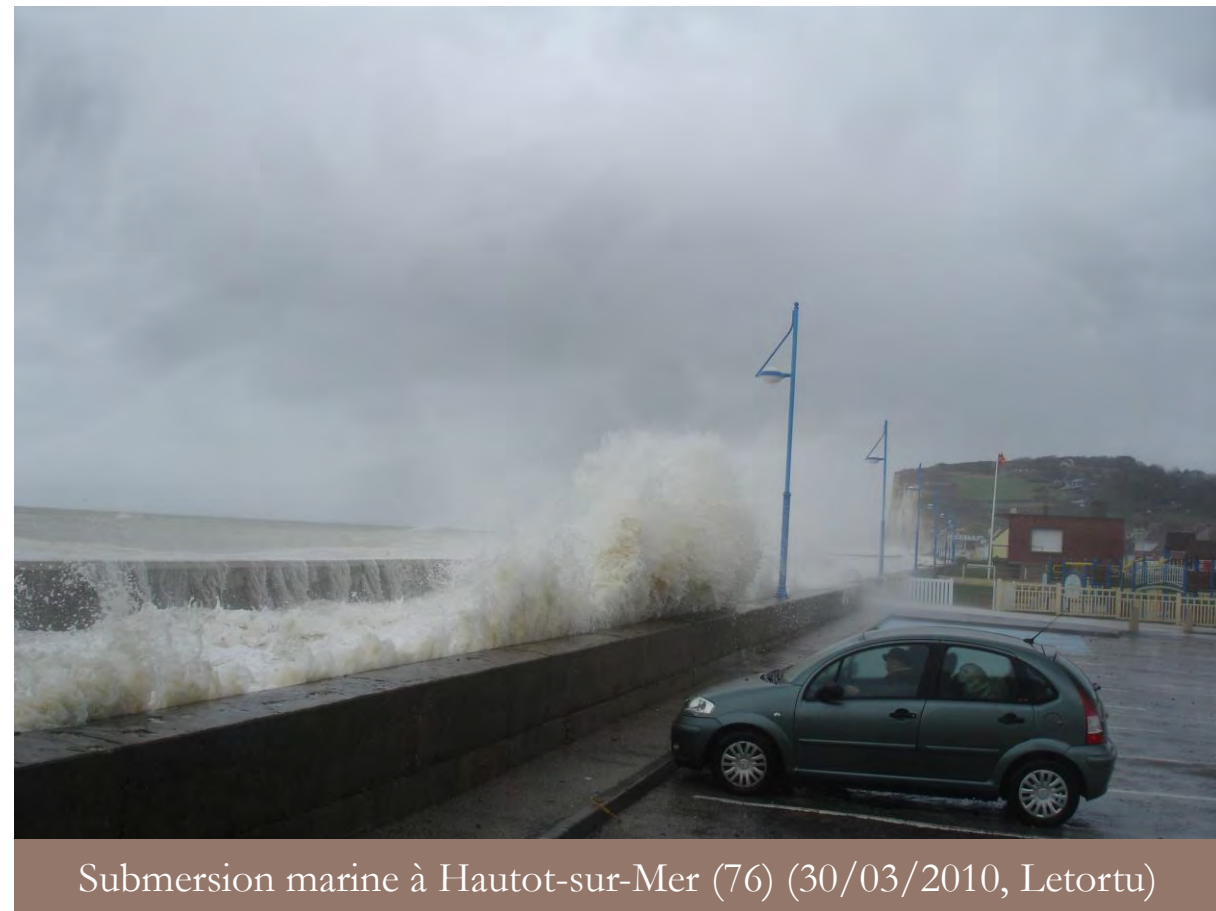


L'érosion des falaises au sein des aléas côtiers : suivis de terrain et défis en lien avec la modélisation

P. Letortu, S. Costa, R. Davidson, O. Maquaire, Z. Bessin, M. Jaud, S. Lefèvre, T. Corpetti, J. Nabucet, N. Le Dantec, A. Hénaff, E. Augereau, R. Taouki, C. Théry, N. Evelpidou, E. Vassilakis, J. Ammann, P. Grandjean, P. Allemand, S. Passot, G. Thirard, B. Peuziat, P. Bernatchez

- Aléas côtiers : submersion marine, migration dunaire et érosion



Submersion marine à Hautot-sur-Mer (76) (30/03/2010, Letortu)



Migration dunaire de la dune du Pilat, à La Teste-de-Buch (33) (*Le Monde*)

Introduction

○ Erosion côtière

« une perte de sédiments pouvant entraîner un recul du trait de côte ou un abaissement de l'estran » (MEDDE, 2014, p. 151).

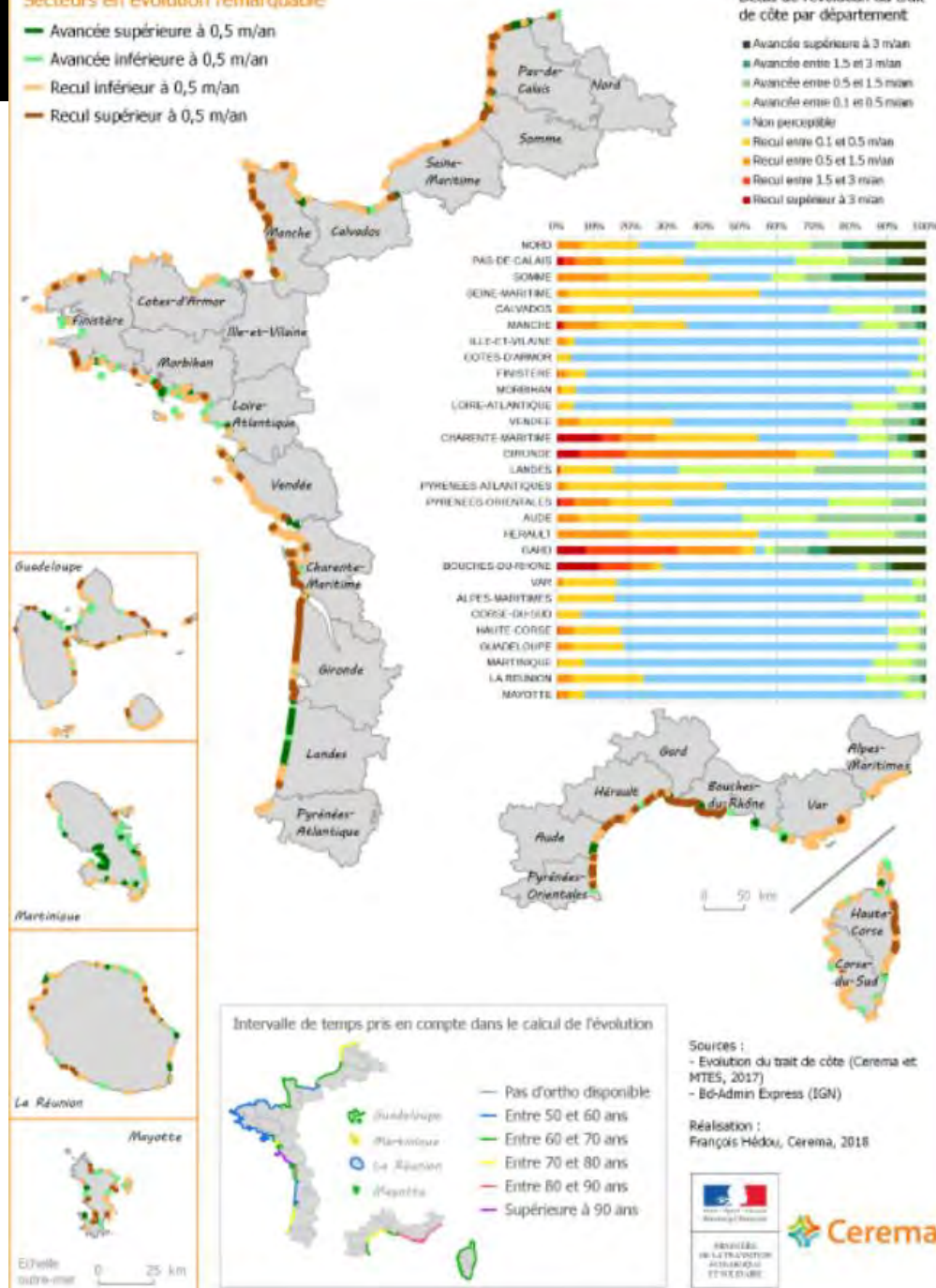


Erosion dunaire à Wimereux (62) (01/06/2023, Letortu)

- Près de **19 %** du trait de côte est en recul (hors Guyane), soit un linéaire d'environ 920 km
- Les côtes basses sableuses évoluent plus : **37 %** sont en recul, équivalent à un linéaire d'environ 700 km (INEC)

Secteurs en évolution remarquable

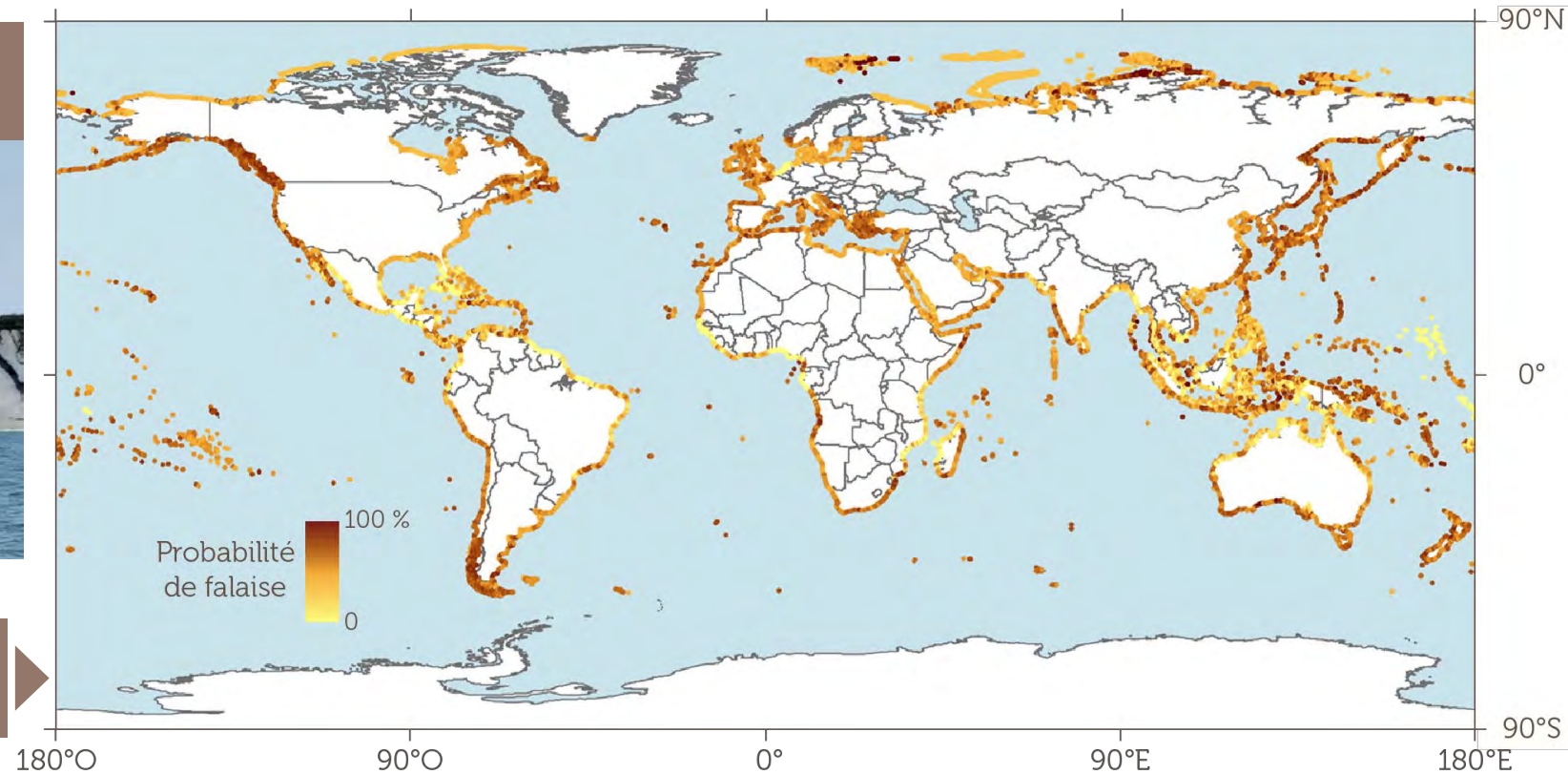
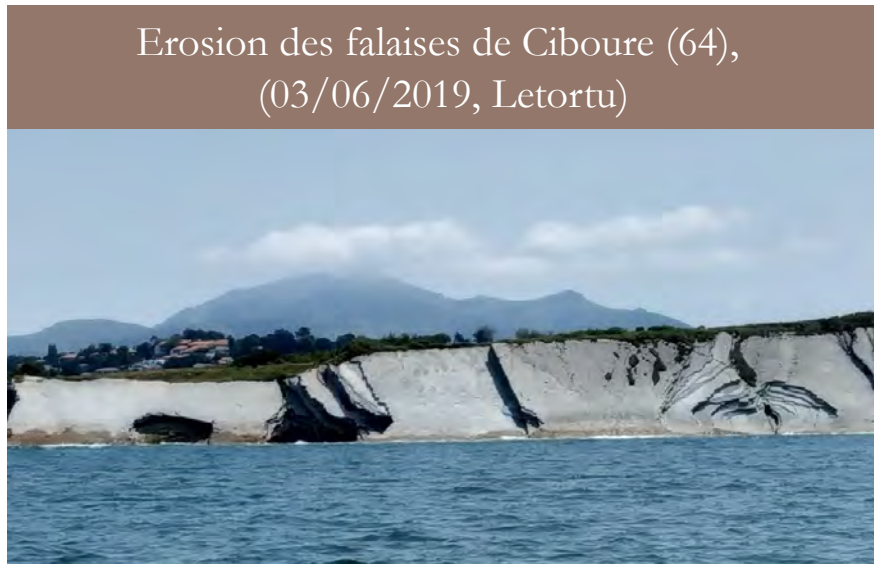
- Avancée supérieure à 0,5 m/an
- Avancée inférieure à 0,5 m/an
- Recul inférieur à 0,5 m/an
- Recul supérieur à 0,5 m/an



➤ Erosion des falaises (EF) rocheuses

« 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 marine » (Guilcher, 1954, p. 42)

➤ 52 % du linéaire côtier mondial (Young et Carilli, 2019) mais environnement peu étudié

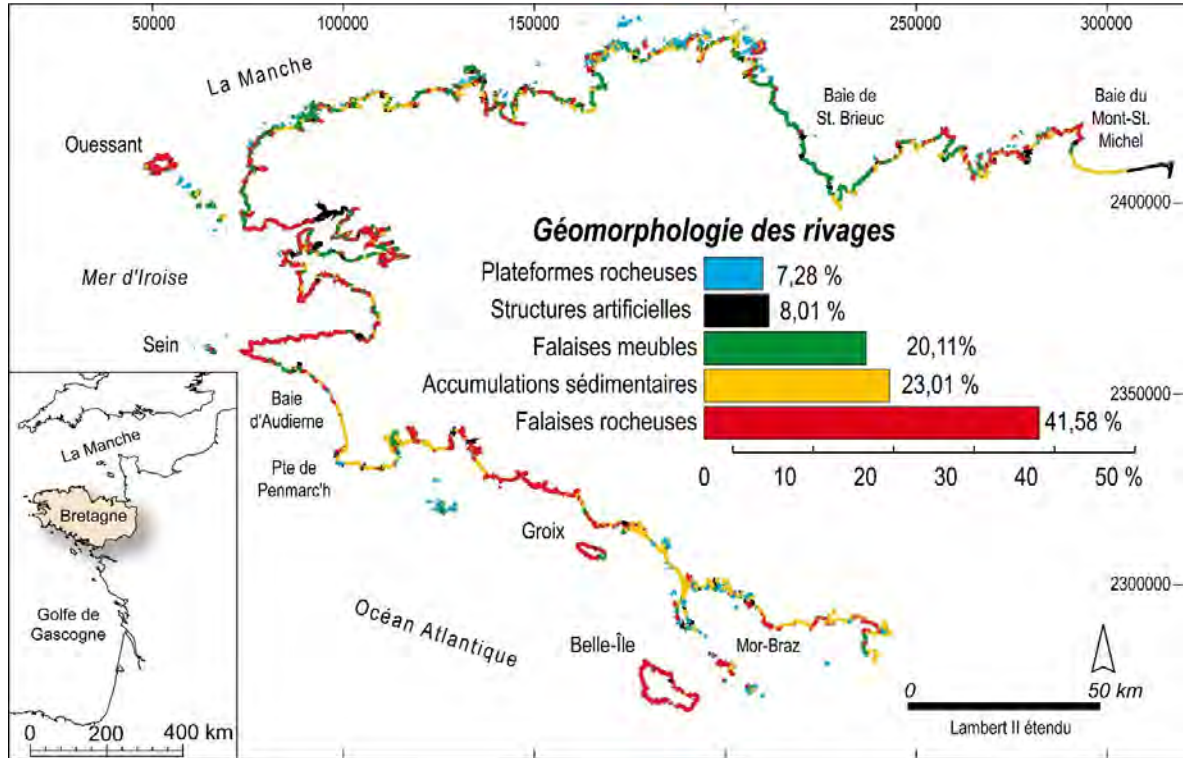


Carte de probabilité d'occurrence des falaises à l'échelle mondiale (Young et Carilli, 2019)

Introduction

○ Falaises rocheuses ou meubles

➤ Répartition spatiale très variable

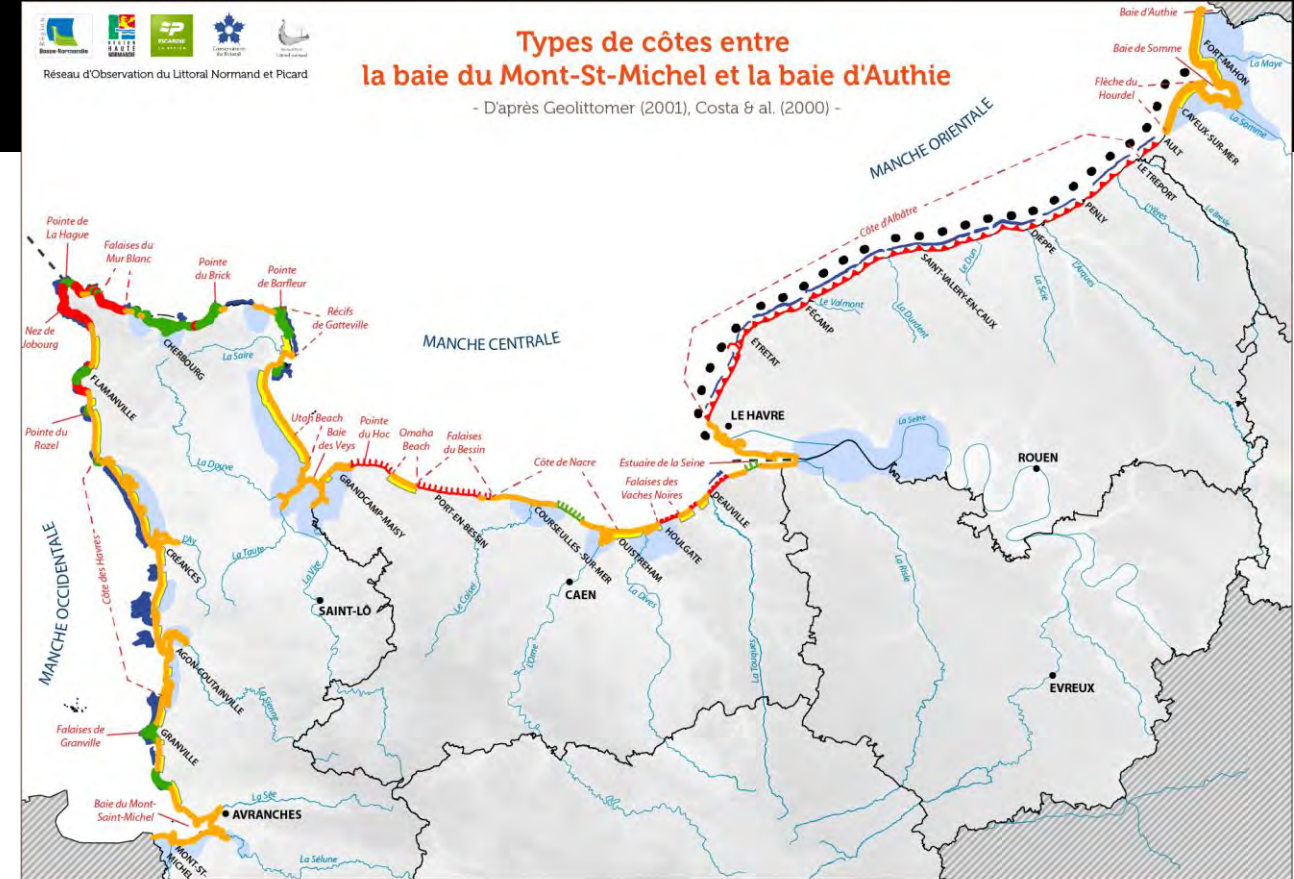


Géomorphologie de la côte en Bretagne (Hénaff, 2003)

Géomorphologie de la côte entre la baie du Mt-St-Michel et la baie d'Authie (ROLNP, 2012)

Types de côtes entre la baie du Mont-St-Michel et la baie d'Authie

- D'après Geollittomer (2001), Costa & al. (2000) -



Morphologie littorale

Côtes rocheuses hautes (>20m)

- ▲▲▲▲ Roche cohérente sédimentaire du Crétacé
- Roche meuble sédimentaire du Jurassique
- ||||| Roche cohérente sédimentaire du Jurassique
- Roche très cohérente magmatique et métamorphiques

Côtes rocheuses moyennes et basses (<20m)

- ||||| Roche cohérente sédimentaire du Jurassique
- Roche très cohérente magmatique et métamorphique

Côtes d'accumulation

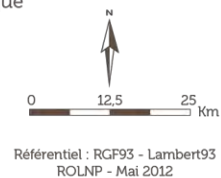
- Cordon de galets
- Cordon dunaire
- Côte sableuse ou sablo-limoneuse

Autres caractéristiques littorales

- Plaines maritimes et marais littoraux
- Platiers rocheux / plateformes d'érosion

Éléments structurants

- Cours d'eau important
- Département
- ▨ Hors zone d'étude



Sources

- Atlas Permanent de la Mer et du Littoral n°5, LETG-Geollittomer- UMR 6554 CNRS, Juin 2001
- Costa & al., 2000 in CPIBP
- BD Ortholittorale, IGN, 2000
- BD Carthage®, 2011
- GEOFLA® IGN, 2011

- Falaises rocheuses à plate-forme d'érosion marine :
 - Ne peuvent que s'éroder
 - Alternance de temps forts et de temps calmes
 - Leur évolution qui est le résultat :
 - de combinaisons et relais dans le temps et dans l'espace de facteurs et de processus
 - d'interactions entre les différents éléments du système « versant littoral » (Pinot, 1998)

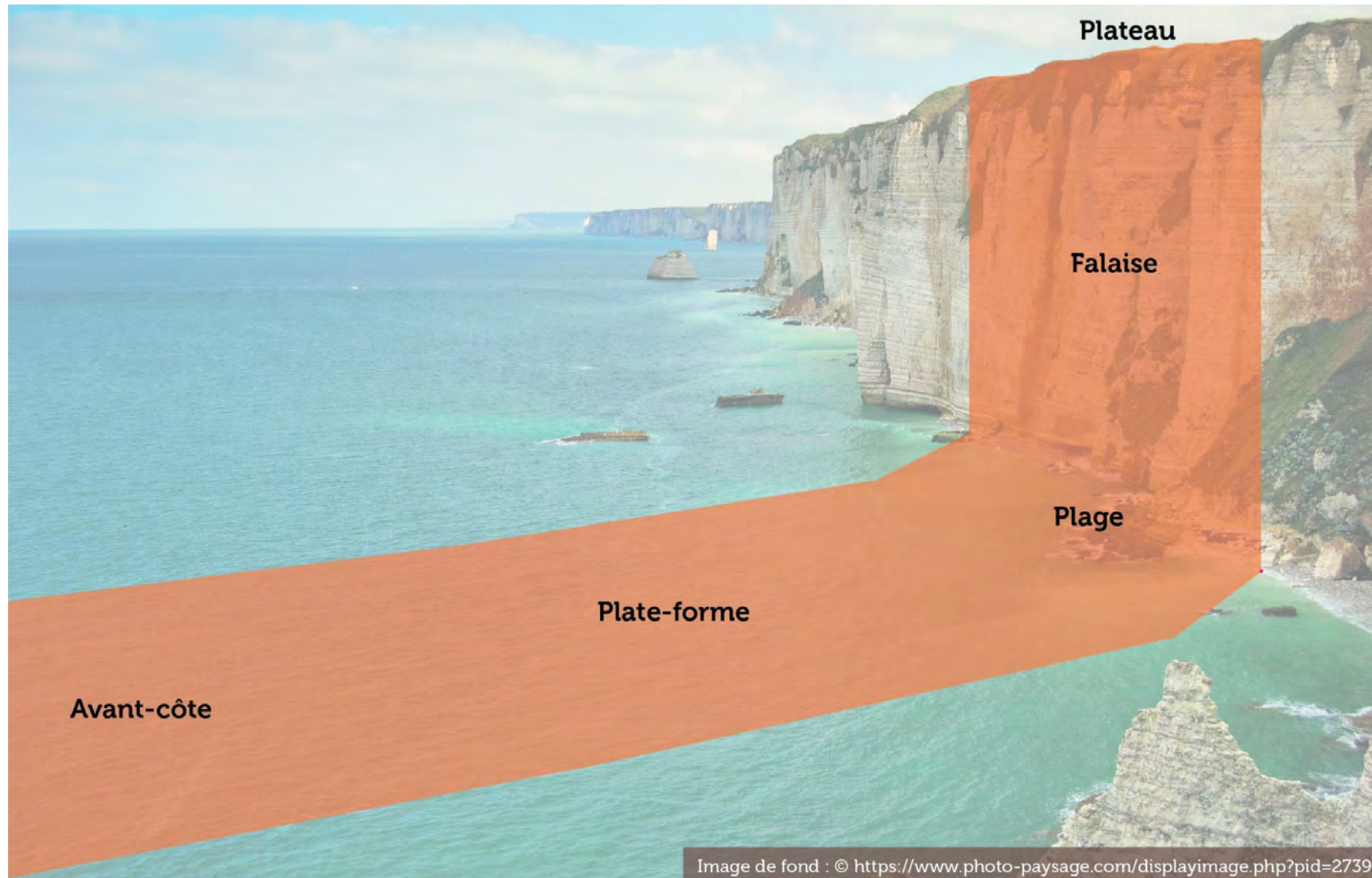


Image de fond : © <https://www.photo-paysage.com/displayimage.php?pid=2739>

Système « versant littoral » intégrant l'avant-côte, la plate-forme, la plage, la falaise et le plateau

- Regain d'intérêt :
 - EF rattrape les enjeux (personnes, biens, activités), implantés près de la falaise



Vidéo d'un éboulement aux Petites Dalles (extrait du *Monde de Jamy*)

➤ Regain d'intérêt :

- EF rattrape les enjeux (personnes, biens, activités), implantés près de la falaise
- Changement climatique (CC)
- Evolutions législatives
- Emergence de nouvelles méthodes et techniques

➤ Verrous scientifiques :

Comportement non linéaire des falaises

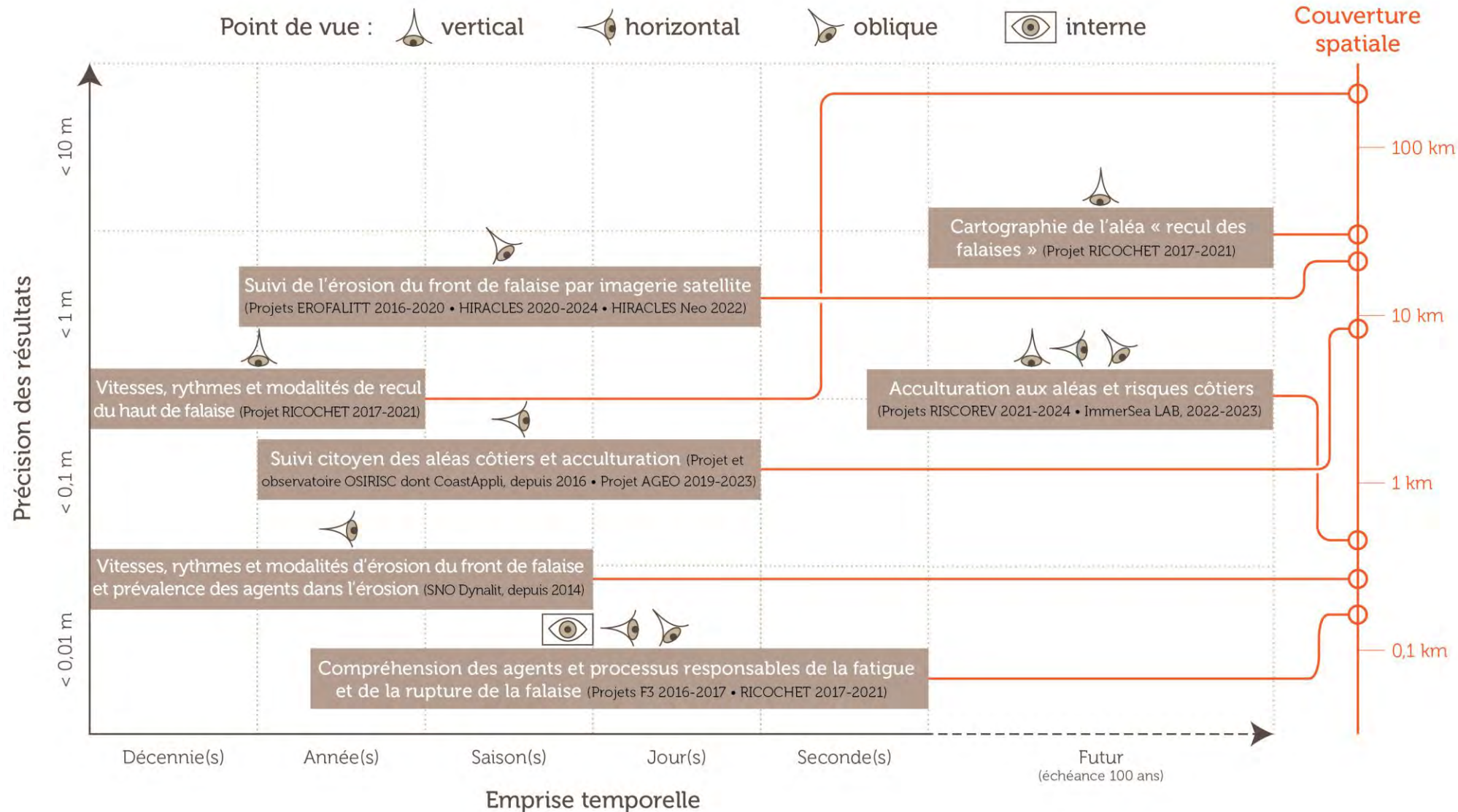
- **Quels sont les rythmes et les modalités d'EF, en plus des vitesses ?**

Rôle des facteurs internes liés à la structure qui prédisposent \pm à l'érosion et les facteurs externes (marins, continentaux...) :
facteurs préparants *vs.* déclenchants ?

- **Quels sont les facteurs et les processus responsables de l'EF et quelles sont leurs contributions dans la fatigue et le déclenchement des mouvements gravitaires ?**

➤ Comment utiliser ces informations pour cartographier cet aléa sur 100 ans dans un contexte de CC ?

Emprise temporelle, couverture spatiale, précision des résultats et point de vue de mes recherches (Letortu, 2023)



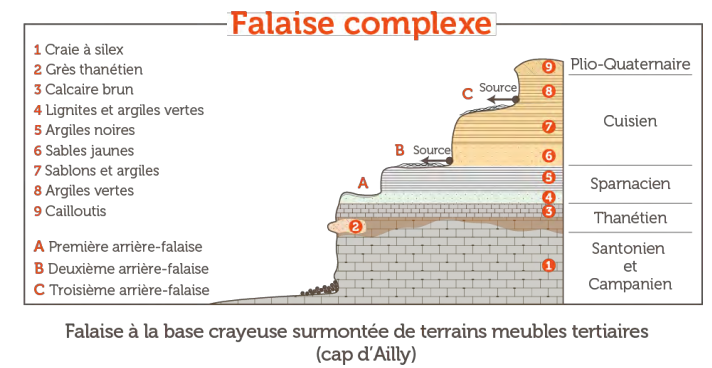
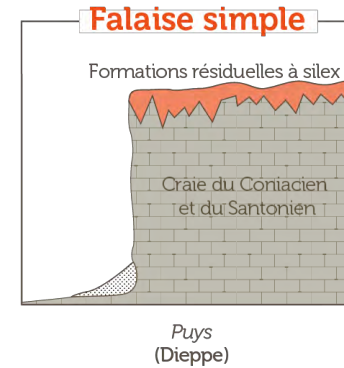
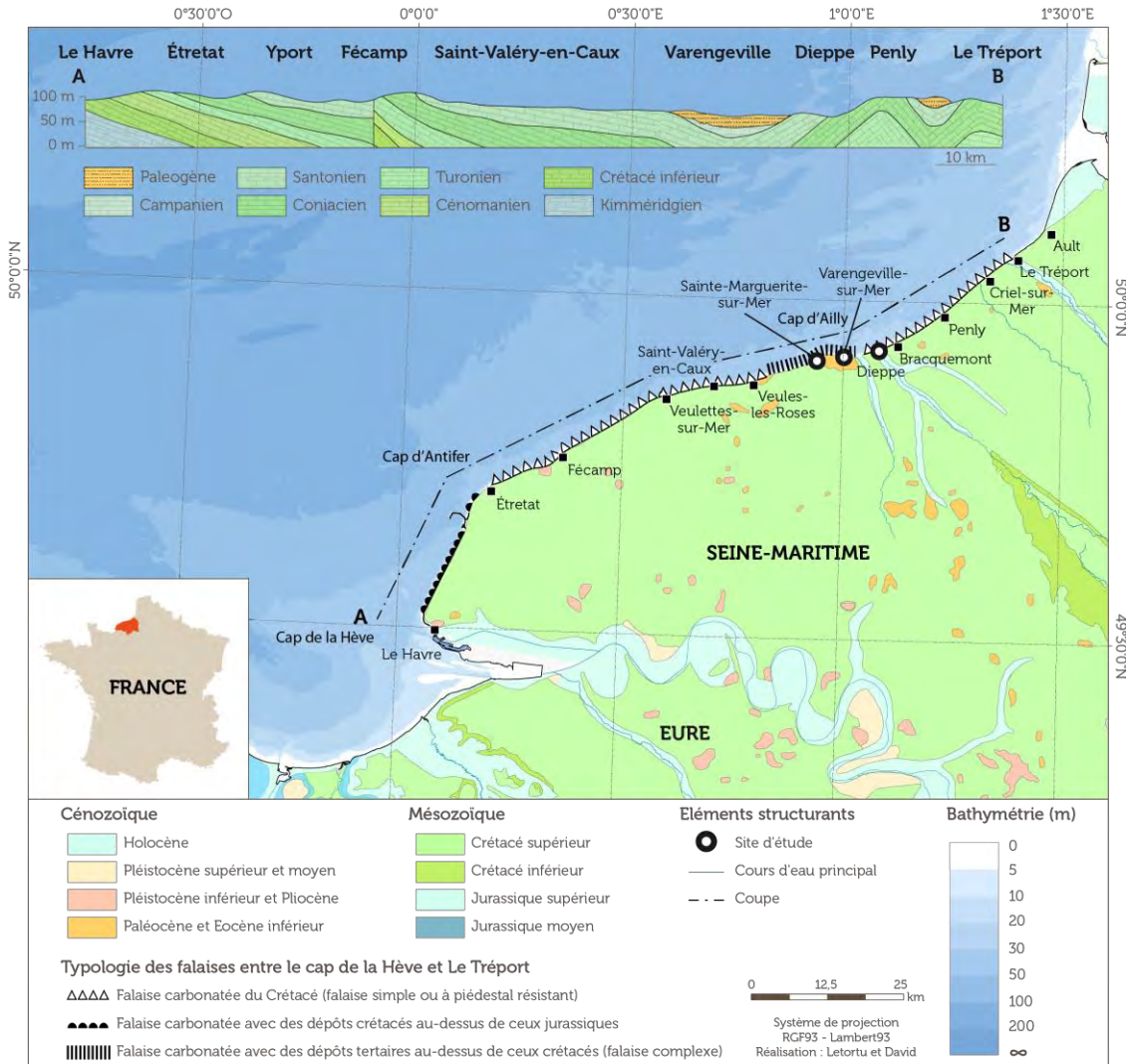
○ Terrains en Seine-Maritime (76) et en Finistère (29)

- Points communs : falaises rocheuses à plate-forme, climat tempéré océanique, marnages et enjeux forts
- Différences : structures et conditions d'agitation



Terrains normands et bretons en fonction des types de côtes (EUROSION, CEREMA) et des zones basses (IGN, SHOM, ex-CETMEF, CEREMA) (Letortu et David, 2023)

○ Falaises de Seine-Maritime : du cap d'Antifer au Tréport



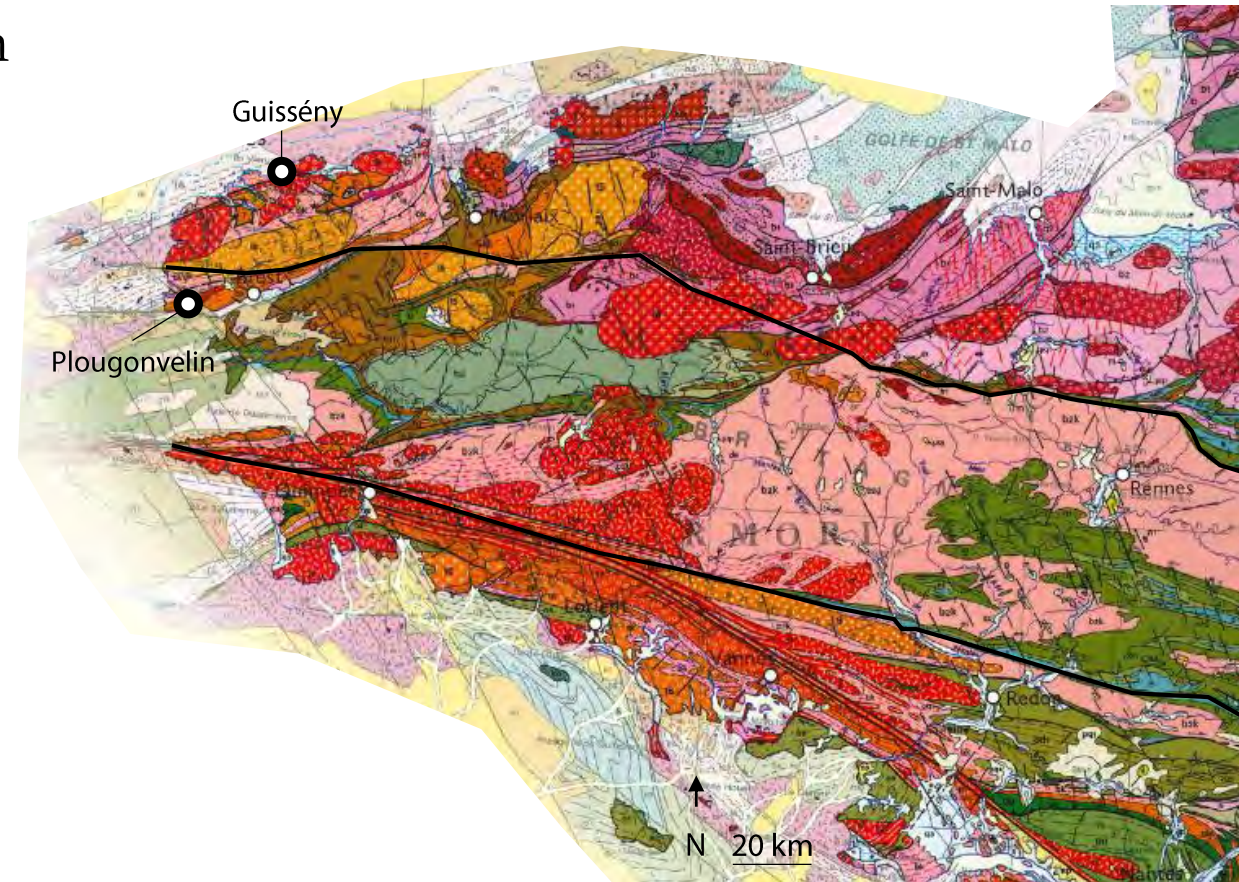
Types de falaises simples et complexes (d'après Costa, 1997)



Varengueville-sur-Mer (76), (09/07/2021, Letortu)

○ Falaises du Finistère : Plougonvelin et Guissény

- Extrémité occidentale du Massif armoricain
- Structure complexe façonnée par 2 orogénèses majeures (> 600 Ma) et des rejeux post-hercyniens
 - Tracé côtier très découpé
- Trois grands ensembles (Costa et Suanez, 2013) :
 - Côte nord rocheuse soulevée avec des granites et des roches métamorphiques
 - Pointe ouest faite surtout de roches sédimentaires métamorphisées
 - Côte sud granitique qui s'affaisse avec de nombreuses formes d'accumulation



Trois grands ensembles du Massif armoricain
(BRGM, *in* Le tour de France d'un géologue, 2012)

- Plan de la présentation

- 1. Utilisation de la télédétection et de l'apprentissage profond pour le suivi de l'EF**

- Quels sont les rythmes et les modalités d'EF, en plus des vitesses ?

- 2. Compréhension des mécanismes de l'EF**

- Quels sont les agents et les processus responsables de l'EF et quelles sont leurs contributions dans la fatigue et le déclenchement des mouvements gravitaires ?

- 3. Gestion de l'aléa « recul des falaises » avec la cartographie intégrant le changement climatique**

- Comment utiliser ces informations pour cartographier cet aléa sur 100 ans dans un contexte de CC ?

1. Utilisation des techniques de télédéttection et d'apprentissage profond pour le suivi de l'EF



« Ensemble des connaissances et des techniques permettant de déterminer certaines caractéristiques physiques et biologiques de points observés à partir de mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (CNTRL)



« Un procédé d'apprentissage automatique utilisant des réseaux de neurones artificiels » (Schmidhuber, 2015)

1. Utilisation des techniques de télédétection et d'apprentissage profond pour le suivi de l'EF

15/38

- Pour une meilleure compréhension de l'EF, il est nécessaire d'obtenir des données :
 - 3 dimensions (3D) du front de falaise pour observer tous les changements
 - à très haute résolution spatiale (< 1 m)
 - à temps de revisite court (d'un jour à quelques mois)
 - à bas coût
 - sur de vastes zones (plusieurs km ; échelle de la cellule hydro-sédimentaire)

▼
« *compartiment de littoral qui peut être décrit et analysé de manière autonome du point de vue des transports de sédiments* » (CEREMA)

▼
Échelle pertinente pour la gestion du littoral



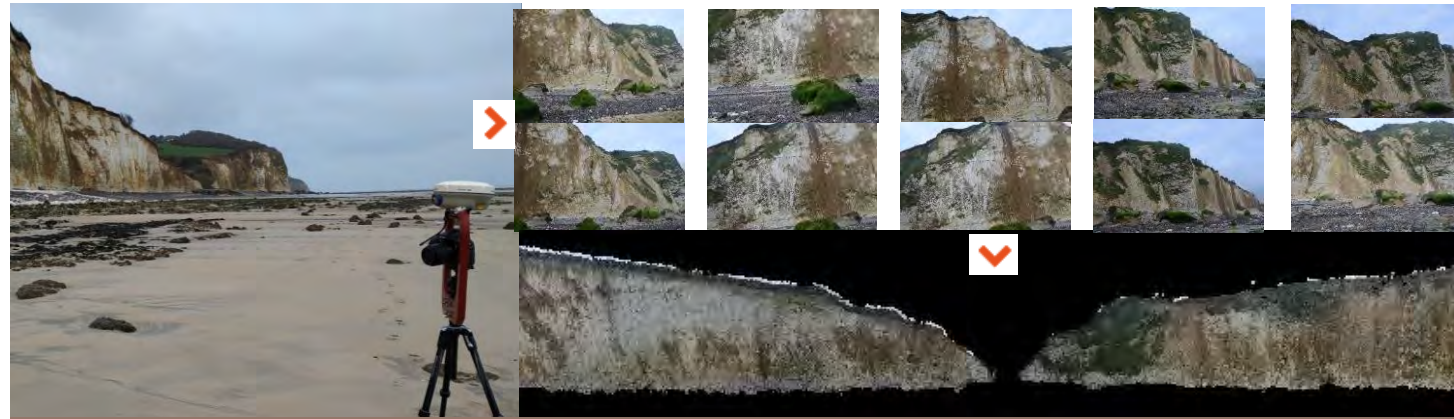
Suivi du front de falaise par drone à Varengeville-sur-Mer
(21/06/2016, Grandjean et Ammann)

1. Utilisation des techniques de télédétection et d'apprentissage profond pour le suivi de l'EF

- En Seine-Maritime, données multisources ...



Orthophotographie, IGN, été 2015



Photogrammétrie terrestre RTK, 09/07/2021



Lasergrammétrie terrestre, 14/04/2020



Photogrammétrie satellite, Pléiades© CNES, 06/07/2017

1. Utilisation des techniques de télédétection et d'apprentissage profond pour le suivi de l'EF

o ...et complémentaires

Caractéristiques	Lasergrammétrie terrestre (TLS)	Photogrammétrie satellite
Référentiel(s) de la falaise	Front de falaise	Haut et front de falaise
Résolution spatiale	≤ 1 cm	≤ 70 cm
Résolution temporelle	Plusieurs mois	Quelques jours
Couverture spatiale	Plusieurs centaines de m	Plusieurs dizaines de km
Types de mouvements gravitaires visibles	Mouvements de masse et éboulisation	Mouvements de masse



Chutes de pierres (éboulisation) à Varengeville-sur-Mer (25/01/2017, Letortu)

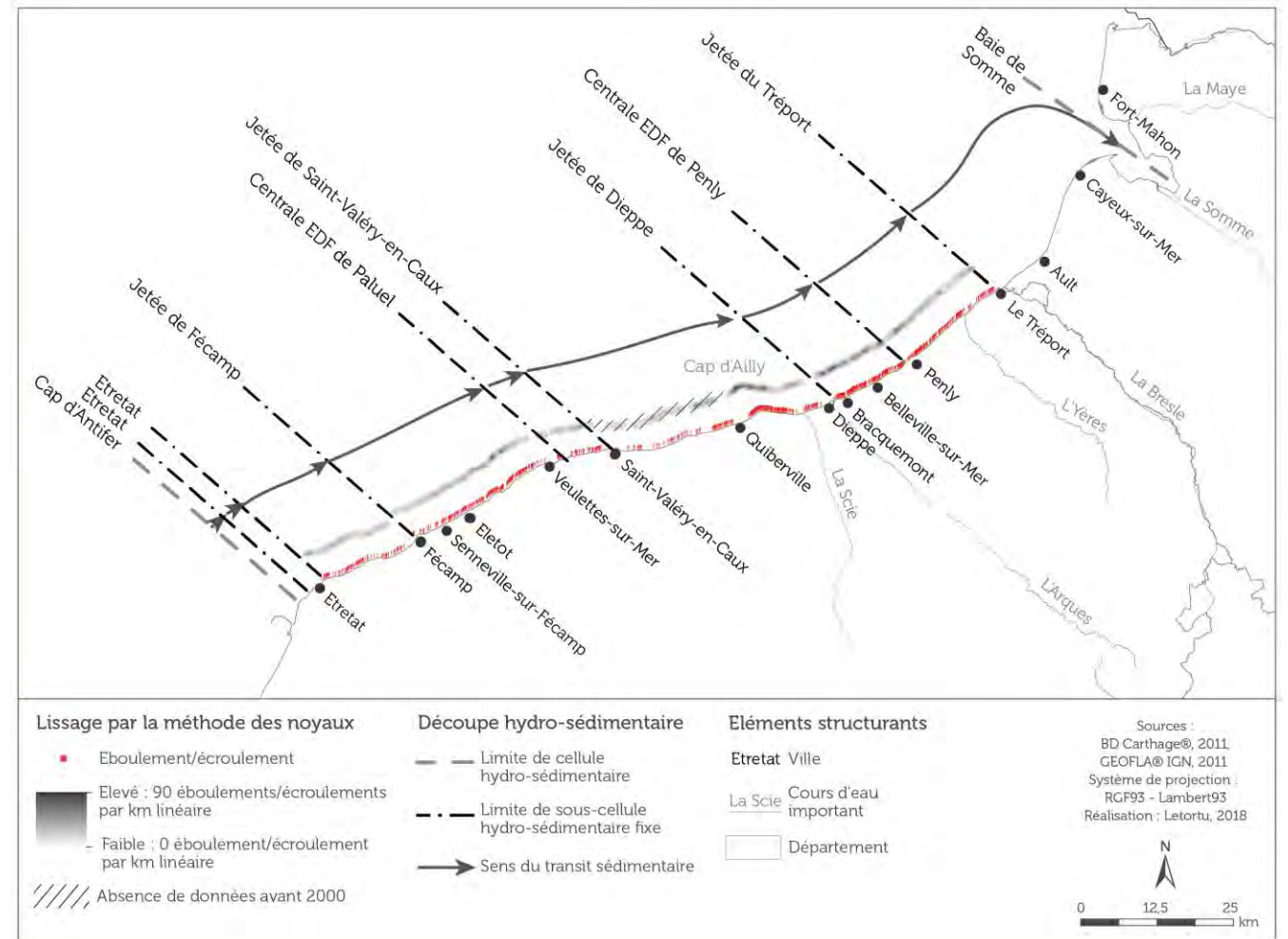


Ecroulement (mouvement de masse) à Varengeville-sur-Mer (16/01/2018)

1. Utilisation des techniques de télédétection et d'apprentissage profond pour le suivi de l'EF

○ Vers une mise à jour des rythmes et modalités de recul (2D) (projet RICOCHET)

- 932 éboulements/écroulements recensés (1939-2015) entre Etretat et Le Tréport
- Distribution en lien avec la lithologie :
 - St-Valéry-en-Caux/Dieppe (Santonien) : peu volumineux mais fréquents
 - Vitesse de recul forte : 23 cm/an (1966-2008 ; Letortu, 2013)
 - Etretat/St-Valéry-en-Caux et Dieppe/Le Tréport (Cénomaniens et Turonien) : massifs et peu fréquents
 - Vitesses de recul faibles à modérées : 10 à 18 cm/an (1966-2008)



Distribution spatiale des 932 éboulements/écroulements (1939-2015) (Letortu, 2023)

1. Utilisation des techniques de télédétection et d'apprentissage profond pour le suivi de l'EF

- Suivi tous les 4-5 mois de l'érosion du front de falaise (collab. IDEES-Caen, DYNALIT)



1 Craie santonienne et terrains tertiaires (au-dessus de la ligne pointillée blanche) ; L ≈ 350 m ; H ≈ 40 m ; orientation : 010°N ; pente : de 70° au surplomb
S2a,b,c : partie inférieure, moyenne et supérieure du Santonien moyen (Seaford Chalk) ; S3 : Santonien supérieur (Newhaven Chalk) adapté par Hoyez (2008), d'après Mortimore (2001)



2a Craie coniacienne ; L ≈ 45 m ; H ≈ 35 m ; orientation : 310°N ; pente : 80°



2b Craie coniacienne ; L ≈ 80 m ; H ≈ 35 m ; orientation : 010°N ; pente : 85°

Co1 : Coniacien inférieur (Lewes Chalk) ; Co2 : Coniacien moyen (Seaford Chalk) adapté par Hoyez (2008), d'après de Mortimore (2001)

Varengeville-sur-Mer et Dieppe : caractéristiques météorologiques, tectoniques et lithologiques proches mais affectés ou non par la mer (Letortu, 2023)

➤ Falaise vive de Varengeville-sur-Mer : craie du Santonien (87 Ma) et terrains argilo-sableux (59-49 Ma)

≠

Falaise morte de Dieppe : craie du Coniacien (89 Ma)



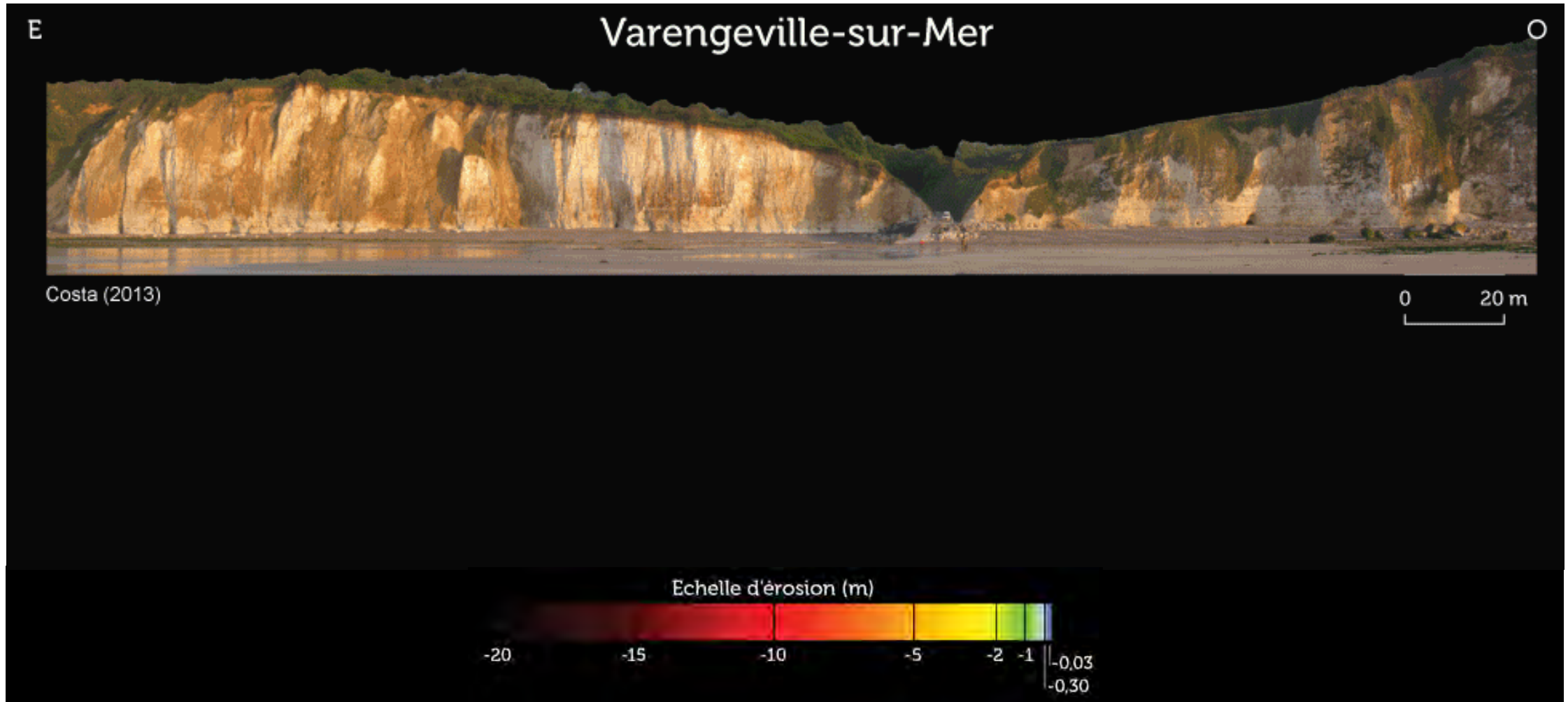
Facteurs continentaux + marins



Facteurs continentaux

1. Utilisation des techniques de télédétection et d'apprentissage profond pour le suivi de l'EF

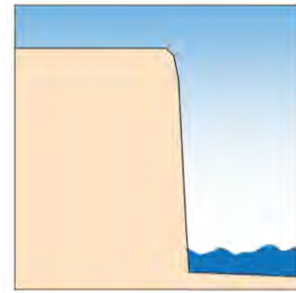
- 350 m de falaise vive et 125 m de falaise morte suivis depuis 2010



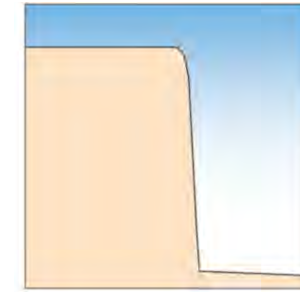
Différentiels du front de falaise de Varengeville-sur-Mer entre le 08/10/2010 et le 09/07/2021 (Letortu et David, 2023)

1. Utilisation des techniques de télédétection et d'apprentissage profond pour le suivi de l'EF

21/38



Varengueville-sur-Mer
(falaise vive)



Dieppe
(falaise morte)

➤ Vitesses d'érosion

➤ 51 ± 2 cm/an

➤ 0 ± 1 cm/an

⇒ **Importance des facteurs marins**

➤ Rythmes d'érosion

➤ « Temps forts » plutôt hivernaux

➤ Pas de saisonnalité

➤ Modalités d'érosion

➤ 103 mouvements gravitaires

➤ 6 mouvements gravitaires

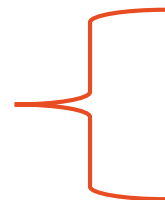
- 68 éboulements/écroulements
($34\,900 \pm 1\,222$ m³)

- 6 chutes de pierres ($1,5 \pm 0,3$ m³)

- 35 chutes de blocs et de pierres
(158 ± 17 m³)

+ autres petits départs

**Près de 32 % de l'érosion
liée à l'éboulisation**



1. Utilisation des techniques de télédétection et d'apprentissage profond pour le suivi de l'EF

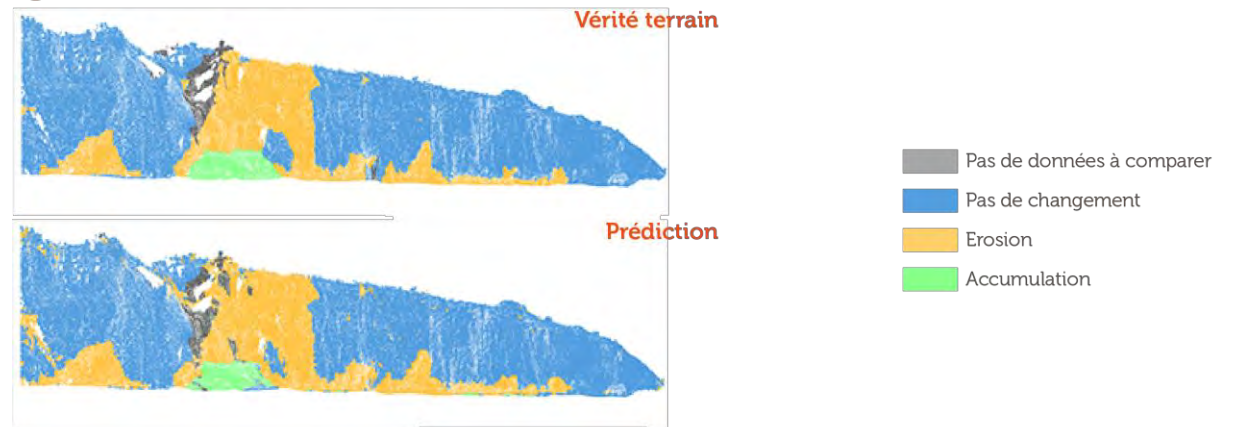
○ Vers une automatisation de la détection de changement

(collab. IRISA, Magellium, LETG-Rennes)

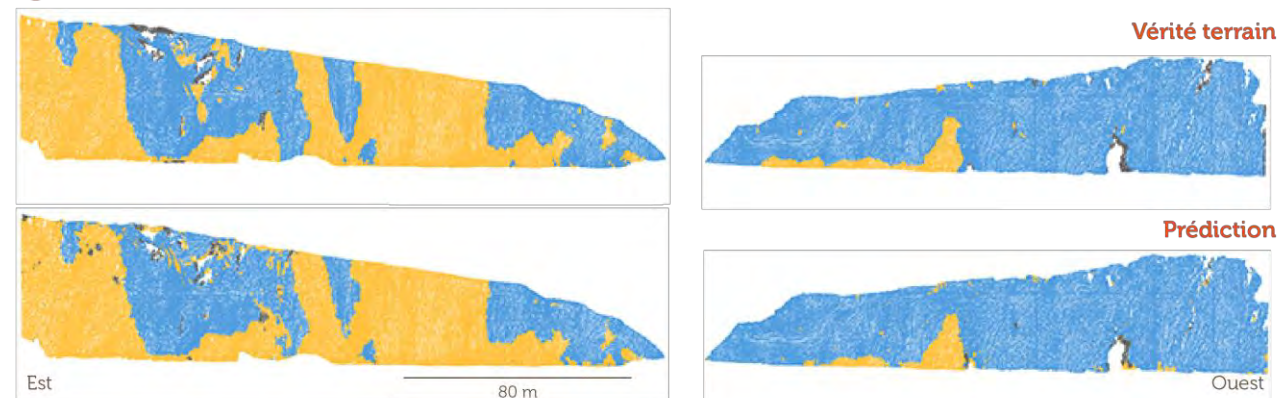
➤ Jeu de données TLS et photogrammétrie terrestre à Varengueville-sur-Mer

- 5 nuages de points annotés (érosion, accrétion, pas de données, pas de changement)
- Détection de changement sur des nuages de points 3D avec un réseau siamois (I. de Gélis et al., 2022)
- Résultats prometteurs (métriques quantitative et qualitative entre 78 et 82 %) mais la méthode n'est pas encore démocratisable

A Résultats entre la vérité terrain et la prédiction sur le côté est des falaises de Varengueville-sur-Mer entre le 02/11/2017 et le 16/01/2018



B Résultats entre la vérité terrain et la prédiction sur les falaises de Varengueville-sur-Mer entre le 16/01/2018 et le 14/04/2020



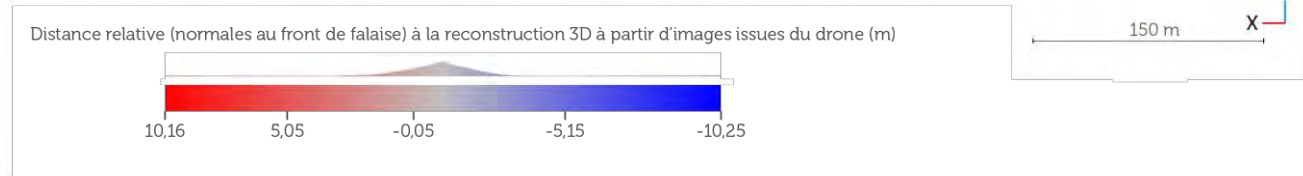
1. Utilisation des techniques de télédétection et d'apprentissage profond pour le suivi de l'EF

- Suivi du front de falaise à l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire grâce aux images satellites obliques Pléiades (projets EROFALITT et HIRACLES)
- Expérimentation à Varengueville-sur-Mer
 - Défis multiples : météo, orientation, acquisition mono et multidate
 - Densité maximale de points : 1,7 pt/m²
 - Erreur de précision moyenne : 0,04 m (écart type de 1,72 m)
 - Seuil de détection des éboulements en comparaison multisource (données satellite et TLS) : > 100 m³ (69 %, d'après le recensement ESTRAN)

A Image Pléiades à 40° (Pléiades © CNES2017 (06/07/2017), Distribution AIRBUS DS)



B ASP (MGM/SSGM, fonction de coût = 3, taille du noyau de corrélation = 7 x 7)



C MicMac (GeomImage, taille de la fenêtre de corrélation : 3 x 3, valeur de régularisation = 0,10)



D Reconstruction 3D à partir d'images issues du drone (26/06/2017)



Reconstruction 3D du front de falaise à partir d'images Pléiades (Letortu et al. 2020)

1. Utilisation des techniques de télédétection et d'apprentissage profond pour le suivi de l'EF

24/38

○ Perspectives

- Utiliser les statistiques spatiales pour l'analyse spatiale et temporelle des éboulements/écroulements (collab. IDEES-Caen)
- Poursuivre l'acquisition de jeux de données à Varengueville-sur-Mer et Dieppe et **leur mise en lien avec les facteurs marins** (collab. IDEES-Caen et vous?)
- Exploiter tout le potentiel des images satellites obliques avec l'apprentissage profond pour le suivi de l'EF (projet HIRACLES, thèse de Z. Bessin, collab. IRISA, LETG-Rennes et Université d'Athènes)
 - Détecter semi-automatiquement l'objet « éboulement/écroulement » (1 seule image) et le changement (2 images)
 - Ajout des falaises rocheuses à Zakynthos (Grèce) et des falaises meubles à Pléneuf-Val-André (22)



Falaises calcaires de Porto Vromi en Grèce (16/06/2022)

○ Objet de débats

➤ Facteurs marins *vs.* continentaux dans l'EF (Emery et Kuhn, 1982)



Sur une falaise homogène : quatre profils en fonction de l'efficacité des facteurs marins et continentaux (Emery et Kuhn, 1982)

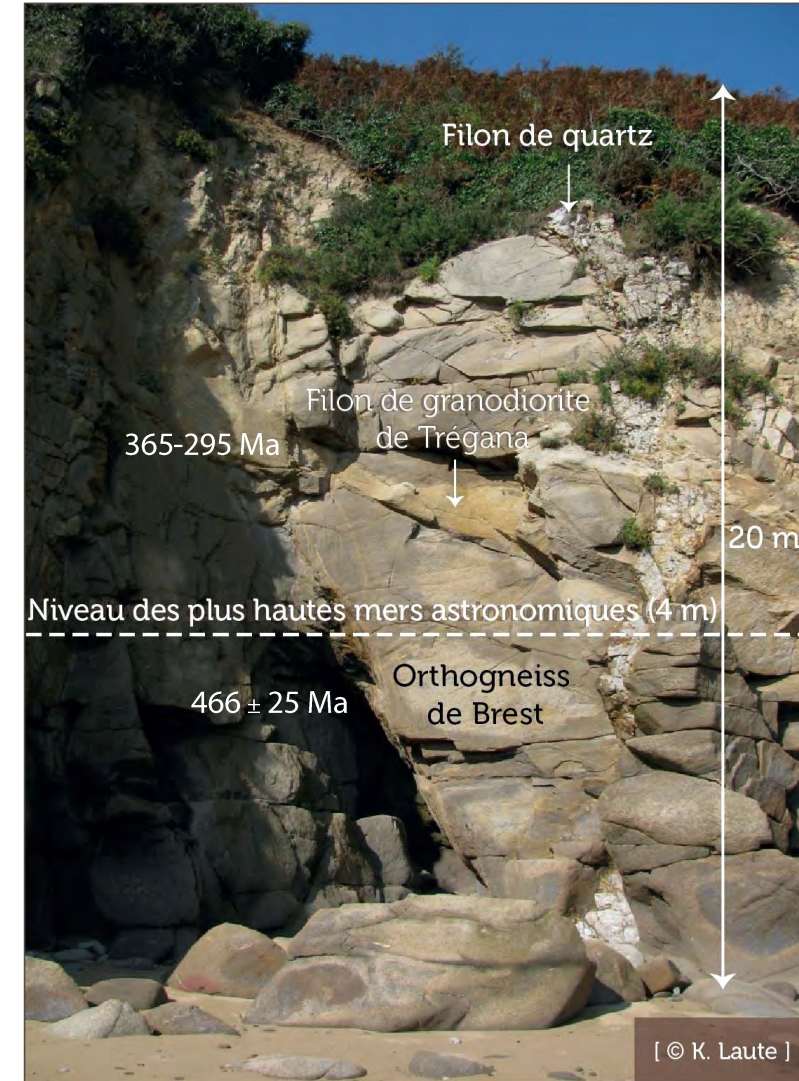
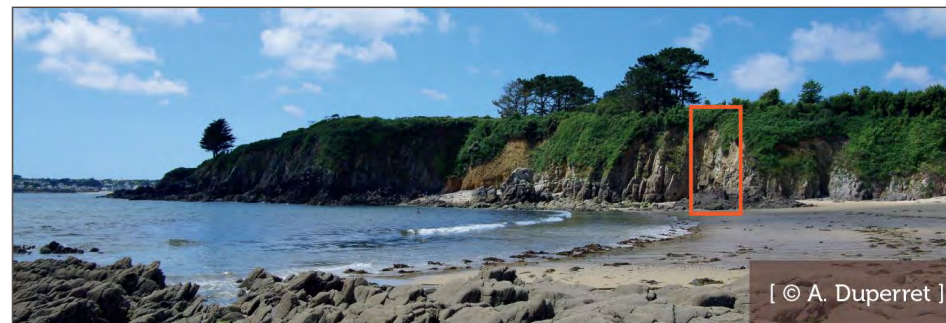
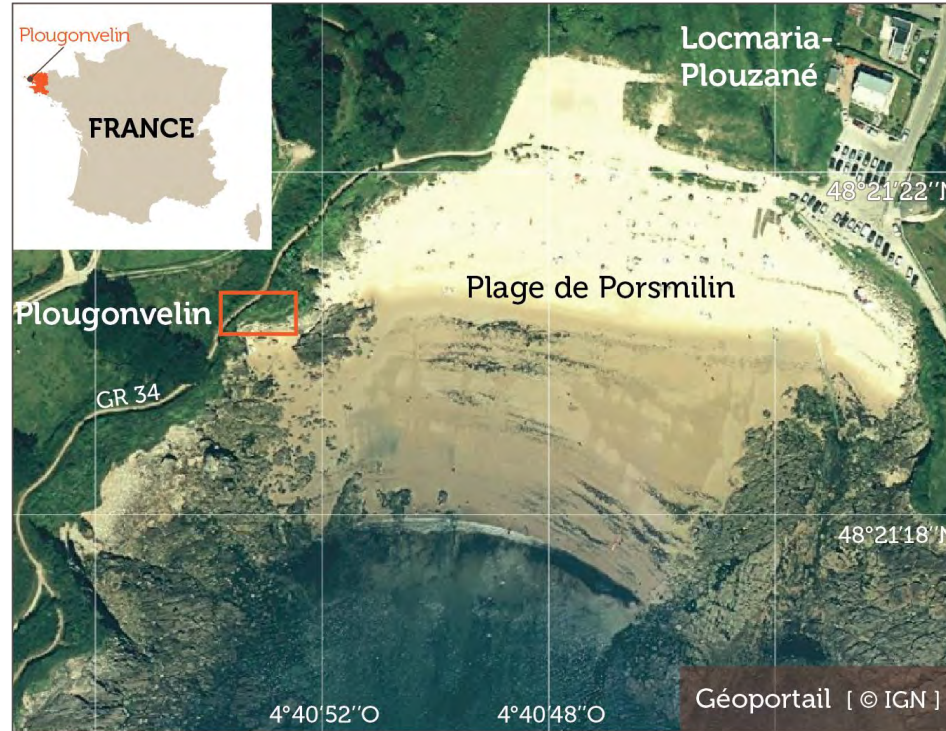
➤ En Normandie et en Bretagne : types de temps favorables au déclenchement de l'EF (Letortu, 2013 ; Basara, 2019)

➤ Instrumentations :

- Suivi des facteurs continentaux sur les falaises du golfe du Saint-Laurent (Bernatchez et al., 2012, 2021)
- Sismomètres à large bande pour suivre les mouvements verticaux de la falaise face à l'assaut des vagues (Adams, 2002, 2005 ; Young et al., 2011)

○ Plougonvelin (29)

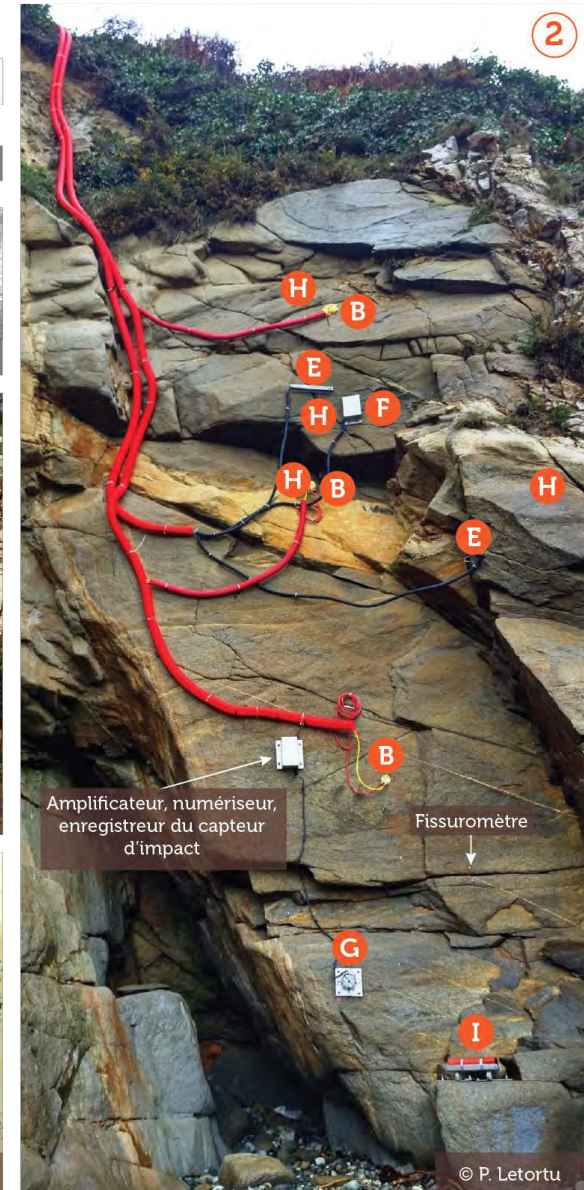
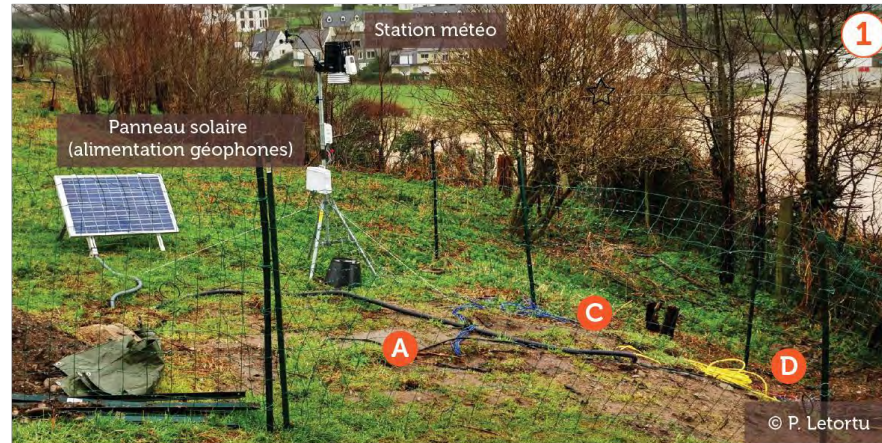
- Contribution des facteurs et processus marins et continentaux dans l'évolution de la microfracturation (fatigue) (projet F3)
- Falaise altérée + failles et diaclases
- Exposée à la houle de sud-ouest



2. Compréhension des mécanismes de l'EF

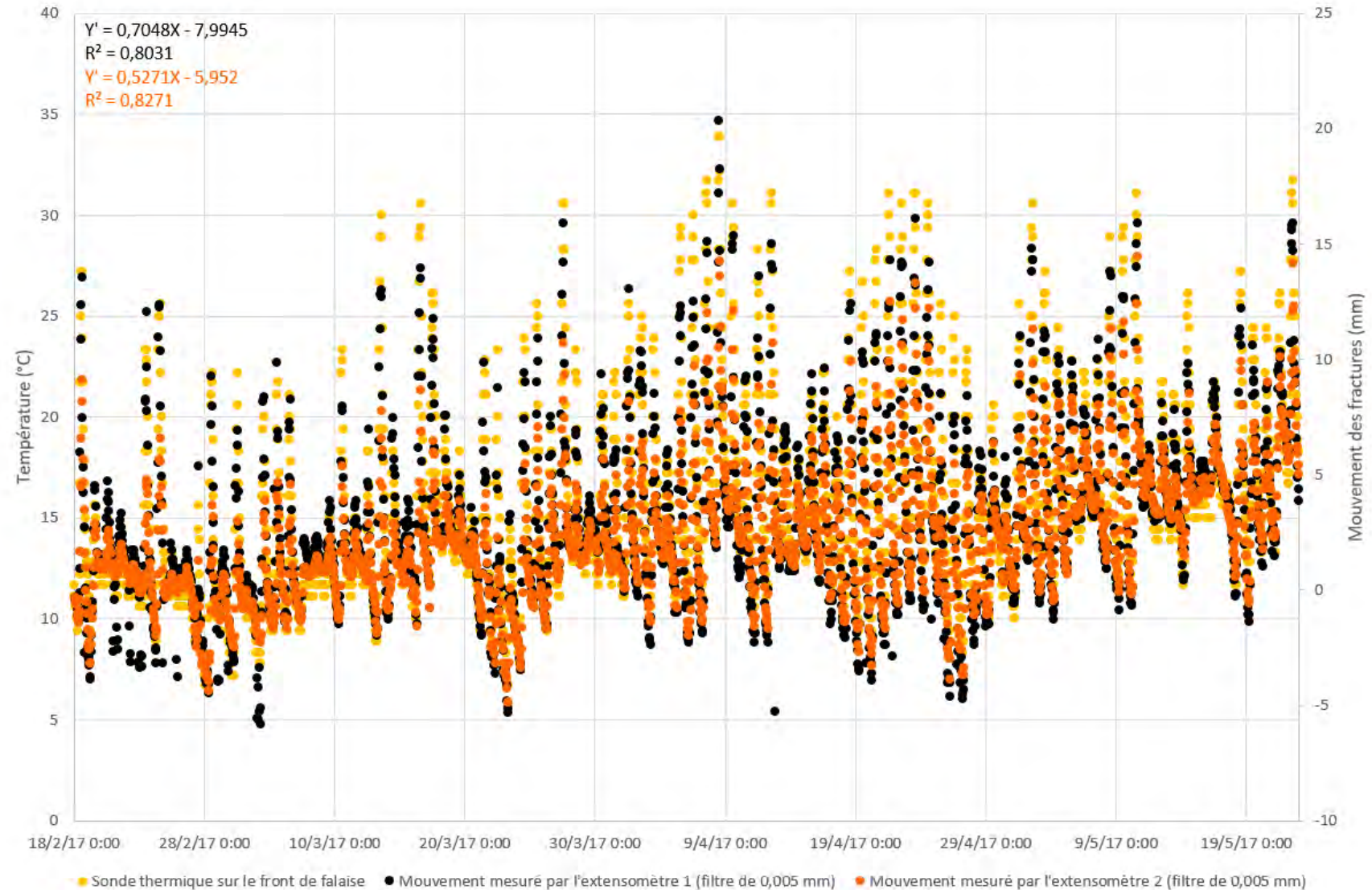
27/38

- De la plate-forme au plateau
- Durée : 3 mois
(entre février et mai 2017)
- Coût : 80 jours ETP
(équivalent temps plein)
- Coût : 75 000 €



Présentation de l'instrumentation à Plougonvelin (Letortu et al., 2017)

- Premiers résultats
 - Mouvements des fractures importants, principalement corrélés à la température ($r^2=0,83$)
 - Microséismes déclenchés surtout par des températures chaudes et des conditions d'agitation et de marée moyennes

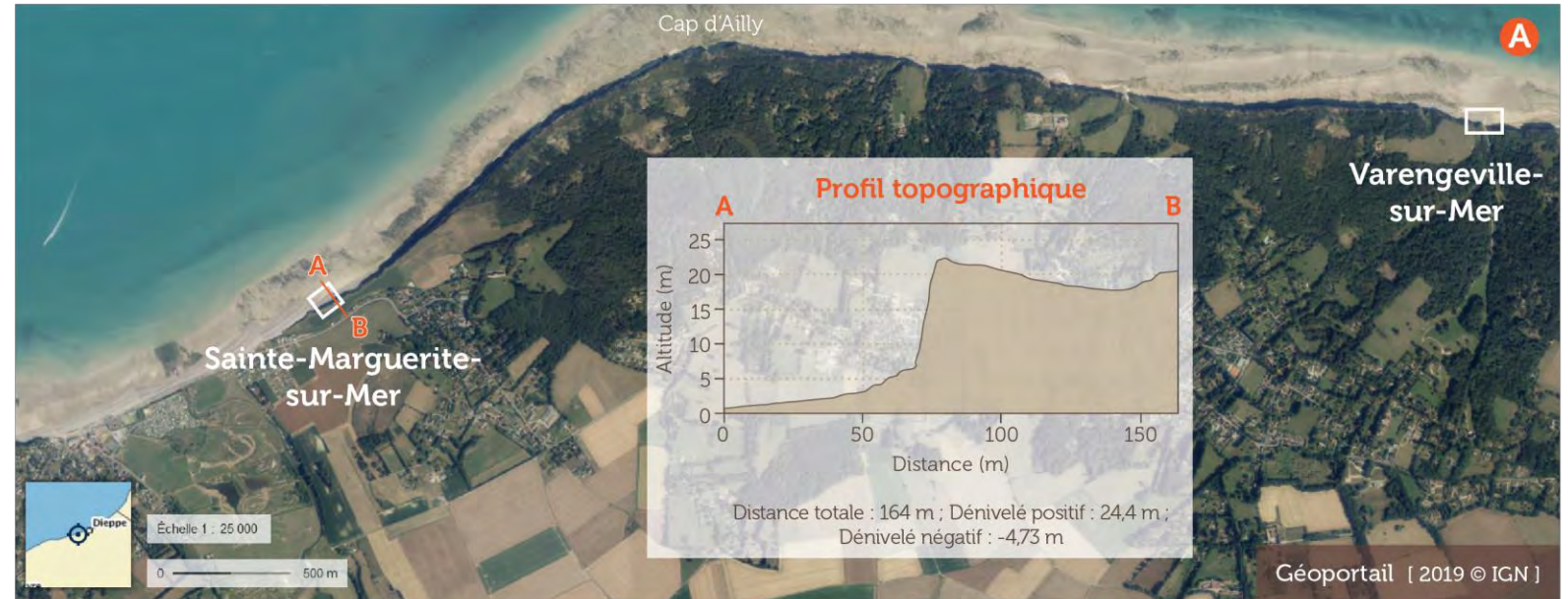


Evolution des mouvements des fractures et de la température en fonction du temps (Letortu, 2023)

2. Compréhension des mécanismes de l'EF

29/38

- Sainte-Marguerite-sur-Mer (76) (projet RICOCHET)
 - Pour connaître la contribution respective des agents et processus dans la fatigue et le déclenchement de l'érosion



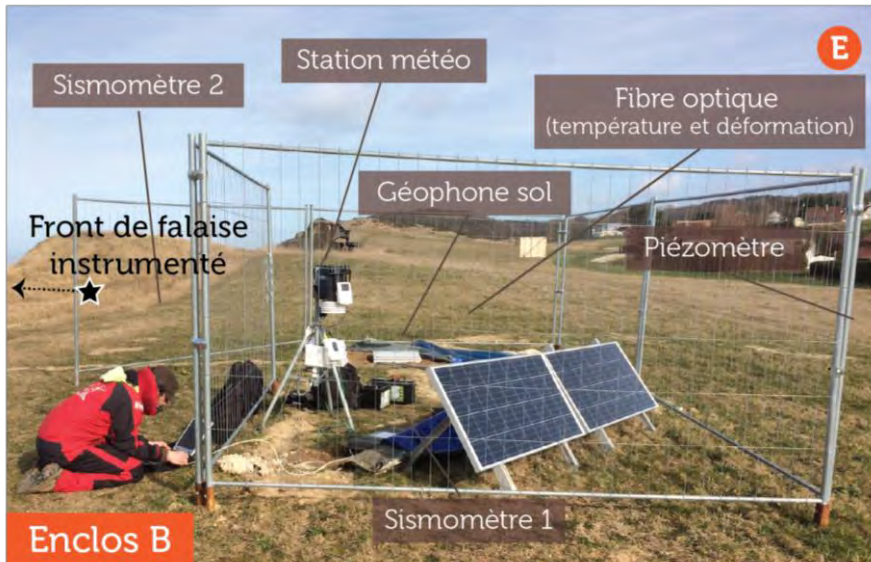
Localisation du site de
Sainte-Marguerite-sur-Mer (Letortu et al., 2022)

Craie santonienne : L \approx 250 m ; H \approx 20 m ; orientation : 320°N ; pente : de 85° au surplomb

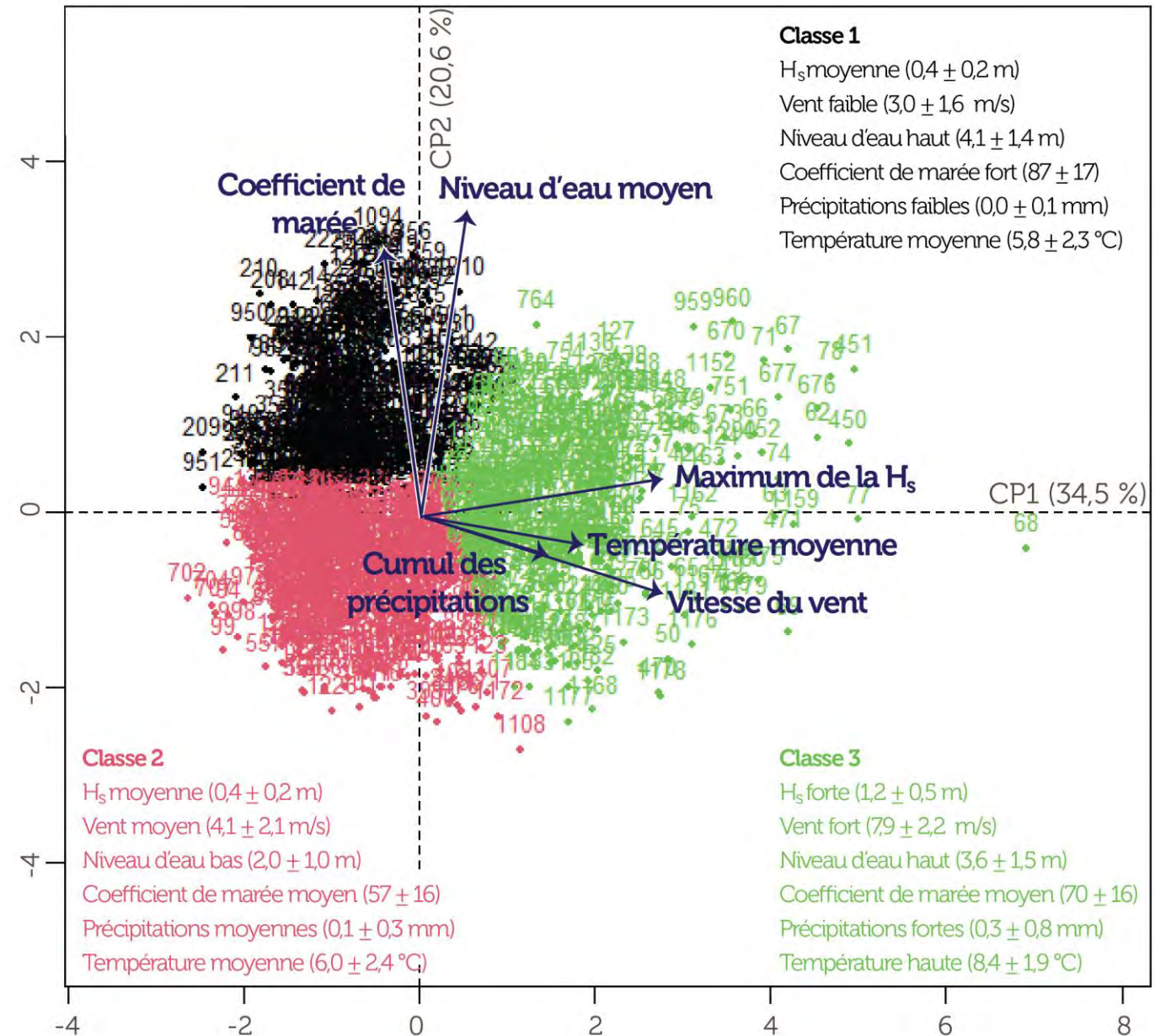
S2 : Santonien moyen (Seaford Chalk) ; S3 : Santonien supérieur (Newhaven Chalk) adapté par Hoyez (2008), d'après Mortimore (2001)

2. Compréhension des mécanismes de l'EF

- De la plate-forme au plateau
- Durée : 13 mois (entre novembre 2018 et janvier 2020)
- Coût : 515 jours ETP
- Coût : 114 000 €
- Chutes de pierres et de blocs



- Résultats entre novembre 2018 et mars 2019
- Transfert d'énergie efficace entre les vagues et la falaise pour les ondes infragravitaires, modulation avec la hauteur des vagues
- Influence majoritaire du marnage associée à d'autres facteurs (classe 1)



Classes propices (ou non) aux déplacements des fractures existantes (Letortu et al., 2022)

○ Perspectives

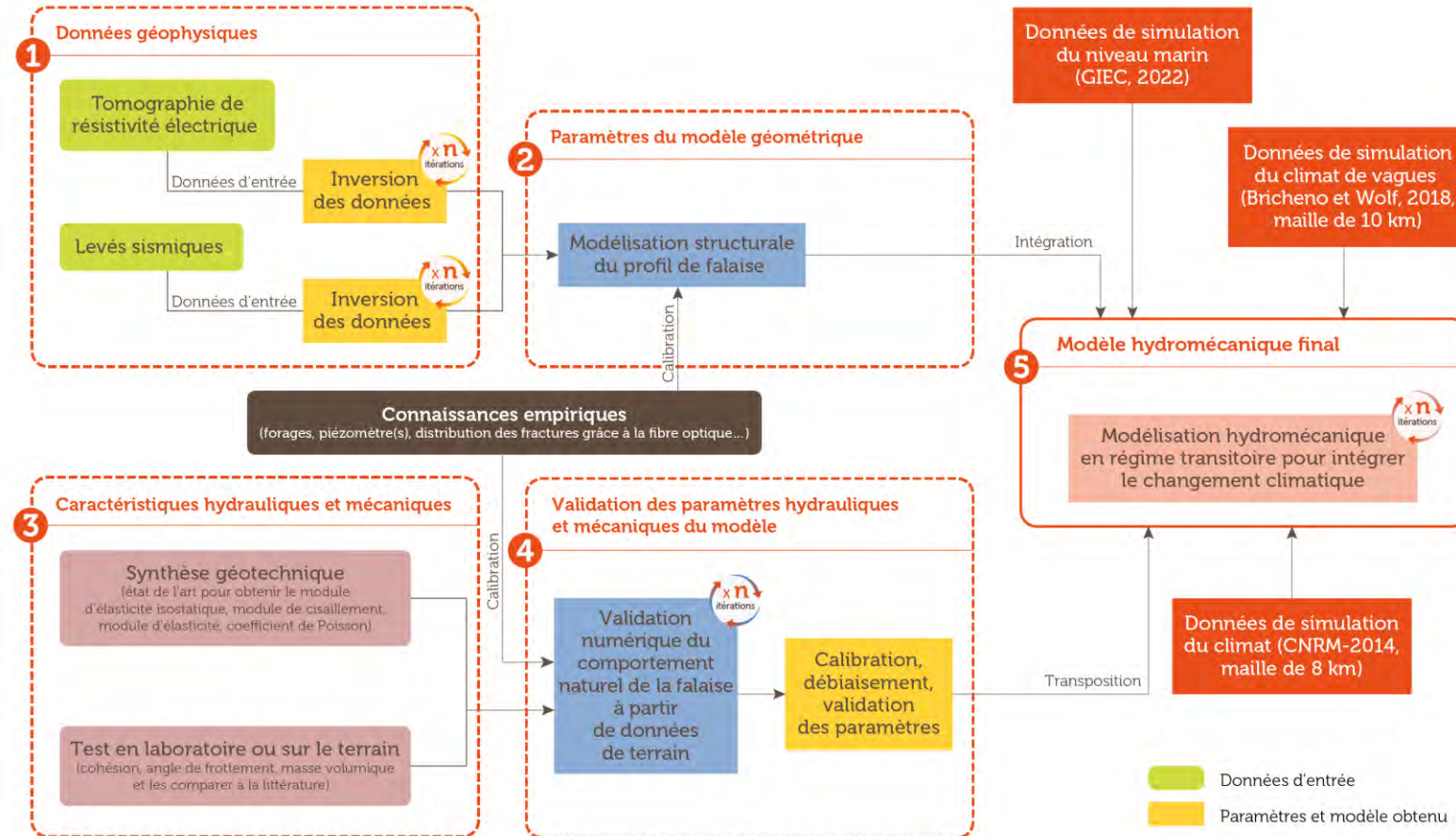
➤ Vers des instrumentations plus « sobres »

➤ Analyser l'ensemble des jeux de données
(collab. IUEM, IDEES-Caen, CEREMA, UQAR et vous ?)

⬅ Données acquises pouvant alimenter la modélisation combinée (rocheuse et hydrodynamique) intégrant le CC

(collab. IUEM, IDEES-Caen, CEREMA et vous ?)

Etapes de la modélisation hydrodynamique en régime transitoire (Letortu, 2023, d'après Thirard, 2022)



3. Gestion de l'aléa « recul des falaises » avec la cartographie intégrant le changement climatique

- Plan de Prévention des Risques Littoraux (PPRL, 2014) (projet RICOCHET)
 - T_x (taux de recul annuel, m/an) * 100 + L_{max} (recul maximal instantané du trait de côte dû à un événement ponctuel majeur, m)

- Cartographie de l'aléa sur 100 ans binaire et CC pas obligatoire

1850-1900 - 2011-2020 : [+0,95 ; +1,20°C]

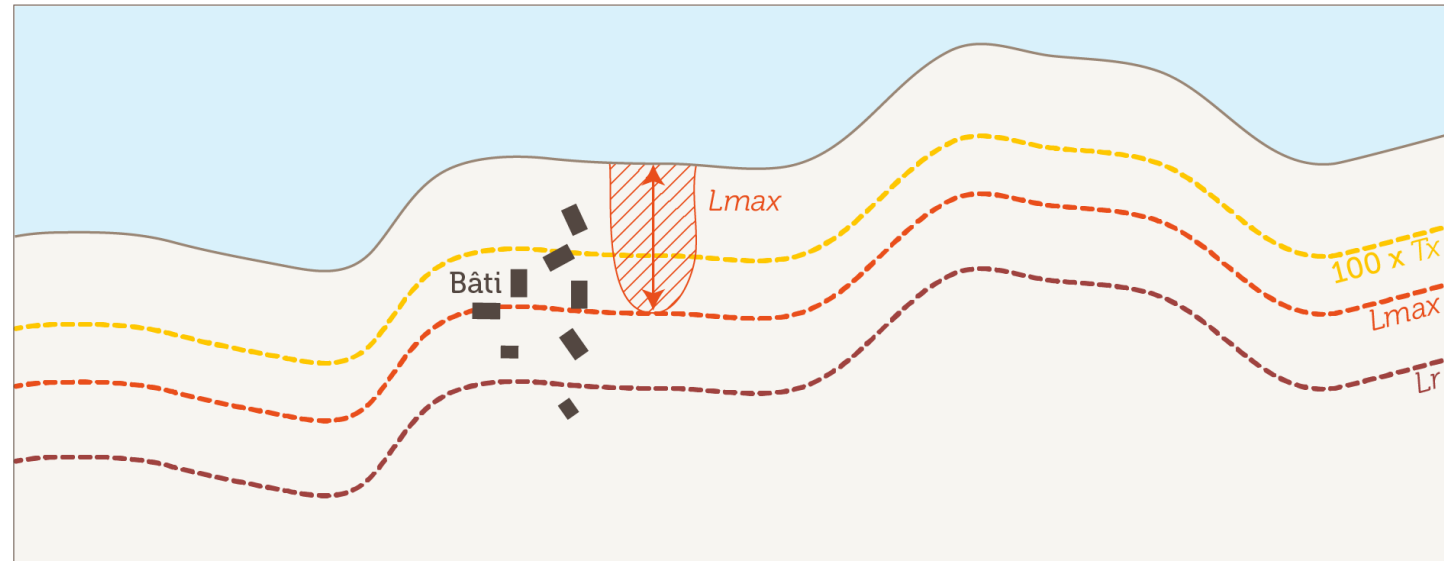
1901-2018 : +3,7 mm

2081-2100 : [+1,4 ; +4,4°C]

2100 : [+0,28 ; +1,01 m] (GIEC, 2022, 2023)

- Quelques modélisations sur les côtes à falaises (Trenhaile, 2011 ; Limber et al., 2018 ; Shadrick et al., 2022) :

- Vitesses actuelles * 1,5 à 10

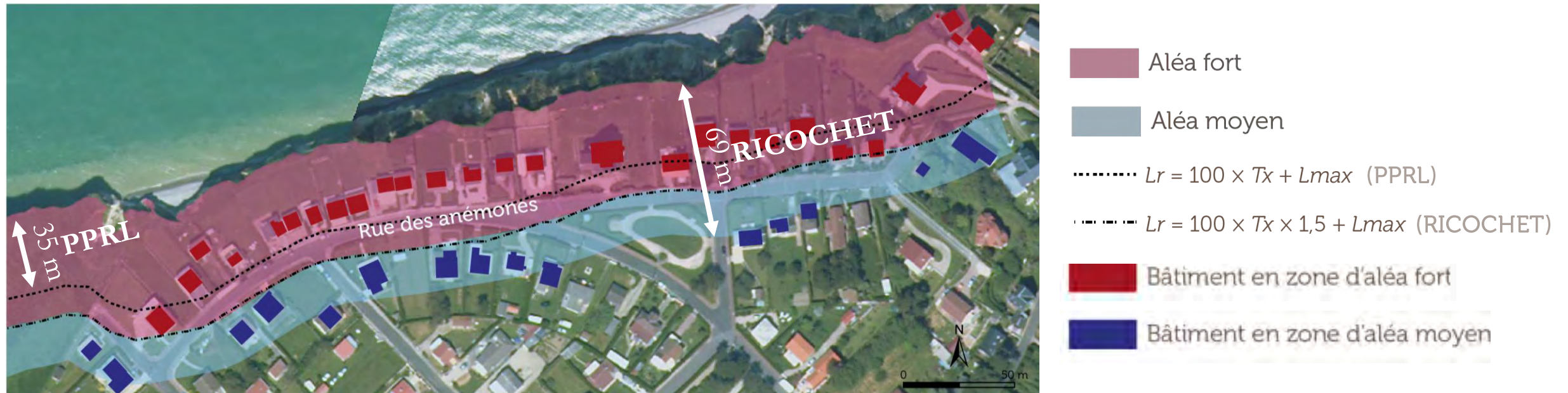


- Position du trait de côte actuel
- - - Position supposée du trait de côte à l'échéance de 100 ans par extrapolation du taux de recul annuel (100 x T_x)
- - - Position du recul maximal instantané dû à l'évènement le plus brutal répertorié (L_{max})
- - - Position supposée du trait de côte à l'échéance de 100 ans par cumul du taux de recul annuel extrapolé et du recul maximal instantané ($L_r = 100 \times T_x + L_{max}$)

Position du trait de côte à l'échéance de 100 ans (Letortu, 2013, d'après le PPRL, 2014)

3. Gestion de l'aléa « recul des falaises » avec la cartographie intégrant le changement climatique

- Sites d'expérimentation à Quiberville, Dieppe et Criel sur-Mer en 2108
 - Coefficient multiplicateur de T_x pour le CC : 1,5 (Costa, 2002 ; Limber et al., 2018)
 - Ajout d'un aléa moyen (pour les incertitudes liées à l'observation et la prospective)



Zonages sur une partie de Quiberville : PPRL (sans l'intégration du CC) et RICOCHET (avec l'intégration du CC) (Letortu, 2023)

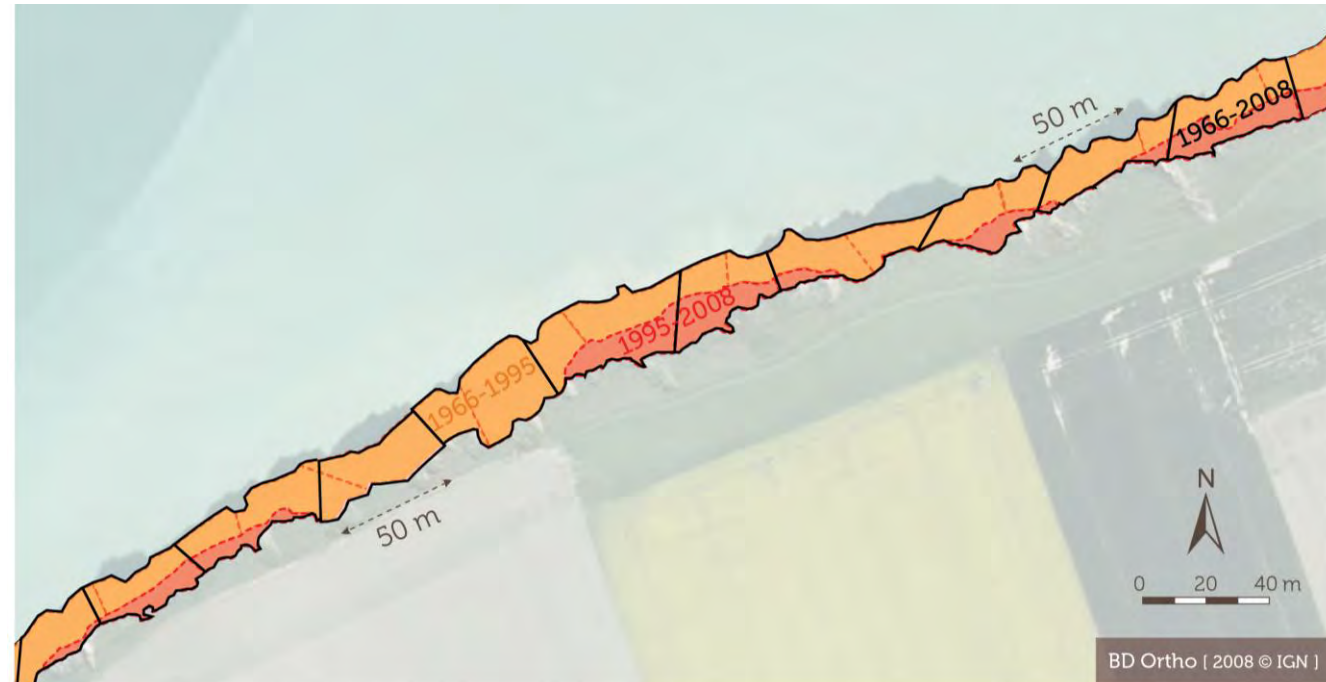
- 1^{er} ordre de grandeur des impacts pour la planification spatiale de ces territoires

3. Gestion de l'aléa « recul des falaises » avec la cartographie intégrant le changement climatique

35/38

○ Perspectives

- Vitesses de recul (T_x) avec l'approche fondée sur l'aire (extension QGIS) (collab. IDEES-Caen, IUEM)
- Dissocier la variation de la variabilité (collab. IDEES-Caen)
- Mieux intégrer les paramètres structuraux locaux, **les conditions d'agitation locale en pied de falaise, etc.** (collab. IDEES-Caen et vous ?)
- **Déclinaison locale des effets du CC à affiner**, notamment en intégrant les derniers milliers d'années (collab. IDEES-Caen, IUEM et vous ?)



Approche fondée sur l'aire pour calculer les vitesses de recul (Letortu, 2013)

○ Principaux résultats

- Obtention des vitesses, rythmes et modalités de recul des falaises sur plusieurs décennies et dizaines de km (Seine-Maritime)
- Importance de l'ébouilisation dans l'érosion du front des falaises à Varengueville-sur-Mer (près de 32 %)
- Pertinence de l'imagerie satellite oblique et très haute résolution spatiale pour le suivi de l'érosion du front de falaise à l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire
- Mise en place en Finistère et en Seine-Maritime des 2 premières instrumentations multiparamètres et continues sur la fatigue et la rupture de la falaise, mais aussi sur les interactions du versant littoral

- Prévalence des facteurs marins dans la fatigue et la rupture des falaises à Varengueville-sur-Mer et Sainte-Marguerite-sur-Mer
- Prépondérance de la température dans l'évolution de la fracturation à Plougonvelin
- Proposition d'une cartographie de l'aléa « recul des falaises » à l'échéance de 100 ans intégrant le CC

Et de nombreuses perspectives de recherche, notamment en lien avec vos compétences en modélisation des conditions de mer à proximité des côtes...

L'érosion des falaises au sein des aléas côtiers : suivis de terrain et défis en lien avec la modélisation

P. Letortu, S. Costa, R. Davidson, O. Maquaire, Z. Bessin, M. Jaud, S. Lefèvre, T. Corpetti, J. Nabucet, N. Le Dantec, A. Hénaff, E. Augereau, R. Taouki, C. Théry, N. Evelpidou, E. Vassilakis, J. Ammann, P. Grandjean, P. Allemand, S. Passot, G. Thirard, B. Peuziat, P. Bernatchez