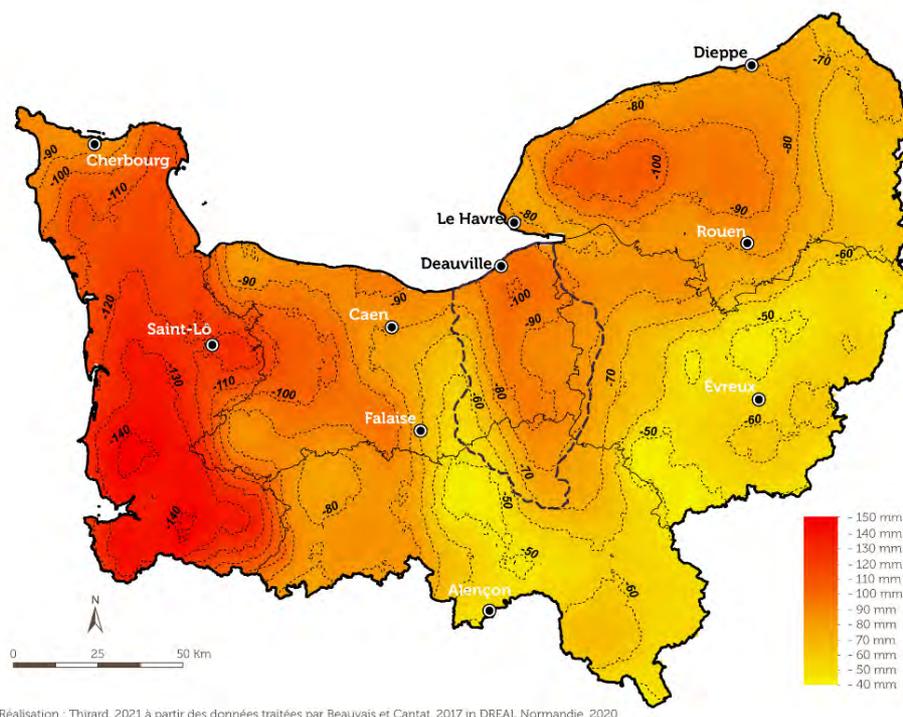
- la baisse attendue des précipitations totales annuelles¹⁸¹ (baisse entre 80 et 90 mm autour du cap d'Ailly pour le RCP 8.5 par rapport à l'actuel, Beauvais et Cantat in DREAL Normandie, 2020, Figure 4.8) et la hausse de l'évapotranspiration¹⁸² impacteront le niveau des nappes¹⁸³ (baisse modélisée à 1 m autour du cap d'Ailly, d'après le modèle CNRM-MODCOU¹⁸⁴). Cette baisse pourrait être atténuée par les surpressions interstitielles liées à la hausse du niveau marin.

¹⁸¹ A l'échelle régionale, pour le scénario RCP 2.6, il y a peu d'évolution dans les précipitations par rapport à l'actuel, par contre, pour le RCP 8.5, les totaux annuels baisseraient de 40 mm à 150 mm avec une perte moyenne annuelle de 20 à 25 jours de pluie (Beauvais et Cantat in DREAL Normandie, 2020).

¹⁸² Comme l'évoque Thirard (2022, p. 63-64) « *considérant qu'une élévation de 1 °C de la température conduit à une augmentation de 7 % de l'humidité, les cycles hydrologiques pourraient être considérablement modifiés* (Rummukainen, 2012 ; Berlemann et Steinhardt, 2017). *La hausse des températures est à même de générer une hausse de l'évapotranspiration et de conduire à une augmentation des précipitations du fait d'une humidité de l'air plus importante* (Berlemann et Steinhardt, 2017). *Cependant, des disparités temporelles et spatiales existent à l'échelle locale. En Normandie, la tendance est plutôt à la baisse des précipitations totales annuelles, avec des conséquences plus marquées durant la période estivale, conduisant à une accentuation des épisodes de pluie plus intenses et plus brefs (de type orageux)* », qui peuvent avoir des impacts notables sur les aléas à commande hydrologique.

¹⁸³ La baisse des précipitations et la hausse de l'évapotranspiration (réchauffement climatique) devraient rabattre les nappes. La baisse de la recharge des aquifères dans le bassin de la Seine est estimée à environ -25 % à horizon 2050 et -30 % en 2100.

¹⁸⁴ Le modèle hydrogéologique MODCOU (maille de 1 km), développé par le centre de géosciences de Mines ParisTech, associe les écoulements souterrains et ceux de surface pour estimer les débits des rivières et les niveaux piézométriques des aquifères (<https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article148>).



Réalisation : Thirard, 2021 à partir des données traitées par Beauvais et Cantat, 2017 in DREAL Normandie, 2020

Figure 4.8 : Différence de cumul de précipitations entre le scénario actuel et le scénario RCP 8.5 (carte réalisée à partir des données traitées par Beauvais et Cantat dans DREAL Normandie, 2020) (Thirard, 2022)

4.2.2.2 Objectifs

Deux objectifs sont visés :

- aboutir à une modélisation combinée (rocheuse et hydromécanique) du profil de falaise instrumenté (stabilité actuelle du versant) avec des seuils de fatigue, de rupture, le nombre de cycles de mise en contrainte nécessaire pour déclencher la fatigue puis l'érosion ;

- évaluer l'impact potentiel du changement climatique sur la fatigue et le déclenchement de l'érosion des falaises sur ce profil avec, au minimum, un scénario « intermédiaire » (RCP 4.5) et un scénario « pessimiste » (RCP 8.5). S'il est toujours d'actualité au regard de nos émissions de GES, le scénario « optimiste » (RCP 2.6) pourrait être ajouté¹⁸⁵ (Tableau 4.5).

Scénario	Forçage radiatif	Concentration de GES (ppm)	Trajectoire
RCP 2.6	Pic à $\approx 3\text{W/m}^2$ avant 2100 puis déclin	Pic ≈ 490 équivalents CO_2 avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin
RCP 4.5	$\approx 4,5\text{W/m}^2$ au niveau de stabilisation après 2100	≈ 660 équivalents CO_2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 8.5	$> 8,5\text{W/m}^2$ en 2100	> 1370 équivalents CO_2 en 2100	Croissante

Tableau 4.5 : Forçage radiatif, concentration en GES et trajectoire en fonction du scénario RCP (Moss et al., 2010 in Thirard, 2022)

¹⁸⁵ Ces trois scénarios sont évoqués dans les recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte (Collectif (BRGM/CEREMA), 2022)

4.2.2.3 Méthodes

Comme l'évoquent Limber et al. (2018), les modèles de profils transversaux s'avèrent particulièrement pertinents pour modéliser la falaise instrumentée, car ils peuvent intégrer une série de processus, notamment le dépôt et le déblaiement des mouvements gravitaires (Kline et al., 2014), le sapement en pied de falaise et les événements de rupture soudaine (Castedo et al., 2012), ainsi que la connectivité dynamique entre l'évolution des falaises et de la plate-forme (Walkden et Hall, 2005 ; Trenhaile, 2009 ; Matsumoto et al., 2016). En collaboration avec des modélisateurs et des géotechniciens, l'application aux falaises rocheuses serait relativement classique en reprenant le modèle conceptuel illustrant les mécanismes d'activation et leurs principales réponses dans la morphodynamique côtière (Castedo et al., 2012). Cet organigramme permet d'intégrer le changement climatique avec les paramètres « précipitations », « température », « changement du niveau marin » et « vagues à la côte » (Figure 4.9).

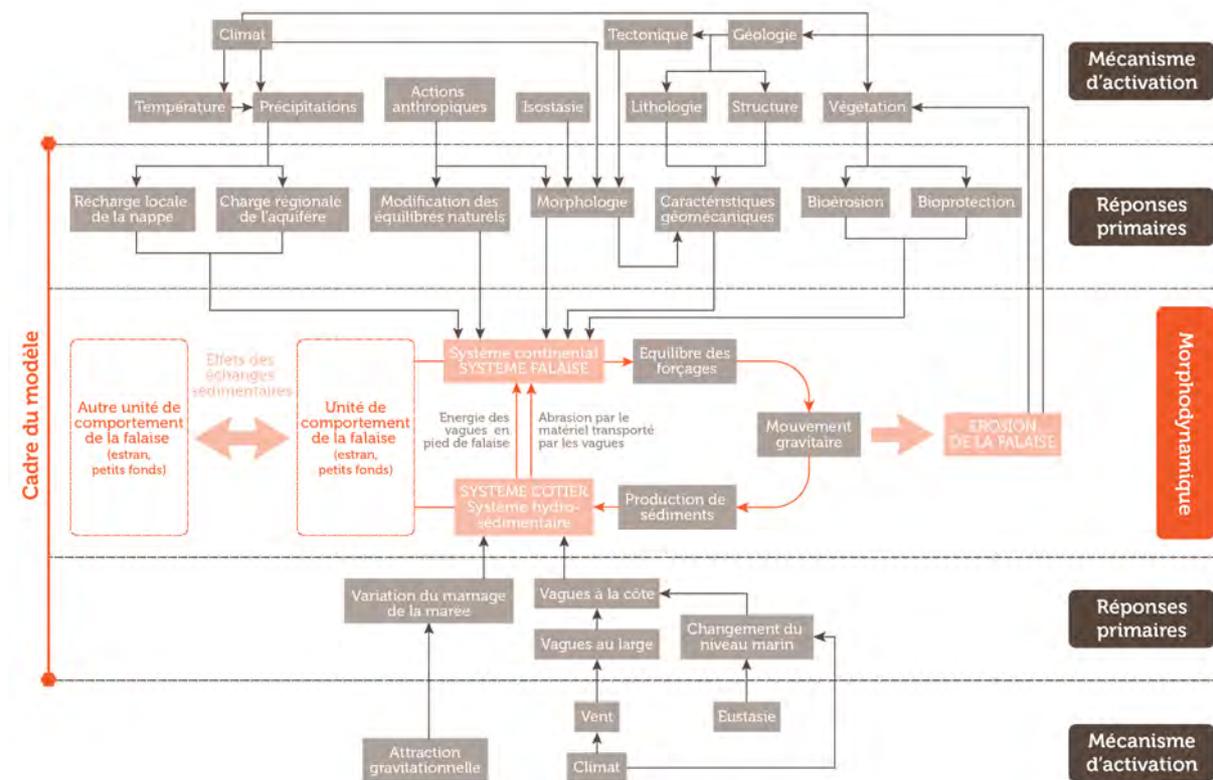


Figure 4.9 : Modèle conceptuel illustrant les mécanismes d'activation et leurs principales réponses dans la morphodynamique côtière (modifié d'après Castedo et al., 2012)

Par contre, le couplage avec la méthode de modélisation hydromécanique en régime transitoire est plus original. La réalisation pourrait se découper en cinq étapes (Figure 4.10) :

- 1) les données géophysiques seraient utilisées pour caractériser la structure géologique de la falaise. Ces données sont traitées (inversées) pour pouvoir alimenter le modèle géométrique ;
- 2) la réalisation du modèle géométrique (ou structural) s'appuierait sur les données géophysiques, validées par les connaissances empiriques ;
- 3) une synthèse des caractéristiques hydrauliques et mécaniques de la craie à Sainte-Marguerite-sur-Mer serait réalisée. Ce paramétrage se baserait à la fois sur la littérature scientifique et technique et sur les analyses complémentaires de laboratoire permettant de déterminer des intervalles de valeurs représentatifs ;

4) une étape préliminaire de validation des paramètres hydrauliques et mécaniques serait nécessaire pour calibrer les valeurs à retenir en entrée de modèle. Autrement dit, il s'agirait de valider le battement de la nappe simulé par les données de précipitations enregistrées. Pour les paramètres mécaniques, la validation s'appuierait sur différents scénarios afin de couvrir l'intervalle de valeurs mises en évidence dans l'étape précédente ;

5) le modèle hydromécanique final (données simulées journalières analysées sur plusieurs décennies jusqu'à 2100) intégrerait les valeurs issues de la calibration appliquée au modèle géométrique. Ce modèle permettrait de mettre en évidence le comportement actuel du versant. Des données prospectives issues de simulations du climat (modèle CNRM-2014 (maille de 8 km), issu du portail Drias^{les futurs} du climat¹⁸⁶, Ouzeau et al., 2014) et du GIEC permettraient de dresser des tendances sur le temps long (2100) à partir de données simulées de précipitations, de températures, d'évapotranspiration et du niveau marin. Ces données sont en libre accès pour l'ensemble des scénarios RCP. Quant aux données de simulation du climat de vagues local de Bricheno et Wolf (2018) en 2100 (maille de 10 km), elles pourraient être intégrées si nous obtenons leur accord.

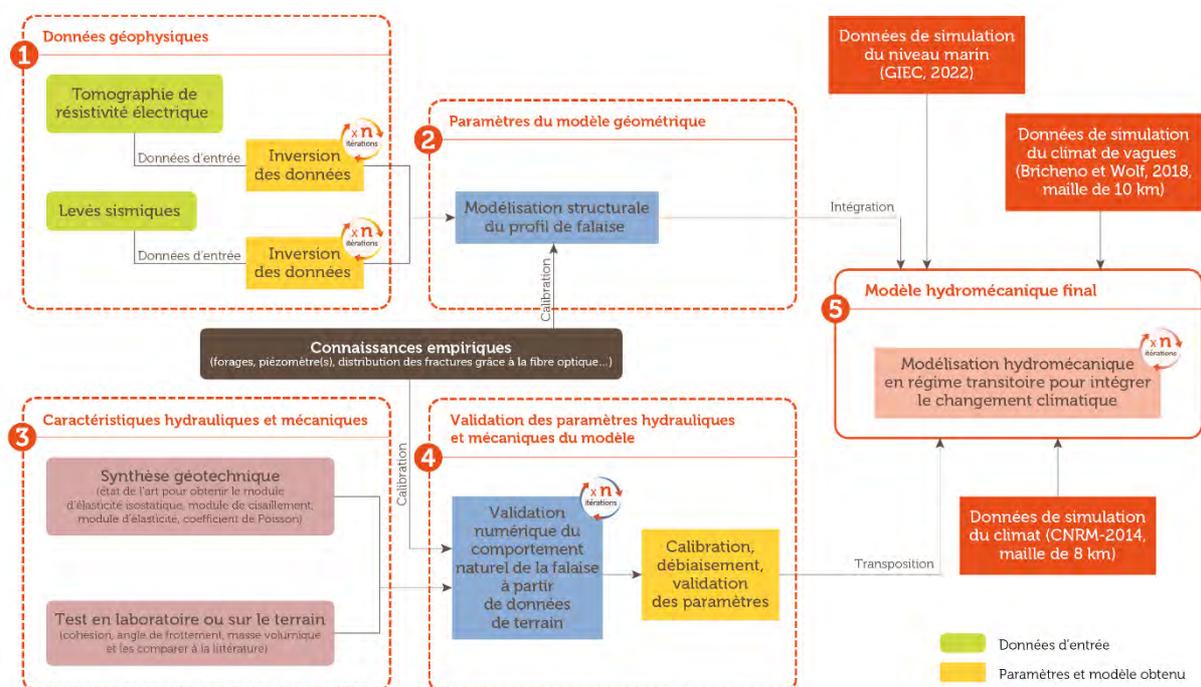


Figure 4.10 : Etapes de réalisation de la modélisation hydromécanique en régime transitoire pour intégrer le changement climatique pour le site de Sainte-Marguerite-sur-Mer (communication personnelle avec G. Thirard, adapté d'après Thirard, 2022)

4.2.2.4 Résultats attendus

Le premier résultat attendu serait de dresser un état des lieux de la sensibilité actuelle à la fatigue et à la rupture de la falaise de Sainte-Marguerite-sur-Mer. La contribution de chaque variable peut ainsi être approximée en simulant différents scénarios de résistance des matériaux et de contraintes environnementales (niveau de nappe, biseau salé, etc.).

¹⁸⁶ <https://www.drias-climat.fr/>

Dans un second temps, les modélisations prospectives réalisées à partir des données simulées permettraient de dresser des tendances du comportement de la falaise sur le temps long. L'impact du changement climatique sur l'évolution de l'abrupt (fatigue, rupture) serait donc appréhendé. Cela permettrait, par la suite, d'apporter des éclairages sur la gestion du risque sur ces territoires.

4.3 Continuer les projets d'acculturation et d'innovation pédagogique

4.3.1 CoastAppli : l'application de science citoyenne pour le suivi des aléas côtiers

4.3.1.1 Contexte

Ce projet de sciences citoyennes (2019-2022) sur le suivi des aléas côtiers a nettement dépassé nos attentes en raison de :

- l'intégration au projet des enseignants et collégiens de la commune de Guissény, qui nous ont permis d'avoir des retours d'expérience sur les protocoles et les outils de mesure, d'estimer l'exactitude et la précision des mesures et d'obtenir chaque mois des données sur la plage de la Croix ;

- l'intérêt des institutions¹⁸⁷ et des médias¹⁸⁸ pour ces initiatives, ce qui permet de partager les expertises avec les acteurs locaux et les citoyens.

Aujourd'hui, l'application smartphone et tablette CoastAppli est opérationnelle¹⁸⁹ et pourrait intégrer à d'autres sites que Guissény. Mais il reste des questions en suspens : comment garantir le traitement, le stockage et l'exploitation rapides (de l'ordre de six mois) des données collectées ? Comment garantir le déploiement sur d'autres sites ? Comment ces données vont-elles être intégrées à l'observatoire OSIRISC, notamment *via* les IDG ?

L'équipe de gestion de projet actuelle est composée de quatre personnes (R. Ruault, M. Rouan, Q. Millière et moi), aboutissant à une personne temps plein. Si déploiement sur d'autres communes il y a, il faudra revoir cette organisation. Ce projet de sciences citoyennes devra bénéficier d'un soutien institutionnel en moyens humains et financiers pour durer. Au-delà des volets scientifiques et de gestion de projet, celui d'« animation et médiation du réseau » est essentiel pour 1) s'assurer que les protocoles de mesures et l'application soient toujours opérationnels, 2) garantir la formation et le retour aux utilisateurs, 3) organiser des espaces de rencontres et d'échanges entre citoyens et scientifiques (organisation d'une communauté). Sans soutien fort et pérenne, la charge de travail est importante et peut aboutir à l'abandon du projet. Le partage des retours d'expérience sur les solutions de financement de démarches participatives (moyens techniques et pratiques à mettre en œuvre, fonctionnement, entretien, mutualisation) constitue

¹⁸⁷ <https://www.bretagne-pays-de-la-loire.cnrs.fr/fr/evenement/cnrs-insolite-littoral-geographie-sciences-citoyennes-et-aleas-cotiers>

¹⁸⁸ <https://www.ouest-france.fr/bretagne/finistere/a-guisseny-la-protection-du-littoral-devient-l-affaire-de-tous-e0c74bb6-4bde-11ed-87fe-e4a9e39ff44f>, <https://actu.orange.fr/societe/videos/video-coastappli-l-application-brestoise-pour-suivre-et-prevenir-les-aleas-cotiers-CNT000001TEUK6.html>, <https://www.ouest-france.fr/bretagne/guisseny-29880/finistere-coastappli-une-application-pour-suivre-les-aleas-cotiers-117f79bc-9ea7-11ec-8137-6cbc1c154bca>, <https://www.ouest-france.fr/bretagne/guisseny-29880/les-sciences-participatives-au-college-diwan-44b73416-af2b-11ec-bd05-1fc41a8225e5>.

¹⁸⁹ Elle est disponible, pour rappel, sur <https://www.isblue.fr/pratiques-innovantes/coastappli/>.

une nécessité, mais comme chaque initiative est différente, les effets de contexte y sont forts. Le rattachement à une structure de recherche (ISblue ou IUEM), au département du Finistère (*via* le partenariat Litto'Risques) et à l'observatoire OSIRISC constitue la piste souhaitée pour l'avenir de CoastAppli.

4.3.1.2 Objectifs

Les objectifs sont de :

- proposer une organisation d'équipe et un mode de financement qui conviennent aux différents membres de CoastAppli pour la gestion courante et long terme du projet ;
- mettre en place des améliorations que ce soit en termes d'interactions avec les utilisateurs, de nouveaux protocoles de mesure, d'exploitation ou de valorisation des résultats.

4.3.1.3 Méthodes

Le retour d'expérience de ces trois années de projet à Guissény permet de dresser un tableau de coût annuel d'une telle initiative (Tableau 4.6). La partie « animation et médiation » avec les utilisateurs est essentielle. Le recrutement d'une personne à 50 % sur un an (ou temps plein sur six mois, à regrouper avec d'autres projets pour aboutir à un temps plein) est donc visé¹⁹⁰. Pour le reste, les coûts (évalués à 7 400 € HT et 32 jours ETP par an) devraient, dans le futur, être répartis vers les départements bretons, la région Bretagne, les communes et EPCI et les projets de recherche.

Coût pour neuf protocoles, déployables sur un ou plusieurs sites	Matériel (€)	Prestation (€)	Personnel (jour ETP)	Missions (€)	Stagiaire (5 mois)	Coût annuel (€ HT)
Déploiement [une fois + entretien à prévoir]	1 000					1 000
Maintenance (mise à jour logicielle + entretien du serveur) [pour l'ensemble des sites]		2 000				2 000
Animation (choix secteurs et protocoles + implantation sur le terrain et <i>back-office</i>) [une fois]			2 + 3 + 10			
Animation (formation + élaboration du carnet de terrain) [une fois, mais en fait à renouveler]			2 + 2			
Animation (réseau - dépannage et accompagnement sur le terrain)			2 + 2			
Animation (vérité terrain + journée de restitution)			2 + 1			
Traitements (traitements + validation et chargement des données)			6		3 100	3 100
Déplacements				1 000		1 000
Communication	300					300
Total			32			7 400

Tableau 4.6 : Coût annuel de CoastAppli pour neuf protocoles

¹⁹⁰ Le coût de six mois d'un poste de médiateur brut chargé est de 22 800 €.

Les améliorations et les développements de CoastAppli que nous souhaiterons mettre en place sur les trois prochaines années consistent à :

1) déployer l'application sur deux autres communes du département du Finistère (trois EPCI nous ont déjà sollicités). Le déploiement pourrait s'appuyer sur la commune ou l'EPCI, l'équipe CoastAppli de l'observatoire OSIRISC et le département du Finistère avec le partenariat Litto'Risques. Du côté de l'équipe CoastAppli, les engagements seraient d'intégrer les sites de la commune en moins de six mois dans l'application, d'animer la communauté d'utilisateurs, et d'effectuer une restitution semestrielle à annuelle des résultats. De son côté, la collectivité s'engagerait à prédéfinir les sites et les protocoles souhaités. Par ailleurs, pour garantir une forte audience et une bonne fréquence de mesures, un partenariat avec un collègue ou une structure éducative (comme une aire marine éducative par exemple) est demandé. La commune s'engagerait aussi à relayer les informations de l'animateur de CoastAppli sur la commune. Quant au département, il pourrait s'engager à financer une partie des coûts humains et matériels (missions, stages, etc.) ;

2) valoriser sur l'IDG INDIGEO les données de CoastAppli avec un développement pour visualiser les mesures, comme cela existe actuellement avec la refonte de l'outil MADDOG¹⁹¹ (initié par S. Suanez et amélioré dans le cadre de l'observatoire OSIRISC et du projet AGE0) sur les données des observatoires IUEM et OSIRISC (Figure 4.11) ;

3) intégrer à l'application le traitement photogrammétrique à partir des photographies smartphone (Cariou et al., 2021), mais lorsqu'il sera libre et automatisé ;

4) faire de CoastAppli une brique qui pourrait être utilisée librement par d'autres applications (un dépôt logiciel avec une licence CC-BY-NC-SA¹⁹² a eu lieu en 2022).

¹⁹¹ <https://portail.indigeo.fr/mviewer/?config=apps/maddog.xml&x=-495919.64701526467&y=6157730.037275833&z=11>

¹⁹² Cette licence « Creative Commons » permet de spécifier :

« 1) l'attribution : vous devez créditer l'Œuvre, intégrer un lien vers la licence et indiquer si des modifications ont été effectuées à l'Œuvre. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens raisonnables, sans toutefois suggérer que l'offrant vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Œuvre ;

2) l'absence d'utilisation commerciale : vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Œuvre, tout ou partie du matériel la composant ;

3) le partage dans les mêmes conditions : dans le cas où vous effectuez un remix, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Œuvre originale, vous devez diffuser l'Œuvre modifiée dans les mêmes conditions, c'est-à-dire avec la même licence avec laquelle l'Œuvre originale a été diffusée ;

4) l'absence de restrictions complémentaires : vous n'êtes pas autorisé à appliquer des conditions légales ou des mesures techniques qui restreindraient légalement autrui à utiliser l'Œuvre dans les conditions décrites par la licence » (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/fr/>).

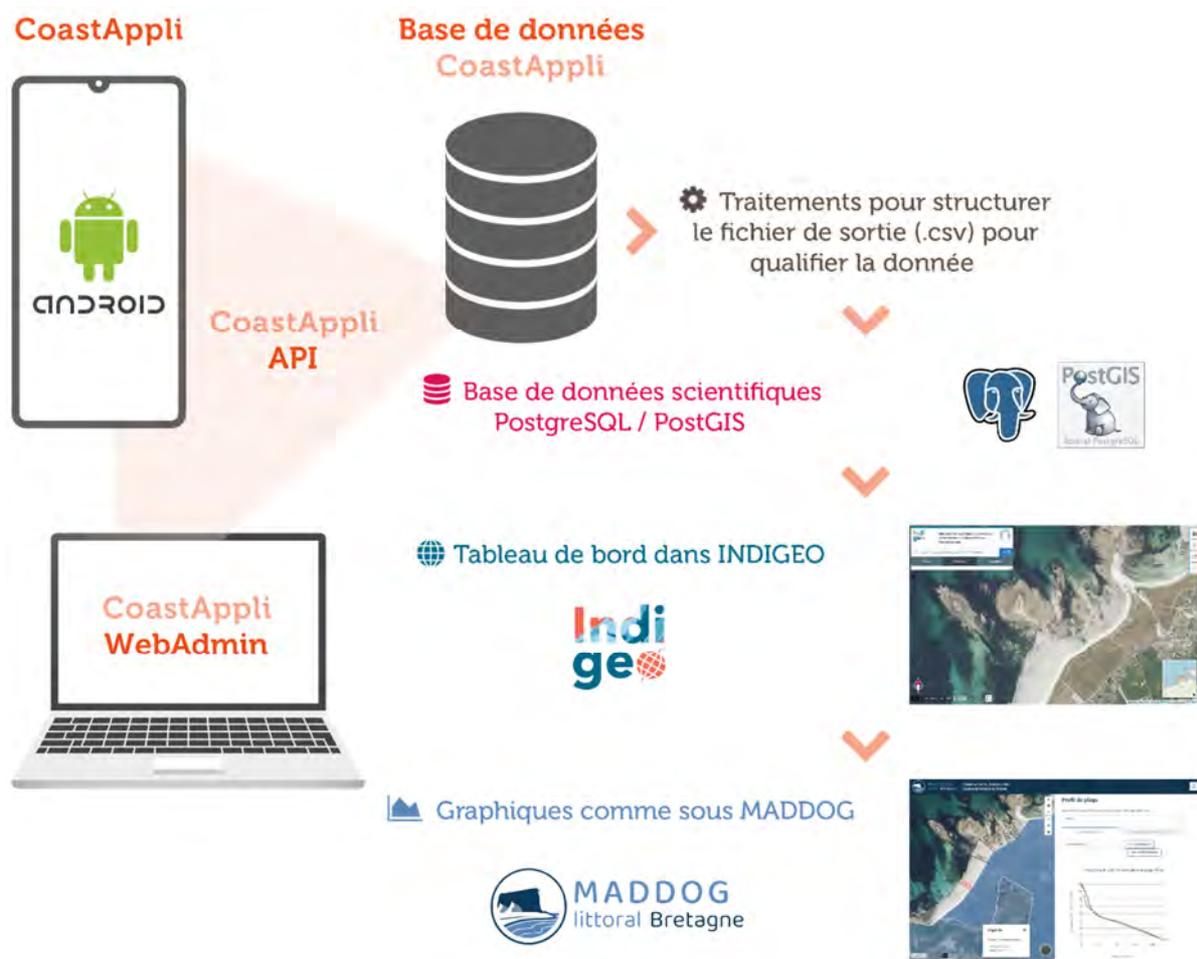


Figure 4.11 : Futur développement de CoastAppli pour une visualisation des résultats sur l'IDG INDIGO

4.3.1.4 Résultats attendus

Si ce projet de sciences citoyennes bénéficie de soutiens humain et financier durables, les résultats attendus sont de :

- proposer un outil pour le suivi citoyen des aléas côtiers sur plusieurs communes bretonnes associé à la visualisation et valorisation des résultats de recherche ;
- proposer un outil d'acculturation des citoyens aux aléas côtiers et un vecteur de communication entre élus, gestionnaires, citoyens et scientifiques ;
- proposer des innovations technologiques au suivi citoyen des aléas côtiers comme la photogrammétrie.

4.3.2 Risques côtiers et réalité virtuelle¹⁹³ (RISCOREV) : immersion et interaction du grand public pour une meilleure acculturation aux aléas et aux risques côtiers

4.3.2.1 Contexte

Tandis que l'Etat met au cœur de la culture du risque le premier volet qu'est l'information aux citoyens¹⁹⁴, deux comportements sont observés :

1) l'intérêt de certains citoyens pour ces informations reste faible, d'autant plus si le citoyen a un rapport peu entretenu à l'environnement à travers ses représentations sociales¹⁹⁵ et ses pratiques (Chionne, 2019) ;

2) d'autres (souvent résidents) sont bien informés, possèdent une bonne conscience du risque sur la commune (par exemple, Ruz et al., 2020), mais sont peu soucieux en raison d'une mise à distance du risque. Ce paradoxe des risques côtiers, décrit par Meur-Férec et Guillou (2019), s'explique par les aménités du bord de mer qui supplantent les risques, notamment par des stratégies discursives de relativisation du risque¹⁹⁶. L'acceptation du risque nécessiterait de remettre en question leur cadre de vie (perçu comme « privilégié ») et les relations que les individus entretiennent avec l'environnement et les institutions¹⁹⁷.

Quant au deuxième volet de la culture du risque qu'est l'adaptation des comportements au(x) risque(s), deux méthodes existent :

1) une confrontation directe avec l'environnement (expérience) : les événements extrêmes sont fortement médiatisés, mais au final peu d'individus ont été directement confrontés à ces phénomènes. Quant aux événements de moindre intensité et plus fréquents, ils sont parfois minimisés, car ne ressemblant pas à la description faite dans les médias (Meur-Férec et Guillou, 2019). Or, l'expérience directe apparaît comme

¹⁹³ La réalité virtuelle (RV) se définit par l'immersion et l'interaction de l'utilisateur pour qu'il puisse réaliser une tâche dans un environnement virtuel (Fuchs, 2016). La finalité de la RV est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensorimotrice et cognitive (utilisateur actif) dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel (Fuchs, 1996).

¹⁹⁴ Différentes directives, depuis les années 1980, ont permis aux citoyens l'accès à l'information sur les risques majeurs et les mesures de sauvegarde (documents d'informations comme le document d'information communal sur les risques majeurs (DICRIM) ou le plan communal de sauvegarde (PCS) ; les plans de prévention comme le PPRL ou le plan d'action et de prévention des inondations (PAPI)). L'Etat a également attribué les compétences des acteurs de l'administration publique en matière de communication et en obligeant ceux-ci à communiquer sur le sujet. Malgré ce dispositif réglementaire, le bilan paraît mitigé (Chionne, 2019). La loi « Climat et résilience » continue dans cette voie avec notamment l'article 237.

¹⁹⁵ Les représentations sociales sont constituées de connaissances sociales : une connaissance partagée du sens commun (Moscovici, 1976, 2013). Cette pensée sociale, ancrée dans une culture et liée à des pratiques, permet aux individus de comprendre leur environnement, de communiquer et d'agir à son égard. Cette pensée est une « réalité » qui donne du sens à ce qui semble étrange ou inhabituel. Ce faisant, les représentations contribuent au partage des idées, des valeurs et des croyances ; elles permettent ainsi de communiquer à travers un univers commun, et d'évoluer par le dialogue (Michel-Guillou et al., 2016).

¹⁹⁶ L'inconsistance entre les risques décrits et le fort attachement au lieu est compensée par des rationalisations (Breakwell, 2001 ; Bertoldo et al., 2021) : la comparaison sociale (eux, c'est pire), la comparaison des risques (oui, mais...) et le fatalisme (c'est fichu, c'est trop tard).

¹⁹⁷ L'Etat est souvent vu comme devant protéger les enjeux alors que celui-ci cherche à les limiter (Chionne, 2019). Cette contradiction se retrouve donc régulièrement dans les modes de gestion préconisés (maintien du trait de côte actuel *versus* recomposition spatiale). Luis et al. (2016) montrent que la connaissance du fonctionnement du milieu peut renforcer la confiance dans les techniques dures pour résoudre le problème. Cela permet aux individus de maintenir une identité de lieu positive (sentiment de contrôle par la technique) dans un environnement à risque (Meur-Férec et Guillou, 2019)

étant la meilleure manière de déterminer le comportement le plus adapté (Goutx, 2012) et de ne pas atténuer le risque dans le temps (Garnier et Surville, 2010) ;

2) une confrontation indirecte par des intermédiaires (mémoire) : les catastrophes naturelles passées peuvent constituer des facteurs contribuant à un « changement culturel » qui permettraient à ces sociétés de mieux les surmonter (Gaillard, 2006). La nécessité de conserver la mémoire des événements passés semble donc essentielle pour promouvoir la culture du risque (Beck, 2006), d'autant qu'aujourd'hui la mobilité des populations sur le territoire est forte¹⁹⁸.

Pour des changements de comportement (mesures de réduction des risques et d'adaptation), les conditions préalables sont : a) le besoin d'une culture vivante de la mémoire du risque, b) la confiance dans les informations scientifiques et celles de la communauté, c) la prise de décision concertée (inclusion et participation citoyenne) dans la formulation et la mise en œuvre des mesures de réduction des risques de catastrophe (Martinez et al., 2020).

La réalité virtuelle (RV) et la réalité augmentée¹⁹⁹ (RA) peuvent rassembler les deux volets de la culture du risque (l'information et l'adaptation des comportements) dans l'objectif de l'améliorer par le tétraptique discussion/compréhension/engagement/action (sachant que d'autres outils existent comme les jeux sérieux (par exemple, Gourmelon et al., 2013 ; Amalric et al., 2017 ; Becu et al., 2017 ; Laatabi et al., 2022)). Avec des explications des scientifiques, des élus et des gestionnaires engagés dans cette démarche, la RV et la RA peuvent rassembler la mémoire et l'expérience dans une simulation de certains aspects du monde réel. Sans danger pour l'utilisateur, il est possible de revivre un événement passé, mais aussi de s'affranchir de la réalité en imaginant un événement qui ne s'est jamais/pas encore produit. L'approche possibiliste (l'événement de référence du passé ne sera pas le même dans la configuration actuelle du changement climatique, des politiques d'aménagement) est donc complémentaire, et évite l'écueil du « déjà vu/déjà connu » figeant les réflexes. Cette expérience immersive et interactive de l'individu face à différents aléas côtiers plausibles permettrait idéalement²⁰⁰ :

- d'attirer un large public, motivé par l'expérience « nouvelle²⁰¹ » et sensorielle (Calil et al., 2021) ;
- l'objectivation d'un événement ou plusieurs événements en tant que catastrophe(s), contribuant à l'amplification sociale d'un risque (Bertoldo et al., 2021) et favorisant le changement ;
- d'intégrer l'événement comme une expérience réelle par le système cognitif (Markowitz et al., 2018) et donc de transformer pour certains utilisateurs, le « si j'avais su » en « je sais ce que j'ai à faire pour moi-même », permettant l'acquisition d'une résilience (Feng et al., 2020) par rapport aux supports traditionnels (vidéos, papiers) (Phillips et Marsh, 2015 ; Shriram et al., 2017) et d'une résilience protectrice en termes de dommages matériels et psychologiques (Goutx, 2012) ;

¹⁹⁸ En France, en 2014, 7,3 millions de personnes recensées ont changé de logement en un an. Les mobilités résidentielles à l'intérieur d'un même département sont les plus nombreuses (74 %). Lorsque les personnes changent de département de résidence, dans la majorité des cas (56 %), elles s'installent dans une autre région (Levy et Dzikowski, 2017).

¹⁹⁹ La RA se définit par sa finalité qui est de permettre à une personne de réaliser des activités sensorimotrices et cognitives dans un nouvel espace en associant l'environnement réel et un environnement virtuel (Fuchs et al., 2010).

²⁰⁰ Des études soulignent les effets contre-productifs de ces technologies immersives comme Simpson et al. (2022).

²⁰¹ Cela ne peut durer qu'un temps, en raison des effets de mode.

- de mettre en évidence la variété des comportements selon les individus (Goutx, 2012 ; Chionne, 2019) ;
- après cette expérience vécue en commun, les citoyens acculturés pourraient être plus ouverts au dialogue entre les différents acteurs du territoire (décideurs, gestionnaires, citoyens) et à la réflexion autour de l'adaptation aux risques (Jude et al., 2015 ; Calil et al., 2021).

Cette pratique de diffusion de la connaissance par immersion dans un environnement virtuel²⁰² n'est pas nouvelle, notamment en lien avec le changement climatique (pour une synthèse, Markowitz et Bailenson, 2021). En France pour l'aléa submersion marine, le projet REVE-Cot²⁰³ (2018-2021), coordonné par S. Costa, proposait d'améliorer, auprès des élus, les connaissances liées aux phénomènes d'inondations marines et continentales et de faire émerger des réflexions sur l'urbanisme possible des villes côtières de demain grâce à l'immersion sur quatre territoires²⁰⁴. Cette expérience a été réalisée pour deux événements par site : un événement de référence passé et le même simulé avec une élévation du niveau moyen des mers de 1 m induit par le changement climatique contemporain. En salle immersive du centre interdisciplinaire de réalité virtuelle (CIREVE, Université de Caen Normandie), mais visualisable également par casque, le projet permet de « (re)vivre » les aléas et se promener dans leur paysage, voire dans leur possible ville côtière de demain. L'environnement est ici utilisé comme outil de visualisation (vidéo de 1'30"), mais aussi pour faire émerger des réflexions sur l'urbanisme possible de villes côtières de demain. Les vidéos sont réalistes donnant la sensation des vagues (quatre mois de calcul du modèle hydrodynamique pour une rue), d'écoulement et de danger potentiel, observable d'un point de vue statique et à 360° avec une sonorisation²⁰⁵ (Costa et al., 2019a, 2022).

Dans notre contexte de l'observatoire OSIRISC, le projet RISCOREV, financé sur trois ans (2021-2024) par ISblue (AAP Formation), est original par rapport à REVE-Cot, car :

- il s'intéresse à l'aléa érosion des falaises, en sus de la submersion marine ;
- les citoyens sont le public visé ;
- les scénarios, les données et les points de vue sont coconstruits avec les acteurs locaux (élus et gestionnaires) et au sein de l'observatoire OSIRISC ;
- la RV (expérience individuelle à l'aide d'un casque de RV) est couplée à de la RA²⁰⁶ (expérience qui peut être collective, se visualisant *via* une application sur smartphone et/ou tablette) pour faciliter les discussions et les collaborations ;

²⁰² Comme l'écrit Fuchs (2016, p. 7), il y a confusion entre la « RV » et l'« immersion ». Cette dernière « *proposant à l'utilisateur de « plonger » dans un environnement virtuel en fournissant à son cerveau des stimuli sensoriels artificiels. Si l'immersion est nécessaire à la RV, elle n'est pas suffisante. Le second pilier indispensable pour pouvoir parler de RV est l'interaction de l'utilisateur pour qu'il puisse réaliser une tâche dans un environnement virtuel. Ainsi, on ne peut pas parler de RV pour une exploration d'un site via une visualisation à 360° à l'aide d'un visiocasque ou pour une séance de cinéma, même si l'image est projetée en relief sur un très grand écran, accompagnée d'un son spatialisé, parce que le spectateur n'y est que passif.* ».

²⁰³ Ce projet de recherche a été financé par la Région Normandie et la fondation de France (<https://cireve.unicaen.fr/index.php/projets/recentes/reve-cot/>).

²⁰⁴ Quiberville-Sainte-Marguerite-sur-Mer (Seine-Maritime, Normandie), Etretat (Seine-Maritime, Normandie), Villers-sur-Mer (Calvados, Normandie), Lancieux-Ploubalay (Côtes-d'Armor, Bretagne).

²⁰⁵ <https://www.tfl.info.fr/environnement-ecologie/video-montee-des-eaux-voici-en-simulation-3d-a-quoi-pourrait-ressembler-etretat-en-2100-2177461.html>

²⁰⁶ La RV couplée à la RA correspond à la réalité mixte (RM).

- notre projet de RM, comme définie par Fuchs (1996), allie immersion et interactivité (pas uniquement de la visualisation) ;

- il s'appuie sur un partenariat unique de formation et de recherche rassemblant des enseignants-chercheurs du CERV (ENIB) et de l'UBO, l'ingénieure pédagogique et l'ingénieur de RM d'ISblue, ainsi qu'une vingtaine d'étudiants de 5^e année de l'ENIB et du master 2 EGEL de l'UBO.

Par contre, comme REVE-Cot, nous intégrons un événement de référence passé et un événement futur intégrant le changement climatique et l'expérience s'accompagne d'explications sur la démarche scientifique (Simpson et al. (2022) soulignent que ces dernières jouent un rôle important dans l'augmentation du risque perçu).

4.3.2.2 Objectifs

Ce projet de RM, alliant formation et recherche, a pour vocation d'atteindre :

1) deux objectifs pédagogiques :

- a) pour les étudiants du master 2 EGEL, une pédagogie par projet menée dans le cadre de l'UE « Ateliers consacrés à la gestion de la zone côtière » en collaboration étroite avec les étudiants de l'ENIB permettant la pluridisciplinarité (collaboration), en s'appuyant sur leurs connaissances 1) pour trouver les documents réglementaires à disposition et identifier les communes à risques pouvant être intéressantes à étudier pour la RM, 2) pour fédérer des acteurs locaux pour les fédérer autour de cette innovation numérique, 3) en maniement de bases de données géographiques (Litto3D, BD Topo IGN, etc.) afin de collecter les données nécessaires pour mener à bien ce projet, 4) pour la signification accordée aux résultats et leur réception par les acteurs concernés (approches conceptuelles et méthodologiques partagées, comprises et acceptées) ;
- b) pour les étudiants de l'ENIB, une pédagogie par projet dans la cadre de leur projet de recherche informatique (PRI) en collaboration étroite avec les étudiants du master 2 EGEL, associant leur expertise en 1) informatique, 2) création et développement de données en RM.

2) quatre objectifs scientifiques : a) l'organisation de données variées pour une lecture fluide par les dispositifs de RM, b) le développement de l'interactivité dans ces dispositifs, c) une meilleure compréhension du risque par les citoyens, d) une base de discussion et de réflexion sur les choix de gestion pertinents pour limiter l'exposition future au risque entre citoyens, élus et gestionnaires.

L'organigramme du projet (Tableau 4.7) présente les tâches successives associées aux compétences des groupes d'étudiants. L'interaction entre les étudiants de l'UBO et de l'ENIB est faible la première année du projet, car les travaux ne sont pas synchrones. A partir de la deuxième année, le travail est synchrone permettant de développer la pluridisciplinarité. La coconstruction avec les élus et les gestionnaires est effective à partir de la deuxième année, lorsque les différents scénarios et supports de communication sont proposés par les étudiants, permettant une base de discussion. Cette rencontre avec les élus et les gestionnaires est réalisée par tous les étudiants du projet (EGEL et ENIB) avec l'aide de l'équipe encadrante.

Année	Semestre	Partenaire ISblue	UE	Actions envisagées
2021-2022	1	UBO (IUEM)	Atelier	1) Etat des lieux des documents réglementaires à disposition (par exemple, PPRL post-Xynthia) pour identifier les communes à risques pouvant être intéressantes à étudier pour la RM, en collaboration avec l'équipe encadrante
				2) Choix des deux communes : une pour l'aléa submersion marine, une pour l'aléa érosion côtière (côtes à falaises)
				3) sur chaque commune : précision sur les points de visualisation envisagés et les différents scénarios possibles (d'aléas)
				4) Préparation de l'entretien et des supports de communication avec les acteurs locaux pour les fédérer autour de cette expérience de RM, en collaboration avec l'équipe encadrante
				5) Collecte de données géographiques (Litto3D, BD topo IGN, etc.) sur ces communes servant de base de données aux simulations afin de les livrer à l'ingénieur RM du projet
				6) Rapport scientifique et pédagogique pour le développement du projet de RM
2022-2023	1	UBO (IUEM)	Atelier	1) Vérification de la compatibilité des cahiers des charges scientifique, pédagogique et technique
				2) Suivi de projet auprès des étudiants ENIB, élus, gestionnaires, citoyens pour le bon déroulement du projet de RM
				3) Collecte de données sur le terrain pour alimenter la base de données nécessaire aux simulations des aléas érosion et submersion marine (mobilier urbain qui peut être un frein à l'écoulement, précision sur le type d'habitat, etc.)
2022-2023	1	ENIB	PRI	4) Présentation des différents scénarios auprès des élus et des gestionnaires et sélection des scénarios les plus adaptés
				5) Restitution des nouvelles données aux étudiants ENIB
				6) Réalisation d'une trame d'enquête pour les citoyens pour apprécier les changements avant et après l'expérience de RM
				1) Intégration des nouvelles données collectées sur le terrain par les étudiants EGEL pour l'aléa submersion marine
				2) Mise en place des premières simulations sur la commune soumise à la submersion marine
				3) Intégration des premiers retours d'expérience de la part l'équipe encadrante
2022-2023	2	ENIB	PRI	4) Présentation des différents scénarios auprès des élus et des gestionnaires et sélection des scénarios les plus adaptés
				1) Intégration des nouvelles données collectées sur le terrain par les étudiants EGEL pour l'aléa érosion
				2) Mise en place des premières simulations sur la commune soumise à l'érosion
				3) Intégration des premiers retours d'expérience de la part de l'équipe encadrante

2023-2024	1	UBO (IUEM)	Atelier	1) Invitation des élus et gestionnaires pour tester les 1 ^{res} simulations de RM
				2) Collecte des retours d'expérience de la part des élus et des gestionnaires
				3) Proposition d'améliorations auprès des élus, des gestionnaires, en collaboration avec les étudiants ENIB et l'équipe encadrante
				4) Suivi de projet auprès des étudiants ENIB, élus, gestionnaires, citoyens pour le bon déroulement du projet de RM
				5) Passation des enquêtes avant l'expérience de RM
	1	ENIB	PRI	1) Finalisation des deuxièmes simulations de RM
				2) Présentation de ces dernières aux élus et aux gestionnaires
				3) Intégration des retours d'expérience des élus, des gestionnaires, en collaboration avec les étudiants EGEL et l'équipe encadrante
	2	ENIB	PRI	1) Finalisation des simulations de RM
				2) Présentation finale aux citoyens
			3) Intégration des retours d'expérience	
			4) Finalisation des projets de RM et réalisation d'un rapport bilan	

Tableau 4.7 : Organisation du projet RISCOREV sur trois ans avec les étapes réalisées par les étudiants du master 2 EGEL et de 5^e année de l'ENIB

4.3.2.3 Méthodes

a. Choix des communes

Pour déterminer les deux communes finistériennes côtières de travail (sur 107 communes), deux critères étaient définis : 1) la commune doit faire l'objet d'un PPRL validé (13 communes) ou un PPRSM validé (15 communes), 2) la communauté de communes doit être impliquée dans les démarches OSIRISC ou Litto'Risques avec l'UBO.

Pour le 1^{er} critère, il était indispensable de partir de données validées par l'Etat, qui servent à élaborer nos scénarios de RM. Pour le second critère, il permettait d'assurer un premier engagement du territoire et de ses élus dans une démarche de prise en compte des risques côtiers.

Au final, 17 communes remplissaient ces critères. Il s'agissait de Goulven, Plounéour-Brignogan, Kerlouan, Guissény, Plouguerneau, Penmarch, Le Guilvinec, Treffiagat, Plobannaec-Lesconil, Loctudy, Ile-Tudy, Pont-l'Abbé, Combrit, Bénodet, Fouesnant, la Forêt-Fouesnant, Concarneau (Tableau 4.8).

Commune	EPCI	EPCI partenaire de Litto' Risques	Découpage des PPRL approuvé	Nombre de constructions concernées par les aléas (tous niveaux confondus)	Découpage des PPRSM	Surface (ha) en zone rouge	Nombre de constructions en zone rouge	Surface (ha) en zone bleue	Nombre de constructions en zone bleue	Surface (ha) en zone verte	Nombre de constructions en zone verte
Goulven		Oui				29,12	2	87	29	0	0
Plounéour-Brignogan-plages	CC Lesneven côte des légendes	Oui			Côte nord 1	12	4	20	53	0,73	1
Kerlouan		Oui				23,42	3	17,5	41	12	1
Guissény		Oui				120	8	84,66	121	25,69	3
Plouguerneau		CC Pays des abers	Oui				Plouguerneau	7.16	7	47.69	65	2.80	13
Penmarch	CC Pays bigouden sud	Oui	PPRL Ouest Odet	2 535							
Le Guilvinec		Oui		337							
Treffiat		Oui		736							
Plobannaec-Lesconil		Oui		322							
Loctudy		Oui		801							
Pont-l'Abbé		Oui		221							
Combrit		Oui		162							
Ile-Tudy		Oui		807							
Bénodet		CC Pays fouesnantais		Oui	PPRL Est Odet	128					
Fouesnant	Oui		689								
La Forêt-Fouesnant	Oui		140								
Concarneau	CA Concarneau		Oui	569							

Tableau 4.8 : Présélection des communes du Finistère exposées aux risques d'érosion côtière et/ou de submersion marine (CC pour communauté de communes et CA pour communauté d'agglomération, Ipenburg et al., 2022)

Pour les communes concernées par un PPRSM, il est possible de comparer le nombre de constructions en zones rouge (aléas les plus forts) et bleue (aléas moyens ou faibles) : c'est Guissény qui apparaît comme la commune la plus exposée avec huit constructions en zone rouge et 121 en zone bleue. En ce qui concerne les surfaces, c'est aussi Guissény qui est en haut de classement avec 120 ha en zone rouge, 85 ha en zone bleue et 26 ha en zone verte (zone tampon naturelle : les espaces non directement affectés par le risque submersion marine, mais où de nouveaux aménagements pourraient aggraver les risques de submersion marine ou en provoquer de nouveaux).

Cette exposition forte au risque de submersion marine est un critère prioritaire, car ce territoire pourrait être davantage intéressé par notre dispositif de RM. Par ailleurs, les élus et gestionnaires de cette commune et de l'EPCI (CLCL) sont très impliqués sur les thématiques des risques côtiers avec une volonté de diffusion des connaissances au public. Pour l'aléa submersion marine, Guissény est donc la commune sélectionnée.

Concernant l'aléa érosion, le choix s'est finalement tourné vers la falaise de Plouguvelin, au niveau de la plage de Porsmilin. Cette commune n'est pas présente sur la liste, car cet aléa n'est pas pris compte dans un PPR. Cependant, elle a l'avantage de présenter un risque d'érosion de la falaise rocheuse à l'ouest de la plage, qui menace la pérennité du GR 34 (commune de Plouguvelin). D'autre part, cette falaise a été

étudiée par le laboratoire LETG-Brest (projet F3, instrumentation multiparamètre et continue, voir 2.3.1) et nous permet d'avoir de nombreuses données scientifiques notamment des levés photogrammétriques et au scanner laser terrestre. Enfin, un projet de RV financé par ISblue s'intéressait déjà à la plage de Porsmilin. Cela nous permettait donc de pouvoir mutualiser les données avec l'aide de l'ingénieur en charge de ce projet, M. Kernec.

b. Six étapes à réaliser

Suite aux échanges avec M. Kernec et R. Ruault, impliqués dans le projet RISCOREV, nous avons identifié six grandes étapes méthodologiques nécessaires pour arriver au produit final sur les deux sites :

1) collecter des nuages de points 3D issus de la photogrammétrie par drone et toute autre donnée permettant de représenter la morphologie de la zone d'intérêt (topographie et bathymétrie si besoin) (Figure 4.12). Les données issues de la photogrammétrie permettent généralement de reconstituer des objets 3D à THRS, rendant agréable l'expérience de l'utilisateur en RM. Mais celles-ci ne couvrent qu'une partie du terrain. Comme l'utilisateur sera amené à visualiser un aléa ou interagir avec son milieu en fonction du scénario, utiliser tous éléments permettant de représenter le plus fidèlement possible l'environnement ambiant est important. Ces modèles complémentaires peuvent être issus des orthophotographies pour l'imagerie, de MNT pour le relief, ou de couches traitées dans les logiciels SIG pour des éléments de contextes (limites du cadastre, routes, bâtiments, etc.) ;



Figure 4.12 : Plage de Porsmilin (Plougonvelin et Locmaria-Plouzané) vue du modèle 3D avec le logiciel Unity (Kernec)

2) créer des scénarios relatifs aux aléas côtiers (quel aléa de référence, où, comment, avec quels points de vue ?) à partir de jeux de données collectés auprès des services de l'Etat, des collectivités, des scientifiques ou sur le terrain. Le type de scénario choisi est le « avant/pendant/après aléa », décrit ci-dessous ;

- avant l'aléa : une prise en main des éléments de navigation et d'interaction est proposée dans l'environnement actuel (sans aléas) pour que l'utilisateur prenne ses repères en RM ;
- pendant l'aléa : l'aléa est présenté avec des effets visuels et sonores (simulation d'une hauteur de submersion, d'un mouvement gravitaire pour l'érosion détruisant partiellement le sentier littoral, etc.). Dans le cadre du projet RISCOREV, l'effet visuel des vagues de

submersion ne sera pas issu de simulation en temps réel à partir de logiciel de calcul océanographique (travaux complexes, consommateurs en puissance de calcul, etc.), mais un effet visuel relativement simple pour éveiller la sensibilité de l'utilisateur ;

- après l'aléa : l'analyse des conséquences de l'aléa sur le terrain avec un milieu modifié est visualisable.

3) simuler les scénarios avec une hauteur d'eau ou un volume érodé, en y ajoutant des effets visuels ou sonores (son, vidéo d'une tempête par ex.) pour davantage d'immersion. A partir du logiciel Unity²⁰⁷, les fonctionnalités identifiées (se déplacer ou se téléporter sur la carte, changer le temps, afficher/enlever des couches de données, faire apparaître ou disparaître des informations relatives à la zone explorée) seront développées de manière modulable, c'est-à-dire transposable à chaque site et adaptable à chaque scénario. Il convient de rappeler que l'affichage d'éléments dans la RM ne signifie pas qu'il y a de l'interactivité : l'apprenant reçoit ces éléments affichés, mais n'agit pas concrètement dans cette RM. Dans un premier temps, ces modules seront développés pour une utilisation en RV, c'est-à-dire avec un casque (relié ou non à un ordinateur), proposant à l'utilisateur de s'immerger dans l'environnement sans être physiquement sur le terrain. Dans un deuxième temps, ces modules seront développés pour une utilisation en RA, avec deux modes possibles. Un premier mode permettant à l'utilisateur sur le terrain d'utiliser une tablette ou un smartphone pour afficher des informations ou des conséquences de l'aléa étudié directement sur le terrain. Un second mode permettant d'afficher la zone étudiée à travers une tablette ou un smartphone sur une surface plane (un bureau ou une table) laissant le choix à l'utilisateur de faire apparaître les conséquences de l'aléa sur le terrain. Cette dernière configuration permet à plusieurs utilisateurs de collaborer et de discuter autour de la maquette virtuelle puisque ceux-ci se voient dans le monde réel et peuvent interagir (ils ne sont pas isolés par le casque de réalité virtuelle) ;

4) créer des modules favorisant l'interactivité où l'apprenant agit concrètement dans cette RM (en intégrant des nouveaux aménagements au paysage (digue, etc.), en accédant à une boîte à outils pour mesurer la longueur du sentier affecté, ou mesurer *a posteriori* la laisse d'inondation sur les maisons, etc. ;

5) évaluer les scénarios et intégrer le retour d'expérience des utilisateurs ;

6) évaluer les changements de pratiques des utilisateurs grâce à des enquêtes avant et après l'expérience de RM (la dernière enquête, après l'expérience de RM, sera réalisée par l'équipe encadrante).

4.3.2.4 Résultats attendus

Au terme de ce projet, nous souhaiterions savoir :

- les étudiants ont acquis des compétences en a) travail en groupe, au sein des différentes promotions étudiantes, mais aussi avec des acteurs universitaires (enseignants-chercheurs, ingénieurs), des gestionnaires et des citoyens, b) pédagogie active, avec l'interaction recherche-action-formation ;

- si l'expérience vécue virtuellement permet une meilleure compréhension des aléas et des risques côtiers par les citoyens ;

- les différents comportements rencontrés lors de cette expérience ;

²⁰⁷ Unity est une solution logicielle pour le développement de contenu 3D et d'expérience immersive.

- si cette expérience change concrètement et durablement les comportements. Ce n'est pas sûr au regard de certaines études qui montrent qu'avoir vécu un événement extrême conduit peu les individus à réagir ou à prendre n'importe quelle disposition afin d'améliorer leur sécurité (Heitz, 2005, 2009 ; Meur-Férec et al., 2011 ; Hellequin et al., 2013). Comme l'évoque (Chionne, 2019, p. 36), « *les individus semblent éprouver des difficultés à dépasser le stade du changement de conscience et de recherche d'informations* » ;

- si cet outil permet une base d'interactions et de discussions constructives sur les choix de gestion pertinents pour limiter l'exposition future aux risques côtiers.

Ce projet devrait se poursuivre avec un dépôt de projet de recherche ANR (axe H15 « Interfaces : mathématiques, sciences du numérique - sciences humaines et sociales » de l'appel à projets générique 2024) et de formation à l'échelle européenne (demande de Boost'Europe en 2013 et dépôt du projet Erasmus+ partenariats de coopération en 2014).

Conclusion

Ce travail de géographe mené sur l'objet de recherche « falaise » et son corollaire l'érosion, commencé depuis mon mémoire de master 2 (2008-2009), a été passionnant en raison de :

- la rencontre d'enseignants-chercheurs, chercheurs, ingénieurs, techniciens, étudiants, élus, gestionnaires et citoyens auprès de qui j'apprends tous les jours ;
- l'attachement aux sites suivis en Normandie, car j'y retrouve une excellente équipe (S. Costa, R. Davidson et O. Maquaire) et de belles falaises ;
- la découverte de nouveaux terrains grâce aux collaborations ;
- l'absence de routine dans un métier où les travaux de terrain alternent avec ceux menés en laboratoire, les enseignements et la coordination de projet.

Face au changement climatique et aux enjeux installés imprudemment très près des falaises, de nombreuses questions scientifiques (mais aussi politiques et sociales) demeurent sur les vitesses, les rythmes et les modalités d'érosion, tout comme sur les facteurs impliqués dans la fatigue et le déclenchement des mouvements gravitaires ou sur la gestion actuelle et future de ces territoires à risques. Cette HDR a, je l'espère, souligné l'intérêt d'observer les falaises avec des points de vue variés (vertical, oblique, horizontal et interne) avec une approche naturaliste et par emboîtement d'échelles (spatiales et temporelles) et en interaction avec les acteurs du territoire. Cela permet de mieux comprendre cet objet d'interface, partie du système avant-côte/plate-forme/plage/falaise/plateau. Les principaux résultats de recherche, issus d'une démarche pluridisciplinaire avec une forte composante de terrain (Normandie, Bretagne), sont :

- l'obtention des vitesses, des rythmes et des modalités de recul des falaises sur plusieurs décennies et sur un linéaire de 100 km (Seine-Maritime) avec le suivi du référentiel « haut de falaise » (point de vue vertical). Ces éléments constituent la clé de voûte de la cartographie de l'aléa « recul du trait de côte » dans le cadre de la loi « Climat et résilience » (2021) ;
- la mise en évidence de la prévalence des actions marines dans la fatigue (fracturation) et la rupture des falaises de Varengueville-sur-Mer et de Sainte-Marguerite-sur-Mer (Seine-Maritime), notamment grâce au suivi du référentiel « front de falaise » (points de vue horizontal et interne). Les variations de température sont, quant à elles, propices à l'évolution de la fracturation des falaises de Plougonvelin (Finistère) et donc à la fatigue du matériel (point de vue interne). Ces résultats suggèrent que le changement climatique pourrait exacerber l'érosion ;
- la mise en exergue, grâce aux méthodes de suivi du front de falaise par lasergrammétrie et photogrammétrie terrestres sur plusieurs centaines de mètres depuis 2010 (point de vue horizontal), que l'éboulement (chutes de blocs et de pierres) peut être impliquée dans presque un tiers de l'érosion des falaises de Varengueville-sur-Mer. Ces départs de matériel, souvent négligés en raison leur grande échelle, sont désormais quantifiés et peuvent être mieux intégrés dans les recherches ;
- la mise en place des deux premières instrumentations multiparamètres et continues sur quelques mois (Plougonvelin et Sainte-Marguerite-sur-Mer) pour mieux comprendre 1) la contribution respective des agents et des processus marins et continentaux à la fatigue et à la rupture des falaises, 2) les interactions du système avant-côte/plate-forme/plage/falaise/plateau (point de vue interne, entre autres). L'exploitation de ces jeux de données constitue un défi scientifique collectif pour la décennie qui vient ;

- la proposition d'une nouvelle méthode d'observation et de suivi de l'érosion du front de falaise à l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire (sur plusieurs dizaines de kilomètres), grâce aux images satellites dépointées et THRS Pléiades (point de vue oblique). Avec le développement de l'AP, ces images pourraient bénéficier de la détection automatisée de l'érosion ;

- la mise à disposition de nouveaux outils à destination des citoyens 1) pour le suivi des aléas côtiers avec l'application smartphone et tablette CoastAppli, 2) pour l'acculturation et l'amorce de discussions sur les aléas et les risques côtiers avec la RM (points de vue horizontal, vertical et oblique).

Les aspects thématique et méthodologique, associés aux campagnes de terrain, que j'ai pu développer en équipe, aussi bien pour la recherche fondamentale qu'appliquée, constituent, selon moi, une vraie force. En effet, une hypothèse n'est valable que si elle peut être vérifiée par des méthodes solides, grâce à des outils adaptés. *A contrario*, découvrir des méthodes et des techniques provenant ou non de sa discipline favorise souvent l'émergence de nouvelles idées et de nouvelles hypothèses thématiques (Feuillet, 2021).

Ces interactions thématiques et méthodologiques me semblent donc essentielles pour réaliser l'ensemble des étapes de la démarche scientifique. De plus, au système complexe qui caractérise le littoral et notamment les côtes à falaises, les choix de société, de gestion et politiques se surajoutent et illustrent eux aussi les interactions et la complexité, où le prêt-à-penser est illusoire. Ces messages seront ceux que je chercherai à transmettre aux étudiants.

Références bibliographiques

- Adams, P.N., Anderson, R.S., Revenaugh, J., 2002. Microseismic measurement of wave-energy delivery to a rocky coast. *Geology* 30, 895-898. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0895:MMOWED>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0895:MMOWED>2.0.CO;2)
- Adams, P.N., Storlazzi, C.D., Anderson, R.S., 2005. Nearshore wave-induced cyclical flexing of sea cliffs. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 110. <https://doi.org/10.1029/2004JF000217>
- Airbus, 2015. *Coastline Changes and Satellite Images Storms over La Salie Beach, French Atlantic Coast* (Geo Reportage). AIRBUS Defence & Space.
- Airbus Defence and Space, 2017. Airbus révolutionne le marché de l'observation de la Terre avec sa constellation Pléiades Neo, les premiers satellites optiques commerciaux utilisant le SpaceDataHighway [WWW Document]. *Airbus*. URL <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/fr/2017/09/Press-release-SpaceDataHighway.html> (consulté le 9.24.20).
- Al Smadi, A., Yang, S., Mehmood, A., Abugabah, A., Wang, M., Bashir, M., 2021. Smart pansharpener approach using kernel-based image filtering. *IET Image Processing* 15, 2629-2642. <https://doi.org/10.1049/ipr2.12251>
- Aldred, J., Eppes, M.C., Aquino, K., Deal, R., Garbini, J., Swami, S., Tuttle, A., Xanthos, G., 2016. The influence of solar-induced thermal stresses on the mechanical weathering of rocks in humid mid-latitudes. *Earth Surface Processes and Landforms* 41, 603-614. <https://doi.org/10.1002/esp.3849>
- Allan, J.C., Hart, R., Tranquili, J.V., 2006. The use of Passive Integrated Transponder (PIT) tags to trace cobble transport in a mixed sand-and-gravel beach on the high-energy Oregon coast, USA. *Marine Geology* 232, 63-86. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.07.005>
- Almeida, L.P., Almar, R., Bergsma, E.W.J., Berthier, E., Baptista, P., Garel, E., Dada, O.A., Alves, B., 2019. Deriving High Spatial-Resolution Coastal Topography From Sub-meter Satellite Stereo Imagery. *Remote Sensing* 11, 590. <https://doi.org/10.3390/rs11050590>
- Amalric, M., Anselme, B., Bécu, N., Delay, E., Marilleau, N., Pignon, C., Rousseaux, F., 2017. Sensibiliser au risque de submersion marine par le jeu ou faut-il qu'un jeu soit spatialement réaliste pour être efficace ? *Sciences du jeu*. <https://doi.org/10.4000/sdj.859>
- Anselin, L., 1995. Local Indicators of Spatial Association - LISA. *Geographical Analysis* 27, 93-115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Anselin, L., 1996. The Moran scatterplot as an ESDA tool to assess local instability in spatial association, in : *Spatial Analytical Perspectives on GIS*, p. 111-125.
- Astrium, 2012. *Pléiades Imagery - User Guide* (Technical report No. USRPHR-DT-125-SPOT-2.0).
- Augris, C., Clabaut, P., Costa, S., Gourmelon, F., Latteux, B., 2004. *Evolution morpho-sédimentaire du domaine littoral et marin de la Seine-Maritime*, Ifremer. ed. Paris.
- Bachelard, G., 1938. *La Formation de l'esprit scientifique : contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*. Librairie philosophique J. Vrin, Paris, France.
- Balica, S.F., Wright, N.G., van der Meulen, F., 2012. A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. *Natural Hazards* 64, 73-105. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0234-1>
- Balk, D., Montgomery, M.R., McGranahan, G., Kim, D., Mara, V., Todd, M., Buettner, T., Dorélien, A., 2009. Mapping Urban Settlements and the Risks of Climate Change in Africa, Asia and South America, in : *Population Dynamics and Climate Change, United Nations Population Fund*, p. 80-103.

- Balleve, M., Bosse, V., Dabard, M.-P., Ducassou, C., Fourcade, S., Paquette, J.-L., Peucat, J.-J., Pitra, P., 2013. Histoire géologique du Massif armoricain : actualité de la recherche. *Bulletin de la Société géologique et minière de Bretagne* 92.
- Barnett, J., Lambert, S., Fry, I., 2008. The hazards of indicators: insights from the environmental vulnerability index. *Annals of the Association of American Geographers* 98, 102-119.
- Basara, N., 2019. *L'érosion des littoraux à falaises meubles en Bretagne : aléa, enjeux et gestion du risque* (thèse de doctorat). Université de Bretagne Occidentale.
- Battistini, R., Martin, S., 1956. La « Plate-forme à écueils » du Nord-Ouest de la Bretagne. *Norois* 10, 147-161. <https://doi.org/10.3406/noroi.1956.1121>
- Beauvais, F., 2021. *Approches géographiques et agro-climatologiques des conséquences du changement climatique sur l'agrosystème céréalier de Normandie : constat et étude d'impact prospective appliqués au blé tendre d'hiver* (thèse de doctorat). Université de Caen Normandie.
- Beauvais, F., Cantat, O., Madeline, P., Le Gouée, P., Brunel-Muguet, S., Medjkane, M., 2019. Quelles conséquences du changement climatique sur le blé tendre en Normandie aux horizons 2050 et 2100 ? - Étude d'impact prospective à partir du modèle ALADIN-Climat. *Climatologie* 16, 129-160. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1414>
- Becerra, S., Peltier, A., 2009. *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*. L'Harmattan, Paris.
- Beck, E., 2006. *Approche multi-risques en milieu urbain : Le cas des risques sismiques et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin)* (thèse de doctorat). Université de Strasbourg 1.
- Becu, N., Amalric, M., Anselme, B., Beck, E., Bertin, X., Delay, E., Long, N., Marilleau, N., Pignon-Mussaud, C., Rousseaux, F., 2017. Participatory simulation to foster social learning on coastal flooding prevention. *Environmental Modelling & Software* 98, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.003>
- Benumof, B.T., Storlazzi, C.D., Seymour, R.J., Griggs, G.B., 2000. The Relationship between Incident Wave Energy and Seacliff Erosion Rates: San Diego County, California. *Journal of Coastal Research* 16, 1162-1178.
- Berleemann, M., Steinhardt, M.F., 2017. Climate Change, Natural Disasters, and Migration - a Survey of the Empirical Evidence. *CESifo Economic Studies* 63, 353-385. <https://doi.org/10.1093/cesifo/ifx019>
- Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G., Corriveau, M., Caulet, C., Barnett, R.L., 2021. Long-Term Evolution and Monitoring at High Temporal Resolution of a Rapidly Retreating Cliff in a Cold Temperate Climate Affected by Cryogenic Processes, North Shore of the St. Lawrence Gulf, Quebec (Canada). *Journal of Marine Science and Engineering* 9, 1418.
- Bernatchez, P., Jolivet, Y., Corriveau, M., 2011. Development of an automated method for continuous detection and quantification of cliff erosion events. *Earth Surface Processes and Landforms* 36, 347-362. <https://doi.org/10.1002/esp.2045>
- Beroutchachvili, N., Bertrand, G., 1978. Le Géosystème ou "système territorial naturel". *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest* 49, 167-180. <https://doi.org/10.3406/rgpso.1978.3548>
- Bertin, X., de Bakker, A., Van Dongeren, A., Coco, G., Andre, G., Ardhuin, F., Bonneton, P., Bouchette, F., Castelle, B., Crawford, W.C., 2018. Infragravity waves: From driving mechanisms to impacts. *Earth-Science Reviews* 177, 774-799.
- Bertoldo, R., Guignard, S., Dias, P., Schleyer-Lindenmann, A., 2021. Entre naturalisation et gestion : Une analyse de l'amplification sociale des risques côtiers. *7ème Colloque Interdisciplinaire ARPEnv "Défis*

- environnementaux d'aujourd'hui et de demain : Mieux comprendre pour mieux accompagner le changement*". Nantes (en ligne), France.
- Bertrand, C., Bertrand, G., 2014. La nature-artefact : entre anthropisation et artialisations, l'expérience du système GTP (Géosystème-Territoire-Paysage). *L'Information géographique* 78, 10-25. <https://doi.org/10.3917/lig.783.0010>
- Bezore, R., Kennedy, D.M., Ierodiaconou, D., 2016. The drowned Apostles: the longevity of Sea stacks over Eustatic cycles. *Journal of Coastal Research* 75, 592-596. <https://doi.org/10.2112/SI75-119.1>
- Bignot, G., 1962. *Etude sédimentologique et micropaléontologique de l'Eocène du Cap d'Ailly (près de Dieppe-Seine-Maritime)* (thèse de doctorat). Université de Paris.
- Bignot, G., 1971. *Dieppe (ouest)*. Carte géologique à 1/50000.
- Billerey, M., 2018. *Le suivi de l'érosion côtière : projet OSIRISC/OSIRISC+* (mémoire de M2 SET). Université d'Aix-Marseille.
- Blaise, E., 2017. *Etude des dynamiques du trait de côte de la région Bretagne à différentes échelles spatio-temporelles* (thèse de doctorat). Université de Bretagne Occidentale.
- Blaise, E., Suanez, S., Stéphan, P., Fichaut, B., David, L., Cuq, V., Autret, R., Houron, J., Rouan, M., Floch, F., Arduin, F., Cancouët, R., Davidson, R., Costa, S., Delacourt, C., 2015. Bilan des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la dynamique de recul du trait de côte en Bretagne. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 21, 267-292. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11104>
- Blesius, J.-C., 2013. Discours sur la culture du risque, entre approches négative et positive. Vers une éducation aux risques ? *Géographie et cultures* 249-265. <https://doi.org/10.4000/gc.3141>
- Bodéré, J.-C., Hallégouët, B., Piriou, N., 1983. *Schéma de protection contre la mer du littoral finistérien, communes de Guissény et de Plouguerneau, zone du Curnic* (rapport d'étude (non publié)). Faculté des Lettres et des Sciences Sociales, Université de Bretagne Occidentale.
- Bodéré, J.-C., Pourinet, L., 2001. Typologie des côtes de France. *APML* 5, 4.
- Bonneuil, C., Joly, P.-B., 2013. III. Science et gouvernement des risques : la fabrique de l'expertise - Démocratiser l'expertise ? *Repères* 59-76.
- Breakwell, G.M., 2001. Mental models and social representations of hazards: the significance of identity processes. *Journal of Risk Research* 4, 341-351. <https://doi.org/10.1080/13669870110062730>
- Bricheno, L.M., Wolf, J., 2018. Future wave conditions of Europe, in response to high-end climate change scenarios. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 123, 8762-8791.
- Bruun, P., 1983. Review of conditions for uses of the Bruun rule of erosion. *Coastal Engineering* 7, 77-89. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(83\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0378-3839(83)90028-5)
- Bruun, P., 1988. The Bruun Rule of Erosion by Sea-Level Rise: A Discussion on Large-Scale Two- and Three-Dimensional Usages. *Journal of Coastal Research* 4, 627-648.
- Buchou, S., 2019. *Quel littoral pour demain ? Vers un nouvel aménagement des territoires côtiers adapté au changement climatique* (rapport parlementaire).
- Bulteau, T., Garcin, M., 2011. *Synthèse des travaux menés sur l'observation du trait de côte* (No. BRGM/RP-59396-FR). BRGM.
- Calil, J., Fauville, G., Queiroz, A.C.M., Leo, K.L., Mann, A.G.N., Wise-West, T., Salvatore, P., Bailenson, J.N., 2021. Using Virtual Reality in Sea Level Rise Planning and Community Engagement - An Overview. *Water* 13, 1142. <https://doi.org/10.3390/w13091142>

- Cariolet, J.-M., 2011. *Inondation des côtes basses et risques associés en Bretagne : vers une redéfinition des processus hydrodynamiques liés aux conditions météo-océaniques et des paramètres morpho-sédimentaires* (thèse de doctorat). Université de Bretagne Occidentale.
- Cariolet, J.-M., Suanez, S., 2013. Runup estimations on a macrotidal sandy beach. *Coastal Engineering* 74, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.11.008>
- Cariou, E., Baltzer, A., Leparoux, D., Lacombe, V., 2021. Collaborative 3D Monitoring for Coastal Survey: Conclusive Tests and First Feedbacks Using the SELPhCoAST Workflow. *Geosciences* 11, 114. <https://doi.org/10.3390/geosciences11030114>
- Case, A., 1992. Neighborhood influence and technological change. *Regional science and urban economics* 22, 491-508.
- Castedo, R., Murphy, W., Lawrence, J., Paredes, C., 2012. A new process-response coastal recession model of soft rock cliffs. *Geomorphology* 177-178, 128-143. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.020>
- Caye Daudt, R., 2020. *Convolutional neural networks for change analysis in Earth observation images with noisy labels and domain shifts* (thèse de doctorat). Institut polytechnique de Paris.
- Caye Daudt, R., Le Saux, B., Boulch, A., 2018. Fully Convolutional Siamese Networks for Change Detection. *2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, p. 4063-4067. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2018.8451652>
- CEREMA, 2018. *Connaissance du trait de côte - Evaluation prospective des enjeux affectés par le recul du trait de côte* (No. 978-2-37180-428-9), Connaissances.
- CEREMA, 2021a. Dynamiques et évolution du littoral - Fascicule 05 : de la pointe de Corsen à la pointe de Chémoulin : Atlas cartographique. *Dynamiques et évolution du littoral*, Connaissances 92 p.
- CEREMA, 2021b. Dynamiques et évolution du littoral - Fascicule 04 : du cap de la Hague à la pointe de Corsen : Atlas cartographique. *Dynamiques et évolution du littoral*, Connaissances 87 p.
- Chang, S.W., Clement, T.P., 2012. Experimental and numerical investigation of saltwater intrusion dynamics in flux controlled groundwater systems. *Water Resources Research* 48. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2012WR012134>
- Chauveau, G., 2011. *Comment l'enfant devient lecteur*. Retz.
- Chavot, P., Masseran, A., 2010. (Re)penser les sciences et les techniques en Europe. *Questions de communication* 7-18.
- Chi, M.T., Wylie, R., 2014. The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes. *Educational psychologist* 49, 219-243.
- Chionne, D., 2019. Contributions géographiques à la définition d'une culture du risque en milieu littoral : le cas des résidents de l'île d'Oléron (Charente-Maritime, France). *Norois* 27-48. <https://doi.org/10.4000/norois.7343>
- Cocquempot, L., Delacourt, C., Paillet, J., Riou, P., Aucan, J., Castelle, B., Charria, G., Claudet, J., Conan, P., Coppola, L., Hocdé, R., Planes, S., Raimbault, P., Savoye, N., Testut, L., Vuillemin, R., 2019. Coastal Ocean and Nearshore Observation: A French Case Study. *Frontiers in Marine Science* 6.
- Collectif (BRGM/CEREMA), 2022. *Recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte* (Co-édition BRGM et CEREMA).

- Collin, A., Hench, J.L., Pastol, Y., Planes, S., Thiault, L., Schmitt, R.J., Holbrook, S.J., Davies, N., Troyer, M., 2018. High resolution topobathymetry using a Pleiades-1 triplet: Moorea Island in 3D. *Remote Sensing of Environment* 208, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.015>
- Conrad, C.C., Hilchey, K.G., 2011. A review of citizen science and community-based environmental monitoring: issues and opportunities. *Environmental Monitoring and Assessment* 176, 273-291. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1582-5>
- Cooper, J.A.G., Pilkey, O.H., 2004. Sea-level rise and shoreline retreat: Time to abandon the Bruun Rule. *Global and Planetary Change* 43, 157-171. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.07.001>
- Corbin, A., 1988. *Le Territoire du vide. L'Occident et le désir du rivage, 1750-1840.*, Aubier. ed. Paris.
- Costa, S., 1997. *Dynamique littorale et risques naturels : L'impact des aménagements, des variations du niveau marin et des modifications climatiques entre la baie de Seine et la baie de Somme (Haute-Normandie, Picardie ; France)* (thèse de doctorat). Paris 1.
- Costa, S., 2000. Réactualisation des connaissances et mise en place d'une méthode de suivi de la dynamique du littoral haut-normand et picard. *Rapport final, Préfecture de Picardie, Contrat de Plan Interrégional du Bassin de Paris (CPIBP)*.
- Costa, S., 2002. L'impact du changement climatique sur l'érosion des falaises crayeuses de Seine Maritime : le cas du site de la Valleuse d'Antifer, in : *L'impact du changement climatique sur l'intervention du Conservatoire du littoral : recul du trait de côte et orientations stratégiques*, p. 32.
- Costa, S., 2005. *Falaises à recul rapide et plages de galets : de la quantification des dynamiques d'un système complexe à la caractérisation des risques induits* (Habilitation à Diriger des Recherches). Université de Bretagne Occidentale.
- Costa, S., Delahaye, D., Freiré-Diaz, S., Di Nocera, L., Davidson, R., Plessis, E., 2004. Quantification of the Normandy and Picardy chalk cliff retreat by photogrammetric analysis, in : *Coastal Chalk Cliff Instability*, p. 139-148.
- Costa, S., Deloffre, J., Lacoste, J.-P., Leymarie, R., Laignel, B., 2021. *Systèmes côtiers : risques naturels et restauration des écosystèmes*, GIEC normand.
- Costa, S., Lageat, Y., Hénaff, A., 2006a. The gravel beaches of North-West France and their contribution to the dynamic of the coastal cliff-shore platform system. *Zeitschrift Fur Geomorphologie* 144, 199-214.
- Costa, S., Lageat, Y., Hénaff, A., Delahaye, D., Plessis, E., 2003. Origine de la variabilité spatiale du recul des falaises crayeuses du nord-ouest du Bassin de Paris. L'exemple du littoral haut-normand (France). *Hommes et Terres du Nord* 1, 22-31.
- Costa, S., Laignel, B., Hauchard, E., Delahaye, D., 2006b. Facteurs de répartition des entonnoirs de dissolution dans les craies du littoral du Nord-Ouest du Bassin de Paris. *Zeitschrift fur Geomorphologie* 50, 95-116. <https://doi.org/10.1127/zfg/50/2006/95>
- Costa, S., Le Cœur, C., Lageat, Y., 2007. Vers la quantification du budget sédimentaire des plages de galets du littoral haut-normand. *Hommage à Alain Godard, Du continent au bassin versant : théories et pratiques en géographie physique* p-467.
- Costa, S., Madeleine, S., Laignel, B., 2019a. De l'intérêt de la réalité virtuelle comme outil de communication auprès des élus. *Colloque : Gestion intégrée du trait de côte*.
- Costa, S., Madeleine, S., Maneuvrier, A., 2022. Apport de la réalité virtuelle pour l'appropriation de l'aléa submersion marine. *Bulletin de l'association de géographes français* 98, 514-529. <https://doi.org/10.4000/bagf.8609>

- Costa, S., Maquaire, O., Letortu, P., Thirard, G., Compain, V., Roulland, T., Medjkane, M., Davidson, R., Graff, K., Lissak, C., Delacourt, C., Duguet, T., Fauchard, C., Antoine, R., 2019b. Sedimentary Coastal Cliffs of Normandy: Modalities and Quantification of Retreat. *Journal of Coastal Research* 88, 46-60. <https://doi.org/10.2112/SI88-005.1>
- Costa, S., Suanez, S., 2013. Géomorphologie des littoraux français, in : *Géomorphologie de la France*, p. 55-77.
- Costa, S., Suanez, S., Anthony, E., Héquette, A., Goslin, J., Morhange, C., Regnaud, H., Ruz, M.-H., Sabatier, F., Stéphan, P., 2013. Les littoraux et l'élévation du niveau des mers, in : *Géomorphologie de la France*, p. 143-156.
- Cousin, A., 2011. *Propositions pour une stratégie nationale de gestion du trait de côte, du recul stratégique et de la défense contre la mer, partagée entre l'État et les collectivités territoriales* (rapport parlementaire).
- Creach, A., 2021. Coastline with Increased Vulnerability to Sea-level Rise, in : *Spatial Impacts of Climate Change*, p. 71-92.
- Davidson-Arnott, R.G.D., 2005. Conceptual Model of the Effects of Sea Level Rise on Sandy Coasts. *Journal of Coastal Research* 21, 1166-1172. <https://doi.org/10.2112/03-0051.1>
- de Franchis, C., Meinhardt-Llopis, E., Michel, J., Morel, J.-M., Facciolo, G., 2014. Automatic digital surface model generation from Pléiades stereo images. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 137-142.
- de Gélis, I., 2021. *Détection et caractérisation du changement à partir de nuages de points 3D par des méthodes d'apprentissage profond*.
- de Gélis, I., Bessin, Z., Letortu, P., Jaud, M., Delacourt, C., Costa, S., Maquaire, O., Davidson, R., Corpetti, T., Lefèvre, S., 2022. Cliff change detection using siamese KPConv deep network on 3D points clouds. *ISPRS 3*. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2022-649-2022>
- de Gélis, I., Lefèvre, S., Corpetti, T., 2021. 3D urban change detection with point cloud siamese networks. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 43, 879-886.
- Del Río, L., Gracia, F.J., 2013. Error determination in the photogrammetric assessment of shoreline changes. *Natural Hazards* 65, 2385-2397. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0407-y>
- Demangeot, J., 2009. *Les milieux « naturels » du globe*. Armand Colin.
- Département de Seine-Maritime, 2016. *Deviation de la RD 75*.
- D'Ercole, R., Thouret, J.-C., Dollfus, O., Asté, J.-P., 1994. Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de Géographie Alpine* 82, 87-96. <https://doi.org/10.3406/rga.1994.3776>
- Derval, J.-M., 2021. *CoastAppli : Participation au développement et à l'amélioration de cette application de sciences participatives de suivis des aléas côtiers* (mémoire de Master 1 IGRECL).
- Dewez, T.J.B., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., Rohmer, J., 2016. Facets : a Cloudcompare Plugin to Extract Geological Planes from Unstructured 3d Point Clouds. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 41B5, 799-804. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-799-2016>
- Dewez, T.J.B., Regard, V., Duperret, A., Lasseur, E., 2015. Shore platform lowering due to frost shattering during the 2009 winter at Mesnil Val, English channel coast, NW France. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, 1688-1700.

- Dewez, T.J.B., Rohmer, J., Regard, V., Cnudde, C., 2013. Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser surveys: Case study from Mesnil Val (Normandy, northern France). *Journal of Coastal Research* 702-707. <https://doi.org/10.2112/SI65-119>
- Dickson, M.E., Pentney, R., 2012. Micro-seismic measurements of cliff motion under wave impact and implications for the development of near-horizontal shore platforms. *Geomorphology* 151–152, 27-38. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.01.006>
- Dietze, M., Cook, K.L., Illien, L., Rach, O., Puffpaff, S., Stodian, I., Hovius, N., 2020. Impact of Nested Moisture Cycles on Coastal Chalk Cliff Failure Revealed by Multiseasonal Seismic and Topographic Surveys. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 125, e2019JF005487. <https://doi.org/10.1029/2019JF005487>
- DigitalGlobe, 2015. *WorldView-4*.
- Dissanayake, P., Yates, M.L., Suanez, S., Floc'h, F., Krämer, K., 2021. Climate Change Impacts on Coastal Wave Dynamics at Vougot Beach, France. *Journal of Marine Science and Engineering* 9, 1009. <https://doi.org/10.3390/jmse9091009>
- Dodet, G., Leckler, F., Sous, D., Ardhuin, F., Filipot, J.-F., Suanez, S., 2018. Wave Runup Over Steep Rocky Cliffs. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 123, 7185-7205. <https://doi.org/10.1029/2018JC013967>
- DREAL Normandie, 2020. Le climat en Normandie. *Profil environnemental, Caen*.
- Dufour, S., Lespez, L., 2019. Les approches naturalistes en géographie, vers un renouveau réflexif autour de la notion de nature? *Bulletin de l'association de géographes français. Géographies* 96, 319-343. <https://doi.org/10.4000/bagf.5196>
- Duguet, T., 2019. *Le recul des falaises de craie de Normandie à l'échelle du Quaternaire, par approche terre-mer* (thèse de doctorat). Université Le Havre Normandie.
- Duperret, A., Genter, A., Martinez, A., Mortimore, R.N., 2004. Coastal chalk cliff instability in NW France: role of lithology, fracture pattern and rainfall, in : *Coastal Chalk Cliff Instability*, p. 33-55.
- Duperret, A., Genter, A., Mortimore, R.N., Delacourt, B., De Pomerai, M.R., 2002. Coastal rock cliff erosion by collapse at Puys, France: The role of impervious marl seams within chalk of NW Europe. *Journal of Coastal Research* 18, 52-61.
- Duvat, V.K.E., Volto, N., Costa, S., Maquaire, O., Pignon-Mussaud, C., Davidson, R., 2021. Assessing atoll island physical robustness: Application to Rangiroa Atoll, French Polynesia. *Geomorphology* 390, 107871. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107871>
- Earlie, C., 2015. *Field observations of wave induced coastal cliff erosion, Cornwall, UK* (thèse de doctorat). Université de Plymouth.
- Earlie, C., Masselink, G., Russell, P., 2018. The role of beach morphology on coastal cliff erosion under extreme waves. *Earth Surface Processes and Landforms* 43, 1213-1228. <https://doi.org/10.1002/esp.4308>
- Earlie, C.S., Young, A.P., Masselink, G., Russell, P.E., 2015. Coastal cliff ground motions and response to extreme storm waves. *Geophysical Research Letters* 42, 847-854. <https://doi.org/10.1002/2014GL062534>
- Emery, K.O., Kuhn, G.G., 1982. Sea cliffs: their processes, profiles, and classification. *Geological Society of America Bulletin* 93, 644-654.
- EUROSION, 2003. *EuroSION Dataset Structure Description*. Commission Européenne.

- Evrard, H., Sinelle, C., 1987. La stabilité des falaises du Pays de Caux (Normandie). *Actes du colloque « Mer et littoral. Couple à risque »*, La Documentation Française, Paris, p. 84-91.
- Feng, Z., González, V.A., Amor, R., Spearpoint, M., Thomas, J., Sacks, R., Lovreglio, R., Cabrera-Guerrero, G., 2020. An immersive virtual reality serious game to enhance earthquake behavioral responses and post-earthquake evacuation preparedness in buildings. *Advanced Engineering Informatics* 45, 101118. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101118>
- Feuillet, T., 2021. *Les effets de contexte en géographie. Des fondements théoriques à la modélisation statistique* (Habilitation à Diriger des Recherches). Université Lyon 3 Jean Moulin.
- Fiorella, L., Mayer, R.E., 2015. *Learning as a Generative Activity*. Cambridge University Press.
- Fletcher, C., Rooney, J., Barbee, M., Lim, S.-C., Richmond, B., 2003. Mapping Shoreline Change Using Digital Orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research* 106-124.
- Fletcher, C.H., Richmond, B.M., Barnes, G.M., Schroeder, T.A., 1995. Marine Flooding on the Coast of Kau'i during Hurricane Iniki: Hindcasting Inundation Components and Delineating Washover. *Journal of Coastal Research* 11, 188-204.
- Foucault, A., Raoult, J.-F., Cecca, F., Platevoet, B., 2014. *Dictionnaire de Géologie*. Dunod.
- Frodella, W., Gigli, G., Morelli, S., Lombardi, L., Casagli, N., 2017. Landslide Mapping and Characterization through Infrared Thermography (IRT): Suggestions for a Methodological Approach from Some Case Studies. *Remote Sensing* 9, 1281. <https://doi.org/10.3390/rs9121281>
- Fuchs, P., 1996. *Les interfaces de la réalité virtuelle*. AJIIMD.
- Fuchs, P., 2016. *Les casques de réalité virtuelle et de jeux vidéo*. Presses des Mines-Transvalor.
- Fuchs, P., Hugues, O., Nannipieri, O., 2010. Proposition d'une Taxonomie Fonctionnelle des Environnements de Réalité Augmentée. *AFRV2010. Cinquième Journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle et de l'Interaction 3D*. Orsay, France.
- Gaillard, J.-C., 2006. La culture comme enjeu majeur de la gestion des catastrophes liées à des phénomènes naturels au sein des sociétés traditionnelles, in : *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles : analyses géographiques*, p. 43-53.
- Galiana, C., Perherin, C., Rocher, M., Souladadie, J.-L., 2017. *Collecte d'informations sur le terrain suite à une inondation*. CEREMA.
- Gallopin, G.C., 2006. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change, Resilience, Vulnerability, and Adaptation: A Cross-Cutting Theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change* 16, 293-303. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004>
- Garnier, E., Surville, F., 2010. *La tempête Xynthia face à l'histoire ; submersions et tsunamis sur les littoraux français du Moyen Âge à nos jours*. Saintes : Le Croît Vif.
- Garreau, J., 1979. Géographie physique de la Bretagne, fondements structuraux. *Norois* 104, 479-497.
- Gbégnon, E., 2019. *Vers un observatoire intégré des risques côtiers d'érosion et de submersion (projet OSIRISC) : opérationnalisation des indicateurs de suivi des aléas* (mémoire de Master 1 EGEL). Université de Bretagne Occidentale.
- Genter, A., Duperret, A., Martinez, A., Mortimore, R.N., Vila, J.-L., 2004. Multiscale fracture analysis along the French chalk coastline for investigating erosion by cliff collapse, in : *Coastal Chalk Cliff Instability*, p. 57-74.
- GIEC, 2019. IPCC, 2019: Summary for Policymakers, in : *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, p. 35.

- GIEC, 2021. IPCC, 2021: Summary for Policymakers, in : *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, p. 31.
- GIEC, 2022a. IPCC 2022: Summary for Policymakers, in : *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, p. 35.
- GIEC, 2022b. IPCC 2022: Full report, in : *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, p. 3056.
- Giuliano, J., Dewez, T.J.B., Lebourg, T., Godard, V., Prémaillon, M., Marçot, N., 2022. Mapping Coastal Erosion of a Mediterranean Cliff with a Boat-Borne Laser Scanner: Performance, Processing, and Cliff Erosion Rate, in : *3D Digital Geological Models*, p. 109-132. <https://doi.org/10.1002/9781119313922.ch7>
- Godard, A., 1992. Rythmes d'évolution géomorphologique dans les hautes latitudes et niveaux d'échelle spatio-temporelle (Erosion rates over space and time in cold environments of high latitudes). *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 69, 230-235. <https://doi.org/10.3406/bagf.1992.1634>
- Gómez-Pazo, A., Pérez-Alberti, A., 2021. The Use of UAVs for the Characterization and Analysis of Rocky Coasts. *Drones* 5, 23. <https://doi.org/10.3390/drones5010023>
- Gorokhovich, Y., Leiserowiz, A., 2011. Historical and Future Coastal Changes in Northwest Alaska. *Journal of Coastal Research* 28, 174-186. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00031.1>
- Gourmelon, F., Chlous-Ducharme, F., Kerbirou, C., Rouan, M., Bioret, F., 2013. Role-playing game developed from a modelling process: A relevant participatory tool for sustainable development? A co-construction experiment in an insular biosphere reserve. *Land Use Policy* 32, 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.10.015>
- Gourmelon, F., Rouan, M., Nabucet, J., 2017. Infrastructures de données géographiques et observatoires de recherche en environnement - Un exemple de mise en œuvre. *Revue Internationale de Géomatique* 27, 355-373. <https://doi.org/10.3166/rig.2017.00031>
- Goutx, D., 2012. Rôle des individus dans la prévention des risques d'inondation et la gestion de crise. *23èmes Journées Scientifiques de l'Environnement - Risques environnementaux : détecter, comprendre, s'adapter*. Créteil, France, p. 23.
- Greenwood, R.O., Orford, J.D., 2008. Temporal patterns and processes of retreat of drumlin coastal cliffs - Strangford Lough, Northern Ireland. *Geomorphology* 94, 153-169. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.05.004>
- Griggs, G.B., Trenhaile, A.S., 1994. Coastal cliffs and platforms, in : *Coastal Evolution*, p. 425-450.
- Grinsted, A., Jevrejeva, S., Riva, R.E.M., Dahl-Jensen, D., 2015. Sea level rise projections for northern Europe under RCP8.5. *Climate Research* 64, 15-23. <https://doi.org/10.3354/cr01309>
- Guilcher, A., 1948. *Le relief de la Bretagne méridionale de la baie de Douarnenez à la Vilaine*.
- Guilcher, A., 1954. *Morphologie littorale et sous-marine*. Presses universitaires de France.
- Guilcher, A., 1966. Les grandes falaises et mégafalaises des côtes sud-ouest et ouest de l'Irlande. *Annales de Géographie* 75, 26-38.
- Guilyardi, E., 2020. Les sciences du climat face au défi de la confiance dans l'expertise. *Après-demain* 1, 8-10. <https://doi.org/10.3917/apdem.053.0008>

- Haklay, M., 2013. Citizen Science and Volunteered Geographic Information: Overview and Typology of Participation, in : *Crowdsourcing Geographic Knowledge: Volunteered Geographic Information (VGI) in Theory and Practice*, p. 105-122. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4587-2_7
- Hallégouët, B., 1971. *Le Bas-Léon (Finistère, France). Étude géomorphologique* (thèse de doctorat). Université de Bretagne Occidentale.
- Hallégouët, B., Yoni, C., Bodéré, J.-C., 1992. Evolution de la ligne de rivage en baie de Goulven, depuis le XVIIIème siècle. *Le littoral, ses contraintes environnementales et ses conflits d'utilisation*, Nantes, 1-4 juillet 1991, p. 43-47.
- Hédou, F., 2022. *Mise à jour de l'indicateur national de l'érosion côtière : proposition d'une méthodologie* (rapport d'étude No. NOVA : 22-RE-0138). CEREMA.
- Hédou, F., Roche, A., Trmal, C., Deniaud, Y., 2015. Méthodologie d'élaboration de l'indicateur national d'érosion côtière. *MeriGéo*, Brest, p. 69-72.
- Hédou, F., Roche, A., Trmal, C., Moraud, S., Deniaud, Y., 2018. Élaboration de l'indicateur national de l'érosion côtière. *Journées nationales Génie Côtier Génie Civil* 647-654.
- Heitz, C., 2005. *Etude de la perception du risque de catastrophes naturelles relatif aux coulées de boue par les acteurs des communes périurbaines (Sundgau, Alsace)* (mémoire de DEA). Université de Strasbourg.
- Heitz, C., 2009. *La perception du risque de coulées boueuses : analyse sociogéographique et apports à l'économie comportementale* (thèse de doctorat). Université de Strasbourg.
- Hellequin, A.-P., Flanquart, H., Meur-Férec, C., Rulleau, B., 2013. Perceptions du risque de submersion marine par la population du littoral languedocien : contribution à l'analyse de la vulnérabilité côtière. *Natures Sciences Sociétés* 21, 385-399.
- Hénaff, A., 2003. Présentation du programme pluriannuel de recherche d'intérêt régional sur l'érosion côtière et la vulnérabilité du trait de côte en Bretagne. *Actes des Journées Scientifiques et Techniques du CETMEF*. Paris, p. 27-35.
- Hénaff, A., Lageat, Y., Costa, S., Plessis, E., 2002. Le recul des falaises crayeuses du Pays de Caux : détermination des processus d'érosion et quantification des rythmes d'évolution. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 8, 107-118. <https://doi.org/10.3406/morfo.2002.1132>
- Hénaff, A., Le Cornec, E., Jabbar, M., Pétré, A., Corfou, J., Le Drezen, Y., van Vliët-Lanoë, B., 2018. Caractérisation des aléas littoraux d'érosion et de submersion en Bretagne par l'approche historique. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Hénaff, A., Philippe, M., 2014. *Gestion des risques d'érosion et de submersion marines* (guide méthodologique). Projet COCORISCO.
- Hinschberger, F., Pauvret, R.-B., 1968. Les fonds sous-marins de l'Iroise et de la Baie de Douarnenez (Finistère). Reconstitution d'un réseau hydrographique immergé. *Noroi* 58, 213-225. <https://doi.org/10.3406/noroi.1968.1622>
- Houllier, F., Merilhou-Goudard, J.-B., 2016. Les sciences participatives en France : Etats des lieux, bonnes pratiques et recommandations 63.
- Hoyez, B., 2008. *Les Falaises du Pays de Caux : lithostratigraphie des craies turono-campaniennes*. Publications Université Rouen-Le Havre.
- INSEE, 2018. *Perspectives d'évolution de la population des départements littoraux à l'horizon 2050*.
- Ipenburg, C., Jacques, P., Potin, A., Villedieu, A., 2022. *Projet RISCOREV (RISques CÔtiers et RÉalité Virtuelle)* (rapport d'atelier Master 2 EGEL).

- Irwin, A., 1995. *Citizen Science: A Study of People, Expertise and Sustainable Development*, Psychology Press. ed.
- Isakov, I.S., 1953. *Morskoi Atlas: Ministry of the Navy of the USSR*.
- Isola, P., Zhu, J.-Y., Zhou, T., Efros, A.A., 2017. Image-To-Image Translation With Conditional Adversarial Networks. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* 1125-1134.
- Jabbar, M., 2016. *Dynamiques morpho-sédimentaires des avant-plages et impact sur les stocks sableux : vers une meilleure stratégie de gestion des risques côtiers* (thèse de doctorat). Université de Bretagne Occidentale.
- Jaffe, B.E., Gelfenbaum, G., 2002. Using Tsunami Deposits to Improve Assessment of Tsunami Risk. *Solutions to Coastal Disasters '02*, Proceedings 836-847. [https://doi.org/10.1061/40605\(258\)72](https://doi.org/10.1061/40605(258)72)
- James, M.R., Robson, S., 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117. <https://doi.org/10.1029/2011JF002289>
- James, M.R., Robson, S., 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 1413-1420. <https://doi.org/10.1002/esp.3609>
- Jaud, M., Bertin, S., Beauverger, M., Augereau, E., Delacourt, C., 2020. RTK GNSS-Assisted Terrestrial SfM Photogrammetry without GCP: Application to Coastal Morphodynamics Monitoring. *Remote Sensing* 12, 1889. <https://doi.org/10.3390/rs12111889>
- Jaud, M., Letortu, P., Augereau, E., Le Dantec, N., Beauverger, M., Cuq, V., Prunier, C., Le Bivic, R., Delacourt, C., 2017. Adequacy of pseudo-direct georeferencing of terrestrial laser scanning data for coastal landscape surveying against indirect georeferencing. *European Journal of Remote Sensing* 50, 155-165. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1300047>
- Jaud, M., Letortu, P., Théry, C., Grandjean, P., Costa, S., Maquaire, O., Davidson, R., Le Dantec, N., 2019a. UAV survey of a coastal cliff face - Selection of the best imaging angle. *Measurement* 139, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.024>
- Jaud, M., Passot, S., Allemand, P., Le Dantec, N., Grandjean, P., Delacourt, C., 2019b. Suggestions to Limit Geometric Distortions in the Reconstruction of Linear Coastal Landforms by SfM Photogrammetry with PhotoScan® and MicMac® for UAV Surveys with Restricted GCPs Pattern. *Drones* 3, 2. <https://doi.org/10.3390/drones3010002>
- Javernick, L., Brasington, J., Caruso, B., 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology* 213, 166-182. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.006>
- JCGM, 2012. *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)* (No. VIM-318).
- Jiang, H., Hu, X., Li, K., Zhang, J., Gong, J., Zhang, M., 2020. PGA-SiamNet: Pyramid Feature-Based Attention-Guided Siamese Network for Remote Sensing Orthoimagery Building Change Detection. *Remote Sensing* 12, 484. <https://doi.org/10.3390/rs12030484>
- Jouzel, J., Debroise, A., 2014. *Le défi climatique - Objectif: +2°C!* Dunod.
- Joyal, G., Lajeunesse, P., Morissette, A., Bernatchez, P., 2016. Influence of lithostratigraphy on the retreat of an unconsolidated sedimentary coastal cliff (St. Lawrence estuary, eastern Canada). *Earth Surface Processes and Landforms* 41, 1055-1072. <https://doi.org/10.1002/esp.3886>

- Jude, S., Mokrech, M., Walkden, M., Thomas, J., Koukoulas, S., 2015. Visualising Potential Coastal Change: Communicating Results Using Visualisation Techniques, in : *Broad Scale Coastal Simulation: New Techniques to Understand and Manage Shorelines in the Third Millennium, Advances in Global Change Research*, p. 255-272. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5258-0_10
- Juigner, M., Robin, M., Debaine, F., Hélen, F., 2017. A generic index to assess the building exposure to shoreline retreat using box segmentation: Case study of the Pays de la Loire sandy coast (west of France). *Ocean & Coastal Management* 148, 40-52. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.07.014>
- Juignet, P., Breton, G., 1992. Mid-cretaceous sequence stratigraphy and sedimentary cyclicity in the western Paris Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 91, 197-218. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(92\)90067-F](https://doi.org/10.1016/0031-0182(92)90067-F)
- Kennedy, D.M., Jones, E.C.V., Dickson, M.E., Rosser, N.J., 2018. Wind Waves and Cliff Shaking on Macrotidal Shore Platforms: A Case-study from North Yorkshire, U.K. *Journal of Coastal Research* 436-440. <https://doi.org/10.2112/SI85-088.1>
- Kennedy, D.M., Stephenson, W.J., Naylor, L.A., 2014a. *Rock coast geomorphology: A global synthesis*, Geological Society. ed. Kennedy D.M., Stephenson W.J. and Naylor L.A., London.
- Kennedy, D.M., Stephenson, W.J., Naylor, L.A., 2014b. Introduction to the rock coasts of the world, in : *Rock coast geomorphology: A global synthesis*, p. 1-5.
- Kerguillec, R., Audère, M., Baltzer, A., Debaine, F., Fattal, P., Juigner, M., Launeau, P., Le Mauff, B., Luquet, F., Maanan, M., Pouzet, P., Robin, M., Rollo, N., 2019. Monitoring and management of coastal hazards: Creation of a regional observatory of coastal erosion and storm surges in the Pays de la Loire region (Atlantic coast, France). *Ocean & Coastal Management* 181, 104904. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104904>
- Kiage, L.M., Walker, N.D., Balasubramanian, S., Babin, A., Barras, J., 2005. Applications of Radarsat-1 synthetic aperture radar imagery to assess hurricane-related flooding of coastal Louisiana. *International Journal of Remote Sensing* 26, 5359-5380. <https://doi.org/10.1080/01431160500442438>
- Kienberger, S., Lang, S., Zeil, P., 2009. Spatial vulnerability units—expert-based spatial modelling of socio-economic vulnerability in the Salzach catchment, Austria. *Natural Hazards & Earth System Sciences* 9.
- Kim, H., 2019. The Definition of Convolution in Deep Learning by using Matrix. *Journal of Engineering and Applied Sciences* 14, 2272-2275. <https://doi.org/10.36478/jeasci.2019.2272.2275>
- Klier, T., McMillen, D.P., 2008. Clustering of auto supplier plants in the United States: generalized method of moments spatial logit for large samples. *Journal of Business & Economic Statistics* 26, 460-471.
- Kline, S.W., Adams, P.N., Limber, P.W., 2014. The unsteady nature of sea cliff retreat due to mechanical abrasion, failure and comminution feedbacks. *Geomorphology* 219, 53-67. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.037>
- Kokotsaki, D., Menzies, V., Wiggins, A., 2016. Project-based learning: A review of the literature. *Improving Schools* 19, 267-277. <https://doi.org/10.1177/1365480216659733>
- Komar, P.D., 1998. *Beach processes and sedimentation*, 2e édition. ed. Prentice-Hall, New Jersey.
- Kopczewska, K., 2020. *Applied Spatial Statistics and Econometrics: Data Analysis in R*. Routledge.
- Laatabi, A., Becu, N., Marilleau, N., Amalric, M., Pignon-Mussaud, C., Anselme, B., Beck, E., Bertin, X., Monfort, A., Hayoun, C., Rousseaux, F., 2022. LittoSIM-GEN: A generic platform of coastal

- flooding management for participatory simulation. *Environmental Modelling & Software* 149, 105319. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105319>
- Lacoste, Y., 2012. *La géographie, ça sert, d'abord, à faire la guerre*. La Découverte. <https://doi.org/10.3917/dec.lacos.2014.01>
- Lageat, Y., Hénaff, A., Costa, S., 2006. The retreat of the chalk cliffs of the Pays de Caux (France): erosion processes and patterns. *Zeitschrift für Geomorphologie* 144, 183-197.
- Lahousse, P., Pierre, G., Lanoy-Ratel, P., 2000. Quantification par analyse photogrammétrique du recul des falaises du Blanc-Nez depuis 1944 (Pas-de-Calais, France). *Photo-interprétation* 38, 3-9.
- Laignel, B., 1997. *Les altérites à silex de l'ouest du Bassin de Paris : caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats* (thèse de doctorat). Université de Rouen.
- Laignel, B., 2003. *Caractérisation et dynamique érosive de systèmes géomorphologiques continentaux sur substrat crayeux. Exemple de l'Ouest du Bassin de Paris dans le contexte nord-ouest européen* (Habilitation à Diriger des Recherches). Université de Rouen.
- Lamarre, H., MacVicar, B., Roy, A.G., 2005. Using Passive Integrated Transponder (PIT) Tags to Investigate Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers. *Journal of Sedimentary Research* 75, 736-741. <https://doi.org/10.2110/jsr.2005.059>
- Lang, M., Claudet, R., 2005. The French national scale of flood magnitude and an example on the Hérault catchment. *La Houille Blanche* 91, 52-59. <https://doi.org/10.1051/lhb:200501007>
- Laugel, A., 2013. *Climatologie des états de mer en Atlantique nord-est : analyse du climat actuel et des évolutions futures sous scénarios de changement climatique par descente d'échelle dynamique et statistique* (thèse de doctorat). Université Paris Est.
- Laute, K., Letortu, P., Le Dantec, N., Hibert, C., Augereau, E., Provost, F., Malet, J.-P., 2018. Driving factors of hard rock cliff erosion in Brittany, France. *Geophysical Research Abstracts*.
- Lautridou, J.-P., 1985. *Le cycle périglaciaire pléistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie* (thèse de doctorat). Université de Caen.
- LCHF, 1972. *Etude de la production des galets sur le littoral haut-normand*.
- Le Berre, I., Meur-Férec, C., Cuq, V., Guillou, E., Lami, T., Le Dantec, N., Letortu, P., Lummert, C., Philippe, M., Rouan, M., Noûs, C., Hénaff, A., 2022. Systemic vulnerability of coastal territories to erosion and marine flooding: A conceptual and methodological approach applied to the Brittany (France). *International Journal of Disaster Risk Reduction* 78, 103122.
- Le Cozannet, G., Bulteau, T., Castelle, B., Ranasinghe, R., Wöppelmann, G., Rohmer, J., Bernon, N., Idier, D., Louisor, J., Salas-y-Méla, D., 2019. Quantifying uncertainties of sandy shoreline change projections as sea level rises. *Scientific Reports* 9, 42. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37017-4>
- Lebreton, C., Grosvalet, P., 2014. *Les Départements face au défi littoral* (Mission Mer et Littoral).
- LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G., 2015. Deep learning. *Nature* 521, 436-444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Lee, E.M., Hall, J.W., Meadowcroft, I.C., 2001. Coastal cliff recession: The use of probabilistic prediction methods. *Geomorphology* 40, 253-269. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00053-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00053-8)
- Lefebvre, S., Ambellouis, S., Cabestaing, F., 2007. Approche monodimensionnelle de la mise en correspondance stéréoscopique par corrélation. *21eme Colloque sur le Traitement du Signal et des Images, GRETSI'07*, Troyes, France, p. 189-192.
- Lendre, S., 2016. *Vers des indicateurs de suivi de la vulnérabilité côtière aux risques d'érosion et de submersion* (mémoire de Master 1 EGEL). Université de Bretagne Occidentale.

- LeSage, J.P., Kelley Pace, R., Lam, N., Campanella, R., Liu, X., 2011. New Orleans business recovery in the aftermath of Hurricane Katrina. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)* 174, 1007-1027.
- Letavernier, G., Ozouf, J.C., 1987. Résultats des recherches récentes sur la gélifraction des calcaires. *Inter-Nord* 53-63.
- Letortu, P., 2013. *Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits* (thèse de doctorat). Université de Caen-Basse-Normandie.
- Letortu, P., Costa, S., Bensaid, A., Cador, J.-M., Quénot, H., 2014a. Vitesses et modalités de recul des falaises crayeuses de Haute-Normandie (France) : méthodologie et variabilité du recul. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 20, 133-144. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10872>
- Letortu, P., Costa, S., Bonnet, E., 2014b. Spatial analysis of coastal chalk cliff falls in upper Normandy (France). From Veules-les-Roses to Le Treport (2002-2009). *Revue internationale de géomatique* 24, 335-354. <https://doi.org/10.3166/riq.24.335-354>
- Letortu, P., Costa, S., Cador, J.-M., Coinaud, C., Cantat, O., 2015a. Statistical and empirical analyses of the triggers of coastal chalk cliff failure. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, 1371-1386. <https://doi.org/10.1002/esp.3741>
- Letortu, P., Costa, S., Maquaire, O., Davidson, R., 2019. Marine and subaerial controls of coastal chalk cliff erosion in Normandy (France) based on a 7-year laser scanner monitoring. *Geomorphology* 335, 76-91. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.005>
- Letortu, P., Costa, S., Maquaire, O., Delacourt, C., Augereau, E., Davidson, R., Suanez, S., 2015b. Taux d'ablation des falaises crayeuses haut-normandes : l'apport du scanner laser terrestre. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 21, 73-82.
- Letortu, P., Costa, S., Maquaire, O., Delacourt, C., Augereau, E., Davidson, R., Suanez, S., Nabucet, J., 2015c. Retreat rates, modalities and agents responsible for erosion along the coastal chalk cliffs of Upper Normandy: The contribution of terrestrial laser scanning. *Geomorphology* 245, 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.007>
- Letortu, P., Jaud, M., Grandjean, P., Ammann, J., Costa, S., Maquaire, O., Davidson, R., Le Dantec, N., Delacourt, C., 2018. Examining high-resolution survey methods for monitoring cliff erosion at an operational scale. *GIScience & Remote Sensing* 55, 457-476. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1408931>
- Letortu, P., Jaud, M., Théry, C., Nabucet, J., Taouki, R., Passot, S., Augereau, E., 2020. The potential of Pléiades images with high angle of incidence for reconstructing the coastal cliff face in Normandy (France). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 84, 101976. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101976>
- Letortu, P., Laute, K., Le Dantec, N., Augereau, E., Ammann, J., Prunier, C., Hénaff, A., David, L., Maulpoix, A., Cuq, V., 2017. Impacts des vagues et de la circulation d'eau sur la microfracturation des falaises rocheuses : mise en place d'un suivi multiparamètre en Bretagne. *Collection EDYTEM* 251-256.
- Letortu, P., Le Dantec, N., Augereau, E., Costa, S., Maquaire, O., Davidson, R., Fauchard, C., Antoine, R., Flahaut, R., Guirriec, Y., Longuevergne, L., de la Bernardie, J., David, L., 2022. Experimental field study on the fatigue and failure mechanisms of coastal chalk cliffs: Implementation of a multi-

- parameter monitoring system (Sainte-Marguerite-sur-Mer, France). *Geomorphology* 408, 108211. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108211>
- Letortu, P., Taouki, R., Jaud, M., Costa, S., Maquaire, O., Delacourt, C., 2021. 3D reconstructions of the coastal cliff face in Normandy (France) based on oblique Pléiades imagery: assessment of ASP® and MicMac® processing chains. *International Journal of Remote Sensing* 42. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1892857>
- Levrel, H., Fossat, J., Pelletier, D., 2010. Les indicateurs de biodiversité marine et côtière : état des lieux institutionnel. [*VertigO*] *La revue électronique en sciences de l'environnement* 10, 0-0.
- Levy, D., Dzikowski, C., 2017. *En 2014, un quart de la population qui déménage change de département* (No. 1654), INSEE PREMIERE.
- Lim, M., Rosser, N.J., Allison, R.J., Petley, D.N., 2010. Erosional processes in the hard rock coastal cliffs at Staithes, North Yorkshire. *Geomorphology* 114, 12-21. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.011>
- Limber, P.W., Barnard, P.L., Vitousek, S., Erikson, L.H., 2018a. A model ensemble for projecting multidecadal coastal cliff retreat during the 21st century. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 123, 1566-1589. <https://doi.org/10.1029/2017JF004401>
- Limber, P.W., Barnard, P.L., Vitousek, S., Erikson, L.H., 2018b. A model ensemble for projecting multidecadal coastal cliff retreat during the 21st century. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 123, 1566-1589. <https://doi.org/10.1029/2017JF004401>
- Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B.E., Setio, A.A.A., Ciompi, F., Ghafoorian, M., van der Laak, J.A.W.M., van Ginneken, B., Sánchez, C.I., 2017. A survey on deep learning in medical image analysis. *Medical Image Analysis* 42, 60-88. <https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.005>
- Loke, D.M.H., 2004. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*.
- Loke, M.H., 2002. *RES2DINV, Ver. 3.50, Rapid 2-D Resistivity and IP Inversion Using the Least Square Method*. Geotomo Software, Penang.
- Loonis, V., Bellefon, M.P., 2018. *Manuel d'analyse spatiale. Théorie et mise en œuvre pratique avec R*, INSEE, Eurostat. ed, INSEE méthodes.
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., Aarninkhof, S., 2018. The State of the World's Beaches. *Scientific Reports* 8, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- Luís, S., Pinho, L., Lima, M.L., Roseta-Palma, C., Martins, F.C., Betâmio de Almeida, A., 2016. Is it all about awareness? The normalization of coastal risk. *Journal of Risk Research* 19, 810-826. <https://doi.org/10.1080/13669877.2015.1042507>
- Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., Johnson, B.A., 2019. Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 152, 166-177. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015>
- Mallet, C., Michot, A., 2012. *Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte* (No. BRGM/RP-60616-FR). BRGM.
- Mandelbrot, B.B., 1982. *The fractal geometry of nature*, Freeman. ed. WH freeman New York, New York.
- Maquaire, O., Costa, S., Grandjean, G., Le Dantec, N., Letortu, P., Laignel, B., Tournaille, N., 2022. *RICOCHET: Évaluation multirisques de territoires côtiers en contexte de changement global* (compte-rendu de fin de projet ANR).
- Maquaire, O., Costa, S., Rubio, F., Letortu, P., 2021. *Methodology for coastal risk assessment and mapping of rocky coastal cliffs (Normandy, France)*.

- Marcel, O., Le Berre, I., Rouan, M., Philippe, M., Hénaff, A., 2018. Une application WEB-SIG de suivi de la vulnérabilité systémique des littoraux (projet OSIRISC). *MeriGéo*, Aix-en-Provence, p. 43-46.
- Marchand, J.-P., 1996. Les contraintes naturelles et l'organisation de l'espace. *Géopoint* 96, 9-15.
- Markowitz, D.M., Bailenson, J.N., 2021. Virtual reality and the psychology of climate change. *Current Opinion in Psychology*, Psychology of Climate Change (2021) 42, 60-65. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2021.03.009>
- Markowitz, D.M., Laha, R., Perone, B.P., Pea, R.D., Bailenson, J.N., 2018. Immersive Virtual Reality Field Trips Facilitate Learning About Climate Change. *Frontiers in Psychology* 9.
- Martinez, G., Costas, S., Ferreira, Ó., 2020. The role of culture for coastal disaster risk reduction measures: Empirical evidence from northern and southern Europe. *Advances in Climate Change Research*, Special Issue on Climate change for coastal areas: risks, adaptation and acceptability 11, 297-309. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.11.001>
- Martins, L., Thiery, Y., Guillen, L., Dewez, T., Lévy, C., Garnier, C., 2022. Caractérisation spatiale et temporelle du recul du sommet de falaises basques : recherche méthodologique. *Bulletin de l'association de géographes français. Géographies* 98, 421-439. <https://doi.org/10.4000/bagf.8333>
- Maspataud, A., 2020. *Mobilisation des démarches de sciences participatives dans l'observation de l'évolution du littoral*.
- Masteller, C., Hovius, N., Thomsson, C., Vann-Jones, E., Byul Woo, H., Adams, P., Dickson, M., Young, A., Rosser, N., 2020. Exploring the interplay of wave climate, vertical land motion, and rocky coast evolution. *EGU2020* 12680. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-12680>
- MATE-METL, 1997. *Plans de prévention des risques littoraux (PPR) : Guide méthodologique* (No. I_IFD_REFDOC_0050785).
- Matsumoto, H., Dickson, M.E., Kench, P.S., 2016. An exploratory numerical model of rocky shore profile evolution. *Geomorphology* 268, 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.017>
- Matsuoka, N., Murton, J., 2008. Frost weathering: recent advances and future directions. *Permafrost and Periglacial Processes* 19, 195-210. <https://doi.org/10.1002/ppp.620>
- May, V.J., Heeps, C., 1985. The nature and rates of change on chalk coastlines. *Zeitschrift für Geomorphologie* 57, 81-94.
- McMillen, D., Soppelsa, M.E., 2015. A conditionally parametric probit model of microdata land use in Chicago. *Journal of Regional Science* 55, 391-415.
- MEDDE, 2012. *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte – Vers la relocalisation des activités et des biens*. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie Paris.
- MEDDE, 2014. *Plan de prévention des risques littoraux : Guide méthodologique*.
- MEDDE, Préfecture de Seine-Maritime, DDTM 76, 2016. *Commune de Criel-sur-Mer, élaboration du plan de prévention des risques naturels inondation et éboulements de falaise*. Note de présentation.
- MEEDM, 2010. *La gestion du trait de côte*. Editions Quae.
- MEEM, 2017. *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte - programme d'actions 2017-2019*.
- Mégnién, C., Mégnién, F., 1980. *Synthèse géologique du Bassin de Paris*, mémoire du Bureau des Recherches Géologiques et Minières. ed.
- Mercier, D., 2022. Les littoraux face aux assauts de la mer : comment la géographie peut aussi servir à sauver des vies humaines. *Bulletin de l'association de géographes français. Géographies* 98, 332-347.
- Météo-France, 2019a. *Fiche climatologique Dieppe (76), statistiques (1981-2010) et records*.
- Météo-France, 2019b. *Fiche climatologique Brest (29), statistiques (1981-2010) et records*.

- Metzger, P., D'Ercole, R., 2011. Les risques en milieu urbain : éléments de réflexion. *EchoGéo*.
<https://doi.org/10.4000/echogeo.12640>
- Meur-Férec, C., Deboudt, P., Morel, V., 2008. Coastal risks in France: An integrated method for evaluating vulnerability. *Journal of Coastal Research* 24, 178-189. <https://doi.org/10.2112/05-0609.1>
- Meur-Férec, C., Flanquart, H., Hellequin, A.-P., Rulleau, B., 2011. Risk perception, a key component of systemic vulnerability of the coastal zones to erosion-submersion. A Case study on the French Mediterranean coast. *Littoral 2010—Adapting to Global Change at the Coast: Leadership, Innovation, and Investment* 10003.
- Meur-Férec, C., Guillou, E., 2019. Interest of Social Representations Theory to grasp coastal vulnerability and to enhance coastal risk management. *PsyEcology. Revista Bilingüe de Psicología Ambiental / Bilingual Journal of Environmental Psychology* 1-12.
<https://doi.org/10.1080/21711976.2019.1644003>
- Meur-Férec, C., Le Berre, I., Cocquempot, L., Guillou, E., Hénaff, A., Lami, T., Le Dantec, N., Letortu, P., Philippe, M., Noûs, C., 2020. Une méthode de suivi de la vulnérabilité systémique à l'érosion et la submersion marines. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*. <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.16731>
- Meur-Férec, C., Morel, V., 2004. L'érosion sur la frange côtière : un exemple de gestion des risques. *Natures Sciences Sociétés* 12, 263-273. <https://doi.org/10.1051/nss:2004038>
- Michel-Guillou, E., Krien, N., Meur-Férec, C., 2016. Inhabitants of Coastal Municipalities Facing Coastal Risks: Understanding the Desire to Stay. *Papers on Social Representations* 25, 8.1-8.21.
- Michoud, C., Carrea, D., Costa, S., Derron, M.-H., Jaboyedoff, M., Delacourt, C., Maquaire, O., Letortu, P., Davidson, R., 2014. Landslide detection and monitoring capability of boat-based mobile laser scanning along Dieppe coastal cliffs, Normandy. *Landslides* 12, 403-418.
<https://doi.org/10.1007/s10346-014-0542-5>
- Millière, Q., 2021. *En quoi la médiation scientifique est-elle un atout pour une Ecole Universitaire de Recherche (EUR)? Application à l'EUR ISblue* (thèse professionnelle du Mastère spécialisé Management de Projets Maritimes). ENSTA Bretagne.
- Mineo-Kleiner, L., Meur-Férec, C., 2016. Relocaliser les enjeux exposés aux risques côtiers en France : points de vue des acteurs institutionnels. *VertigO : la revue électronique en sciences de l'environnement* 16.
- Mondon, S., Imbard, M., 2013. Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC. *Direction générale de l'économie et du climat*, document de travail.
- Monterrat, B., Lavoué, E., George, S., Desmarais, M., 2017. Les effets d'une ludification adaptative sur l'engagement des apprenants. *STICEF (Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation)* 24, 51. <https://doi.org/10.23709/sticf.24.1.2>
- Moore, L.J., Benumof, B.T., Griggs, G.B., 1999. Coastal erosion hazards in Santa Cruz and San Diego Counties, California. *Journal of Coastal Research* 121-139.
- Morim, J., Hemer, M., Wang, X.L., Cartwright, N., Trenham, C., Semedo, A., Young, I., Bricheno, L., Camus, P., Casas-Prat, M., Erikson, L., Mentaschi, L., Mori, N., Shimura, T., Timmermans, B., Aarnes, O., Breivik, Ø., Behrens, A., Dobrynin, M., Menendez, M., Staneva, J., Wehner, M., Wolf, J., Kamranzad, B., Webb, A., Stopa, J., Andutta, F., 2019. Robustness and uncertainties in global multivariate wind-wave climate projections. *Nature Climate Change* 9, 711-718.
<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0542-5>

- Morim, J., Trenham, C., Hemer, M., Wang, X.L., Mori, N., Casas-Prat, M., Semedo, A., Shimura, T., Timmermans, B., Camus, P., Bricheno, L., Mentaschi, L., Dobrynin, M., Feng, Y., Erikson, L., 2020. A global ensemble of ocean wave climate projections from CMIP5-driven models. *Scientific Data* 7, 105. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0446-2>
- Morrow, B.H., 1999. Identifying and mapping community vulnerability. *Disasters* 23, 1-18.
- Mortimore, R.N., 2001. *ROCC project, Report on mapping of the chalk Channel coast of France from Port du Havre-Antifer to Ault*. BRGM.
- Mortimore, R.N., Stone, K.J., Lawrence, J., Duperret, A., 2004. Chalk physical properties and cliff instability, in : *Coastal Chalk Cliff Instability*, p. 75-88.
- Moscovici, S., 1976. *La psychanalyse, son image et son public*. PUF.
- Moscovici, S., 2013. *Le scandale de la pensée sociale. Textes inédits sur les représentations sociales réunis et préfacés par Nikos Kalampalikis*. Editions des Hautes Etudes en Sciences Sociales.
- Moses, C., Robinson, D., 2011. Chalk coast dynamics: Implications for understanding rock coast evolution. *Earth-Science Reviews* 109, 63-73. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.08.003>
- Moses, C.A., Robinson, D.A., Williams, R.B.G., Marques, F.M.S.F., 2006. Predicting rates of shore platform downwearing from rock geotechnical properties and laboratory simulation of weathering and erosion processes. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband* 144, 19-37.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- MTES, 2017. *Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-2)*.
- Mucchielli-Bourcier, A., Mucchielli, R., 1969. *Lexique des sciences sociales*. Éditions Sociales Françaises, Paris.
- Muro, M., Jeffrey, P., 2008. A critical review of the theory and application of social learning in participatory natural resource management processes. *Journal of Environmental Planning and Management* 51, 325-344. <https://doi.org/10.1080/09640560801977190>
- Murton, J.B., Peterson, R., Ozouf, J.-C., 2006. Bedrock fracture by ice segregation in cold regions. *Science* 314, 1127-1129. <https://doi.org/10.1126/science.1132127>
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffman, A., Giovannini, E., 2005. *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD, Paris. <https://doi.org/10.1787/533411815016>
- NASA, 2019. *The Ames Stereo Pipeline: NASA's Open Source Automated Stereogrammetry Software* (No. Version 2.6.2). NASA.
- Naylor, L.A., Stephenson, W.J., Trenhaile, A.S., 2010. Rock coast geomorphology: Recent advances and future research directions. *Geomorphology* 114, 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.004>
- Neumann, B., Vafeidis, A.T., Zimmermann, J., Nicholls, R.J., 2015. Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. *PLOS ONE* 10, e0118571. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>
- Newman, G., Graham, J., Crall, A., Laituri, M., 2011. The art and science of multi-scale citizen science support. *Ecological Informatics* 6, 217-227. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2011.03.002>

- Norman, E.C., Rosser, N.J., Brain, M.J., Petley, D.N., Lim, M., 2013. Coastal cliff-top ground motions as proxies for environmental processes. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118, 6807-6823. <https://doi.org/10.1002/2013JC008963>
- Nott, J., Hubbert, G., 2005. Comparisons between topographically surveyed debris lines and modelled inundation levels from severe tropical cyclones Vance and Chris, and their geomorphic impact on the sand coast. *Australian Meteorological Magazine* 54, 187-196.
- Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R., 2014. *Le climat de la France au XXIe siècle* (Rapport de la Direction générale de l'énergie et du climat).
- Pannet, P., Meire, B., Boulet, M., Quesnel, F., Jacob, T., Samyn, K., Bitri, A., Dewez, T., Ardito, L., Barbier, R., François, B., Guizouarn, G., Dupuis, C., Idier, D., Raymond, L., Brannelec, M., Leroi, M., Chesne, A., 2015. *Détermination de l'aléa lié au recul de la falaise côtière. Application à la région dieppoise (76)* (No. BRGM/RP-65008-FR).
- Paskoff, R., 1978. Sur l'évolution géomorphologique du grand escarpement côtier du désert chilien. *Géographie Physique et Quaternaire* 32, 351-360.
- Paskoff, R., 1998. La crise des plages : pénurie de sédiments. *Mappemonde* 52, 11-15.
- Perherin, C., Berenger, N., Bocquier, L., Flouest, N., Moreira, S., 2014. Comprendre les submersions marines et leurs conséquences L'apport du retour d'expérience Xynthia pour la définition des données à collecter suite à une submersion. *Colloque international Connaissance et compréhension des risques côtiers*.
- Perrin, C., Angles, S., Theodosia, A., Bouraoui, M., Buhot, C., Cadoret, A., Daligaux, J., François, M., Gérard, Y., Guigueno, V., Guri, F., Houman, B., Huete, R., Humbert, A., Kanakari, K., Lamacchia, M.R., Lavaud, V., Marocco, F., Melot, R., Migliaccio, A., Mininni, M., Morieux, R., Nikolaidou, S., Paoli, J.C., Petrou, M., Rochette, J., Salvemini, B., Alfosea, F.J.T., Tros, M., Vidal, R., 2013. *Un littoral sans nature ? L'avenir de la Méditerranée face à l'urbanisation*. Ecole française de Rome.
- Peulvast, J.-P., Bétard, F., Giusti, F., 2013. Plaines, plateaux et moyennes montagnes, in : *Géomorphologie de la France*, p. 19-36.
- Philippe, M., Hénaff, A., Lami, T., Le Berre, I., Meur-Férec, C., Le Dantec, N., Letortu, P., Guillou, E., Rouan, M., David, L., 2021. *Expérimentation pour un observatoire régional de la vulnérabilité aux risques côtiers en Bretagne. Projets OSIRISC et OSIRISC+. UBO, CNRS, CEREMA*.
- Phillips, Y., Marsh, D., 2015. *Virtual Reality and Scope Sensitivity in a Choice Experiment About Coastal Erosion*.
- Pinot, J.-P., 1998. *La gestion du littoral*. Institut océanographique.
- Poli, D., Remondino, F., Angiuli, E., Aguiaro, G., 2015. Radiometric and geometric evaluation of GeoEye-1, WorldView-2 and Pléiades-1A stereo images for 3D information extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information* 100, 35-47. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.04.007>
- Pomerol, B., Bailey, H.W., Monciardini, C., Mortimore, R.N., 1987. Lithostratigraphy and biostratigraphy of the Lewes and Seaford chalks: A link across the Anglo-Paris Basin at the Turonian-Senonian boundary. *Cretaceous research* 8, 289-304.
- Poncet, F., 1984. *Les zones humides du littoral breton : caractères et évolution* (thèse de doctorat). Université de Bretagne Occidentale.
- Prêcheur, C., 1960. *Le littoral de la Manche, de Sainte-Adresse à Ault: étude morphologique*. Poitiers: SFIL.

- Prémaillon, M., 2018. *Hiérarchisation des facteurs d'érosion des falaises côtières du site au globe* (thèse de doctorat). Université Toulouse III Paul Sabatier.
- Prémaillon, M., Regard, V., Dewez, T., 2017. How to explain variations in sea cliff erosion rate?. *Geophysical Research Abstracts*, p. 8012.
- Prick, A., 1995. Dilatometrical behaviour of porous calcareous rock samples subjected to freeze-thaw cycles. *CATENA, Experimental Geomorphology and Landscape Ecosystem Changes* 25, 7-20. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)00038-G](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)00038-G)
- Pucino, N., Kennedy, D.M., Carvalho, R.C., Allan, B., Ierodiaconou, D., 2021. Citizen science for monitoring seasonal-scale beach erosion and behaviour with aerial drones. *Scientific Reports* 11, 3935. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83477-6>
- Rasse, P., 2007. La médiation scientifique et technique, entre vulgarisation et espace public. *Quaderni* 73-94.
- Reuter, Y., 2011. Penser la perspective didactique : la question de l'articulation entre disciplinaire, pédagogique et scolaire. *Les concepts et les méthodes en didactique du français* 35-60.
- Robinson, D., Jerwood, L., 1987. Sub-aerial weathering of chalk shore platforms during harsh winters in Southeast England. *Marine Geology* 77, 1-14.
- Rodet, J., 1991. *Les karsts de la craie : étude comparative* (thèse de doctorat). Paris 4.
- Rodgers, P.W., 1968. The response of the horizontal pendulum seismometer to Rayleigh and Love waves, tilt, and free oscillations of the Earth. *Bulletin of the Seismological Society of America* 58, 1385-1406.
- ROLNP, 2012. *Atlas permanent du littoral*. Réseau d'observation du littoral normand picard, Caen.
- Rosser, N., Lim, M., Petley, D., Dunning, S., Allison, R., 2007. Patterns of precursory rockfall prior to slope failure. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 112. <https://doi.org/10.1029/2006JF000642>
- Roulland, T., 2022. *Modalités et rythmes d'évolution des falaises des Vaches Noires (Normandie, France) : caractérisation et quantification des dynamiques hydrogravitaires par approche multi-scalaire* (thèse de doctorat). Université de Caen Normandie.
- Ruggiero, P., Komar, P.D., McDougal, W.G., Marra, J.J., Beach, R.A., 2001. Wave runup, extreme water levels and the erosion of properties backing beaches. *Journal of Coastal Research* 17, 407-419.
- Rummukainen, M., 2012. Changes in climate and weather extremes in the 21st century. *WIREs Climate Change* 3, 115-129. <https://doi.org/10.1002/wcc.160>
- Rupnik, E., Daakir, M., Pierrot Deseilligny, M., 2017. MicMac – a free, open-source solution for photogrammetry. *Open Geospatial Data, Software and Standards* 2, 14. <https://doi.org/10.1186/s40965-017-0027-2>
- Rupnik, E., Pierrot-Deseilligny, M., Muller, J.M., Zhou, Z., Daakir, M., Maillet, G., 2020. *MicMac, Apero, Pastis and Other Beverages in a Nutshell!*
- Ruz, M.-H., Rufin-Soler, C., Héquette, A., Révillon, R., Hellequin, A.-P., Deboudt, P., Herbert, V., Cohen, O., Lebreton, F., Le Goff, L., Schmitt, F.G., Marin, D., 2020. Climate Change and Risk Perceptions in Two French Coastal Communities. *Journal of Coastal Research* 95, 875-879. <https://doi.org/10.2112/SI95-170.1>
- Salima, B.A., Bellefon, M.P., 2018. Indices d'autocorrélation spatiale, in : *Manuel d'analyse spatiale. Théorie et mise en œuvre pratique avec R*, INSEE méthodes, p. 53-72.
- Saporta, G., 2006. *Probabilités, analyse des données et statistique*. Editions Technip.
- Sauleau, P., Poisson, P., Ruault, R., 2021. *Les sciences participatives dédiées à la mer et au littoral breton : état des lieux, recommandations et perspectives pour les universités ISblue*.

- Scheibling, J., 2015. *Qu'est-ce que la géographie?*, 2ème édition revue et augmentée. ed, Carré géographie. Hachette supérieur.
- Schmidhuber, J., 2015. Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks* 61, 85-117. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003>
- Senfaute, G., Amitrano, D., Lenhard, F., Morel, J., 2005. Étude en laboratoire par méthodes acoustique : de l'endommagement des roches de craie et corrélation avec des résultats in situ. *Revue Française de Géotechnique* 9-18. <https://doi.org/10.1051/geotech/2005110009>
- Shadrack, J.R., Rood, D.H., Hurst, M.D., Piggott, M.D., Hebditch, B.G., Seal, A.J., Wilcken, K.M., 2022. Sea-level rise will likely accelerate rock coast cliff retreat rates. *Nature Communications* 13, 7005. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34386-3>
- Shean, D.E., Alexandrov, O., Moratto, Z.M., Smith, B.E., Joughin, I.R., Porter, C., Morin, P., 2016. An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very-high-resolution commercial stereo satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 116, 101-117.
- Shirk, J.L., Ballard, H.L., Wilderman, C.C., Phillips, T., Wiggins, A., Jordan, R., McCallie, E., Minarchek, M., Lewenstein, B.V., Krasny, M.E., Bonney, R., 2012. Public Participation in Scientific Research: a Framework for Deliberate Design. *Ecology and Society* 17.
- SHOM, 2020. *Références Altimétriques Maritimes. Ports de France métropolitaine et d'outre-mer.*
- Shriram, K., Oh, S.Y., Bailenson, J., 2017. Virtual Reality and Prosocial Behavior, in : *Social Signal Processing*, p. 304-316. <https://doi.org/10.1017/9781316676202.022>
- Simpson, M., Padilla, L., Keller, K., Klippel, A., 2022. Immersive storm surge flooding: Scale and risk perception in virtual reality. *Journal of Environmental Psychology* 80, 101764. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2022.101764>
- Small, C., Nicholls, R.J., 2003. A Global Analysis of Human Settlement in Coastal Zones. *Journal of Coastal Research* 19, 584-599.
- Smith, M.W., Carrivick, J.L., Hooke, J., Kirkby, M.J., 2014. Reconstructing flash flood magnitudes using 'Structure-from-Motion': A rapid assessment tool. *Journal of Hydrology* 519, 1914-1927. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.078>
- Stéphan, P., Blaise, E., Suanez, S., Fichaut, B., Autret, R., Floc'h, F., Cuq, V., Le Dantec, N., Ammann, J., David, L., 2019. Long, medium, and short-term shoreline dynamics of the Brittany coast (Western France). *Journal of Coastal Research* 88, 89-109.
- Stephenson, W., 2015. Rock Coasts, in : *Coastal Environments and Global Change*, p. 356-379. <https://doi.org/10.1002/9781119117261.ch15>
- Stumpf, A., Malet, J.-P., Allemand, P., Ulrich, P., 2014. Surface reconstruction and landslide displacement measurements with Pléiades satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 95, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.05.008>
- Suanez, S., Cariolet, J.-M., Cancouët, R., Arduin, F., Delacourt, C., 2012. Dune recovery after storm erosion on a high-energy beach: Vougot Beach, Brittany (France). *Geomorphology* 139-140, 16-33. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.014>
- Suanez, S., Fichaut, B., Sparfel, L., 2008. Méthode d'évaluation du risque de submersion des côtes basses appliquée à la plage du Vougot, Guissény (Bretagne). *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 319-334.

- Sunamura, T., 1983. Processes of sea cliff and platform erosion, in : *Handbook of Coastal Processes and Erosion*, p. 233-265.
- Sunamura, T., 1992. *Geomorphology of Rocky Coasts*. John Wiley & Sons.
- Swenson, M.J., Wu, C.H., Edil, T.B., Mickelson, D.M., 2006. Bluff recession rates and wave impact along the Wisconsin coast of Lake Superior. *Journal of Great Lakes Research* 32, 512-530. [https://doi.org/10.3394/0380-1330\(2006\)32\[512:BRRAWI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3394/0380-1330(2006)32[512:BRRAWI]2.0.CO;2)
- Teisson, C., 1986. *Houle de projet et durées de tempêtes sur le site de Penly - Analyse de la houle naturelle* (LNH HE-42/86 No. 2). LNH.
- Thiéblemont, R., Le Cozannet, G., Rohmer, J., Toimil, A., Álvarez-Cuesta, M., Losada, I.J., 2021. Deep uncertainties in shoreline change projections: an extra-probabilistic approach applied to sandy beaches. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21, 2257-2276. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2257-2021>
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Miller, T.L., 2005. *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0: an ArcGIS extension for calculating shoreline change* (US Geol Surv Open-File Rep No. 2005-1304).
- Thirard, G., 2022. *Glissements de terrain littoraux et rétro-littoraux du Pays d'Auge (Normandie): caractérisation hydromécanique et modélisation spatialisée de l'aléa dans un contexte de changement global* (thèse de doctorat). Université de Caen Normandie.
- Thomas, A., 2016. *Elaboration d'un suivi participatif du littoral sur le territoire de la côte des Isles* (mémoire de Master 2 AGIRE). Université de Caen-Normandie.
- Thomas, H., Qi, C.R., Deschaud, J.-E., Marcotegui, B., Goulette, F., Guibas, L.J., 2019. KPConv: Flexible and Deformable Convolution for Point Clouds. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, p. 6411-6420.
- Thomas, J.W., 2000. *A review of research on project-based learning*.
- Thompson, C.F., Young, A.P., Dickson, M.E., 2019. Wave impacts on coastal cliffs: Do bigger waves drive greater ground motion? *Earth Surface Processes and Landforms* 44, 2849-2860. <https://doi.org/10.1002/esp.4712>
- Tran, J., Divine, L.M., Heffner, L.R., 2021. "What are you going to do, Protest the Wind?": Community Perceptions of Emergent and Worsening Coastal Erosion from the Remote Bering Sea Community of St. Paul, Alaska. *Environmental Management* 67, 43-66. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01382-6>
- Tran, T.H.G., Ressler, C., Pfeifer, N., 2018. Integrated Change Detection and Classification in Urban Areas Based on Airborne Laser Scanning Point Clouds. *Sensors* 18, 448. <https://doi.org/10.3390/s18020448>
- Trenhaile, A.S., 1980. Shore platforms: a neglected coastal feature. *Progress in Physical Geography* 4, 1-23. <https://doi.org/10.1177/030913338000400101>
- Trenhaile, A.S., 2002. Rock coasts, with particular emphasis on shore platforms. *Geomorphology* 48, 7-22. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00173-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00173-3)
- Trenhaile, A.S., 2009. Modeling the erosion of cohesive clay coasts. *Coastal Engineering* 56, 59-72. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.07.001>
- Trenhaile, A.S., 2011. Predicting the response of hard and soft rock coasts to changes in sea level and wave height. *Climatic Change* 109, 599-615. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0035-7>

- Trenhaile, A.S., 2019. Hard-Rock Coastal Modelling: Past Practice and Future Prospects in a Changing World. *Journal of Marine Science and Engineering* 7, 34. <https://doi.org/10.3390/jmse7020034>
- Tricot, A., 2017. *L'innovation pédagogique*. Retz.
- Turner, B.L., Kasperson, R.E., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A., Martello, M.L., Polsky, C., Pulsipher, A., Schiller, A., 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100, 8074-8079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- United Nations, 1992. *United Nations framework convention on climate change*.
- Van Brussel, S., Huyse, H., 2019. Citizen science on speed? Realising the triple objective of scientific rigour, policy influence and deep citizen engagement in a large-scale citizen science project on ambient air quality in Antwerp. *Journal of Environmental Planning and Management* 62, 534-551. <https://doi.org/10.1080/09640568.2018.1428183>
- Vann Jones, E.C., Rosser, N.J., Brain, M.J., 2018. Alongshore variability in wave energy transfer to coastal cliffs. *Geomorphology* 322, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.08.019>
- Vann Jones (née Norman), E.C., Rosser, N.J., Brain, M.J., Petley, D.N., 2015. Quantifying the environmental controls on erosion of a hard rock cliff. *Marine Geology* 363, 230-242. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.12.008>
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109, 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Verger, F., Ghirardi, R., 2009. *Les zones humides du littoral français*. Belin.
- Veyret, Y., 2003. *Les risques*, Dossiers des images économiques du monde. SEDES.
- Viles, H.A., 2013. Linking weathering and rock slope instability: non-linear perspectives. *Earth Surface Processes and Landforms* 38, 62-70. <https://doi.org/10.1002/esp.3294>
- Vinet, F., Defosse, S., Rey, T., Boissier, L., 2012. Le processus de production du risque « submersion marine » en zone littorale : l'exemple des territoires « Xynthia ». *Noréis* 222, 11-26.
- Vitousek, S., Barnard, P.L., Limber, P., 2017. Can beaches survive climate change? *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 122, 1060-1067. <https://doi.org/10.1002/2017JF004308>
- Walkden, M.J.A., Hall, J.W., 2005. A predictive Mesoscale model of the erosion and profile development of soft rock shores. *Coastal Engineering* 52, 535-563. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.02.005>
- Whitelaw, G., Vaughan, H., Craig, B., Atkinson, D., 2003. Establishing the Canadian Community Monitoring Network. *Environmental Monitoring and Assessment* 88, 409-418. <https://doi.org/10.1023/A:1025545813057>
- Wijetunge, J.J., 2006. Tsunami on 26 December 2004: spatial distribution of tsunami height and the extent of inundation in Sri Lanka. *Science of Tsunami Hazards*.
- Woodroffe, C.D., 2002. *Coasts: Form, Process and Evolution*. Cambridge University Press.
- WSDOT, 2021. *Geotechnical Design Manual*. Washington State Department of Transportation.
- Young, A.P., 2018. Decadal-scale coastal cliff retreat in southern and central California. *Geomorphology* 300, 164-175. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.10.010>

- Young, A.P., Adams, P.N., O'Reilly, W.C., Flick, R.E., Guza, R.T., 2011a. Coastal cliff ground motions from local ocean swell and infragravity waves in southern California. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 116. <https://doi.org/10.1029/2011JC007175>
- Young, A.P., Carilli, J.E., 2019. Global distribution of coastal cliffs. *Earth Surface Processes and Landforms* 44, 1309-1316. <https://doi.org/10.1002/esp.4574>
- Young, A.P., Flick, R.E., Gutierrez, R., Guza, R.T., 2009. Comparison of short-term seacliff retreat measurement methods in Del Mar, California. *Geomorphology* 112, 318-323. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.018>
- Young, A.P., Flick, R.E., O'Reilly, W.C., Chadwick, D.B., Crampton, W.C., Helly, J.J., 2014. Estimating cliff retreat in southern California considering sea level rise using a sand balance approach. *Marine Geology* 348, 15-26. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.11.007>
- Young, A.P., Guza, R.T., Adams, P.N., O'Reilly, W.C., Flick, R.E., 2012. Cross-shore decay of cliff top ground motions driven by local ocean swell and infragravity waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 117. <https://doi.org/10.1029/2012JC007908>
- Young, A.P., Guza, R.T., Dickson, M.E., O'Reilly, W.C., Flick, R.E., 2013. Ground motions on rocky, cliffed, and sandy shorelines generated by ocean waves. *Journal of Geophysical Research* 118, 6590-6602. <https://doi.org/10.1002/2013JC008883>
- Young, A.P., Guza, R.T., O'Reilly, W.C., Burvingt, O., Flick, R.E., 2016. Observations of coastal cliff base waves, sand levels, and cliff top shaking. *Earth Surface Processes and Landforms* 41, 1564-1573. <https://doi.org/10.1002/esp.3928>
- Young, A.P., Guza, R.T., O'Reilly, W.C., Flick, R.E., Gutierrez, R., 2011b. Short-term retreat statistics of a slowly eroding coastal cliff. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, 205-217. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-205-2011>
- Yuan, Q., Shen, H., Li, T., Li, Z., Li, S., Jiang, Y., Xu, H., Tan, W., Yang, Q., Wang, J., Gao, J., Zhang, L., 2020. Deep learning in environmental remote sensing: Achievements and challenges. *Remote Sensing of Environment* 241, 111716. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111716>
- Zagoruyko, S., Komodakis, N., 2015. Learning to compare image patches via convolutional neural networks. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, p. 4353-4361.
- Zhang, L., Zhang, L., Du, B., 2016. Deep Learning for Remote Sensing Data: A Technical Tutorial on the State of the Art. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 4, 22-40. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2016.2540798>
- Zhang, Z., Vosselman, G., Gerke, M., Persello, C., Tuia, D., Yang, M.Y., 2019. Detecting building changes between airborne laser scanning and photogrammetric data. *Remote sensing* 11, 2417.
- Zhu, X.X., Tuia, D., Mou, L., Xia, G.-S., Zhang, L., Xu, F., Fraundorfer, F., 2017. Deep learning in remote sensing: a review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 5, 8-36. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2017.2762307>

Table des figures

Figure 1.1 : Trois types d'aléas côtiers (érosion côtière, submersion marine et migration dunaire).....	16
Figure 1.2 : Distribution des côtes à falaises (Emery et Kuhn, 1982) et une erreur le long du désert du Namib.....	19
Figure 1.3 : Carte de probabilité d'occurrence des falaises à l'échelle globale (Young et Carilli, 2019)	20
Figure 1.4 : Types de littoraux en Bretagne et distribution géographique (Hénaff et al., 2018)	20
Figure 1.5 : Types de côtes entre la baie du Mont-Saint-Michel et la baie d'Authie (ROLNP, 2012).....	21
Figure 1.6 : Impacts des obstacles au transit sédimentaire et de la lithologie sur les vitesses de recul des falaises de Seine-Maritime (1966-2008), établies tous les 50 m (modifié d'après Letortu et al., 2014a).....	23
Figure 1.7 : Histogramme du pays du premier auteur pour les 1 309 publications recensées sur les côtes à falaises (meubles ou rocheuses) et les côtes rocheuses entre 1960 et 2021 dans les bases Scopus d'Elsevier et du WoS™ Core Collection de Clarivate Analytics, accessible par abonnement sur internet par le biais de la plate-forme WoS (INIST-CNRS - UAR76)	27
Figure 1.8 : Représentativité du référentiel « haut de falaise » et celui du « front de falaise » pour suivre l'érosion côtière (d'après Young et al., 2009)	28
Figure 1.9 : Types de mouvements gravitaires observés en Seine-Maritime (modifié d'après Letortu, 2013)	30
Figure 1.10 : Déclenchement d'un écroulement de 1 009 m ³ le 10 février 2020 à 12h19 entre la seconde 37 et 39 (temps universel coordonné, UTC) à Sainte-Marguerite-sur-Mer (après la période d'instrumentation du projet RICOCHET)	32
Figure 1.11 : Extrait d'un article de vulgarisation scientifique sur le suivi de l'évolution des falaises dans le cadre du projet RICOCHET, réalisé conjointement par les scientifiques et les employés de l'agence Normandie biodiversité et développement durable	35
Figure 1.12 : OSIRISC : l'observatoire et les acteurs impliqués (Hénaff et Le Dantec).....	36
Figure 1.13 : Sites de suivis de la vulnérabilité systémique aux risques côtiers dans le Finistère (UBO, OSIRISC et Litto'Risques)	38
Figure 1.14 : Position supposée du trait de côte à l'échéance de 100 ans (L_r) selon la méthodologie du PPRL (modifié d'après Letortu, 2013).....	39
Figure 1.15 : Emboîtement des échelles spatiales dans mes recherches.....	42
Figure 1.16 : Emprises temporelles, couvertures spatiales, précisions des résultats et points de vue de mes recherches (en fonction des projets de recherche et/ou de formation).....	43
Figure 1.17 : Présentation de la géologie, des types de falaises et de la bathymétrie le long des falaises de Seine-Maritime et les trois sites étudiés (d'après Costa, 1997 ; Letortu, 2013).....	48
Figure 1.18 : « Stabilité » du paysage d'Etretat (à gauche, la peinture d'E. Boudin en 1890 ; à droite, la photographie prise en janvier 2020).....	50
Figure 1.19 : Instabilité du paysage de Varengeville-sur-Mer avec son église (à gauche, la peinture de C. Monet en 1882 ; à droite, la photographie prise en 2021).....	51
Figure 1.20 : Caractéristiques des sites étudiés dans le cadre du suivi de l'érosion du front de falaise : A) localisation, B) et C) lithologie, longueur (L), hauteur (H), orientation et pente, D) fracturation (d'après Mortimore, 2001 ; Hoyez, 2008 ; Dewez et al., 2016 ; Letortu et al., 2019)	52

Figure 1.21 : Présentation du site de l'instrumentation de Sainte-Marguerite-sur-Mer : A) localisation (par rapport à Varengueville-sur-Mer) et profil topographique, B) lithologie, longueur (L), hauteur (H), orientation et pente (d'après (Mortimore, 2001 ; Hoyez, 2008)	54
Figure 1.22 : Carte géologique simplifiée du Massif armoricain (France du Nord in Jabbar, 2016)	56
Figure 1.23 : Carte morphologique du littoral de la Bretagne (d'après Bodéré et Pourinet (2001), modifié par Costa et Suanez, 2013)	57
Figure 1.24 : Localisation de la falaise instrumentée à Plougonvelin (Finistère)	59
Figure 1.25 : Carte géomorphologique du site d'étude (modifié de Suanez et al., 2012, d'après Hallégouët, 1971 et Bodéré et al., 1983)	61
Figure 1.26 : Programme d'action de la stratégie locale de gestion intégrée du trait de côte de la CLCL (https://www.clcl.bzh/environnement/espaces-nat/240-prevention-des-inondations/372-prevention-des-inondations)	62
Figure 2.1 : Chronologie montrant l'évolution de la recherche sur les côtes rocheuses (la position des différentes méthodes et techniques le long de la ligne de temps représente la date à laquelle elles ont été utilisées pour la première fois pour étudier les côtes rocheuses, modifiée d'après Gómez-Pazo et Pérez-Alberti, 2021)	63
Figure 2.2 : Approche fondée sur l'aire pour une mesure continue des vitesses de recul des falaises (Letortu, 2013).....	65
Figure 2.3 : Méthode de calcul par l'approche fondée sur l'aire sur ArcGIS (A. Bensaid) (Letortu, 2013)	66
Figure 2.4 : Trait de côte de 2015 et boîtes générées le long du littoral de Criel-sur-Mer	67
Figure 2.5 : Zones de départ et de dépôt des éboulements/écroulements repérés à Saint-Pierre-en-Port (A) et Dieppe (B) (Letortu, 2013)	69
Figure 2.6 : Séries de photographies aériennes verticales disponibles et utilisées jusqu'en 2018.....	69
Figure 2.7 : Eboulements/écroulements successifs de pan entier de falaise à Bracquemont (Letortu, 2013)	70
Figure 2.8 : Différents scénarios pour estimer le recul à l'échéance de 100 ans à Criel-sur-Mer	72
Figure 2.9 : Distribution temporelle des levés du front de falaise depuis octobre 2010 à Varengueville-sur-Mer et à Dieppe	73
Figure 2.10 : A) Matériel utilisé, B) cibles, stations et lignes de base, C) reconstruction photogrammétrique terrestre, D) reconstruction photogrammétrique par drone à Varengueville-sur-Mer (modifié d'après Letortu et al., 2018)	76
Figure 2.11 : Protocole d'acquisition par photogrammétrie terrestre RTK (Jaud et al., 2020) et sa mise en place à Varengueville-sur-Mer (02/02/2021 avec B. Peuziat).....	78
Figure 2.12 : Evolutions dans l'acquisition et le traitement des données sur les sites de Varengueville-sur-Mer et de Dieppe	79
Figure 2.13 : Evolutions dans le traitement détaillé des données sur les sites de Varengueville-sur-Mer et de Dieppe (MNT pour modèle numérique de terrain).....	80
Figure 2.14 : Principe de KPConv sur des points 2D (et non 3D, pour une illustration plus simple) par rapport à une convolution classique sur une image (Thomas et al., 2019).....	82
Figure 2.15 : Réseau siamois KPConv développé pour détecter le changement sur les nuages de points 3D (écrits PC dans la figure) (de Gélis et al., 2021)	83

Figure 2.16 : Acquisition multodate d'images monodépointées (Letortu et al., 2020) et les différents angles dont l'angle d'incidence (Letortu et al., 2021). Exemple de l'extension spatiale complète de l'image panchromatique du 15 juin 2017 entre Quiberville et Berneval-le-Grand (angle d'incidence 0-10°) et les paires stéréoscopiques découpées autour de Varengueville-sur-Mer (angles d'incidence 0-10° et 40°) (Letortu et al., 2021)	86
Figure 2.17 : Chaînes de traitements d'ASP et de MicMac pour obtenir un nuage de points (NASA, 2019 ; Rupnik et al., 2020) et les différents tests réalisés à l'étape de corrélation pour déterminer le meilleur logiciel (Letortu et al., 2021)	89
Figure 2.18 : Différence entre la précision et l'exactitude	90
Figure 2.19 : Environnement de l'instrumentation à Plougouvelin (côté ouest de la plage de Porsmilin) et présentation du matériel déployé (Letortu et al., 2017)	92
Figure 2.20 : Histogramme représentant les scores de classification durant l'instrumentation en fonction de la classe « bruit » et la classe « microséisme » (C. Hibert)	95
Figure 2.21 : A) Localisation des capteurs en haut de la falaise et sur la plate-forme et quelques éléments structurants du site de Sainte-Marguerite-sur-Mer, B) falaise surveillée (vue depuis la plage) et l'aspect visuel de la craie sur le front de falaise, C) extensomètre et installation sur le front de falaise, D) capteurs situés dans l'enclos A en bordure de la falaise, E) capteurs situés dans l'enclos B et à proximité, sur le plateau (Letortu et al., 2022)	98
Figure 2.22 : Etat de l'art, la première sélection et le choix final des variables « aléas »	107
Figure 2.23 : Matrice des risques comme le résultat de l'intersection de l'aléa observé (érosion côtière) et/ou potentiel (zones basses sujettes aux submersions marines) et des enjeux (Le Berre et al., 2022)	112
Figure 2.24 : Déroulement du levé avec l'application CoCliCò (Thomas, 2016).....	114
Figure 2.25 : Organisation du projet CoastAppli sur trois ans avec les étapes réalisées par les étudiants EGEL et de l'IMTA	116
Figure 2.26 : Fonctionnement des éléments constituant CoastAppli	117
Figure 2.27 : Sites suivis par CoastAppli à Guissény.....	119
Figure 3.1 : Phénomènes d'érosion et d'ombre, ce dernier nuisant à la photo-interprétation du trait de côte « haut de falaise abrupt crayeux » entre le cap d'Antifer et Etretat.....	122
Figure 3.2 : Distribution et densité d'éboulements/écroulements recensés par kilomètre linéaire entre 1939 et 2015.....	125
Figure 3.3 : Distribution de l'aire de départ (A) et celle de dépôt (B) des éboulements/écroulements de 1983 à 2015	126
Figure 3.4 : Evolution rapide de la falaise au <i>Petit Ailly</i> (Varengueville-sur-Mer) : trois éboulements/écroulements de pan entier de falaise au même endroit (Letortu, 2013)	129
Figure 3.5 : Distribution spatio-temporelle des éboulements/écroulements et leur barycentre par année en amont et en aval-dérive de l'éboulement du Chien Neuf daté de 1910.....	131
Figure 3.6 : Distribution spatio-temporelle des éboulements/écroulements et leur barycentre par année en amont et en aval-dérive de la jetée de la centrale EDF de Penly, construite en 1981	132
Figure 3.7 : Distribution spatio-temporelle des éboulements/écroulements et leur barycentre par année en amont et en aval-dérive de l'épi majeur de Criel-sur-Mer, rallongé en 1995	133
Figure 3.8 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à Quiberville avec le scénario 1 (sans la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108).....	136

Figure 3.9 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à Quiberville avec le scénario 2 (avec la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108).....	136
Figure 3.10 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à la <i>Côte aux Hérons</i> avec le scénario 1 (sans la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108).....	137
Figure 3.11 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à la <i>Côte aux Hérons</i> avec le scénario 2 (avec la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108).....	137
Figure 3.12 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à <i>Puys</i> avec le scénario 1 (sans la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108).....	138
Figure 3.13 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à <i>Puys</i> avec le scénario 2 (avec la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108).....	138
Figure 3.14 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à Criel-sur-Mer avec le scénario 1 (sans la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108).....	139
Figure 3.15 : Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à Criel-sur-Mer avec le scénario 2 (avec la prise en compte du changement climatique) à l'échéance de 100 ans (en 2108).....	139
Figure 3.16 : Travaux d'aménagement de la <i>côte aux Hérons</i> (Département de Seine-Maritime, 2016)..	142
Figure 3.17 : Comparaison de l'orthophotographie de 2015 (IGN) présentant une mauvaise qualité radiométrique et celle de 2020 (ROL de Normandie-Hauts-de-France) avec une excellente qualité radiométrique	143
Figure 3.18 : Comparaison des zonages du projet RICOCHET (Maquaire et al., 2021) et du BRGM (Pannet et al., 2015) à l'échéance de 100 ans à la <i>Côte aux Hérons</i> à Dieppe en fonction de la prise en compte de l'aléa « recul des falaises » avec les entonnoirs de dissolution qui peuvent se vidanger rapidement (d'orange à jaune) ou sans les entonnoirs de dissolution (de violet à rose clair).....	146
Figure 3.19 : Accident mortel le 14/08/2015 à Varengueville-sur-Mer où un pêcheur à pied est retrouvé sous un éboulement (<i>Sud-Ouest</i> , agence France-Presse C. Triballeau).....	150
Figure 3.20 : Différentiels du front de falaise à Varengueville-sur-Mer entre le 08/10/2010 et le 09/07/2021	153
Figure 3.21 : Différentiels des fronts de falaise à Dieppe 1 O et Dieppe 2 N entre le 07/10/2010 et le 09/07/2021	155
Figure 3.22 : Variation des profils de falaise en fonction de la résistance des roches et de l'efficacité des agents et des processus marins et continentaux (d'après Emery et Kuhn, 1982)	157
Figure 3.23 : Principales évolutions des profils de falaise à Varengueville-sur-Mer et Dieppe entre 2011 et 2014 (modifié d'après Mortimore, 2001 ; Hoyez, 2008 ; Letortu et al., 2019).....	158
Figure 3.24 : Résultats entre la vérité terrain et la prédiction du réseau siamois KPConv pour les nuages de points du front de falaise à Varengueville-sur-Mer A) du 02/11/2017 et du 16/01/2018, B) du 16/01/2018 et du 14/04/2020 (d'après de Gélis et al., 2022)	160
Figure 3.25 : A) Front de falaise reconstruit à partir des images acquises par drone (26/06/2017) et classement de la qualité des reconstructions 3D à partir des images Pléiades : B) insatisfaisante, C) peu satisfaisante, D) satisfaisante (Letortu et al., 2021)	162
Figure 3.26 : Distance relative des normales au front de falaise (m) à Varengueville-sur-Mer entre les reconstructions 3D à partir d'images Pléiades (paire stéréoscopique du 15/06/2017 et 06/07/2017 à 40° (A)) avec B) ASP et C) MicMac (Letortu et al., 2021).....	164

Figure 3.27 : Les meilleurs paramètres (en gras) pour les reconstructions 3D satisfaisantes du front de falaise de Varengeville-sur-Mer avec 1) ASP et 2) MicMac (Letortu et al., 2021)	165
Figure 3.28 : A) Distance relative (m) du front de falaise entre le maillage TLS (25/09/2015) et B) les données du drone (26/06/2017) avec l'érosion détectée à Varengeville-sur-Mer (Letortu et al., 2021)	166
Figure 3.29 : Pierre tombée en pied de falaise de Dieppe 2 N (à gauche) et fracture de détente délimitant un mouvement de masse observable sur le front de Dieppe 2 N (à droite)	168
Figure 3.30 : Les deux premières composantes de l'ACP et les quatre groupes de la CAH sur la population des périodes de 1 h avec et sans microséismes (les variables supplémentaires que sont les déplacements mesurés par les deux extensomètres sur les fractures existantes se trouvent, sans surprise, autour de la variable de la température moyenne)	174
Figure 3.31 : Erosion du front de falaise (précision de $\pm 0,03$ m) entre le 17/10/2018 et le 20/06/2019 à Sainte-Marguerite-sur-Mer (Letortu et al., 2022)	175
Figure 3.32 : Comparaison des 24 capteurs de températures du 08/12/2018 au 28//12/2018 (numérotation des capteurs depuis le sommet vers le pied du front de falaise) et calculs des gradients de température pour les capteurs 3, 11 et 20 (Letortu et al., 2022)	176
Figure 3.33 : Rapport entre l'énergie de déplacement au sommet des falaises et la H_s dans les bandes IG et SF en mars 2019 (Letortu et al., 2022)	177
Figure 3.34 : Extrait des déplacements significatifs des huit extensomètres (E) (numérotation depuis le milieu (7 m IGN69) jusqu'au haut du front de falaise (15 m IGN69) depuis le 21/11/2018 (00h00) au 31/03/2019 (22h00), ainsi que les enveloppes de contraction, d'extension des extensomètres et du niveau d'eau (Letortu et al., 2022)	178
Figure 3.35 : Les deux premières composantes de l'ACP et les trois groupes de la CAH sur la population des périodes de 2 h avec et sans déplacements (Letortu et al., 2022)	179
Figure 3.36 : Fiches méthodologiques des indicateurs « distance érodée/an/100 m linéaires » et « hauteur de submersion » (OSIRISC)	185
Figure 3.37 : Exemples des protocoles « distance entre un repère et le trait de côte » et « hauteur d'eau par mesure verticale » (d'après Gbégnon, 2019)	189
Figure 3.38 : Organigramme récapitulant les étapes pour un suivi des indicateurs d'érosion côtière (d'après Billerey, 2018)	190
Figure 3.39 : Extrait de la page 9 du livret communal de Locmariaquer avec l'exemple de la fiche transect 2 (Billerey, 2018)	191
Figure 3.40 : Exposition du littoral breton aux aléas d'érosion côtière et de submersion marine, dans le cadre de l'observatoire OSIRISC (Le Berre et al., 2022)	192
Figure 3.41 : Outils de mesure présents sur soi qui sont intégrés dans CoastAppli (A : le pas ; B : l'index ; C : la personne étalon) (d'après Derval, 2021)	194
Figure 3.42 : Evolution de la plage de la Croix du 13/12/2021 au 14/10/2022 avec les données de CoastAppli (suivis qualitatif et quantitatif en saisie directe)	201
Figure 4.1 : Critères de définition d'une variable décalée spatialement (Loonis et Bellefon, 2018)	210
Figure 4.2 : Exemples A) de LISA et B) du nombre de variables explicatives significatives sur les données d'éboulements/écroulements en Seine-Maritime (maille de 50 m)	211
Figure 4.3 : Réseau collaboratif de bases GNSS RTK ouvertes, installées en France et A) autour de Penly (avril 2022, https://docs.centipede.fr/)	212

Figure 4.4 : Instruments de la partie « mobile » nécessaires à la photogrammétrie terrestre RTK (modifié du tutoriel de M. Jaud) et l'exemple de son déploiement à Penly pour le suivi de l'érosion des falaises	213
Figure 4.5 : Présentation du site de Penly suivi par photogrammétrie terrestre RTK depuis janvier 2022 (d'après Mortimore, 2001 ; Hoyez, 2008)	213
Figure 4.6 : Principe du GAN (modifié d'après le cours en ligne FIDLE du CNRS (https://www.youtube.com/watch?v=kVBJQw_erAY)	219
Figure 4.7 : Architectures de réseaux de neurones A) <i>early fusion</i> B) <i>Siamese</i> pour la détection de changement à l'échelle du patch (Caye Daudt, 2020)	220
Figure 4.8 : Différence de cumul de précipitations entre le scénario actuel et le scénario RCP 8.5 (carte réalisée à partir des données traitées par Beauvais et Cantat dans DREAL Normandie, 2020) (Thirard, 2022)	226
Figure 4.9 : Modèle conceptuel illustrant les mécanismes d'activation et leurs principales réponses dans la morphodynamique côtière (modifié d'après Castedo et al., 2012)	227
Figure 4.10 : Etapes de réalisation de la modélisation hydromécanique en régime transitoire pour intégrer le changement climatique pour le site de Sainte-Marguerite-sur-Mer (communication personnelle avec G. Thirard, adapté d'après Thirard, 2022).....	228
Figure 4.11 : Futur développement de CoastAppli pour une visualisation des résultats sur l'IDG INDIGEO	232
Figure 4.12 : Plage de Porsmilin (Plougonvelin et Locmaria-Plouzané) vue du modèle 3D avec le logiciel Unity (Kernec)	240

Table des tableaux

Tableau 1.1 : Différents modèles de sciences citoyennes (Sauleau et al., 2021).....	37
Tableau 2.1 : Jeux de données à disposition en Seine-Maritime entre 2008 et 2018.....	64
Tableau 2.2 : Comparaison des vitesses de recul par sous-cellule hydro-sédimentaire obtenues entre 1995 et 2008 en fonction des méthodes utilisées	68
Tableau 2.3 : Points forts (significatifs en vert) et points faibles (significatifs en rouge) des méthodes utilisant le TLS, la photogrammétrie terrestre et la photogrammétrie drone pour le suivi de l'érosion des falaises (Letortu et al., 2018).....	77
Tableau 2.4 : Nuages de points 3D du front de falaise de Varengeville-sur-Mer utilisés par le réseau siamois KPConv pour y détecter du changement (de Gélis et al., 2022).....	83
Tableau 2.5 : Caractéristiques des images Pléiades (Astrium, 2012)	85
Tableau 2.6 : Caractéristiques des images acquises lors du projet CNES EROFALITT (Letortu et al., 2020)	87
Tableau 2.7 : Les meilleures images pour reconstruire en 3D le front des falaises de Varengeville-sur-Mer (d'après Letortu et al., 2021).....	88
Tableau 2.8 : Instruments utilisés et caractéristiques d'acquisition des données entre le 18/02/20217 et le 22/05/2017 (modifié d'après Letortu et al., 2017).....	93
Tableau 2.9 : Etapes des analyses statistiques multivariées et bivariées menées sur les périodes de 1 h avec ou sans microséismes.....	97
Tableau 2.10 : Instruments utilisés et caractéristiques d'acquisition des données et d'alimentation électrique à Sainte-Marguerite-sur-Mer (Letortu et al., 2022)	100
Tableau 2.11 : Etapes des analyses statistiques multivariées et bivariées menées sur les deux populations (séparées par la ligne pointillée) à partir des données des extensomètres et des conditions environnementales (Letortu et al., 2022)	104
Tableau 3.1 : Vitesses moyennes annuelles de recul par sous-cellule hydro-sédimentaire obtenues entre 2008 et 2015 ($\pm 0,17$ m/an)	121
Tableau 3.2 : Comparaison des vitesses moyennes annuelles de recul par sous-cellule hydro-sédimentaire obtenues pour les périodes 1966-2008 ($\pm 0,03$ m/an), 1995 et 2008 ($\pm 0,09$ m/an) et 1995 et 2015 ($\pm 0,06$ m/an)	122
Tableau 3.3 : Nombre d'éboulements/écroulements par sous-cellule hydro-sédimentaire et par mission (* : Quiberville/Dieppe)	124
Tableau 3.4 : Récurrence moyenne des éboulements/écroulements et amplitude de la récurrence en fonction des sous-cellules hydro-sédimentaires.....	128
Tableau 3.5 : Durée moyenne de déblaiement des éboulements/écroulements au niveau du cordon de galets par sous-cellule hydro-sédimentaire entre 1939 et 2015	130
Tableau 3.6 : Estimation du taux de recul annuel (T_x), $100 \times T_x$, du L_{max} initial et L_{max} final et du L_r à Quiberville, la Côte aux Hérons, Puys et Criel-sur-Mer	134
Tableau 3.7 : Calculs des zones d'aléas « fort » et « moyen » à Quiberville, la Côte aux Hérons, Puys et Criel-sur-Mer, à l'échéance de 100 ans (en 2108) pour les scénarios 1 (sans la prise en compte du changement climatique) et 2 (avec la prise en compte du changement climatique)	135
Tableau 3.8 : Evaluation de la surface communale et du nombre de bâtiments concernés par la cartographie de l'aléa « recul des falaises » (calcul des surfaces d'après la BD Carto IGN, 2019 ;	

calcul du nombre de bâtiments d'après la BD Topo IGN, 2021) à l'échéance de 100 ans (en 2108) avec (scénario 2) ou sans (scénario 1) la prise en compte du changement climatique.....	140
Tableau 3.9 : Comparaison des vitesses d'érosion obtenues par le suivi du front de falaise et du haut de falaise à Varengueville-sur-Mer et à Dieppe	147
Tableau 3.10 : Erosion du front de falaise à Varengueville-sur-Mer entre le 08/10/2010 et le 09/07/2021 au <i>Petit Ailly</i> (en gris, les levés dépassant les $\pm 0,03$ m d'imprécision).....	149
Tableau 3.11 : Type, numéro et volume des mouvements gravitaires observés entre le 08/10/2010 et le 09/07/2021 (en gris, les mouvements gravitaires issus de levés imprécis)	151
Tableau 3.12 : Qualité de prédiction du réseau KPConv (avec la métrique quantitative IoU) pour la détection et la catégorisation des changements (de Gélis et al., 2022)	160
Tableau 3.13 : Sélection des meilleures reconstructions 3D du front de falaise par paire d'images et par logiciel à partir des 146 tests (Letortu et al., 2021).....	163
Tableau 3.14 : Tests de reconstruction 3D basés sur la mise en correspondance tristéoscopique dans MicMac (triplet d'images : 10-15-18/06/2017) (Letortu et al., 2021).....	167
Tableau 3.15 : Critère et cote associée pour que les variables d'érosion côtière deviennent des indicateurs.....	183
Tableau 3.16 : Critère et cote associée pour que les variables de submersion marine deviennent des indicateurs.....	184
Tableau 3.17 : Liste des 20 protocoles mis en place pour suivre les différents indicateurs des aléas d'érosion côtière et de submersion marine, ainsi que les avantages et inconvénients de chaque protocole (d'après Billerey, 2018 ; Gbégnon, 2019).....	188
Tableau 3.18 : Indices thématiques et de composante pour les aléas (Le Berre et al., 2022).....	192
Tableau 3.19 : Tri des protocoles du projet OSIRISC intégrables actuellement dans CoastAppli (un protocole est barré lorsqu'il n'est pas intégrable) et en fonction du profil de l'utilisateur (en blanc : pour les débutants, habitués et gestionnaires ; en marron clair : pour les habitués et gestionnaires ; en marron foncé : uniquement pour les gestionnaires)	195
Tableau 3.20 : Protocoles d'érosion côtière et de submersion marine en fonction des sites de Guissény	196
Tableau 3.21 : Couleurs de badge et les seuils associés	196
Tableau 3.22 : Exactitude et précision des mesures sur CoastAppli pour les débutants, les habitués et les gestionnaires (données de V. Ar Gall, D. Chorlay, R. Ruault, Q. Millière, N. Floch)	199
Tableau 3.23 : Nombre de contributions par site en fonction des utilisateurs (du 17/01/2022 au 14/10/2022).....	199
Tableau 3.24 : Nombre de contributions par site en fonction des protocoles d'érosion côtière (du 17/01/2022 au 14/10/2022).....	199
Tableau 3.25 : Nombre de contributions par protocole d'érosion côtière à la plage de la Croix en fonction des utilisateurs (du 17/01/2022 au 14/10/2022).....	200
Tableau 3.26 : Extrait des seuils de cotation de l'indicateur de l'érosion côtière en fonction des types de côtes pour la façade nord (modifié d'après Billerey, 2018).....	203
Tableau 4.1 : Orthophotographies sélectionnées pour l'étude de la distribution spatiale et temporelle des éboulements/écroulements entre 2000 et 2018	208
Tableau 4.2 : Ecart du dGPS Centipède par rapport à la base de Penly post-traitée avec le réseau GNSS permanent.....	214

Tableau 4.3 : Caractéristiques des trois sites de falaises étudiés dans le projet HIRACLES	217
Tableau 4.4 : Tâches du projet HIRACLES.....	218
Tableau 4.5 : Forçage radiatif, concentration en GES et trajectoire en fonction du scénario RCP (Moss et al., 2010 in Thirard, 2022).....	226
Tableau 4.6 : Coût annuel de CoastAppli pour neuf protocoles	230
Tableau 4.7 : Organisation du projet RISCOREV sur trois ans avec les étapes réalisées par les étudiants du master 2 EGEL et de 5 ^e année de l'ENIB	238
Tableau 4.8 : Présélection des communes du Finistère exposées aux risques d'érosion côtière et/ou de submersion marine (CC pour communauté de communes et CA pour communauté d'agglomération, Ipenburg et al., 2022).....	239

Table des graphiques

Graphique 1.1 : Vitesses de recul des falaises en fonction de la lithologie : comparaison entre Woodroffe (2002) et GlobR2C2 (<i>global recession rates of coastal cliffs</i> , 2018) (Prémaillon, 2018)	22
Graphique 1.2 : Nombre d'articles reliés à la géomorphologie publiés sur les différents types de côtes dans le monde entre 1993 et 2008 (Naylor et al., 2010)	25
Graphique 1.3 : Distribution annuelle des 1 309 publications recensées sur les côtes à falaises (meubles ou rocheuses) et les côtes rocheuses entre 1960 et 2021 dans les bases Scopus d'Elsevier et du Web of science™ (WoS) Core Collection de Clarivate Analytics, accessible par abonnement sur internet par le biais de la plate-forme WoS (institut de l'information scientifique et technique (INIST-CNRS) – unité d'appui à la recherche (UAR76)	26
Graphique 1.4 : Variation de la moyenne mondiale du niveau des océans par rapport à 1900 (GIEC, 2022a, https://resumegiec.wordpress.com/2021/08/11/rapport-du-giec-resume-pour-les-decideurs/)	40
Graphique 2.1 : Densité spectrale de puissance du déplacement du 13/11/2018 en fonction des bandes de fréquence, en comparant la station sismométrique côtière de Sainte-Marguerite-sur-Mer (Ste Mar.) et celle intérieure de Thoiré-sur-Dinan (TSDF) (Letortu et al., 2022)	102
Graphique 3.1 : Nombre d'éboulements/écroulements par sous-cellule hydro-sédimentaire et par mission entre 1939 et 2015	127
Graphique 3.2 : Mouvements des fractures mesurés par les deux extensomètres sur le front de falaise à Plougouvelin en lien avec la température du front de falaise, associés à leur équation de droite de régression (Y) et leur coefficient de détermination (la variable à expliquer (Y) étant les mouvements sur les fractures, et la variable explicative (X) étant la température)	172
Graphique 3.3 : Résidus aux modèles et leur relation avec la moyenne du niveau d'eau et le maximum de la H _s	172
Graphique 3.4 : La facilité ou non de la réalisation de la mesure avec CoastAppli, d'après les 85 questionnaires analysés par R. Ruault et Q. Millière (0 : très difficile ; 1 : difficile ; 2 relativement difficile ; 3 : relativement facile ; 4 : facile ; 5 : très facile ; pas de réponse)	197
Graphique 3.5 : La diffusion d'information sur les risques côtiers et CoastAppli auprès des familles, d'après les 85 questionnaires analysés par R. Ruault et Q. Millière	198

Table des photographies

Photographie 1.1 : Le front de mer à Biarritz où les falaises et les plages présentent de nombreux enjeux (vue depuis la pointe Saint-Martin)	25
Photographie 3.1 : Travaux de sécurisation du site de Dieppe 1 O (à gauche) et Dieppe 2 N (à droite)	148
Photographie 4.1 : Evolution du stock de galets en pied de falaise et ses effets sur le profil des falaises à Penly (la centrale nucléaire est à l'arrière-plan).....	215
Photographie 4.2 : Site des <i>Vallées</i> à Pléneuf-Val-André (Côtes-d'Armor)	216
Photographie 4.3 : Site de Porto Vromi sur la côte ouest de Zakynthos	217

Table des matières

REMERCIEMENTS	1
SOMMAIRE	5
TABLE DES SIGLES ET DES ACRONYMES	7
INTRODUCTION	13
CHAPITRE 1 OBJET DE RECHERCHE « FALAISE » ET SON COROLLAIRE « EROSION » : PROBLEMATIQUES ET POINTS DE VUE	15
1.1 FALAISE ET EROSION : CONTEXTE	16
1.1.1 Précisions terminologiques	16
1.1.2 Répartition spatiale	18
1.1.3 Dynamiques d'évolution	22
1.1.4 Objet approprié, mais relativement peu étudié	24
1.2 QUESTIONS SCIENTIFIQUES : PERMANENCE ET EMERGENCE	27
1.2.1 Vitesses, rythmes et modalités d'érosion	28
1.2.2 Facteurs prépondérants dans l'érosion	31
1.2.3 Contribution des recherches à l'action et à la pratique sociale	34
1.2.3.1 Développement, actualisation et diffusion classique des connaissances	34
1.2.3.2 Développement et actualisation des connaissances par l'implication des élus, gestionnaires et des citoyens	35
1.2.3.3 Prévoir l'aléa « recul des falaises » pour mettre en place une logique d'adaptation	39
1.3 VARIETE DES ECHELLES SPATIALES ET TEMPORELLES ET DES COLLABORATIONS (GEOSCIENCES, SCIENCES DE L'EDUCATION, INFORMATIQUE)	42
1.3.1 Suivi de la falaise (haut et front de falaise) de l'échelle locale à l'échelle de la cellule hydro- sédimentaire, sur plusieurs décennies (résolution infradécimétrique)	43
1.3.2 Suivi de la falaise (front de falaise, intérieur de la falaise) de l'échelle de la falaise au versant littoral, de quelques secondes à plusieurs mois	45
1.3.3 De l'échelle de la pluridécennie à la seconde, et vers l'avenir	47
1.4 PRESENTATION DES SECTEURS ETUDIÉS	47
1.4.1 Normandie : les falaises de craie (Dieppe, Varengeville-sur-Mer et Sainte-Marguerite-sur- Mer)	47
1.4.1.1 Contextes géographique et structural	47
1.4.1.2 Facteurs continentaux, marins et anthropiques en présence	49
1.4.1.3 Dieppe et Varengeville-sur-Mer pour le suivi diachronique de l'érosion du front de falaise	51
1.4.1.4 Sainte-Marguerite-sur-Mer : le second site d'instrumentation multiparamètre et continue	53
1.4.2 Bretagne : les falaises d'orthogneiss à Plougonvelin et la côte de Guissény	55
1.4.2.1 Contextes géographique et structural	55
1.4.2.2 Facteurs continentaux, marins et anthropiques en présence	58
1.4.2.3 Plougonvelin : le premier site d'instrumentation multiparamètre et continue	59
1.4.2.4 Guissény pour le suivi citoyen des aléas côtiers	60
CHAPITRE 2 METHODOLOGIES ET INNOVATIONS	63
2.1 VITESSES, RYTHMES ET MODALITES DE RECU OBSERVES DEPUIS LE HAUT DE FALAISE	64
2.1.1 Tentative de mise à jour des vitesses de recul avec l'orthophotographie de 2015	64
2.1.1.1 Nouvelles données à disposition	64
2.1.1.2 Digitalisation	65
2.1.1.3 Calcul des vitesses de recul par l'approche fondée sur l'aire et estimation de l'erreur	65
2.1.1.4 Comparaison des méthodes de calcul sur le jeu de données 1995-2008	68
2.1.2 Continuation des travaux sur les rythmes et les modalités de recul	68
2.1.2.1 Nouvelles données à disposition	69
2.1.2.2 Digitalisation	70

2.1.2.3 Estimation de la récurrence des éboulements/écroulements	70
2.1.3 Travaux de prospective sur l'aléa « recul des falaises » prenant en compte le changement climatique	70
2.2 EVOLUTION DES METHODES DE SUIVI DU FRONT DE FALAISE	73
2.2.1 Continuité du suivi à l'échelle locale grâce au relais des méthodes d'acquisition et de traitements	73
2.2.1.1 Objectifs scientifiques des suivis à THRS	73
2.2.1.2 Méthodes d'acquisition	73
2.2.1.3 Méthode de traitements	79
2.2.2 Vers une détection semi-automatique de changement sur le front des falaises de Varengueville-sur-Mer grâce au suivi à haute fréquence temporelle : l'aide de l'AP	81
2.2.2.1 Présentation du réseau siamois adapté pour détecter le changement sur des nuages de points 3D	81
2.2.2.2 Etapes de l'expérimentation du réseau siamois KPConv sur le front des falaises de Varengueville-sur-Mer	83
2.2.3 A l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire : les images satellites Pléiades	84
2.2.3.1 Caractéristiques des satellites et des images Pléiades	84
2.2.3.2 Méthode d'acquisition des données satellites du front de falaise	85
2.2.3.3 Sélection des images pour la reconstitution 3D	87
2.2.3.4 Méthode de reconstitution 3D du front de falaise	88
a. Logiciels choisis	88
b. Chaînes de traitements testées	88
c. Estimation de la qualité des reconstructions 3D	90
2.3 SUIVIS MULTIPARAMETRES ET CONTINUS EN PLURIDISCIPLINAIRE	91
2.3.1 En Bretagne	91
2.3.1.1 Instrumentation et données topographiques complémentaires	91
2.3.1.2 Analyse des données	93
a. Fracturation sur le front de falaise	94
b. Niveau d'eau enregistré par les capteurs de pression	94
c. Microséismes enregistrés par les géophones	94
d. Combinaison des données grâce aux analyses statistiques	95
2.3.2 En Normandie	97
2.3.2.1 Instrumentation	97
2.3.2.2 Données complémentaires : caractérisation géophysique du site et suivis topographiques et thermiques du front de falaise	101
2.3.2.3 Analyse des données	101
a. Caractérisation géophysique du site	101
b. Mouvement du sol en sommet de falaise mesuré par le sismomètre à large bande	102
c. Analyses statistiques pour connaître les facteurs marins et continentaux impliqués dans les mouvements (contraction/extension) sur les fractures existantes mesurés par les extensomètres	102
2.4 PROJETS COCONSTRUITS EN RECHERCHE OPERATIONNELLE ET EN PEDAGOGIE	105
2.4.1 OSIRISC	105
2.4.1.1 Contexte	105
2.4.1.2 Mise en place des variables et des indicateurs pour la composante « aléas »	106
2.4.1.3 Des indicateurs aux protocoles	109
2.4.1.4 Des indicateurs aux indices	111
2.4.2 Innovations pédagogiques dans la lignée d'OSIRISC	112
2.4.2.1 Précisions terminologiques et éléments de contexte	112
2.4.2.2 CoastAppli	113
a. Contexte et intérêts pédagogiques	113
b. Organigramme et coût du projet	115
c. Méthodes utilisées	117
d. Déploiement sur la commune de Guissény	118

CHAPITRE 3	RESULTATS MAJEURS ET APPORTS A LA GEOGRAPHIE.....	121
3.1	VITESSES, RYTHMES, MODALITES DE RECU (1966-2015) DEPUIS UN POINT DE VUE VERTICAL ET UNE PROPOSITION DE CARTOGRAPHIE PPR L INTEGRANT LE CHANGEMENT CLIMATIQUE (NORMANDIE)	121
3.1.1	Tentative de réactualisation des vitesses de recul.....	121
3.1.1.1	Vitesses moyennes annuelles de recul entre 2008 et 2015	121
3.1.1.2	Vitesses moyennes annuelles de recul entre 1995 et 2015	121
3.1.2	Répartition spatiale des éboulements/écroulements	123
3.1.2.1	Nombre d'éboulements/écroulements, sectorisation de l'érosion et densité d'éboulements/écroulements par km linéaire	123
3.1.2.2	Caractéristiques morphométriques des éboulements/écroulements : les volumes appréciés par les aires de départ et de dépôt.....	125
3.1.3	Répartition temporelle des éboulements/écroulements	127
3.1.3.1	Evolution temporelle	127
3.1.3.2	Vers la définition de la récurrence des éboulements/écroulements.....	127
3.1.3.3	Vitesse de déblaiement des éboulements/écroulements	129
3.1.4	Distribution spatio-temporelle des mouvements de masse : aléatoire ou organisée ?	130
3.1.5	La définition du <i>L_{max}</i> et la cartographie de l'aléa « recul des falaises » à l'échéance de 100 ans sur quatre territoires.....	133
3.1.5.1	<i>L_{max}</i> : recul instantané maximal du trait de côte dû à un événement ponctuel majeur.....	133
3.1.5.2	Cartographie de l'aléa « recul des falaises » à l'échéance de 100 ans (en 2108) avec ou sans la prise en compte du changement climatique	134
3.1.5.3	Evaluation de la surface communale et du nombre de bâtiments concernés par l'aléa « recul des falaises » à l'échéance de 100 ans (en 2108), avec ou sans la prise en compte du changement climatique	140
3.1.6	Discussion	143
3.2	SUIVI DU FRONT DE FALAISE (NORMANDIE)	147
3.2.1	A THRS et haute fréquence temporelle depuis 2010	147
3.2.1.1	Vitesses, rythmes et modalités d'érosion	147
a.	Vitesses d'érosion du front de falaise entre les falaises vives et mortes et comparaison avec les vitesses de recul du haut de falaise	147
b.	Saisonnalité de l'érosion à Varengeville-sur-Mer : « temps forts » généralement hivernaux et « temps calmes » plutôt estivaux	148
c.	Volumes érodés, mouvements de masse et mouvements individuels.....	150
d.	Encoche basale générant l'instabilité complète du front de falaise	156
3.2.1.2	Prévalence des agents et processus marins dans l'érosion des falaises vives.....	156
3.2.2	Première classification semi-automatique de l'érosion sur des nuages de points 3D du front de falaise.....	159
3.2.2.1	Réseau siamois KPConv performant sur les nuages de points des falaises de Varengeville-sur-Mer	159
3.2.2.2	Retour d'expérience	160
3.2.3	Satellites THRS et agile : un nouveau moyen de suivi du front de falaise et de son érosion ..	161
3.2.3.1	Critères de classement des reconstructions.....	161
3.2.3.2	Analyse de sensibilité pour identifier les meilleures chaînes de traitements	164
3.2.3.3	Potentiel de ces reconstructions dans le cadre d'un suivi diachronique multisource	165
3.2.3.4	Quid de la tristéréoscopie ?	166
3.2.4	Discussion	168
3.3	PREMIERS RESULTATS ISSUS DES BASES DE DONNEES MULTIPARAMETRES ET CONTINUES (BRETAGNE ET NORMANDIE)	171
3.3.1	Falaises de Plougouvelin (Bretagne).....	171
3.3.1.1	Mouvements des fractures existantes corrélés principalement à la température	171
3.3.1.2	Microséismes déclenchés par des températures chaudes, mais des conditions d'agitation et de marée moyennes	173
3.3.2	Falaises de Sainte-Marguerite-sur-Mer (Normandie)	174
3.3.2.1	Caractérisation géophysique du site : une craie sèche au sommet, saturée au pied.....	174
3.3.2.2	Période d'analyse : est-elle représentative des conditions environnementales moyennes ?	175
3.3.2.3	Variations des températures de subsurface le long du front de falaise.....	175

3.3.2.4	Micromouvements enregistrés par le sismomètre en sommet de falaise : élevés dans les bandes IG et SF des vagues.....	176
3.3.2.5	Déplacements observés par les extensomètres sur le front de falaise.....	177
a.	Influence du marnage	177
b.	Résultats sur les deux populations de périodes de 2 h, avec ou sans déplacements	178
c.	Résultats sur la population des périodes de 2 h avec déplacements	179
3.3.3	Discussion	180
3.4	RESULTATS DE RECHERCHE OPERATIONNELLE ET DE FORMATION (BRETAGNE).....	183
3.4.1	OSIRISC.....	183
3.4.1.1	Indicateurs.....	183
3.4.1.2	Protocoles.....	185
a.	Du théorique... ..	185
b.	à l'opérationnel.....	189
3.4.1.3	Indices.....	191
3.4.1.4	Diffusion au sein d'une interface web-SIG, nommée OSI.....	193
3.4.2	CoastAppli.....	193
3.4.2.1	Outils de mesure utilisés dans l'application.....	193
3.4.2.2	Protocoles à Guissény : en fonction des sites et du profil de l'utilisateur.....	194
3.4.2.3	Badges pour engager les utilisateurs.....	196
3.4.2.4	Utilisateurs et leur retour d'expérience	197
3.4.2.5	Quantification de l'erreur des mesures.....	198
3.4.2.6	Premiers résultats du suivi citoyen de l'érosion côtière	199
3.4.3	Discussion	201
CHAPITRE 4	PERSPECTIVES DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT	205
4.1	POUR SUIVRE L'ACQUISITION DE DONNEES FIABLES, HOMOGENES, PERENNES, A BAS COUT, POUR TOUS, POUR LE SUIVI ET LA COMPREHENSION DES COTES A FALAISES (FRANCE, GRECE)	205
4.1.1	Point de vue vertical pour les vitesses, les rythmes et les modalités de recul des falaises.....	205
4.1.1.1	Mise à jour les vitesses de recul (1966-2020) et export de la méthode en Bretagne	205
a.	Contexte.....	205
b.	Objectif.....	206
c.	Méthode.....	206
d.	Résultats attendus	207
4.1.1.2	Statistiques spatiales pour l'analyse des éboulements/écroulements	207
a.	Contexte.....	207
b.	Objectif.....	208
c.	Méthode.....	208
d.	Résultats attendus	210
4.1.2	Point de vue horizontal ou oblique pour le suivi multiscalair de l'érosion du front de falaise	211
4.1.2.1	Echelle du site (quelques centaines de m) : augmenter la couverture spatiale du suivi en améliorant la méthode d'acquisition des données	211
a.	Contexte.....	211
b.	Objectifs.....	212
c.	Méthode.....	214
d.	Résultats attendus	214
4.1.2.2	Echelle de la cellule hydro-sédimentaire : exploiter tout le potentiel des satellites THRS et agiles à l'aide de l'AP (France, Grèce)	215
a.	Contexte.....	215
b.	Objectifs.....	216
c.	Méthodes	217
d.	Résultats attendus	221

4.2 EXPLOITER EN PLURIDISCIPLINARITE LES BASES DE DONNEES MULTIPARAMETRES ET CONTINUES POUR MIEUX COMPRENDRE LA PART RESPECTIVE DES FACTEURS RESPONSABLES DE LA FATIGUE ET DU DECLENCHEMENT DE L'EROSION ET POUR ALIMENTER LES ETUDES PROSPECTIVES (FRANCE, CANADA)	221
4.2.1 Analyses des données F3 et RICOCHET par l'approche systémique « avant-côte/plate-forme/plage/falaise/plateau »	221
4.2.1.1 Contexte.....	221
4.2.1.2 Objectifs.....	222
4.2.1.3 Méthodes.....	223
4.2.1.4 Résultats attendus	224
4.2.2 Modélisation de la falaise et de son évolution en intégrant le changement climatique	224
4.2.2.1 Contexte.....	224
4.2.2.2 Objectifs.....	226
4.2.2.3 Méthodes.....	227
4.2.2.4 Résultats attendus	228
4.3 CONTINUER LES PROJETS D'ACCULTURATION ET D'INNOVATION PEDAGOGIQUE	229
4.3.1 CoastAppli : l'application de science citoyenne pour le suivi des aléas côtiers	229
4.3.1.1 Contexte.....	229
4.3.1.2 Objectifs.....	230
4.3.1.3 Méthodes.....	230
4.3.1.4 Résultats attendus	232
4.3.2 Risques côtiers et réalité virtuelle (RISCOREV) : immersion et interaction du grand public pour une meilleure acculturation aux aléas et aux risques côtiers	233
4.3.2.1 Contexte.....	233
4.3.2.2 Objectifs.....	236
4.3.2.3 Méthodes.....	238
a. Choix des communes.....	238
b. Six étapes à réaliser.....	240
4.3.2.4 Résultats attendus	241
CONCLUSION	243
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	245
TABLE DES FIGURES	269
TABLE DES TABLEAUX	275
TABLE DES GRAPHIQUES	279
TABLE DES PHOTOGRAPHIES.....	281
TABLE DES MATIÈRES	283