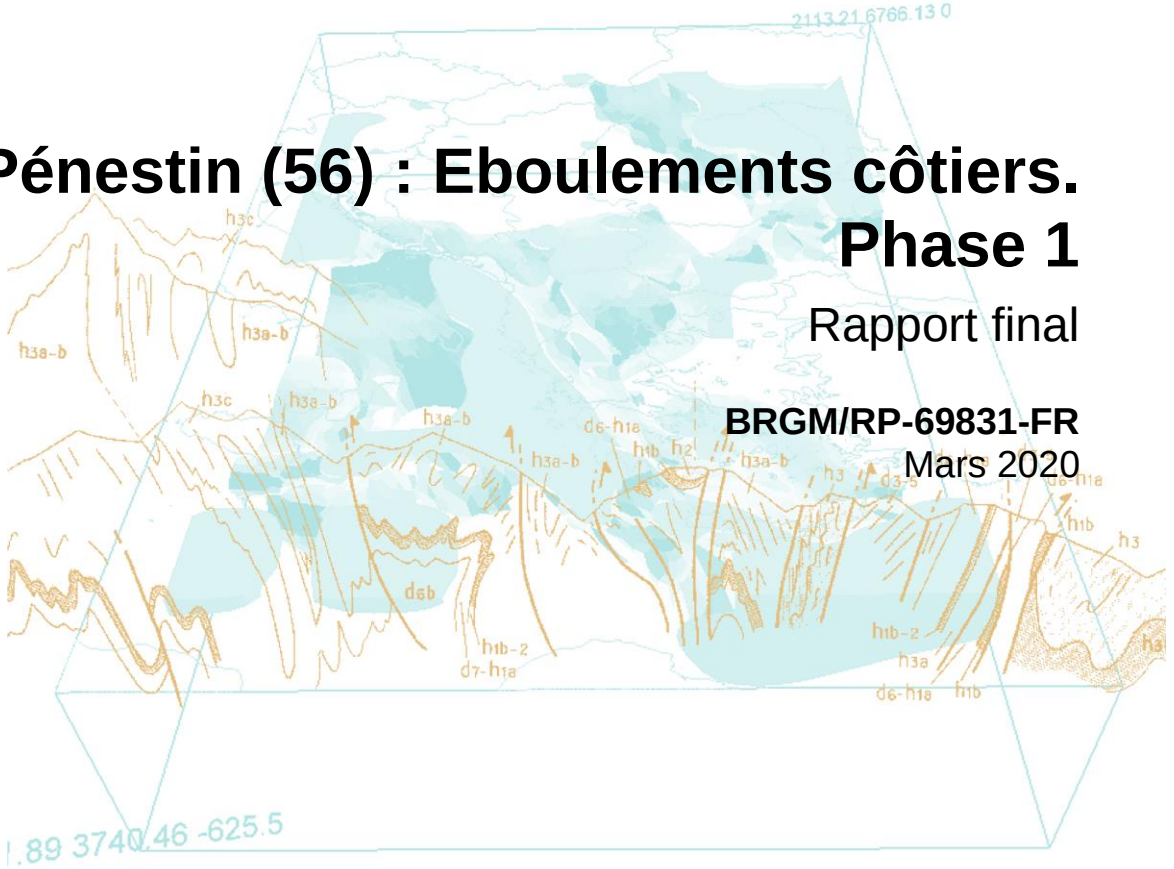
Document public



Pénestin (56) : Eboulements côtiers. Phase 1

Rapport final

BRGM/RP-69831-FR
Mars 2020

Université Bretagne Sud

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Pénestin (56) : Eboulements côtiers. Phase 1

Rapport final

BRGM/RP-69831-FR
Mars 2020

Étude réalisée dans le cadre des
opérations de Service public du BRGM (AP18REN009)

S. Le Roy, N. Le Baron, J.M. Schroëtter

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Franck Desmazes	Nom : Mélanie Bardeau
Fonction : Ingénieur-chercheur sur les risques côtiers	Fonction : Directrice du BRGM Bretagne
Date : 09/04/2020	Date : 09/04/2020
Signature :	Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : Falaise, Mouvements gravitaires, Aléa, Érosion, Trait de côte, Tempêtes, Bretagne, Morbihan, Pénestin.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

S. Le Roy, N. Le Baron, J.M. Schroëtter (2019) – Pénestin (56) : Eboulements côtiers. Phase 1. Rapport final. BRGM/RP-69831-FR, 78 p., 66 ill.

© BRGM, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Suite à des éboulements côtiers récurrents sur les falaises de la commune de Pénestin, et notamment au niveau de la plage de la Mine d'Or, la DDTM du Morbihan a demandé au BRGM une étude plus approfondie sur ces phénomènes. Un programme d'étude, nommé PENEBOCO (PENestin : EBOulements COtiers), a donc été initié, faisant suite à une précédente étude réalisée par le BRGM (Schroëtter, 2013). Ce programme s'articule en 3 phases :

- ***Opération 1*** : Evolution de la cinématique passée des éboulements côtiers et évènements climatiques ;
- ***Opération 2*** : Evolution de la cinématique actuelle de la falaise de la Mine d'Or et conditions climatiques contemporaines ;
- ***Opération 3*** : Synthèse des opérations précédentes et projection de la position de la falaise de la Mine d'Or vers un horizon à 100 ans.

Le présent rapport synthétise les travaux de l'opération 1 (Evolution de la cinématique passée des éboulements côtiers). Quatre sites ont été analysés sur la commune de Pénestin dans le cadre de cette opération, en concertation avec la mairie de Pénestin et la DDTM 56 : la falaise de la Mine d'Or, le secteur de la Poudrantais et du Maresclé, le secteur de la Pointe du Bile et le secteur allant de la Pointe du Bile à Pont-Mahé.

L'opération a consisté à caler 11 photographies aériennes disponibles entre 1952 et 2011, puis à digitaliser la position des falaises sur ces photographies afin de quantifier le recul des falaises sur les 10 périodes étudiées (1952-1962, 1962-1968, 1968-1974, 1974-1977, 1977-1982, 1982-1991, 1991-2000, 2000-2009, 2009-2016, 2016-2018). Il convient toutefois de noter que si les reculs mesurés sur le long terme (période 1952-2018) sont relativement fiables, les reculs calculés sur les périodes plus courtes présentent quant à eux des incertitudes importantes, qui peuvent être supérieures aux valeurs de recul calculées.

Les reculs observés sur ces 10 périodes ont été confrontés à des indicateurs météo-océanographiques : la pluviométrie (à partir des données enregistrées à la station de Billiers), le niveau marin (à partir des données mesurées par le marégraphe de la pointe Saint-Gildas, à Préfailles, en Loire-Atlantique) et l'occurrence de tempêtes et de dommages associés (à partir de la base de données des impacts de tempêtes réalisée par le BRGM).

L'analyse des photographies aériennes anciennes menée dans cette étude a permis d'avancer un certain nombre de conclusions :

- A la Mine d'Or, l'analyse confirme un recul bien marqué de la falaise, et confirme que la partie Sud de la falaise recule plus vite que la partie Nord ; les vitesses de recul sont toutefois sensiblement moins importantes que celles attendues : au Nord de la Source, la falaise recule typiquement de l'ordre de 10 cm/an (avec parfois sur des périodes plus courtes des vitesses pouvant atteindre l'ordre de 30 à 50 cm/an), alors qu'au Sud de la Source la falaise recule typiquement de 30 cm/an (avec parfois sur des périodes plus courtes des vitesses pouvant atteindre l'ordre de 1 m/an). Sur la majeure partie de la période analysée (jusqu'en 2000), le recul semble directement corrélé avec les conditions météo marines (notamment la pluviométrie et le niveau marin), mais la période récente (depuis 2000) se distingue par un recul limité malgré de fortes précipitations, des niveaux marins particulièrement élevés et une fréquence marquée de tempêtes importantes. Ce ralentissement pourrait s'expliquer par des modifications

d'aménagement, notamment concernant la gestion des eaux pluviales (hypothèse restant à vérifier).

- A la Poudrantais et au Maresclé, les falaises reculent de façon beaucoup plus modérée. Seuls 2 secteurs semblent se distinguer par des reculs significatifs, pouvant atteindre ou dépasser les 10 cm/an : le Nord de l'anse de la Poudrantais, vers le Landrin, et le Sud de la Plage du Maresclé.
- Sur la façade occidentale de la Pointe du Bile, le recul des falaises reste également modéré. Les parcelles situées au Nord du camping semblent toutefois reculer plus significativement, avec des vitesses pouvant atteindre ou dépasser les 10 cm/an.
- De la Pointe du Bile à Pont-Mahé, la côte est constituée d'une alternance de falaises qui apparaissent stables (façade orientale de la Pointe du Bile, Pointe de l'Espernel et Pont-Mahé) et de côtes sableuses très mobiles (baies du Bile et du Palandrin) ; concernant ces côtes sableuses, bien qu'il semble y avoir une tendance à l'érosion de part et d'autre de la Pointe de l'Espernel, une certaine cyclicité apparait, avec notamment des petites flèches sableuses se déplaçant d'Ouest en Est dans la Baie du Palandrin. L'installation d'ouvrages côtiers destinés à fixer le trait de côte dans la Baie du Bile semble toutefois se traduire par un accroissement de l'érosion en « aval dérive » de ces ouvrages (à l'extrémité Est), et une possible perturbation des transits sédimentaires vers la Baie du Palandrin pourrait apparaitre à terme.

Le présent rapport conclue la phase 1 du projet PENEBOCO (PEnestin : EBOulement COtiers) qui visait à mieux comprendre les évolutions passées des falaises de la commune de Pénestin, et notamment de la falaise de la Mine d'Or. Il a donc notamment permis de revoir à la baisse les vitesses de recul des falaises par rapport à ce qui était attendu *a priori*, de vérifier que certaines corrélations apparaissaient entre les vitesses de recul de la falaise de la Mine d'Or et les conditions météo-océaniques, mais aussi de souligner un possible ralentissement de ce recul à la Mine d'Or, peut-être lié aux aménagements hydrauliques récents (hypothèse restant à vérifier).

Dans la phase 2 du projet PENEBOCO, l'installation d'une caméra pour le suivi de la falaise permettra de visualiser et mieux comprendre les mécanismes à l'origine du recul de la falaise (ruissellement et infiltration entrainant l'effondrement du haut de la falaise, nettoyage des matériaux tombés par la mer, éventuel sapement du pied de la falaise par la mer…). Enfin, la 3ème et dernière phase du projet visera à évaluer le recul possible de la falaise à l'échéance 100 ans sur la base des éléments des 2 premières phases.

Sommaire

1. Introduction et objectifs 11

2. Contexte général 13

2.1. ETUDES ANTERIEURES 13

2.2. GEOMORPHOLOGIE DU TRAIT DE COTE DE LA COMMUNE PENESTIN 18

2.3. CONTEXTE OCEANOGRAPHIQUE 22
2.3.1. Courants et régime de marée 22
2.3.2. Instrumentation et mesures in situ 23
2.3.3. Niveaux marins et surcotes 24
2.3.4. Etat des mers 26

3. Méthodologie 31

3.1. LE CALAGE DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES 31
3.1.1. Choix de l'algorithme de calage parmi ceux disponibles dans QGIS 32
3.1.2. Synthèse et choix des transformations : 34
3.1.3. Acquisition des marqueurs géomorphologiques d'évolution des falaises (digitalisation) 34
3.1.4. Photographies traitées 35

3.2. OUTIL UTILISE POUR L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE 36

3.3. DONNEES DISPONIBLES POUR LA CONFRONTATION AU RECUL DES FALAISES 38
3.3.1. Pluviométrie 38
3.3.2. Niveau marin 39
3.3.3. Tempêtes 39

3.4. CREATION D'INDICATEURS POUR LA CONFRONTATION DES DONNEES AU RECUL DES FALAISES 40
3.4.1. Indicateurs sur la pluviométrie 41
3.4.2. Indicateurs sur le niveau marin 41
3.4.3. Indicateurs sur les tempêtes 43
3.4.4. Premiers éléments de synthèse sur ces indicateurs 45

4. Résultats et analyse 47

4.1. LA MINE D'OR 47
4.1.1. Résultats sur le long terme (période 1952-2018) 47
4.1.2. Résultats sur les différentes périodes 49
4.1.3. Confrontation aux différents indicateurs 53

4.2. LA POUDRANTAIS ET LE MARESCLE 56
4.2.1. Résultats sur le long terme (période 1952-2018) 56
4.2.2. Résultats sur les différentes périodes 56
4.2.3. Confrontation aux différents indicateurs 61

4.3. LA POINTE DU BILE (COTE OUEST) 62
4.3.1. Résultats sur le long terme (période 1952-2018) 62
4.3.2. Résultats sur les différentes périodes 63
4.3.3. Confrontation aux différents indicateurs 67

4.4. DE LA POINTE DU BILE A PONT-MAHE 68
4.4.1. Résultats sur le long terme (période 1952-2018) 68
4.4.2. Résultats sur les différentes périodes 69

5. Conclusion et perspectives 75

6. Bibliographie 77

Liste des illustrations

Illustration 1 - Localisation de la commune de Pénestin (www.geoportail.gouv.fr).....11

Illustration 2 – Carte de la commune de Pénestin (www.geoportail.gouv.fr) et localisation des 4 sites d'étude retenus 12

Illustration 3 - Falaise de la Mine d'Or au niveau de Pénestin (56) : les micaschistes ne sont plus ici reconnaissables, laissant place à des argiles et limons kaoliniques d'altération 13

Illustration 4 - En haut, coupe schématique Est-Ouest au niveau de la falaise montrant la relation entre géologie et hydrogéologie ; En bas, schéma de principe des éboulements côtiers : la nappe contenue dans les altérites entraine leur liquéfaction qui fait s'ebouler un pan de falaise de 1 à 2 m (Schroetter, 2013) 14

Illustration 5 - Evolution du trait de côte à la Mine d'Or entre 1962 et 2000 (le trait noir pointillé est le trait HistoLittV2.0 ; le rouge pointillé est le trait de 1962 et le bleu pointillé est le trait de 2000, Schroëtter, 2013). 15

Illustration 6 – Vitesses de recul du trait de côte sur la période 1952-2010 sur la commune de Pénestin (d'après les données de Blaise, 2017) 16

Illustration 7 – Indice National d'Erosion (INE) sur la période 1952-2011 sur la commune de Pénestin (d'après les données de www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr).....17

Illustration 8 - Aperçu des projections du trait de côte au niveau de la plage de la Mine d'Or (Landreau, 2018).....18

Illustration 9 – Géomorphologie simplifiée du trait de côte et arrière trait de côte sur la commune de Pénestin 20

Illustration 10 – Falaise de la Mine d'or depuis l'accès enroché au Sud pendant un coup de vent (tempête Ines du 13/02/2020), 01h40 avant la pleine mer (vue vers le Nord à gauche et vers le Sud à droite).....21

Illustration 11 – Topographie du secteur de la Mine d'Or et de la Poudrantais (données 2011 du RGE Alti ©IGN) ; les lignes bleue et rouge représentent respectivement le niveau des pleines mers de vives eaux et le niveau des plus hautes mers astronomiques (2,62 et 3,43 m NGF à Tréhiguier d'après SHOM, 2019).....21

Illustration 12 - Caractéristiques des marées dans le Morbihan : en haut, marnage maximum pour un coefficient 120 et courants de marée au maximum du flot pour un coefficient 95 ; en bas, vitesses maximales des courants de marée pour un coefficient 95 et courants de marée au maximum du jusant pour un coefficient 95 (Source : data.shom.fr).....22

Illustration 13 – Localisation des mesures disponibles au niveau du Morbihan (marégraphes, houlographes) et des points d'analyse statistique des vagues à partir de la base de données BoBWA (commune de Pénestin en jaune pâle) 24

Illustration 14 - Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.....25

Illustration 15 - Niveaux extrêmes de pleines mers (en m NGF) à Port-Tudy et à la Pointe de Saint-Gildas (SHOM-CETMEF, 2012).....25

Illustration 16 - Niveaux centennaux de pleine mer au large du Morbihan (d'après SHOM-CETMEF, 2012).....26

Illustration 17 – Hauteurs significatives des vagues au large pour des périodes de retour de 10 ans (à gauche) et 100 ans (à droite) estimées à partir de la base BoBWA (Charles et al., 2012) sur la période 1958-2001 à pas de temps 6 heures (Bulteau et al., 2013) 26

Illustration 18 – Analyse statistique des vagues au point BoBWA Bretagne_17 (Bulteau et al., 2013).....28

Illustration 19 - Rose des houles mesurées à la bouée 05602 de Belle-Ile, sur la période 2010 – 2018 (http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr) 29

Illustration 20 - Histogramme représentant la fréquence des hauteurs significatives des houles mesurées à la bouée 05602 de Belle-Ile, sur la période 2010 – 2019, en considérant toute la période à gauche, puis la période hivernale au centre et la période estivale à droite (http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr) 29

Illustration 21 - Exemple de l'emplacement des points d'ancrage pour une photographie de 1982 sur la Mine d'Or et dallage des photographies aériennes anciennes de 1962 une fois géréférencées 32

Illustration 22 - Erreurs résiduelles calculées par le géréférenceur de QGIS 33

Illustration 23 - Erreurs visuelles mesurées dans le géoréférencement d'une même campagne d'images (ici 1977) 34

Illustration 24 – Date des 11 phototgraphies traitées et durée des 10 périodes ainsi définies 35

Illustration 25 - Extrait de la digitalisation du sommet de la falaise (limite de végétation) pour les 11 campagnes de photographies aériennes traitées (fond : Orthoimage 2016 en noir et blanc, IGN) 36

Illustration 26 - Principe du Digital Shoreline Analysis System 37

Illustration 27 – Pluviométrie mensuelle à Billiers de Janvier à Décembre /2019 38

Illustration 28 – Pluviométrie annuelle à Billiers de 1961 à 2019 38

Illustration 29 --- Précipitations mensuelles moyennes sur la période 1961-2019 38

Illustration 30 – Série temporelle de niveaux marins horaires mesurés par le marégraphe de Saint-Gildas entre 1962 et 2017 (Source : data.shom.fr) 39

Illustration 31 – Localisation et nature des 1 070 impacts de tempêtes extraits de la base de données des impacts de tempête 40

Illustration 32 – Chronologie des 126 tempêtes bien datées correspondant à l'extraction de la base de données des impacts de tempête (la zone encadrée en noir correspond aux 36 tempêtes dans la période étudiée) 40

Illustration 33 – Indicateurs sur la pluviométrie : Pluviométrie mensuelle moyenne sur l'ensemble des périodes séparant 2 photographies aériennes (en haut), sur les trimestres hivernaux uniquement (au milieu) et sur les trimestres estivaux uniquement (en bas) 41

Illustration 34 – Indicateurs sur le niveau marin : Niveau marin horaire moyen enregistré à la pointe Saint-Gildas pour chacune des périodes étudiées et niveau moyen sur l'ensemble de la période de mesure (ligne rouge) (d'après les données de data.shom.fr) 42

Illustration 35 – Indicateurs sur le niveau marin : Proportion de temps où le niveau horaire enregistré a été supérieur au niveau des pleines mers de vives eaux (en haut) ou au niveau des plus hautes mers astronomiques (en bas) 42

Illustration 36 – Indicateurs sur le niveau marin : Lame d'eau horaire moyenne (en mètres) supérieure au niveau des pleines mers de vives eaux (en haut) ou au niveau des plus hautes mers astronomiques (en bas) 43

Illustration 37 – Classement de la sévérité des tempêtes selon le nombre d'impacts directs recensés (sévérité faible pour les flèches jaunes, sévérité modérée pour les flèches oranges, sévérité forte pour les flèches rouges) 44

Illustration 38 - Indicateurs sur les tempêtes : Pour chaque période étudiée, nombre de tempêtes ayant généré des impacts directs, nombre d'impacts directs et nombre moyen d'impact directs par tempête en ayant généré 45

Illustration 39 – Vitesses de recul de la position de la falaise le long de la plage de la Mine d'Or (la représentation cartographique pivotée en haut est approximativement calée avec la courbe des vitesses en bas) 47

Illustration 40 – Comparaison des vitesses de recul obtenues sur la partie Sud de la plage de la Mine d'Or à partir des traits de côte 1952-2018 de la présente étude et des traits de côte 1965-2016 fournis par Cap Atlantique 48

Illustration 41 – Aperçu de la photographie aérienne de 1952 au niveau de l'accès enroché (on peut noter l'orientation de l'ombre des arbres en haut à droite) et digitalisations disponibles (en bleu : trait de côte 1952 de Blaise, 2017 ; en rouge : trait de côte 2010 de Blaise 2017 ; en turquoise : trait de côte 1952 digitalisé pour la présente étude)....49

Illustration 42 – Vitesses de recul de la position de la falaise le long de la plage de la Mine d'Or sur les périodes 1952-1962, 1962-1968, 1968-1974, 1974-1977....50

Illustration 43 – Vitesses de recul de la position de la falaise le long de la plage de la Mine d'Or sur les périodes 1977-1982, 1982-1991, 1991-2000, 2000-2009....51

Illustration 44 – Vitesses de recul de la position de la falaise le long de la plage de la Mine d'Or sur les périodes 2009-2016, 2016-2018....52

Illustration 45 – Evolutions de la vitesse de recul moyenne de la falaise de la Mine d'Or (la ligne orange représente la vitesse de recul moyenne sur l'ensemble de la période 1952-2018)....53

Illustration 46 – Confrontation entre les vitesses de recul globales de la falaise de la Mine d'Or pour chaque période (en haut) et les indicateurs de pluviométrie (au milieu) et de niveau marin (en bas)....54

Illustration 47 – Vitesses de recul globales de la falaise de la Mine d'Or pour chaque période de 1952 à 2016 et position des principales tempêtes recensées (les étoiles rouges, oranges et jaunes correspondent aux flèches de mêmes couleurs de l'Illustration 25)....54

Illustration 48 – Comparaison entre les vitesses de recul pour chaque période au Sud de la plage de la Mine d'Or (en marron en haut), les pluviométries associées (en bleu en haut), les vitesses de recul sur le même secteur estimées à partir des traits de côte de Cap Atlantique (en marron en bas) et les pluvimétries associées (en bleu en bas)....55

Illustration 49 - Vitesses de recul de la position des falaises le long de la Poudrantais et du Maresclé (la représentation cartographique pivotée en haut est approximativement calée avec la courbe des vitesses en bas)....56

Illustration 50 – Vitesses de recul de la position des falaises à la Poudrantais et au Maresclé sur les périodes 1952-1962, 1962-1968, 1968-1974, 1974-1977....58

Illustration 51 – Vitesses de recul de la position des falaises à la Poudrantais et au Maresclé sur les périodes 1977-1982, 1982-1991, 1991-2000, 2000-2009....59

Illustration 52 – Vitesses de recul de la position des falaises à la Poudrantais et au Maresclé sur les périodes 2009-2016, 2016-2018....60

Illustration 53 – Evolutions de la vitesse de recul moyenne des falaises du secteur Poudrantais-Maresclé (la ligne orange représente la vitesse de recul moyenne sur l'ensemble de la période 1952-2018)....61

Illustration 54 – Confrontation entre les vitesses de recul globales dans le secteur de la Poudrantais-Maresclé pour chaque période (en haut) et les indicateurs de pluviométrie (au milieu) et de niveau marin (en bas)....62

Illustration 55 - Vitesses de recul de la position des falaises le long de la façade occidentale de la Pointe du Bile (la représentation cartographique pivotée en haut est approximativement calée avec la courbe des vitesses en bas)....63

Illustration 56 – Vitesses de recul de la position des falaises de la facade occidentale de la Pointe du Bile sur les périodes 1952-1962, 1962-1968, 1968-1974, 1974-1977....64

Illustration 57 – Vitesses de recul de la position des falaises de la facade occidentale de la Pointe du Bile sur les périodes 1977-1982, 1982-1991, 1991-2000, 2000-2009....65

Illustration 58 – Vitesses de recul de la position des falaises de la facade occidentale de la Pointe du Bile sur les périodes 2009-2016, 2016-2018....66

Illustration 59 – Evolutions de la vitesse de recul moyenne des falaises de la façade occidentale de la Pointe du Bile (la ligne orange représente la vitesse de recul moyenne sur l'ensemble de la période 1952-2018) 67

Illustration 60 – Evolutions de la vitesse de recul moyenne des falaises de la façade occidentale de la Pointe du Bile, uniquement au niveau du camping et des parcelles située juste au Nord de ce dernier (la ligne orange représente la vitesse de recul moyenne sur l'ensemble de la période 1952-2018) 67

Illustration 61 – Confrontation entre les vitesses de recul globales dans le secteur de la Poudrantais-Maresclé pour chaque période (en haut) et les indicateurs de pluviométrie (au milieu) et de niveau marin (en bas) 68

Illustration 62 - Vitesses de recul de la position des falaises et du trait de côte de la Pointe du Bile à Pont-Mahé (la représentation cartographique pivotée en haut est approximativement calée avec la courbe des vitesses en bas) 69

Illustration 63 – Vitesses de recul de la position des falaises et du trait de côte entre la Pointe du Bile et Pont-Mahé sur les périodes 1952-1962, 1962-1968, 1968-1974 70

Illustration 64 – Vitesses de recul de la position des falaises et du trait de côte entre la Pointe du Bile et Pont-Mahé sur les périodes 1974-1977, 1977-1982, 1980-1991 71

Illustration 65 – Vitesses de recul de la position des falaises et du trait de côte entre la Pointe du Bile et Pont-Mahé sur les périodes 1991-2000, 2000-2009, 2009-2016 72

Illustration 66 – Vitesses de recul de la position des falaises et du trait de côte entre la Pointe du Bile et Pont-Mahé sur la période 2016-2018 73

1. Introduction et objectifs

Suite aux récents éboulements côtiers qui se sont produits en mai 2018 sur les falaises de la commune de Pénestin, la Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Morbihan (DDTM 56) a demandé au BRGM Bretagne une étude plus approfondie sur ces phénomènes récurrents d'éboulement des falaises de la commune. En effet, ces falaises meubles présentent certainement des reculs parmi les plus importants de Bretagne.

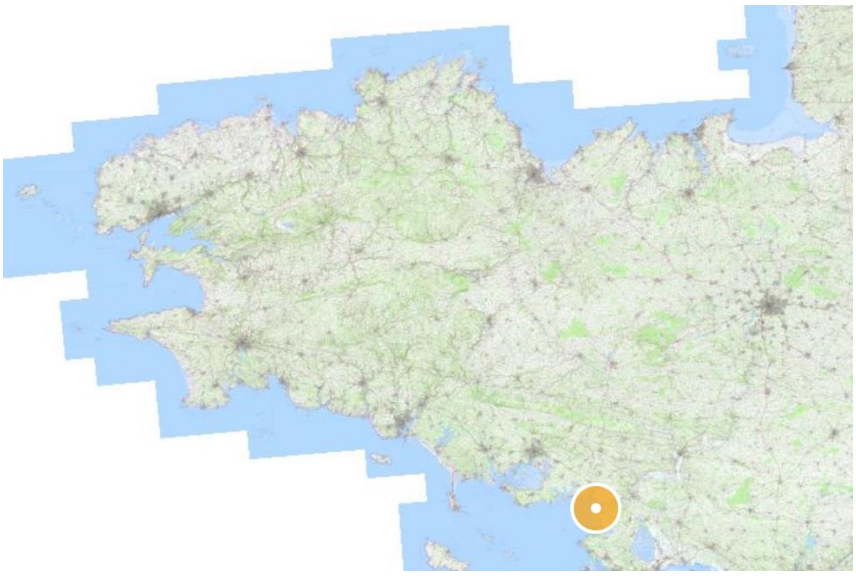


Illustration 1 - Localisation de la commune de Pénestin (www.geoportail.gouv.fr)

Le BRGM Bretagne a donc proposé un programme d'étude en trois phases nommé PENEBOCO (PENestin : EBOulements COtiers). Ce programme d'études fait suite à une précédente étude réalisée par le BRGM Bretagne (Schroëtter, 2013), dont l'objectif principal était de déterminer si la fissuration des bâtiments dans le secteur de la Mine d'Or pouvait être liée recul de la falaise dans ce secteur ou si cette sinistralité s'expliquait par des phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux.

Le programme PENEBOCO s'articule en 3 phases :

- ***Opération 1*** : Evolution de la cinématique passée des éboulements côtiers et évènements climatiques (Analyse de la position des falaises au cours du temps à partir de photographies aériennes anciennes et récentes et comparaison avec les conditions de forçage météo-océaniques) ;
- ***Opération 2*** : Evolution de la cinématique actuelle de la falaise de la Mine d'Or et conditions climatiques contemporaines (Suivi vidéo de la falaise et des éboulements pour une meilleure compréhension des mécanismes) ;
- ***Opération 3*** : Synthèse des opérations précédentes et projection de la position de la falaise de la Mine d'Or vers un horizon à 100 ans en tenant en compte l'augmentation du niveau de mer.

Le présent rapport synthétise les travaux de l'opération 1 (Evolution de la cinématique passée des éboulements côtiers). Quatre sites (Illustration 1) ont été analysés sur la commune de Pénestin dans le cadre de cette opération, en concertation avec la mairie de Pénestin et la DDTM 56 :

- La falaise de la Mine d'Or, sur la plage du même nom, qui se caractérise par des éboulements très fréquents et un recul important (il s'agit du site principal qui a motivé la réalisation de cette étude) ;
- Le secteur de la Poudrantais et du Maresclé, sur lequel la mairie de Pénestin a manifesté un certain nombre d'inquiétudes ;
- Le secteur de la Pointe du Bile, et notamment de son camping qui pourrait être menacé par le recul des falaises ;
- Le secteur allant de la Pointe du Bile à Pont-Mahé, sur lequel le trait de côte est particulièrement mobile.

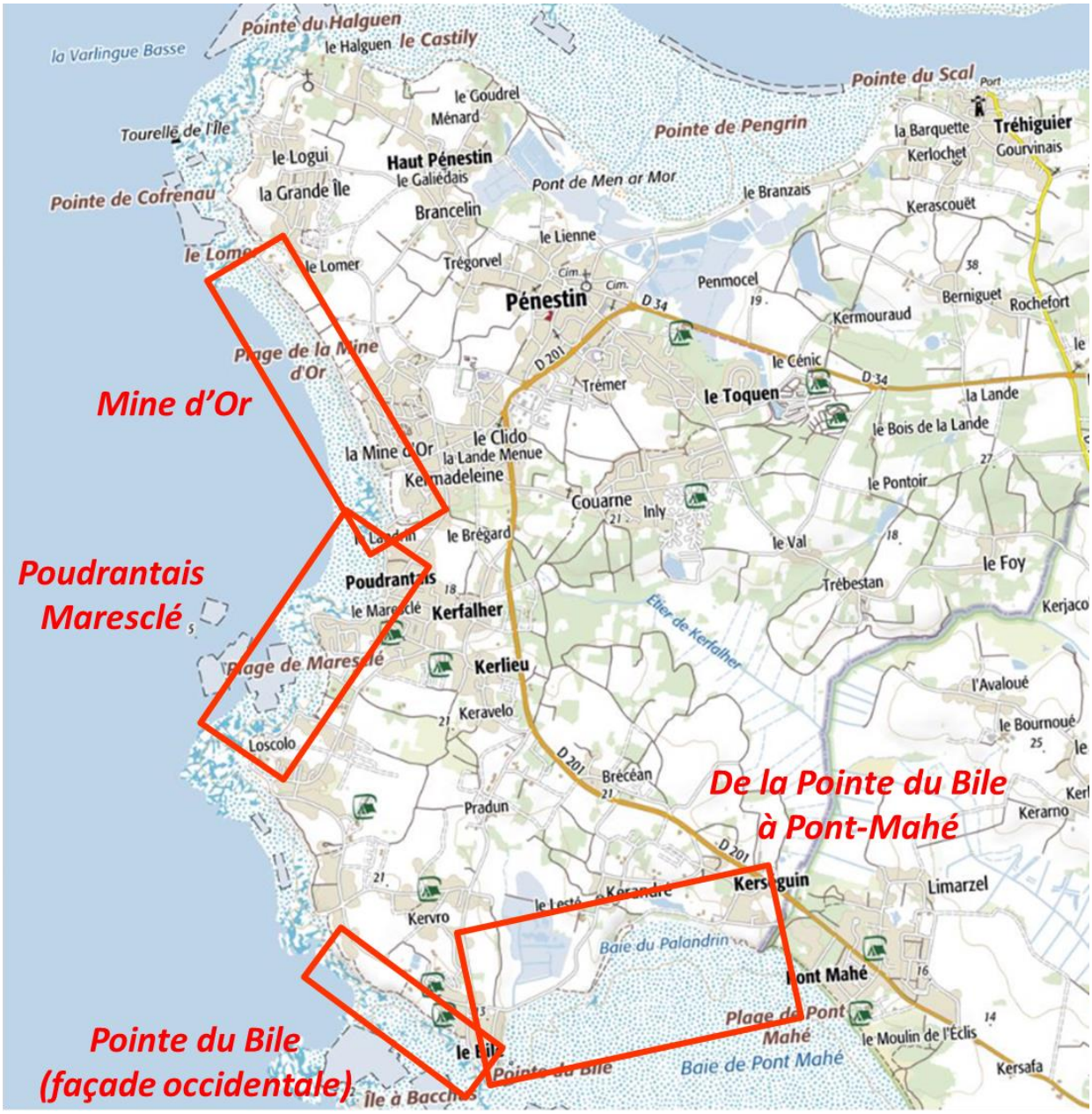


Illustration 2 – Carte de la commune de Pénestin (www.geoportail.gouv.fr) et localisation des 4 sites d'étude retenus

.

2. Contexte général

2.1. ETUDES ANTERIEURES

Le littoral et les falaises de Pénestin, sont connus pour leur recul depuis au moins une cinquantaine d'années.

Les premiers travaux sont ceux de géomorphologues des côtes et de l'avant côte de Bretagne Sud, comme Ferronière (1921), Guilcher (1948), ou encore Pinot (1974) et Vanney (1977).

Plus récemment, les chercheurs de l'Université de Bretagne Occidentale, de Géosciences Rennes ou de l'Université de Bretagne Sud se sont de nouveau penchés sur ces phénomènes littoraux, par exemple à l'aide d'imagerie stéréoscopique et du scanner laser 3D pour mesurer l'érosion de cette falaise (voir par exemple Van Vliet-Lanoe *et al.*, 1997, Bonnet, 1998, Bonnet et Menier, Menier *et al.*, 2009 & 2010).

Des travaux plus récents ont porté sur la morphologie des côtes de Bretagne Sud et sur l'impact des infrastructures touristiques sur l'évolution des falaises de Pénestin (par exemple Pian *et al*., 2011), qui ont évalué le recul de celles-ci à plusieurs dizaines de centimètres par an, voire plus de 1 mètre par an suivant les secteurs. Pénestin a également fait partie d'un site d'étude du programme de recherche de l'ANR COCOCRISCO, mené par des universitaires de l'Université de Bretagne Occidentale à Brest.

Par ailleurs, des géologues comme Brault *et al***.**, (2001) et Van Vliet-Lanoë *et al*. (2009) se sont intéressés à la géologie des falaises en interprétant les déformations observées dans les terrasses comme des déformations tectoniques liées à la séismicité quaternaire.

Illustration 3 - Falaise de la Mine d'Or au niveau de Pénestin (56) : les micaschistes ne sont plus ici reconnaissables, laissant place à des argiles et limons kaoliniques d'altération

Schroëtter (2013) s'est intéressé à la sinistralité qui affectait un certain nombre de maisons situées non loin de la falaise de la Mine d'Or et à la Poudrantais, avec pour objectif d'affiner la cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux sur la commune de Pénestin et de vérifier si cette sinistralité pouvait s'expliquer par le recul de la falaise de la Mine d'Or ou uniquement par les phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux. Dans ces premiers travaux, seule la vitesse de recul de la falaise sur une période semi-séculaire, entre 1962 et 2000, avait été évaluée et des données hydrogéologiques avaient été acquises sur la commune, avec pour objectif de trouver une explication sur les fissurations présentes sur certaines habitations en surplomb. Les modalités de rupture de la falaise avaient été précisées grâce à ces travaux.

Dans le détail, l'étude comprenait des résultats importants pour la compréhension de l'aléa « mouvement de terrain » de la commune à travers :

- Une cartographique géologique de détail, valable à l'échelle du 1/10 000, réalisée afin de caractériser les formations géologiques superficielles susceptibles d'entrainer des mouvements de terrain ; cette cartographie a permis de mettre en évidence une formation géologique argileuse (qui n'existait pas jusqu'à présent sur les cartes géologiques), située au droit des habitations fissurées, et présentant une susceptibilité forte au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux ;
- L'installation de dispositifs de suivi des mouvements de la falaise (2 inclinomètres, qui ont montré que le recul de la falaise se faisait par des mouvements suivant des plans verticaux, avec un recul de 1 à 2 m par évènement, et non par des mouvements de type « glissement rotationnel » enracinés sur un niveau de décollement principal) et des fissures sur des habitations sinistrées (jauges « saugnac », qui ont montré des battements des fissures en ouverture/fermeture, respectivement pendant les périodes sèches et humides) ;
- La mise en évidence de deux niveaux phréatiques superposés : un niveau supérieur situé dans les terrasses alluviales quaternaires et un niveau inférieur dans les altérites meubles sous-jacentes au stade « allotérite » ; ces deux niveaux phréatiques permettaient de comprendre le fonctionnement de la rupture au niveau de la falaise, avec une mise en charge de la nappe inférieure qui entraine une liquéfaction des argiles d'altération de pied de falaise et son éboulement (Illustration 4).

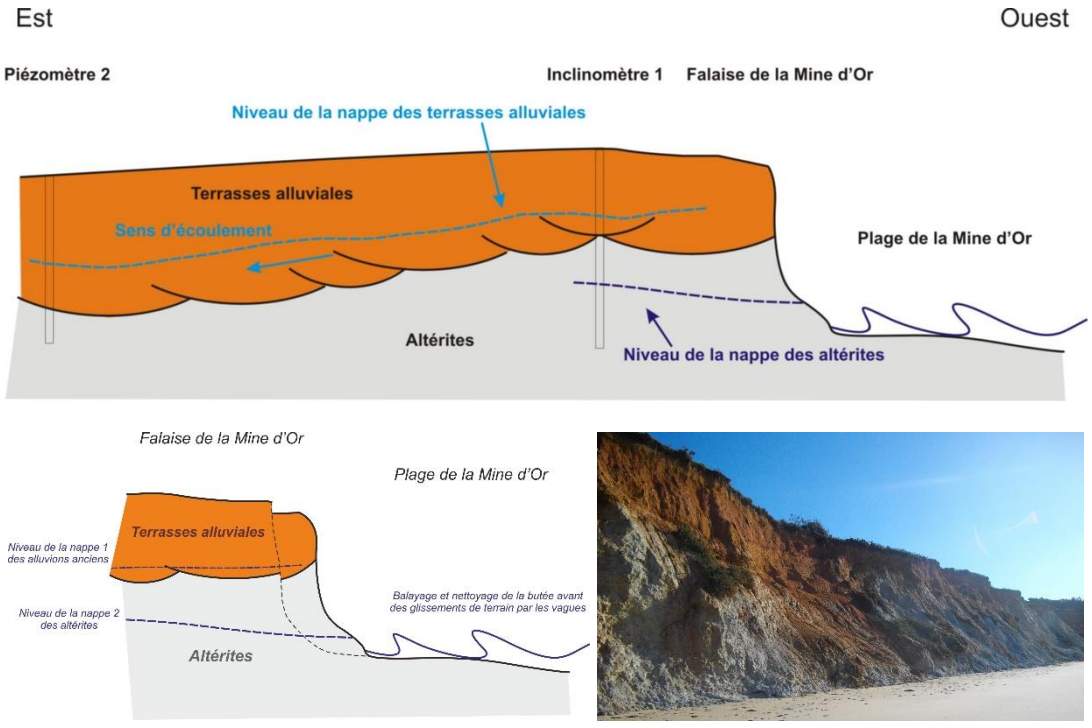


Illustration 4 - En haut, coupe schématique Est-Ouest au niveau de la falaise montrant la relation entre géologie et hydrogéologie ; En bas, schéma de principe des éboulements côtiers : la nappe contenue dans les altérites entraine leur liquéfaction qui fait s'ebouler un pan de falaise de 1 à 2 m (Schroetter, 2013)

En complément, concernant la cinématique des éboulements de la falaise :

- Les processus de recul de la falaise sont en relation avec différentes géométries des falaises tels que
  - un pied meuble et une tête résistante de falaise produisant des éboulements par pan,
  - un pied et une tête résistant, produisant des ravinements en tête

- et enfin, des falaises fracturées, produisant des éboulements très localisés le long des discontinuités tectoniques ;

- La cinématique de la falaise a été évaluée au maximum de l'ordre de 0,75 m/an, au niveau du Sud de la Mine d'Or (Illustration 5), alors que sur la partie estuarienne de la commune, un déplacement « *long-shore* » de matériaux sablo-graveleux avait été observé depuis l'océan vers l'amont du fleuve. Enfin, un recul des marqueurs géomorphologiques de 0,625 à 0,75 m/an avait été observé dans le fond de la Baie du Bile (similaire aux vitesses mesurées à la Mine d'Or).

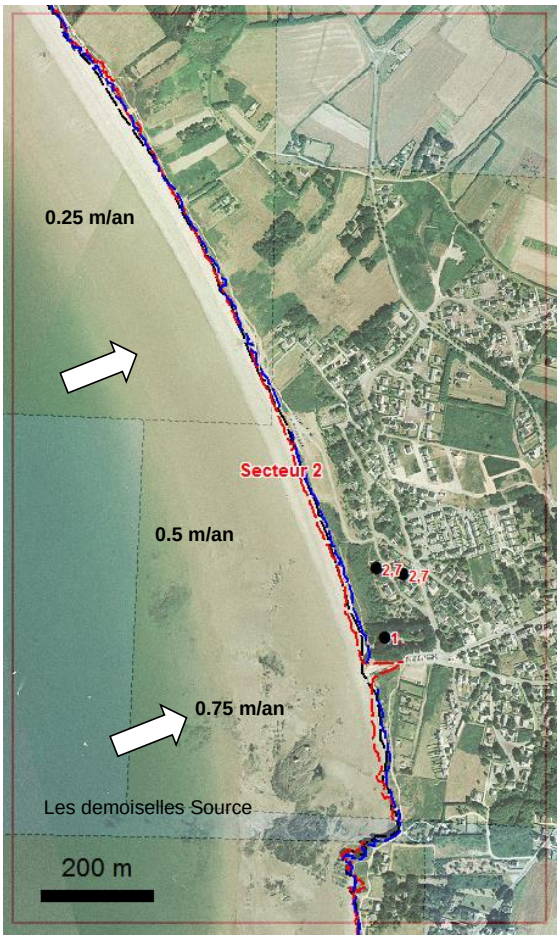


Illustration 5 - Evolution du trait de côte à la Mine d'Or entre 1962 et 2000 (le trait noir pointillé est le trait HistoLittV2.0 ; le rouge pointillé est le trait de 1962 et le bleu pointillé est le trait de 2000, Schroëtter, 2013)

Par ailleurs, d'autres digitalisations de traits de côte (souvent plus globales) ont été réalisées :

- La communauté d'agglomération dont fait partie Pénestin, Cap Atlantique, a déjà réalisé un certain nombre de digitalisations de traits de côte au niveau de la Mine d'Or, du Maresclé, sur la Pointe du Bile et vers Pont Mahé, sur des photographies aériennes de 1965, 1974, 1981, 1993, 2004 et 2016. Ces données, mises à disposition par Cap Atlantique, ont été utilisées pour vérifier la plausibilité de certains résultats.
- Dans le cadre de sa thèse à l'Université de Bretagne Occidentale, Blaise (2017) a digitalisé le trait de côte de plusieurs centaines de plages bretonnes à deux dates différentes (photographies anciennes des années 50 et photographies récentes des années 2010), et en a tiré des vitesses de recul sur toutes ces plages à l'échelle de la Bretagne. Sur Pénestin, cette analyse concerne des traits de côte de 1952 et de 2010.

Ces résultats, repris par Le Roy et al. (2020), indiquent notamment sur Pénestin des vitesses calculées de quelques centimètres à 25 cm/an au Nord de la Mine d'Or à 60-80 cm/an au Sud de la Mine d'Or.

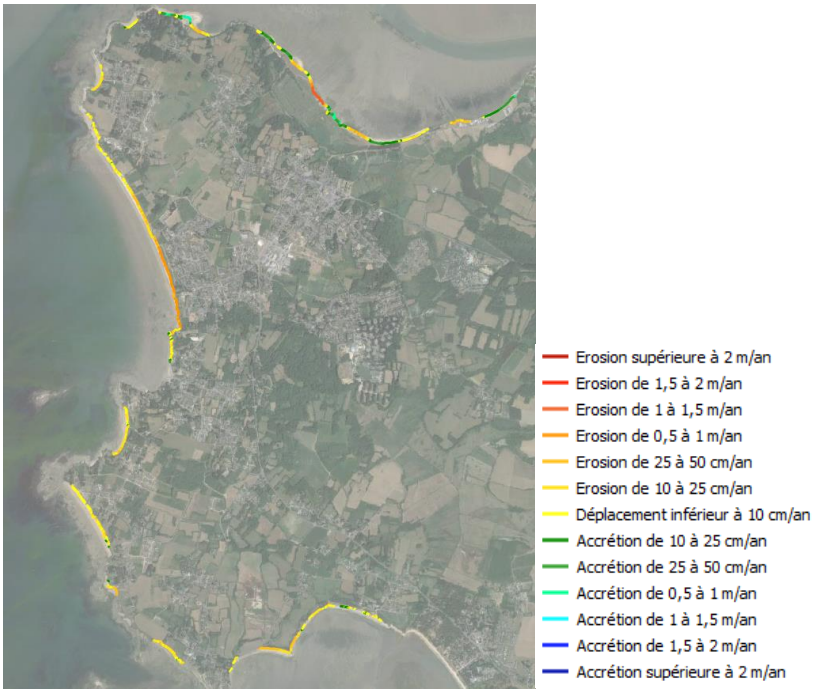


Illustration 6 – Vitesses de recul du trait de côte sur la période 1952-2010 sur la commune de Pénestin (d'après les données de Blaise, 2017)

- Le CEREMA a produit à l'échelle nationale une analyse diachronique du même type, baptisée INE (Indice National d'Erosion, Hédou *et al.*, 2018), et basée sur des profils disposés tous les 200 m. Au niveau de Pénestin, l'analyse porte sur la période 1952-2011 ; les traits de côte associés ne sont pas librement disponibles, mais on peut retenir que l'INE indique des reculs compris entre 0 et 0,5 m/an sur une large partie Nord de la Mine d'Or, et de 0,5 à 1,5 m/an autour de l'accès enroché à la plage (Illustration 7).

Illustration 7 – Indice National d'Erosion (INE) sur la période 1952-2011 sur la commune de Pénestin (d'après les données de www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr)

Malgré ces analyses, les éboulements côtiers de la commune de Pénestin n'ont pas bénéficié d'une étude poussée sur leurs cinématiques en relation avec les agents météo-marins (climatiques), ni d'une analyse de leurs modes de fonctionnement.

Enfin, très récemment, dans le cadre d'une étude sur la stratégie départementale de gestion du trait de côte du Morbihan (Landreau, 2018), le CEREMA a récemment produit des projections de la position du trait de côte à différentes échéances (2025, 2050, 2100). La méthodologie mise en œuvre s'appuie sur une certain nombre d'hypothèses (élévation du niveau de la mer, hypothèse de conservation des pentes de plages cumulée aux reculs estimés par l'INE pour les côtes meubles, recul forfaitaire pour les côtes rocheuses). Au niveau de Pénestin, les valeurs de recul estimées dans la précédente étude du BRGM ont été considérées, sans toutefois effectuer de distinctions particulières selon la géologie locale, du fait de l'échelle départementale considérée. Dans la phase 2 de cette étude menée par le CEREMA (définition des modes d'intervention), le site de la plage de Mine d'Or a par ailleurs été sélectionné (Illustration 8).

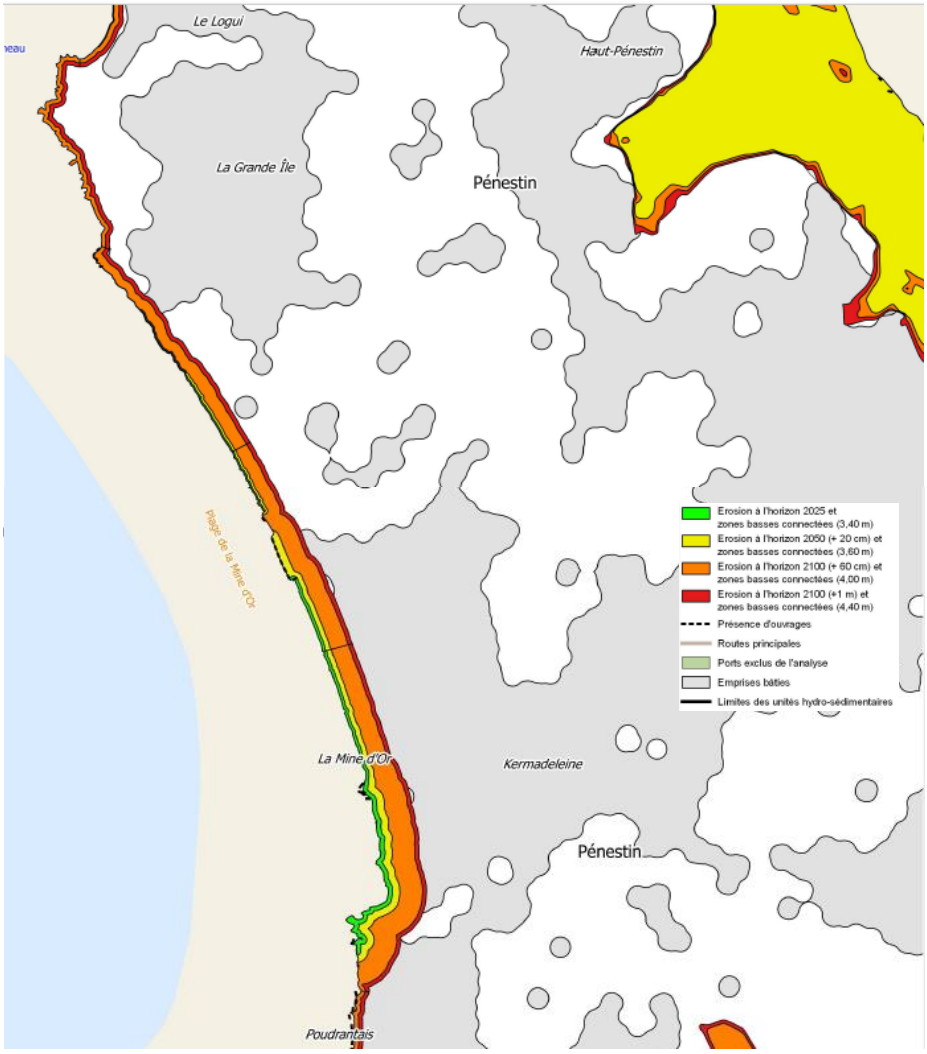


Illustration 8 - Aperçu des projections du trait de côte au niveau de la plage de la Mine d'Or (Landreau, 2018)

2.2. GEOMORPHOLOGIE DU TRAIT DE COTE DE LA COMMUNE PENESTIN

La caractérisation de la géomorphologie du trait de côte a été réalisée sur le département du Morbihan par Le Roy *et al.* (2020), et a bénéficié pour la commune de Pénestin des approfondissements permis par l'étude PENEBOCO. Cela a d'ailleurs conduit à individualiser une formation spécifique au Sud de la falaise de la Mine d'Or (Terrasses anciennes de type 2, constituées d'une importante épaisseur d'altérites surmontées de terrasses alluviales anciennes) ; cette formation, qui n'a été reconnue que sur ce secteur dans le département du Morbihan, est d'ailleurs la seule formation de côtes à falaises du département à avoir été classée au final comme ayant une prédisposition élevée à l'érosion (Le Roy *et al.*, 2020). La caractérisation de la géomorphologie du trait de côte est par ailleurs complétée par la notion d'avant trait de côte (nature de l'estran) et par la notion d'arrière trait de côte, qui représente les zones *a priori* vulnérables aux aléas côtiers, selon qu'ils s'agissent de zones basses (potentiellement submersibles) ou de formations géologiques meubles (potentiellement érodables). Ces résultats, réalisés à l'échelle du 1/15 000, sont illustrés de façon synthétique à l'Illustration 9.

Par ailleurs, il convient de noter que le niveau de la mer peut en beaucoup d'endroits atteindre relativement fréquemment le pied des falaises en contexte de grandes marées ou par tempête.

Ainsi par exemple, l'Illustration 10 montre un aperçu du Sud de la falaise de la Mine d'Or pendant un petit coup de vent, tandis que l'Illustration 11 présente la position des niveaux des pleines mers de vives eaux et de la plus haute mer astronomique au pied des falaises de la Mine d'Or et de la Poudrantais. Dans les secteurs où la mer peut ainsi atteindre assez facilement le pied de la falaise, les matériaux tombés sur les plages suite aux éboulements côtiers peuvent potentiellement être assez rapidement « nettoyés » par la mer, ce qui contribue à exposer à nouveau le pied de la falaise qui peut de nouveau être attaquée par la mer. A contrario, on remarque que dans la partie Nord de la Mine d'Or, au Nord de la Source, le niveau des plus hautes mers astronomiques n'atteint pas tout à fait le pied de la falaise, ce qui pourrait expliquer la présence d'importantes accumulations de matériaux éboulés constituant un talus végétalisé en pied de falaise, et semblant stabiliser et protéger cette dernière de l'érosion.

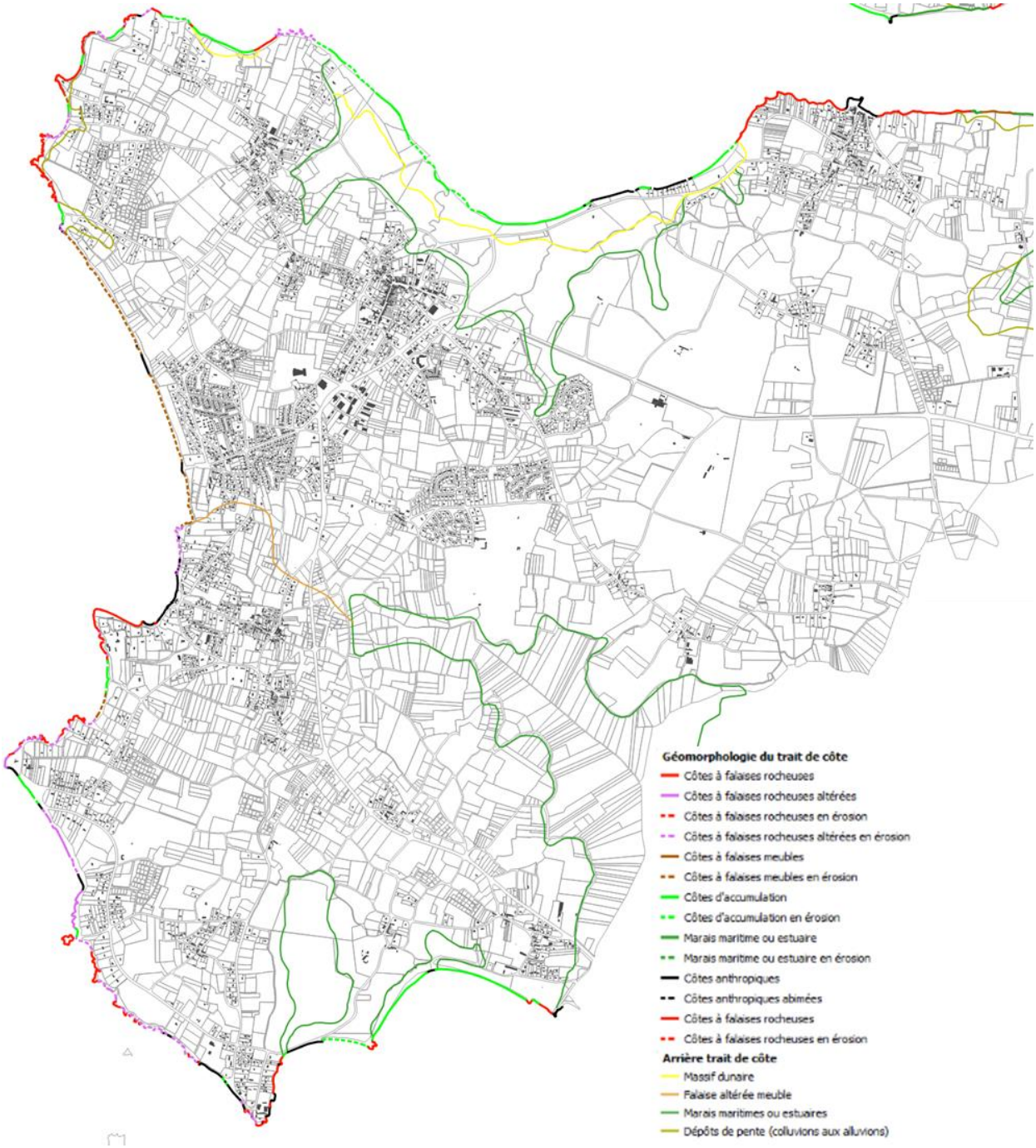


Illustration 9 – Géomorphologie simplifiée du trait de côte et arrière trait de côte sur la commune de Pénestin

Illustration 10 – Falaise de la Mine d'or depuis l'accès enroché au Sud pendant un coup de vent (tempête Ines du 13/02/2020), 01h40 avant la pleine mer (vue vers le Nord à gauche et vers le Sud à droite)

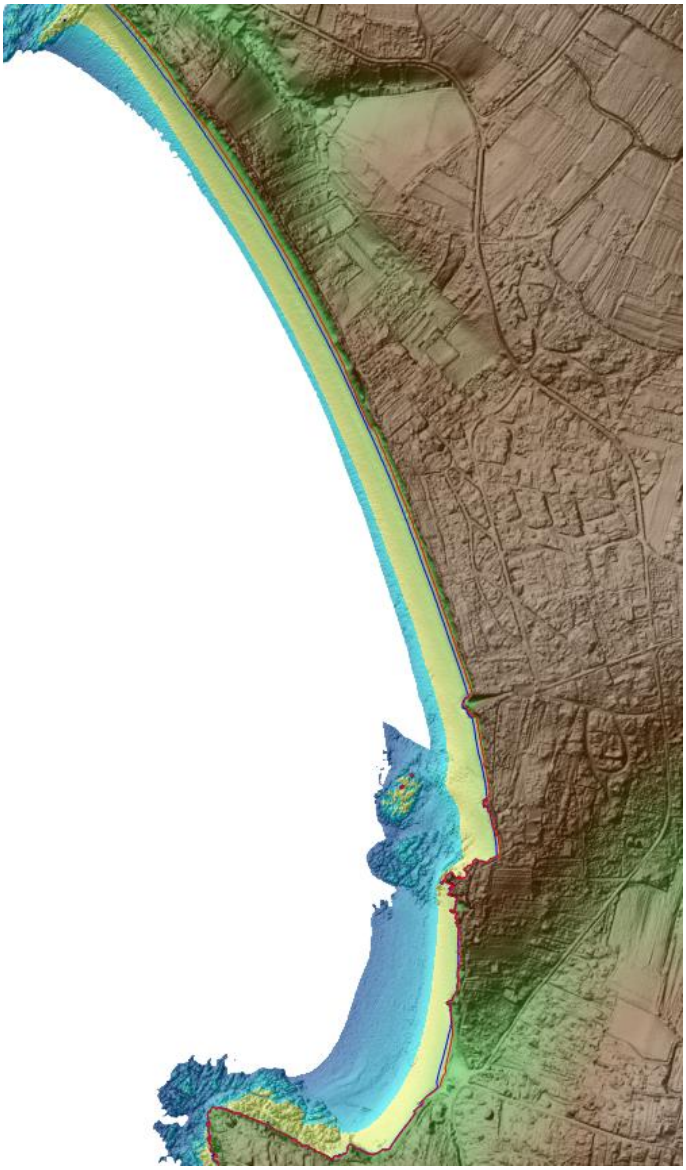


Illustration 11 – Topographie du secteur de la Mine d'Or et de la Poudrantais (données 2011 du RGE Alti ©IGN) ; les lignes bleue et rouge représentent respectivement le niveau des pleines mers de vives eaux et le niveau des plus hautes mers astronomiques (2,62 et 3,43 m NGF à Tréhiguier d'après SHOM, 2019)

2.3. CONTEXTE OCEANOGRAPHIQUE

2.3.1. Courants et régime de marée

Le Morbihan, tout comme le reste de la Bretagne, est soumis à un régime de marée macrotidal semi-diurne (marnage supérieur à 4 m, deux basses mers et 2 pleines mers d'amplitudes similaires par jour). Lors des coefficients de marée maximum, le marnage peut atteindre plus de 6 m à l'Est du département.

Dans la baie de Quiberon, les vitesses des courants de marées sont généralement inférieures à 1 nœud, sauf secteurs particuliers (entrée du Golfe du Morbihan, passage de la Teignouse…) comme illustré à l'Illustration 12.

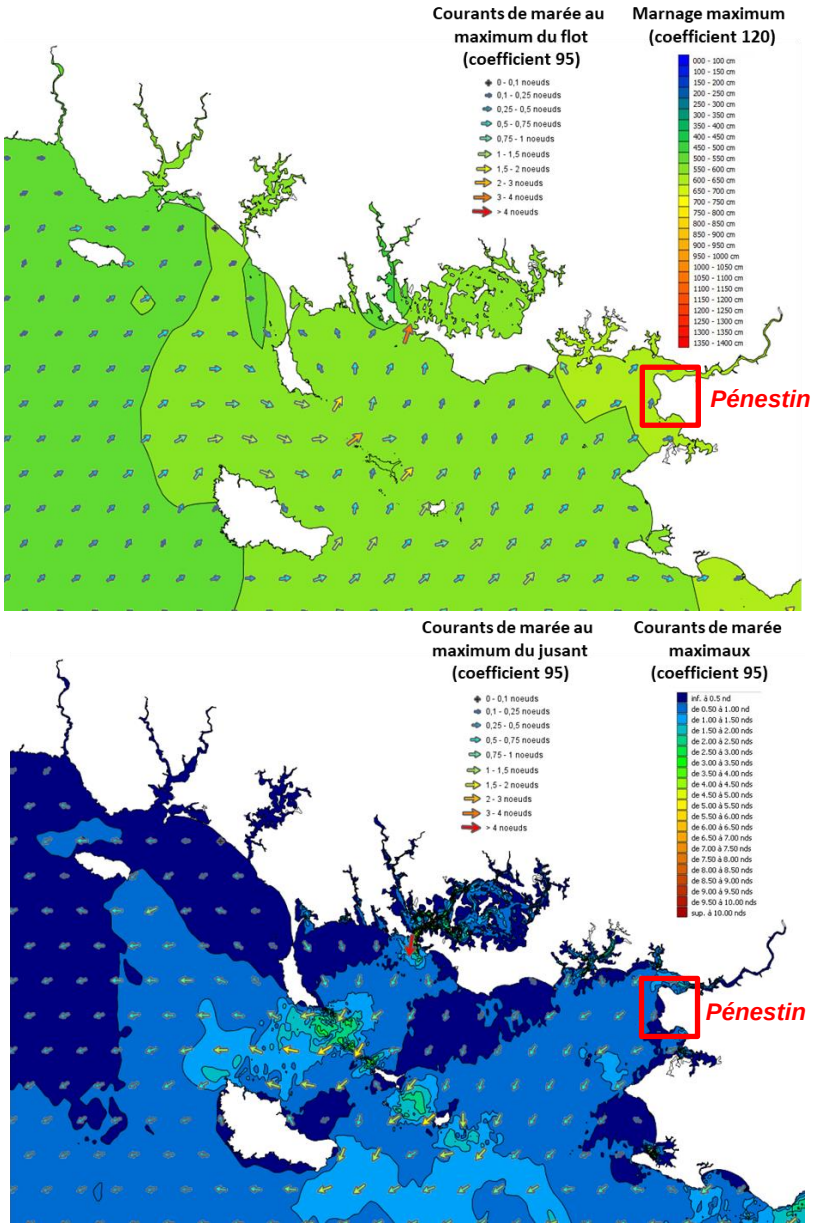


Illustration 12 - Caractéristiques des marées dans le Morbihan : en haut, marnage maximum pour un coefficient 120 et courants de marée au maximum du flot pour un coefficient 95 ; en bas, vitesses maximales des courants de marée pour un coefficient 95 et courants de marée au maximum du jusant pour un coefficient 95 (Source : data.shom.fr)

2.3.2. Instrumentation et mesures in situ

Peu d'instruments sont installés de manière pérenne au niveau du littoral morbihannais pour un suivi continu des conditions océaniques :

- 2 marégraphes du réseau REFMAR, géré par le SHOM, permettent le suivi en temps réel du niveau marin (données consultables sur data.shom.fr) :
    - Le marégraphe de Port-Tudy, sur l'île de Groix, mesure en continu les niveaux marins depuis le 10/08/1986 ;
    - Le marégraphe du Crouesty, à Arzon, mesure en continu les niveaux marins depuis le 14/03/1996.
- 2 houlographes du réseau CANDHIS, géré par le CEREMA, permettent le suivi en temps réel des conditions de vagues (données consultables sur candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr) :
    - Le houlographe de Belle-Ile (bouée 05602), implanté à environ 4 km au Sud-Ouest des côtes de Bangor et à environ 24 km du continent, par 45 m de fond, mesure en continu les houles depuis le 18/10/2010.
    - Le houlographe du Plateau du Four (bouée 04403, opérée en partenariat avec l'Ecole Centrale de Nantes), implanté à environ 12 km au Sud-Sud-Est d'Hoëdic et sensiblement à mi-chemin entre Belle-Ile et la pointe du Croisic, à 28 km de la presqu'île de Rhuys, par 30 m de fond, mesure en continu les houles depuis le 01/04/2008.
- D'autres éléments ponctuels peuvent être consultés en cas de besoin (mesures de niveaux marin limitées dans le temps, consultables auprès du SHOM notamment, campagnes de mesures houlographiques temporaires bancarisées par le réseau CANDHIS : 2 campagnes affichées dans le Morbihan : Gâvres, en Novembre-Décembre 1997, et le Croisic d'Avril à Juin 2003).
- Pour ce qui concerne la partie la plus à l'Est du département du Morbihan, dont fait partie Pénestin, on peut noter également l'existence de marégraphes installés et gérés par le Grand Port Maritime de Nantes-Saint-Nazaire (en collaboration avec le SHOM) au niveau de l'estuaire de la Loire.

La localisation de ces points de mesure est présentée à l'Illustration 13.

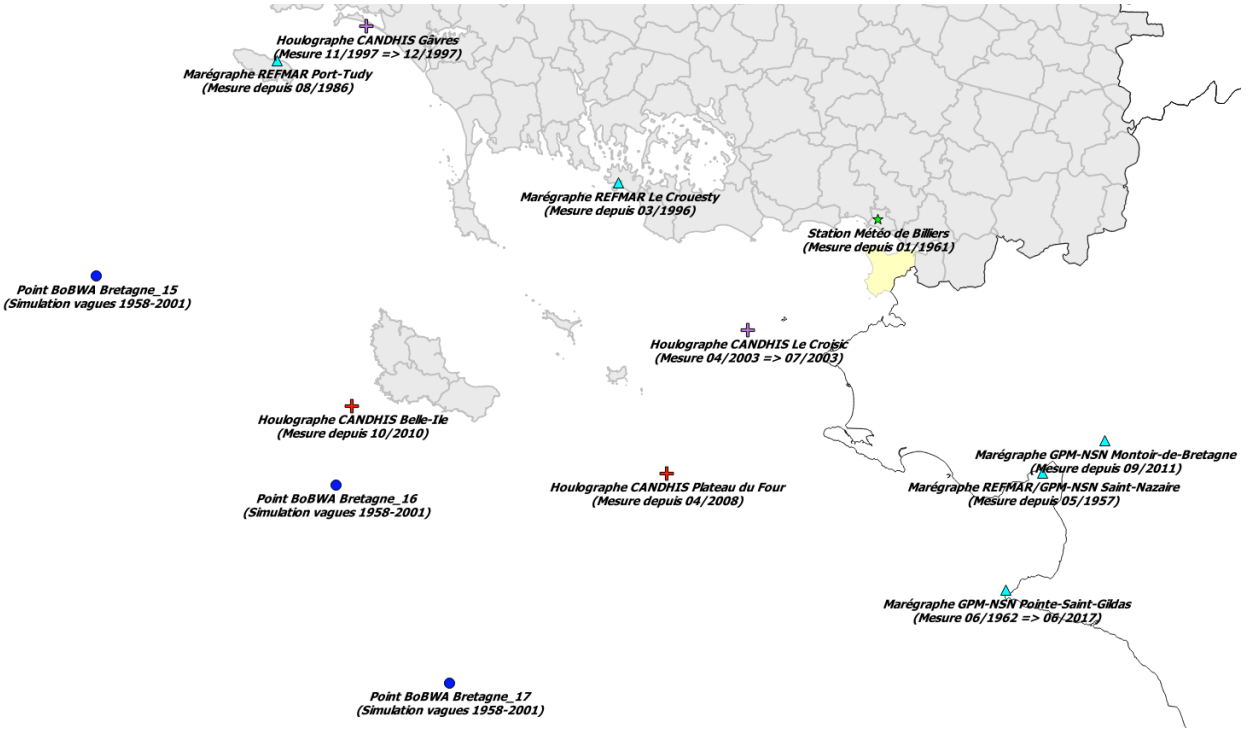


Illustration 13 – Localisation des mesures disponibles au niveau du Morbihan (marégraphes, houlographes) et des points d'analyse statistique des vagues à partir de la base de données BoBWA (commune de Pénestin en jaune pâle)

2.3.3. Niveaux marins et surcotes

Les aléas littoraux sont le plus souvent associés à des surélévations temporaires du niveau de la mer lors de tempêtes. Ces surcotes marines sont contrôlées par deux processus principaux (Illustration 14) :

- **La surcote atmosphérique** : le passage d'un important système dépressionnaire (tempête) est caractérisé par des variations du niveau marin selon deux mécanismes :
    - La chute de pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau. C'est le phénomène de *baromètre inverse* : une diminution d'1 hPa équivaut à une élévation d'1 cm du plan d'eau (valeurs pour une situation théorique d'un plan d'eau infini et d'une pression atmosphérique uniforme).
    - A cela s'ajoute l'effet du vent, qui en fonction de son intensité et de sa direction est susceptible de provoquer des accumulations d'eau sur la bande littorale.

  La surélévation du plan d'eau provoquée par la chute de pression et l'action du vent correspond à la surcote atmosphérique. La combinaison de la marée et de cette surcote atmosphérique génère le niveau de la mer « au repos » (Illustration 14).
- **La surcote liée aux vagues (« *wave setup* »)** : à l'approche de la côte, les vagues générées au large déferlent en transférant leur énergie sur la colonne d'eau, dont une partie provoque une surélévation du niveau moyen du plan d'eau (le « *wave setup* » ou surcote liée aux vagues) qui peut localement atteindre plusieurs dizaines de centimètres, notamment le long des plages et potentiellement dans l'ensemble des plans d'eau plus fermés (ports…).

Le **niveau moyen du plan d'eau** (ou niveau statique) lors d'une tempête résulte de la contribution de la surcote atmosphérique, de la surcote des vagues et de la marée (Illustration 14).

Enfin, le niveau instantané du plan d'eau dépendra du jet-de-rive (*swash*), c'est-à-dire le flux et le reflux des vagues sur l'estran. On appelle *runup* la cote maximale atteinte par la mer au-dessus d'un niveau de référence (ex. le zéro hydrographique).

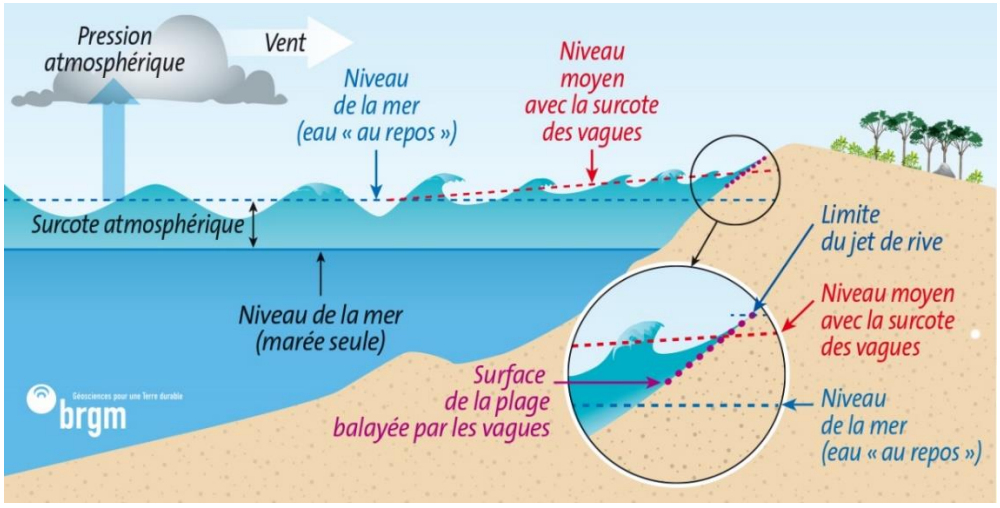


Illustration 14 - Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.

La combinaison de la surcote atmosphérique et de la surcote liée aux vagues avec des forts coefficients de marées et/ou des pleines mers peut considérablement surélever l'altitude du plan d'eau par rapport au niveau marin prédit (marée seule), conduisant à des niveaux extrêmes qui peuvent aggraver les aléas côtiers (submersion et érosion marines).

Les statistiques des niveaux marins extrêmes ont été calculés par le SHOM-CETMEF (2012) sur un certain nombre de ports de référence, en s'appuyant sur une convolution entre le signal de surcote mesuré et les niveaux de pleine-mer de marée astronomique. Dans le Morbihan, seul le port de Port-Tudy a fait l'objet de ce traitement (Illustration 15), mais l'interpolation des résultats avec d'autres ports (dont des ports secondaires, correspondant à des enregistrements du niveau marin de plus courte durée) permet de visualiser la répartition géographique de ces niveaux marins extrêmes (Illustration 16). Ces résultats montrent que le niveau marin centennal au niveau de Pénestin doit être de l'ordre de 3,80 m NGF (pour mémoire, d'après le Référentiel Altimétrique Maritime du SHOM, 2019, le niveau des plus hautes mers astronomiques à Tréhiguier, sur la commune de Pénestin, se situe à 3,43 m NGF, soit 30 à 40 cm sous ce niveau centennal).

Période de retour	**5 ans**	**10 ans**	**20 ans**	**50 ans**	**100 ans**
Niveau marin à Port-Tudy	3,28 m NGF	3,35 m NGF	3,42 m NGF	3,51 m NGF	3,58 m NGF
Niveau marin à la Pointe de Saint-Gildas	3,42 m NGF	3,49 m NGF	3,56 m NGF	3,66 m NGF	3,73 m NGF

Illustration 15 - Niveaux extrêmes de pleines mers (en m NGF) à Port-Tudy et à la Pointe de Saint-Gildas (SHOM-CETMEF, 2012)

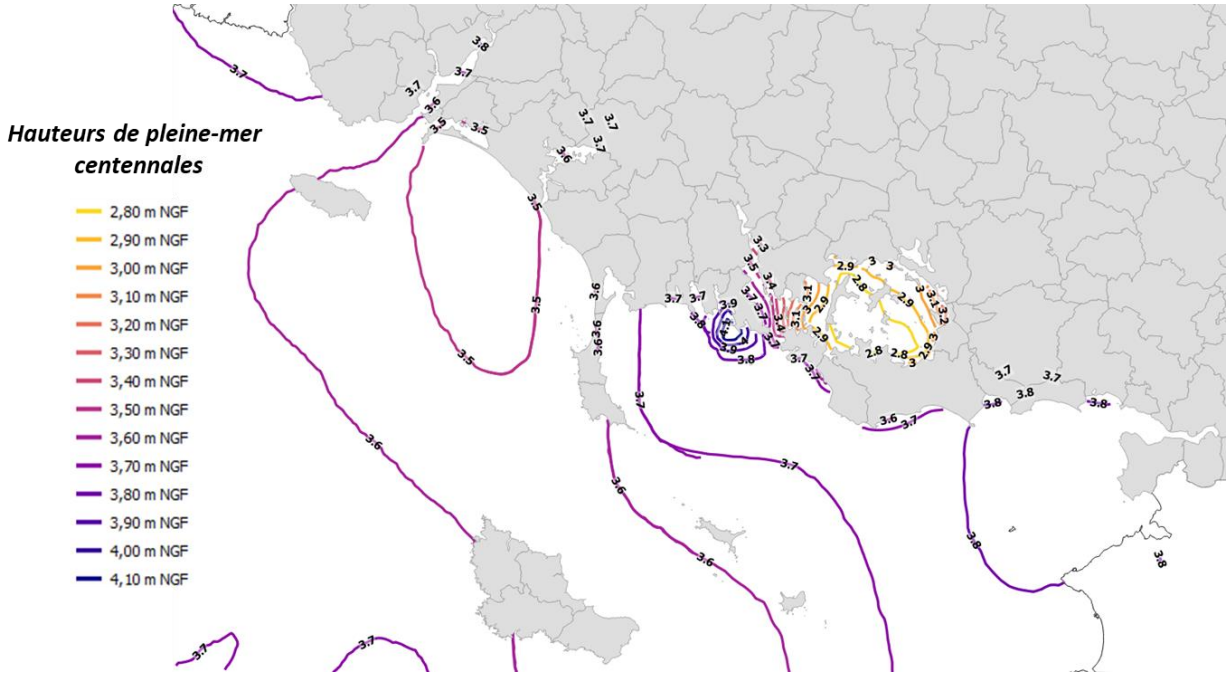


Illustration 16 - Niveaux centennaux de pleine mer au large du Morbihan (d'après SHOM-CETMEF, 2012)

2.3.4. Etat des mers

Bulteau *et al.* (2013) ont analysé les valeurs extrêmes des vagues le long de la côte Atlantique et de la Manche à partir de la base BoBWA (Charles *et al.*, 2012) simulant les conditions de mer, entre 1958 et 2001. A l'échelle de la Bretagne, les hauteurs significatives des vagues au large du Morbihan s'avèrent assez similaires à celles qui affectent les côtes du Finistère Nord et du Trégor, mais restent sensiblement inférieures à celles qui affectent la pointe bretonne (Illustration 17).

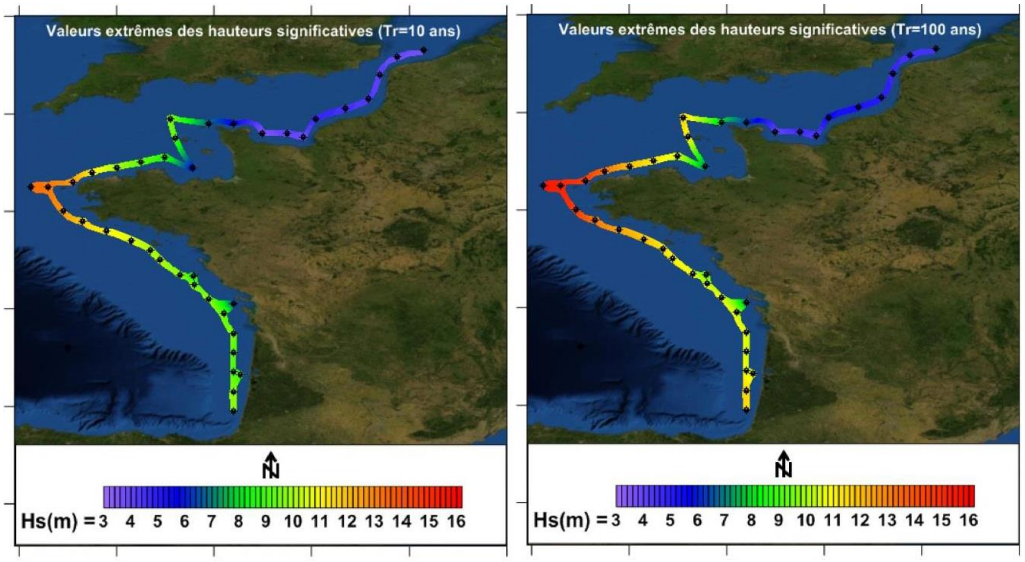


Illustration 17 – Hauteurs significatives des vagues au large pour des périodes de retour de 10 ans (à gauche) et 100 ans (à droite) estimées à partir de la base BoBWA (Charles et al., 2012) sur la période 1958-2001 à pas de temps 6 heures (Bulteau et al., 2013)

L'analyse statistique des données simulées sur des bouées virtuelles implantées dans la simulation permet de calculer les caractéristiques des vagues au large. Le point étudié le plus proche de Pénestin est celui nommé Bretagne_17 par Bulteau et al. (2013). Ce point Bretagne_17 est situé à environ 53 km des côtes (Pointe du Croisic) et à environ 70 km de Pénestin, par 70 m de profondeur, au large de Belle-Ile, Houat et Hoëdic (Illustration 13).

L'analyse statistique sur ce point (Illustration 18) montre que les houles au large font en moyenne de l'ordre de 2 m, et sont la plupart du temps de secteur Ouest, s'orientant parfois légèrement au Sud lors des épisodes intenses.

Les séries temporelles de vagues simulées sur la période 1958-2001 permettent par ailleurs d'identifier quelques événements majeurs en termes de hauteurs significatives de vagues. Il s'agit des tempêtes :

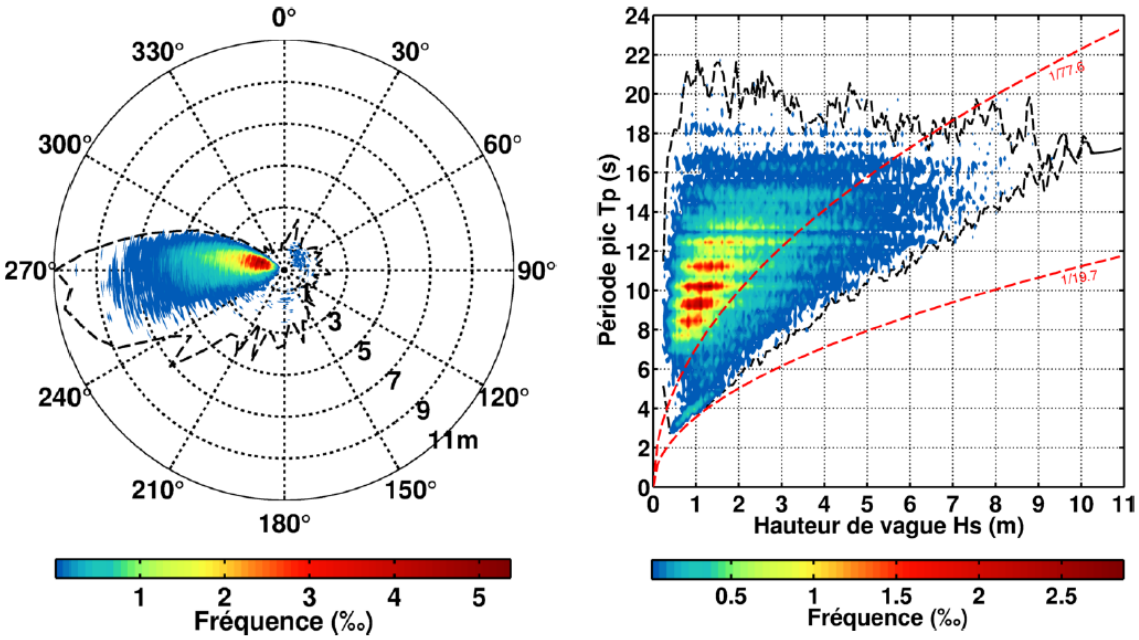
- du 12/02/1990 (vagues de 10,92 m, soit une période de retour décroissant de 57 ans sur ce point) ;
- du 21/01/1971 (vagues de 10,64 m, soit une période de retour de 30 ans) ;
- du 25/02/1989 (vagues de 10,24 m, soit une période de retour de 14 ans) ;
- du 15/12/1979 (vagues de 10,23 m, soit une période de retour de 14 ans) ;
- du 20/01/1965 (vagues de 10,12 m, soit une période de retour de 11 ans) ;
- du 07/12/1959 (vagues de 10,10 m, soit une période de retour de 11 ans) ;

Il convient toutefois de noter que tous ces événements n'ont pas nécessairement causé de dommages à la côte :

- ces événements ne sont globalement pas survenus en périodes de grandes marées, hormis pour les tempêtes du 12/02/1990 et du 07/12/1959 (respectivement des coefficients 94 à 92 et de 102 à 99, contre des coefficients de 35 le 21/01/1971, de 77 à 73 le 25/02/1989, de 49 à 53 le 15/12/1979 et de 55 le 07/12/1959) ;
- ces caractéristiques correspondent à des valeurs importantes au large, mais l'appréhension de leurs impacts potentiels à la côte nécessiterait des simulations plus fines de la propagation des vagues du large à la côte et de leur éventuelle coïncidence avec la pleine-mer.

	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Mode
Hs (m)	0,19	10,92	2,00	1,60	1,08
Dp (°)	0	360	277	281	282
Tp (s)	2,6	-	11,2	11,1	12,3

Hs = hauteur significative ; Dp = direction pic de provenance des vagues (convention nautique) ; Tp = période pic



Période de retour (ans)	Valeur de retour (m)	Intervalle de confiance à 68% (m)	Intervalle de confiance à 95% (m)
1	8,21	[8,12 ; 8,31]	[8,03 ; 8,40]
10	10,04	[9,82 ; 10,26]	[9,61 ; 10,47]
20	10,43	[10,14 ; 10,72]	[9,87 ; 11,00]
50	10,87	[10,46 ; 11,27]	[10,07 ; 11,66]
100	11,14	[10,64 ; 11,65]	[10,16 ; 12,13]

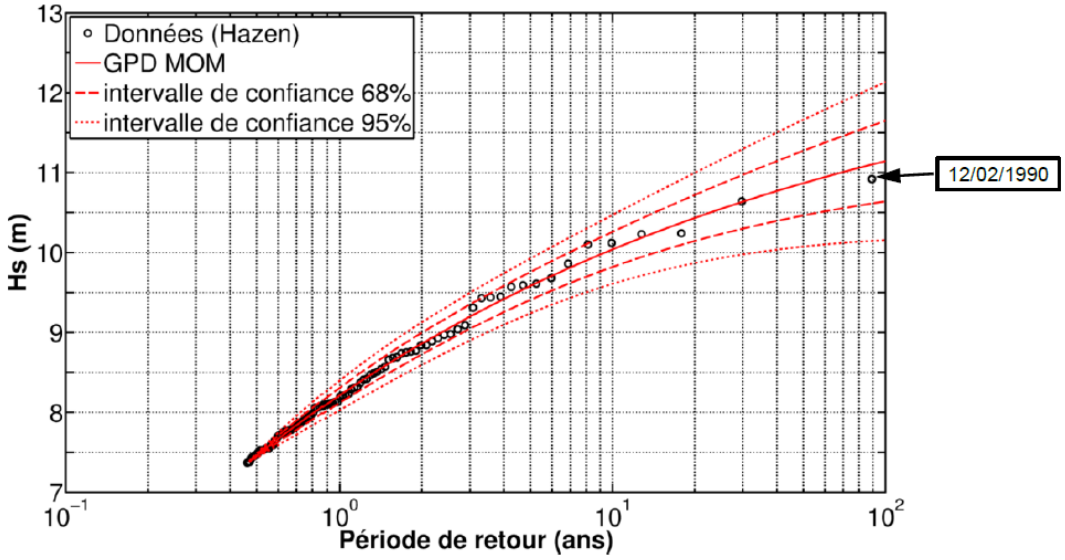


Illustration 18 – Analyse statistique des vagues au point BoBWA Bretagne_17 (Bulteau et al., 2013)

Les enregistrements houlographiques de la base de données CANDHIS permettent d'obtenir le même type d'informations, à partir cette fois-ci de mesures *in situ*.

Par exemple, les enregistrements houlographiques réalisés sur la période 2010 – 2019 à la bouée Belle-Ile (emplacement à l'Illustration 13), confirment la provenance des houles (principalement de l'Ouest, avec un régime secondaire assez fréquent légèrement plus au Nord et un régime légèrement plus au Sud pouvant correspondre à des vagues importantes, Illustration 19). Entre 2010 et 2018, les houles restaient inférieures à 4,30 m pendant 95% du temps, et les vagues les plus importantes (4 m ou plus) apparaissent quasi-exclusivement en période hivernale (Illustration 20). L'analyse statistique réalisée sur ces mesures, sur la période 2010-2018, indique des valeurs supérieures à celles indiquées précédemment pour les points de la base BoBWA (Hauteurs significatives de 11,13 m à 11,86 m pour une période de retour décennale, selon la méthode statistique utilisée, et 11,85 m à 12,85 m pour une période de retour de 20 ans, selon la méthode statistique utilisée. Ceci pourrait toutefois s'expliquer par les faits que (1) la bouée et le point BoBWA ne sont pas localisés au même endroit (environ 9 km entre les 2 points) et (2) les périodes considérées ne sont pas les mêmes (2010-2018 pour la mesure Candhis et 1958-2001 pour la base BoBWA).

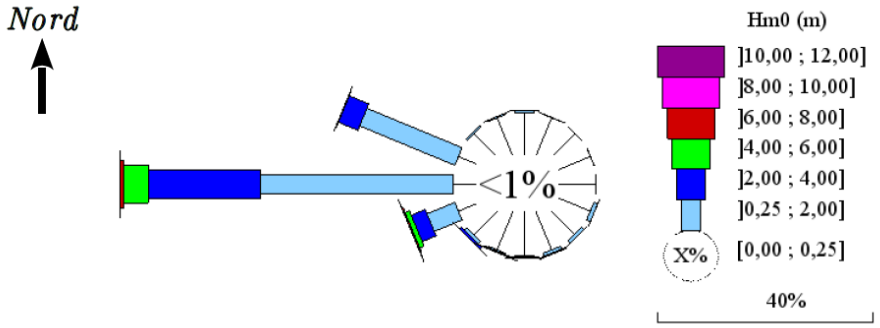


Illustration 19 - Rose des houles mesurées à la bouée 05602 de Belle-Ile, sur la période 2010 – 2018 (http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr)

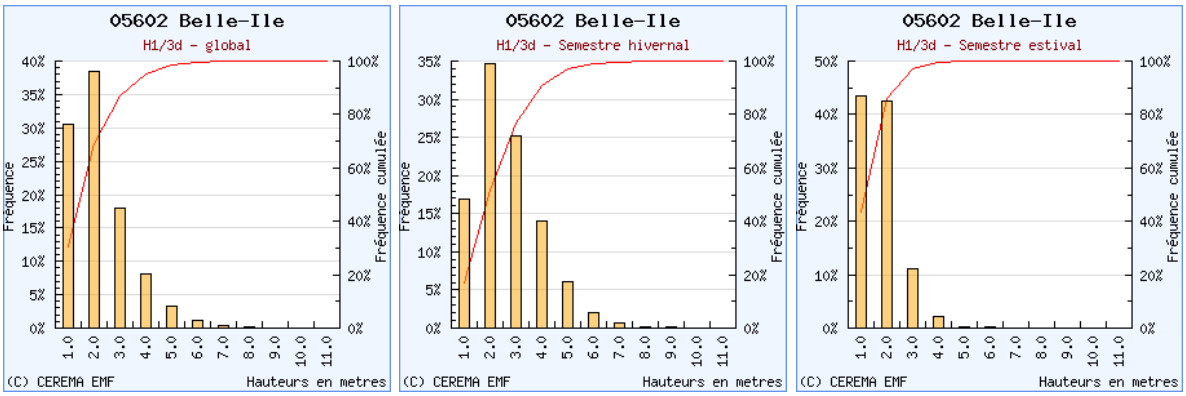


Illustration 20 - Histogramme représentant la fréquence des hauteurs significatives des houles mesurées à la bouée 05602 de Belle-Ile, sur la période 2010 – 2019, en considérant toute la période à gauche, puis la période hivernale au centre et la période estivale à droite (http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr)

3. Méthodologie

3.1. LE CALAGE DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES

Les photographies aériennes anciennes ont été géoréférencées (calées) à partir d'orthoimages de référence. Deux orthoimages de référence a été utilisées, datant de 2009 et de 2016, toutes deux issues de la BDORTHO de l'IGN (Institut Géographique National).

Ces deux orthoimages sont dans le système de coordonnées de référence (SCR) actuellement en application en France, le RGF93 (EPSG 2154).

Une orthoimage est une image composée par une mosaïque d'images aériennes comme les images anciennes utilisées dans l'Illustration 21 ou d'images numériques aéroportées. Cette image mosaïque est ensuite orthorectifiée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT ou DEM en anglais pour Digital Elevation Model). Cette opération permet de rectifier les distorsions induites par les prises de vue dans les secteurs à forts reliefs ou à bâtiments élevés grâce au modèle numérique de terrain.

Le calage géographique d'une image aérienne ancienne d'une campagne à une date donnée consiste à trouver des points homologues entre deux dates : l'image géoréférencée de référence (ici l'orthoimage IGN) et l'image de la campagne choisie.

Les points homologues doivent être des objets les plus remarquables possibles entre les 2 dates tels que des coins de bâtiments, faîtages d'habitations, intersection caractéristique de fractures sur l'estran, des rochers ou encore des intersections de routes ou chemins etc. (Illustration 21).

Sur les images aériennes extraites du site internet « Remonter le temps » de l'IGN, les résolutions sont variables d'une campagne à l'autre, et elles s'améliorent en général sur les campagnes récentes. Leurs résolutions s'étalent typiquement de 1 à 2 mètres par pixels pour les campagnes les plus anciennes à 0,50 m (voire moins) pour les plus récentes.

L'identification d'objets pour leur digitalisation manuelle est fonction de cette résolution variable, qui constitue l'un des facteurs d'incertitude sur lequel il faut être vigilant.

L'illustration ci-dessous montre à gauche, un exemple de prise de points homologues sur une image de la campagne de 1982, au niveau de la falaise de la Mine d'Or (la photo n'étant pas calée, le Nord est orientée vers le bas à gauche) et à droite, les clichés géoréférencés de la campagne de 1962.

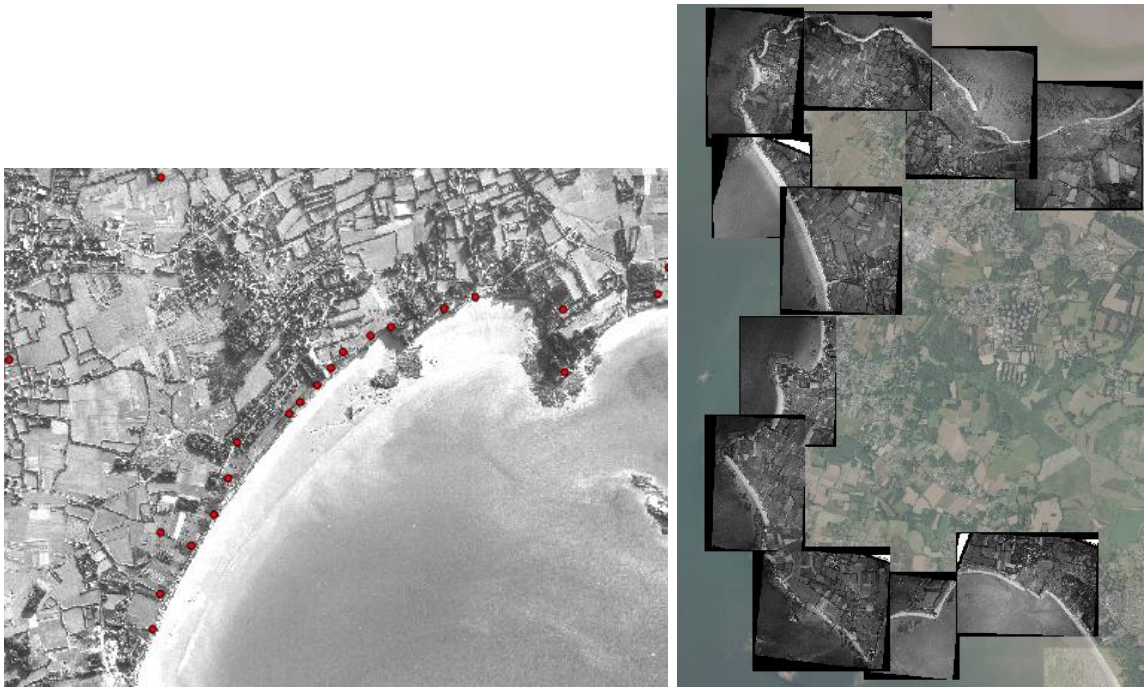


Illustration 21 - Exemple de l'emplacement des points d'ancrage pour une photographie de 1982 sur la Mine d'Or et dallage des photographies aériennes anciennes de 1962 une fois géréférencées

3.1.1. Choix de l'algorithme de calage parmi ceux disponibles dans QGIS

L'algorithme de calage des images apporte aux images géoréférencées une transformation pour laquelle il est important de choisir la méthode la plus adaptée, avec un niveau de distorsion géométrique acceptable. Le choix de l'algorithme est fonction deux paramètres essentiels :

- Le nombre de points homologues entre les deux images,
- La qualité des sources de données (qualité des images à géoréférencer).

Description de quelques algorithmes de transformation d'images :

- L'algorithme **Helmert** réalise simplement des translations, des rotations et une mise à l'échelle, pour faire un calage global de l'image. Peu de points homologues lui sont nécessaires ce qui peut engendrer localement des erreurs de précision. Helmert est généralement utilisé dans le cas d'une image numérique, récente, de bonne qualité et déjà dans un système de projection similaire à la référence. Un scan papier (plan) et de mauvaise qualité ne sera pas adapté à cet algorithme.
- Les algorithmes **Polynomiaux de degré 1 à 3** sont les algorithmes généralement les plus utilisés. Le degré de distorsion diffère entre 1 et 3, et c'est la transformation de degré 2 qui est la plus utilisée, et qui autorise quelques distorsions. En première approximation, cette transformation polynomiale d'ordre 2 est similaire à la transformation TPS décrite plus loin.
- L'algorithme **Projective** provoque une rotation *linéaire* puis une translation des coordonnées. Elle permet de modifier quelque peu le plan de projection d'un plan aérien pour le rendre conforme au système de destination et agit sur le relief. Dans notre cas le relief des falaises étant assez important à l'échelle des photographies anciennes, cette

transformation risque de modifier les distances pour effacer ces reliefs et ne convient donc pas pour l'étude.

- Enfin, l'algorithme **Thin Plate Spline** (TPS) est une méthode plus moderne qui est capable d'introduire des déformations sur des secteurs précis de l'image. Il est très pratique quand des sources de faible qualité sont utilisées. Aucune autre transformation du Géoréférenceur de QGIS ne permet de réduire une distorsion optique aussi sensiblement, même si cela se fait au prix d'un nombre conséquent de points homologues. Cette transformation induit des déformations locales en « forçant » le raster à se caler sur ces points au détriment d'autres parties de l'image. Elle peut cependant être utilisée dans un deuxième temps après un géoréférencement préalable de l'image entière avec un autre algorithme, afin de traiter une partie plus précise avec un nuage de points relativement rapprochés. Le TPS apporte un résultat satisfaisant à partir d'une vingtaine des points homologues.

Erreurs résiduelles du Géoréférenceur QGIS pour chaque algorithme

Le calcul de l'erreur (en mètres) a été réalisé selon la méthode suivante pour l'ensemble des algorithmes de transformation (Bakkouch *et al.*, 2015). Pour la transformation Helmert par exemple, l'erreur moyenne donnée par QGIS, était de 12,6 pixels. Comme l'image avait comme taille « image » : 12600 px de large, soit 3650 m, un mètre était donc égal à 3,5 px, d'où une erreur en mètre de 3,6 m.

Les erreurs résiduelles calculées par le Géoréférenceur de QGIS pour chaque transformation au niveau des points d'ancrage sont donc les suivantes :

Transformation	*Helmert*	*Polynomiale 1*	*Polynomiale 2*	*Projective*	*TPS*
Erreurs pixels	12.6	12	9.6	10.3	0
Erreurs mètres	3.6	3.4	2.7	3.1	0

Illustration 22 - Erreurs résiduelles calculées par le géréférenceur de QGIS

Évaluation visuelle des erreurs du Géoréférenceur

La comparaison entre les différentes transformations par superposition de différentes images géoréférencées avec l'orthophotographie 2009 a été réalisée entre les photographies aériennes de la campagne de 1977, de la partie nord, de la partie centrale et de la partie sud de la commune. Les photographies de la partie nord ont été comparées aux parties centrales puis les parties centrales ont été comparées à celles situées au sud, afin d'évaluer les erreurs de calage.

Ci-dessous, le tableau résume pour la campagne de 1977 (échelle de 1/15 000) les erreurs visuelles mesurées qui montrent l'écart moyen en mètres pour 10 points homologues pris aléatoirement par image, de l'ordre de quelques mètres.

	Helmert	*Polynomiale 1*	*Polynomiale 2*	*Polynomiale 3*	*Projective*	*TPS*
1977 Nord/BD ORTHO 2009	3.7	3.7	3.1	2.8	3.2	2.0
1977 Centre/BD ORTHO 2009	11.0	9.7	6.0	4.6	4.2	3.2
1977 Sud/BD ORTHO 2009	6.1	5.6	5.2	2.3	2.7	2.4

Evaluation faite avec 10 points homologues, pris : au sommet de la falaise, sur l'estran et/ou sur le bâti

Illustration 23 - Erreurs visuelles mesurées dans le géoréférencement d'une même campagne d'images (ici 1977)

Les transformations Helmert et Polynomiale d'ordre 1 sont équivalentes visuellement et présentent les plus forts décalages de points homologues. Les transformations Polynomiales d'ordre 3, et Projectives, ont des résultats plutôt satisfaisants. Enfin, les transformations TPS et Polynomiales d'ordre 2, le calage du cliché ancien est conforme à la BD ORTHO 2009 en de nombreux points, montrent un calage plus fin, avec au moins 20 points homologues pour la TPS.

3.1.2. Synthèse et choix des transformations :

L'analyse des différents algorithmes de transformation et l'analyse des erreurs induites, montrent que les algorithmes de transformation **TPS** ou **Polynomiale d'ordre 2** sont les mieux adaptées, au travail de géoréférencement de cette étude.

L'algorithme **TPS** induit cependant des déformations locales et peut déformer d'autres parties de l'image. Pour éviter ou réduire ces déformations, les points homologues doivent avoir une répartition homogène proche des objets à digitaliser mais il est nécessaire de disposer de points plus éloignés, afin de donner à l'image un calage uniforme. Ainsi un nombre de points homologues de l'ordre de la trentaine et un quadrillage homogène de la surface de l'image donnent des résultats visuels concluants.

Si les 30 points homologues permettent d'obtenir des résultats satisfaisants, l'obtention de ce nombre de points sur des dates anciennes, comme notamment celles de 1952, peut s'avérer compliquée (faible résolution des photographies, urbanisation moindre…).

En résumé, l'algorithme de transformation **TPS** est celui le plus adapté pour mener à bien le calage des images aériennes : il a donc été utilisé pour tous les calages dans un soucis d'homogénéité.

3.1.3. Acquisition des marqueurs géomorphologiques d'évolution des falaises (digitalisation)

Un protocole d'acquisition des marqueurs géomorphologiques d'évolution des falaises littorales a été mis en place afin de réduire les erreurs et donc l'incertitude.

En premier lieu, un objet géomorphologique a été choisi afin que les points homologues soient le plus proche possible de cet objet. Le sommet des falaises et notamment celui de la falaise de la Mine d'Or, a été choisi prioritairement. En effet, le pied de falaise est plus difficile à identifier qu'un sommet, à cause de l'ombre portée par les différentes prises de vue.

Ainsi la digitalisation s'est en règle générale faite sur le sommet des falaises en prenant comme limite géomorphologique de référence, la limite de végétation. D'autres limites physiques peuvent

être localement prises en compte également comme le pied d'un ouvrage ou l'axe du chemin côtier, en conservant ce même marqueur aux différentes dates.

L'échelle de digitalisation doit elle aussi être fixée pour garantir la précision et la maitrise de l'incertitude. Ainsi l'acquisition s'est faite autant que possible au 1/800, et une incertitude pour chaque digitalisation (chaque date de la photographie aérienne) a été notée pour évaluer la précision de l'opérateur. Celle-ci varie selon la qualité des images, mais atteint généralement quelques mètres (qui se cumulent avec l'incertitude liée au calage des photographies).

3.1.4. Photographies traitées

Au final, 11 campagnes photographiques ont ainsi été traitées (calage/digitalisation) sur les 4 secteurs étudiés, entre 1952 et 2018. Ces photographies ont notamment été choisies pour essayer de couvrir l'ensemble de la période de façon assez homogène tout en garantissant une qualité et une couverture spatiale suffisantes. L'intervalle de temps entre 2 photographies varie de 2 à 10 ans. Le traitement de ces 11 photographies permet ainsi de définir 10 périodes d'observation distinctes :

- 1952-1962, soit 10 ans ;
- 1962-1968, soit 6 ans ;
- 1968-1974, soit 6 ans ;
- 1974-1977, soit 3 ans ;
- 1977-1982, soit 5 ans ;
- 1982-1991, soit 9 ans ;
- 1991-2000, soit 9ans ;
- 2000-2009, soit 9 ans ;
- 2009-2016, soit 7 ans ;
- 2016-2018, soit 2 ans.

Ces dates et périodes sont synthétisées sur la frise de l'Illustration 24, et un exemple de digitalisation des 11 positions de la falaise de la Mine d'Or est présenté à l'Illustration 25.

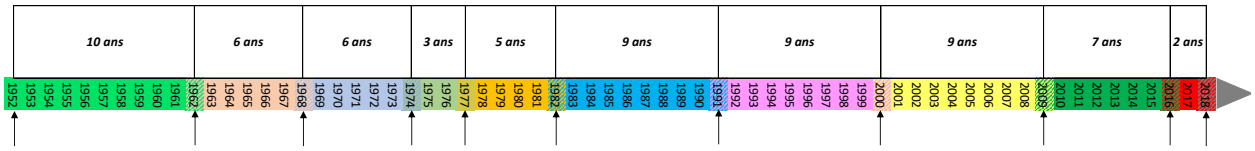


Illustration 24 – Date des 11 phototgraphies traitées et durée des 10 périodes ainsi définies

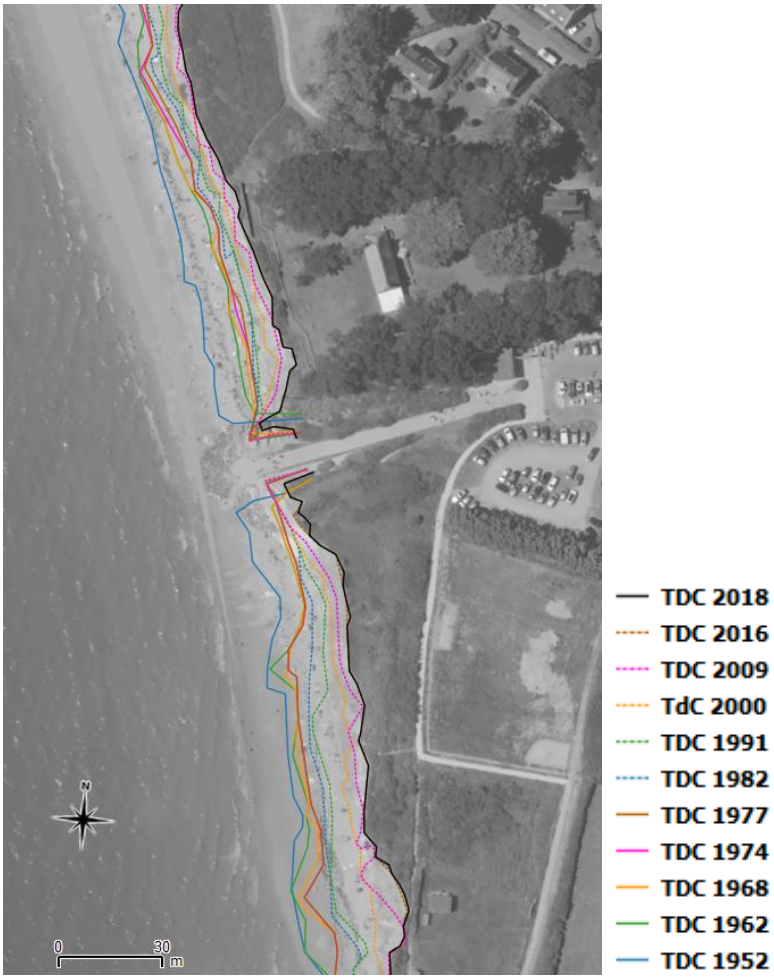


Illustration 25 - Extrait de la digitalisation du sommet de la falaise (limite de végétation) pour les 11 campagnes de photographies aériennes traitées (fond : Orthoimage 2016 en noir et blanc, IGN)

3.2. OUTIL UTILISE POUR L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE

L'analyse quantitative du trait de côte a été réalisée à l'aide de l'extension ArcGIS, *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), développé par l'USGS (Moore, 2000 ; Thieler *et al.,* 2009). Le principe de cette extension est de mesurer les évolutions entre les différentes positions des traits de côte grâce à une série de transects orthogonaux à la plage, disposés le long d'une « ligne de base ».

Les paramètres de construction des transects (longueur, direction et espacement) sont définis par l'opérateur. Cela permet de comparer des changements de position des traits de côte en un grand nombre de points de façon automatique.

L'espacement des transects choisi pour cette analyse sur Pénestin est de 5 m (cette valeur est celle de départ, mais il est possible que certains transects aient été espacés ou rapprochés suivant la pertinence de leur position automatique). Cette approche est présentée à l'Illustration 26 pour un espacement de 50 m.

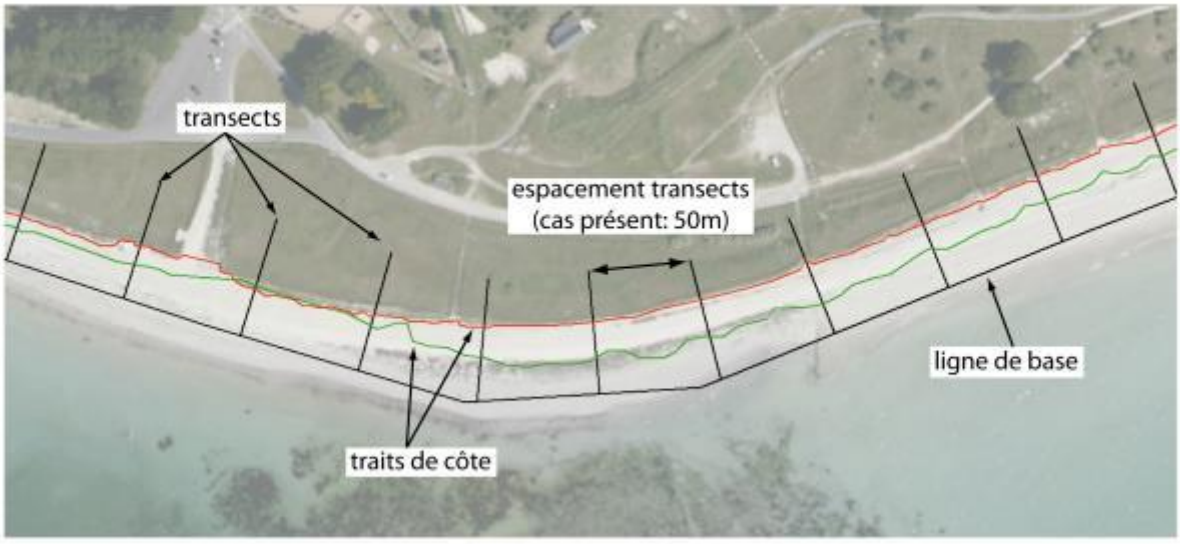


Illustration 26 - Principe du Digital Shoreline Analysis System

Après le réglage d'un certain nombre de paramètres, DSAS calcule le long de chaque transect la distance entre les deux traits de côte, qui permet de quantifier la mobilité du trait de côte entre les dates.

Du fait que les périodes considérées dans cette étude ne soient pas toutes de même durée, cette valeur de recul (ou d'avancée) absolue est ensuite ramenée à une vitesse moyenne de recul sur la période, en m/an.

En ce qui concerne les incertitudes, il convient de noter que plus les reculs sont faibles (ce qui s'observe généralement sur les périodes les plus courtes), plus les incertitudes sont significatives. Ainsi, on peut aisément vérifier que pour un recul modéré sur une courte période, on obtient rapidement une incertitude sur le taux de recul annuel qui peut être largement supérieure à la valeur mesurée. Par exemple, si l'on suppose une incertitude sur la position des traits de côte de l'ordre de 3 m (ce qui reste optimiste au vu des erreurs possibles sur le calage des photographies et la digitalisation de photographies parfois peu lisibles), cela se traduit par une erreur potentielle de 0,6 m/an pour un calcul sur une période de 5 ans. Si par contre on considère la même incertitude sur une période de 50 ans, cette erreur potentielle se réduit à 0,06 m/an.

Les résultats obtenus pour chacune des 10 périodes étudiées (durées de 2 à 10 ans) peuvent donc correspondre à des reculs potentiellement faibles sur des périodes courtes, conduisant à des incertitudes importantes en termes de taux de recul annuel (on atteint alors les limites de détection de la méthode). Les résultats présentés par la suite le font apparaitre, le « bruit » sur le signal à l'échelle d'une falaise étant très marqué (et généralement plus lié aux incertitudes qu'à des événements ponctuels sur la falaise), mais volontairement laissé apparent pour ne pas cacher ces incertitudes. Les résultats obtenus sur ces périodes assez courtes sont donc utilisés plutôt comme des indicateurs de recul afin de rechercher des tendances que comme des valeurs de vitesses de recul à considérer et utiliser en l'état.

3.3. DONNEES DISPONIBLES POUR LA CONFRONTATION AU RECUL DES FALAISES

3.3.1. Pluviométrie

Les données de pluviométrie analysées pour cette étude sont celles de la station de Billiers, située à environ 3,2 km au Nord de la commune de Pénestin (Illustration 13). Les données utilisées, acquises auprès de la société Météo Concept (www.meteo-concept.fr) couvrent la période allant du 01/01/1961 au 31/12/2019 (soit 59 années de mesures), avec une fréquence mensuelle. Ces données sont représentées à l'Illustration 27, et synthétisées à fréquence annuelle à l'Illustration 28 et en moyennes mensuelles à l'Illustration 29.

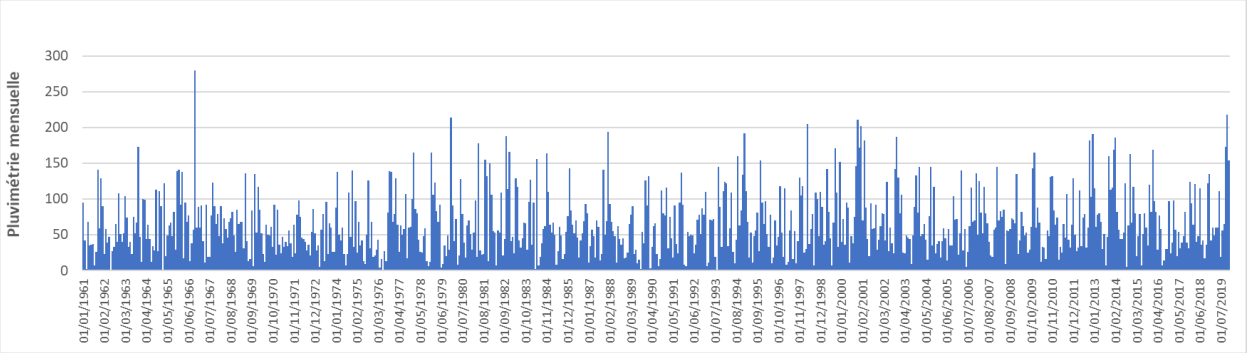


Illustration 27 – Pluviométrie mensuelle à Billiers de Janvier à Décembre /2019

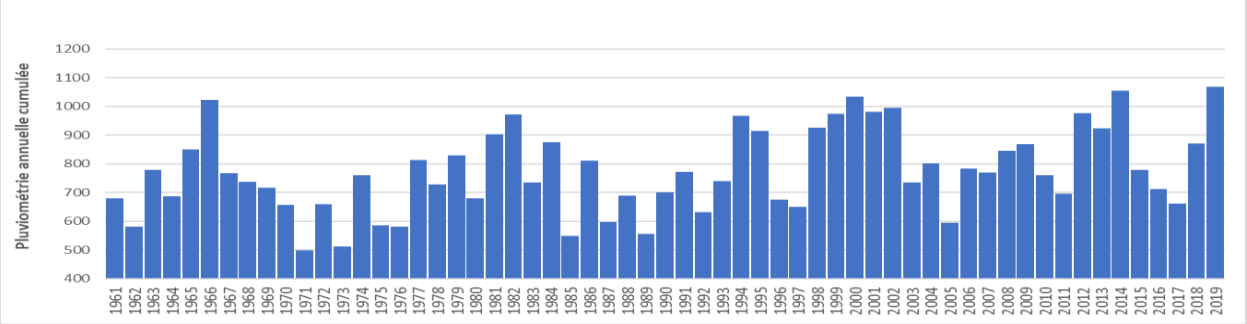


Illustration 28 – Pluviométrie annuelle à Billiers de 1961 à 2019

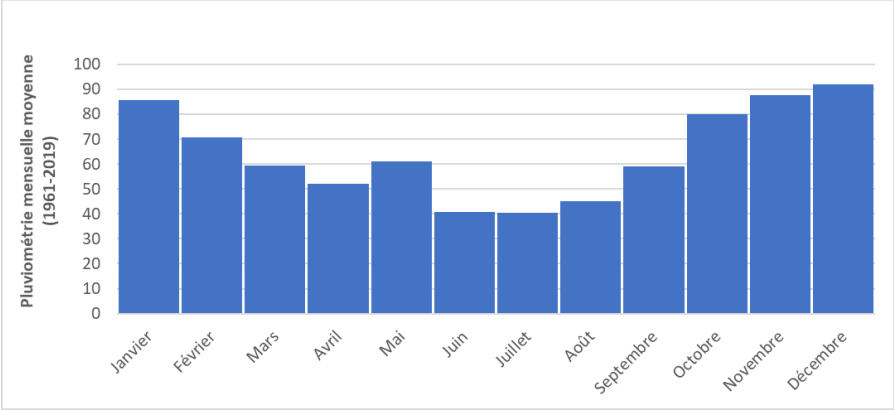


Illustration 29 --- Précipitations mensuelles moyennes sur la période 1961-2019

3.3.2. Niveau marin

Les niveaux marins analysés sont ceux enregistrés par le marégraphe de la Pointe-Saint-Gildas, à Préfailles (44). Ces données ont été préférées pour plusieurs raisons :

- Proximité avec Pénestin (environ 40 km à vol d'oiseau) ;
- Période de mesure (le marégraphe du Crouesty, notamment, ne dispose de mesures que depuis 1996) ;
- Eloignement relatif de l'estuaire de la Loire (le débit du fleuve interagissant avec le niveau d'eau, les mesures peuvent ne pas être représentatives pour Pénestin).

Les données du marégraphe de la Pointe Saint-Gildas couvrent la période allant de Juin 1962 à Juin 2017, avec toutefois quelques périodes lacunaires, notamment dans la première moitié des années 1960 et à la fin des années 1980-début des années 1990 (Illustration 30). L'analyse des niveaux les plus importants mesurés permet de distinguer assez nettement certains événements de tempête bien connus. Ainsi, la tempête Xynthia (28/02/2010) se caractérise par un niveau mesuré largement supérieur au reste de la série (près de 0,7 m au-dessus des plus hautes mers astronomiques – PHMA), mais d'autres tempêtes marquantes peuvent être identifiées (par exemple pour les plus récentes Lothar le 26/12/1999, Johanna le 10/03/2008, Christine le 03/03/2014…).

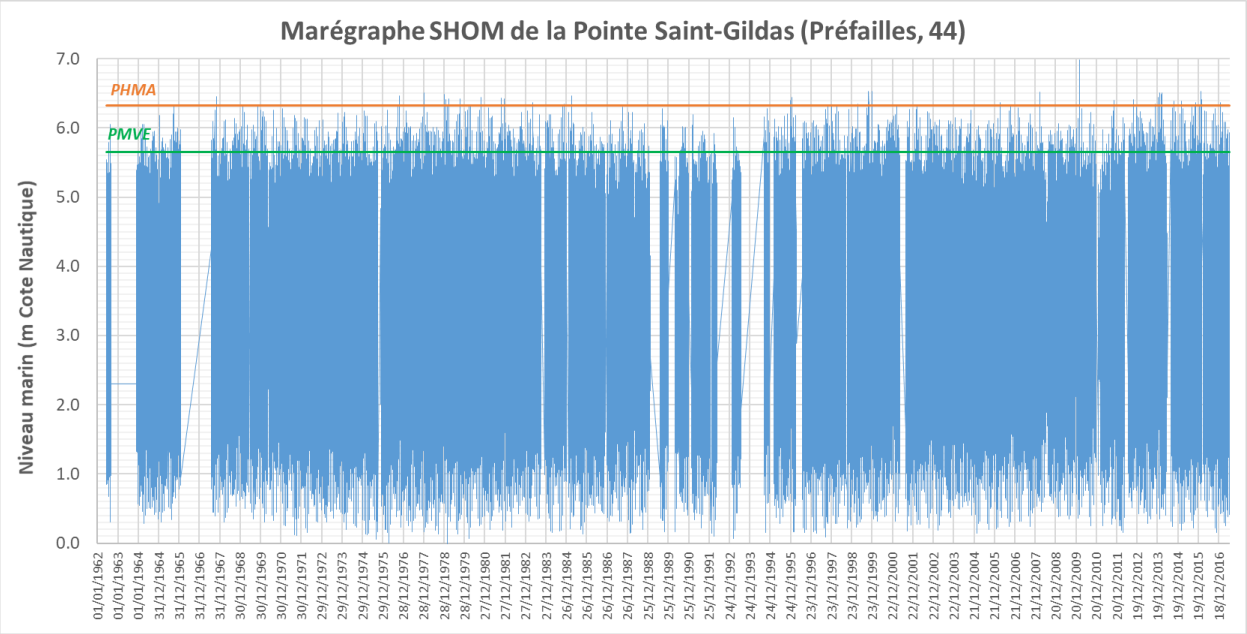


Illustration 30 – Série temporelle de niveaux marins horaires mesurés par le marégraphe de Saint-Gildas entre 1962 et 2017 (Source : data.shom.fr)

3.3.3. Tempêtes

L'occurrence des tempêtes a été analysée à travers la base de données des impacts de tempêtes réalisées par le BRGM dans le cadre de la réalisation des atlas de la géomorphologie du trait de côte sur la Bretagne (Le Roy *et al.*, 2020).

Une extraction des impacts de tempêtes recensés dans la moitié Est du Morbihan (de la presqu'île de Quiberon + Belle-Ile, Houat, Hoëdic, cf Illustration 31) a été effectuée, permettant la sélection de 1 070 impacts de tempête (Illustration 32), correspondant à 126 tempêtes bien

datées (dont 36 dans la période étudiée), 23 datées au mois (dont 9 dans la période étudiée) et 20 datées à l'année (dont 7 dans la période étudiée).

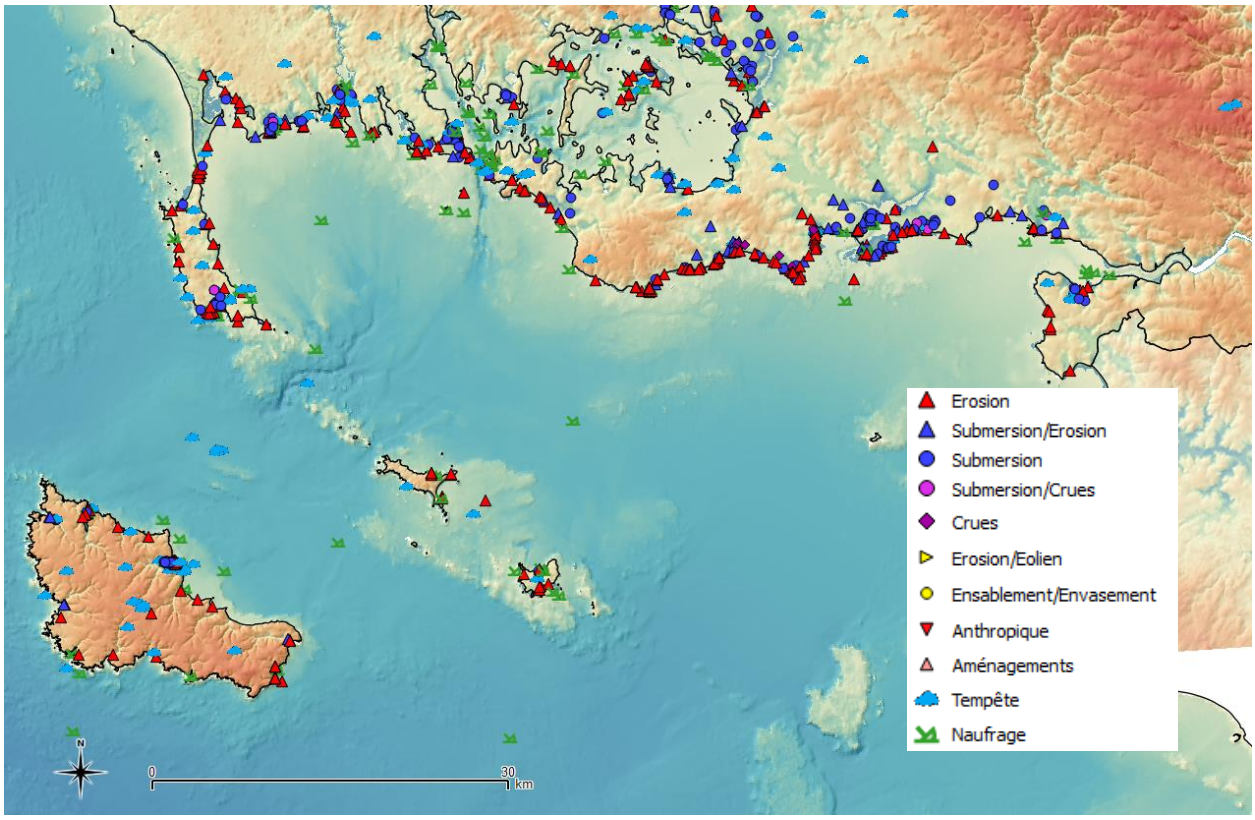


Illustration 31 – Localisation et nature des 1 070 impacts de tempêtes extraits de la base de données des impacts de tempête

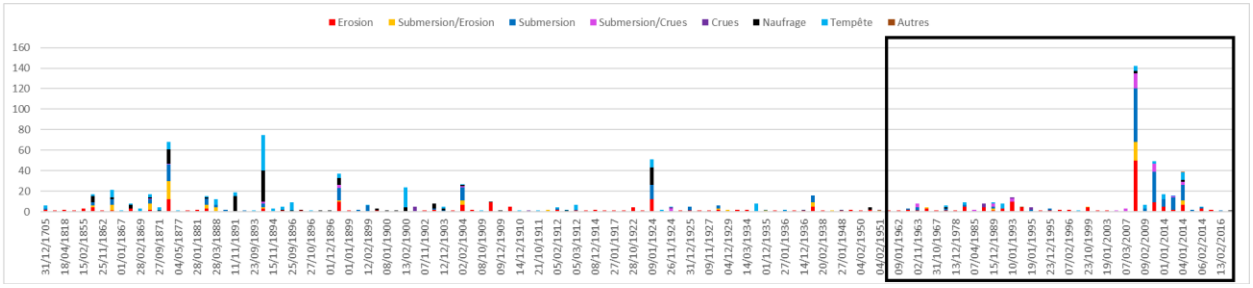


Illustration 32 – Chronologie des 126 tempêtes bien datées correspondant à l'extraction de la base de données des impacts de tempête (la zone encadrée en noir correspond aux 36 tempêtes dans la période étudiée)

3.4. CREATION D'INDICATEURS POUR LA CONFRONTATION DES DONNEES AU RECUL DES FALAISES

Afin de confronter les reculs mesurés entre 2 photographies aériennes et les différents paramètres (pluviométrie, niveaux marins, tempêtes), il a été nécessaire de définir des indicateurs représentatifs de ces paramètres pour chacun des intervalles de temps étudiés.

3.4.1. Indicateurs sur la pluviométrie

Pour la pluviométrie, différents indicateurs ont été analysés, et notamment la pluviométrie mensuelle moyenne sur chacune des périodes (durées de 2 à 10 ans), qui sera conservée par la suite, mais aussi par exemple la pluviométrie mensuelle moyenne des trimestres hivernaux (octobre à mars) et estivaux (avril à septembre), comme présenté à l'Illustration 33.

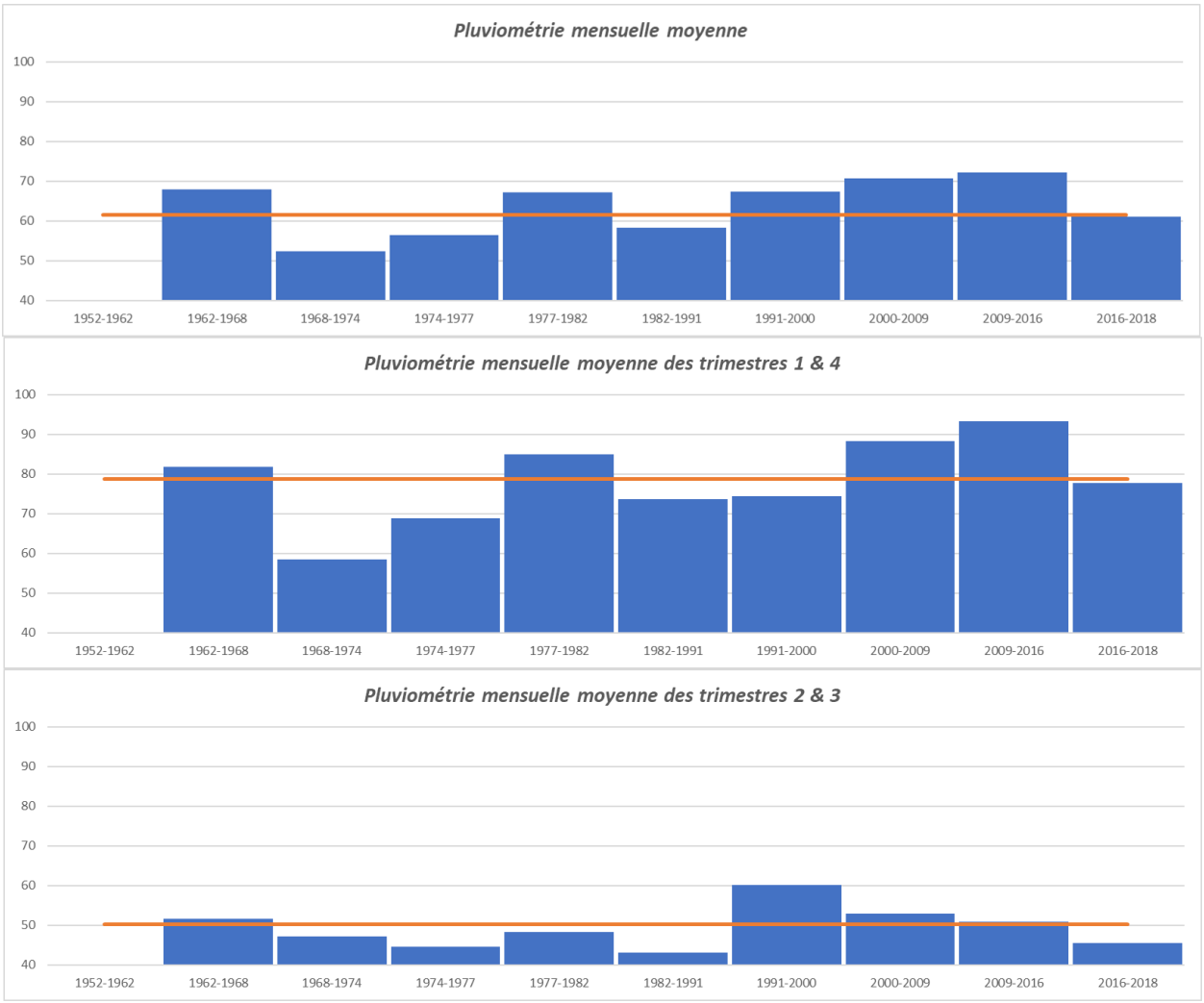


Illustration 33 – Indicateurs sur la pluviométrie : Pluviométrie mensuelle moyenne sur l'ensemble des périodes séparant 2 photographies aériennes (en haut), sur les trimestres hivernaux uniquement (au milieu) et sur les trimestres estivaux uniquement (en bas)

3.4.2. Indicateurs sur le niveau marin

Comme pour la pluviométrie, différents indicateurs ont été définis sur les niveaux marins de manière à pouvoir intégrer ce paramètre sur les périodes considérées, entre 2 photographies aériennes. Le principal critère utilisé et conservé par la suite correspond au niveau marin moyen enregistré sur la période (Illustration 34). Ce critère, bien que très intégrateur (niveau moyen enregistré sur plusieurs années, sans distinctions entre les pleines-mers et les basses-mers, les vives eaux et les mortes eaux, les périodes de tempête…), a finalement semblé suffisamment représentatif et discriminant comparativement aux autres critères envisagés (par exemple la proportion de temps où le niveau horaire enregistré a été supérieur au niveau des pleines mers

de vives eaux ou au niveau des plus hautes mers astronomiques, cf Illustration 35, ou encore la lame d'eau horaire moyenne supérieure au niveau des pleines mers de vives eaux ou au niveau des plus hautes mers astronomiques, i.e. par exemple qu'un niveau d'eau supérieur de 20 cm au seuil pendant 1 heure a le même effet qu'un niveau d'eau supérieur de 10 cm pendant 2 h, cet effet étant lui-même 2 fois supérieur à un niveau d'eau supérieur de 10 cm au seuil pendant 1 heure ; cf Illustration 36).

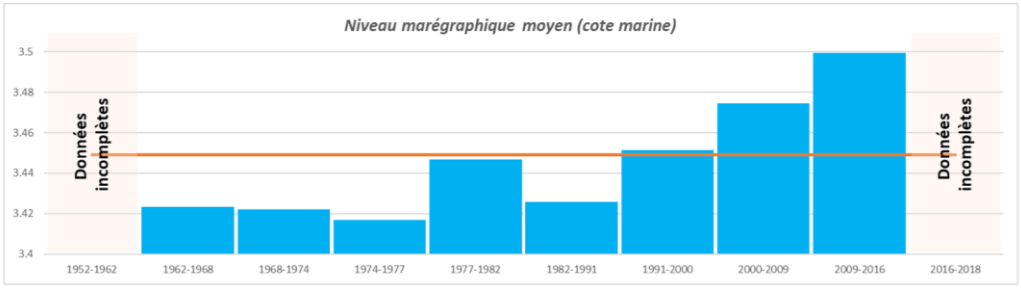


Illustration 34 – Indicateurs sur le niveau marin : Niveau marin horaire moyen enregistré à la pointe Saint-Gildas pour chacune des périodes étudiées et niveau moyen sur l'ensemble de la période de mesure (ligne rouge) (d'après les données de data.shom.fr)

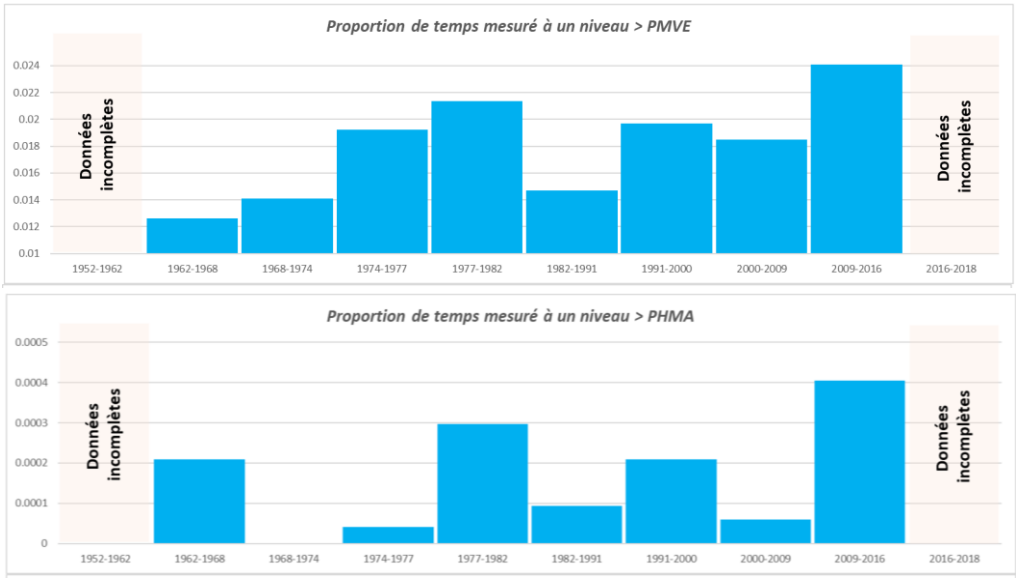


Illustration 35 – Indicateurs sur le niveau marin : Proportion de temps où le niveau horaire enregistré a été supérieur au niveau des pleines mers de vives eaux (en haut) ou au niveau des plus hautes mers astronomiques (en bas)

Illustration 36 – Indicateurs sur le niveau marin : Lame d'eau horaire moyenne (en mètres) supérieure au niveau des pleines mers de vives eaux (en haut) ou au niveau des plus hautes mers astronomiques (en bas)

3.4.3. Indicateurs sur les tempêtes

De par la nature « ponctuelle » des données sur les tempêtes, les indicateurs sont plus délicats à définir sur ce paramètre. L'analyse s'est essentiellement portée sur les événements bien datés, les évènements moins bien datés n'ayant été pris en compte que lorsqu'il était possible de s'assurer qu'ils n'étaient pas redondants avec les événements bien datés. On peut également noter que l'utilisation du critère « nombre d'impacts », i.e. de points recensés dans la base, peut être biaisé par le niveau d'informations disponibles (par exemple lorsque l'on a beaucoup de détails sur l'impact d'une tempête sur une commune, cela peut conduire à la saisie de plusieurs points dans la base, alors qu'un événement tout aussi dommageable mais moins bien connu n'a pu faire l'objet de la saisie que d'un point dans la base).

Une première étape a consisté à identifier, sur la période de l'analyse, les tempêtes semblant les plus impactantes et les dates associées. Pour cela, toutes les tempêtes ayant occasionné plus de 2 impacts directs (Erosion, Submersion/Erosion, Submersion, Submersion/Crue) recensés sur la moitié Est du Morbihan ont été sélectionnées, puis hiérarchisées selon le nombre de ces impacts directs :

- Sévérité faible entre 2 et 5 impacts (10 tempêtes : 07/03/1962, 22/02/1966, 11/02/1974, 07/10/1987, 31/01/1990, 11/01/1995, 23/12/1995, 07/03/2007, 09/02/2009, 06/02/2014) ;
- Sévérité modérée de 5 à 10 impacts (4 tempêtes : 02/11/1963, 22/11/1984, 15/12/1989, 23/10/1999) ;
- Sévérité forte pour plus de 10 impacts (6 tempêtes : 10/01/1993, 10/03/2008, 28/02/2010, 01/01/2014, 02/01/2014, 04/01/2014).

Le classement de ces tempêtes est synthétisé à l'Illustration 37.

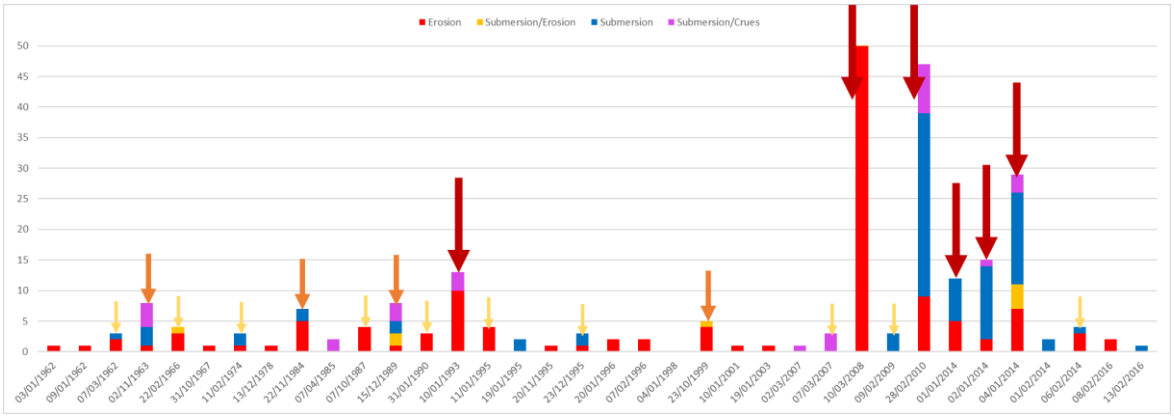


Illustration 37 – Classement de la sévérité des tempêtes selon le nombre d'impacts directs recensés (sévérité faible pour les flèches jaunes, sévérité modérée pour les flèches oranges, sévérité forte pour les flèches rouges)

En complément, et afin d'avoir des indicateurs du même type que ceux définis pour la pluviométrie et le niveau marin et directement comparables au recul des falaises sur les différentes périodes, d'autres indicateurs ont été définis, comme pour chacune des périodes :

- le nombre de tempêtes ayant généré des impacts directs sur la moitié Est du Morbihan,
- le nombre d'impacts directs recensés sur la moitié Est du Morbihan (indépendamment du nombre de tempêtes les ayant générés),
- le nombre moyen d'impacts directs par tempête en ayant généré.

Ces indicateurs sont représentés à l'Illustration 38.

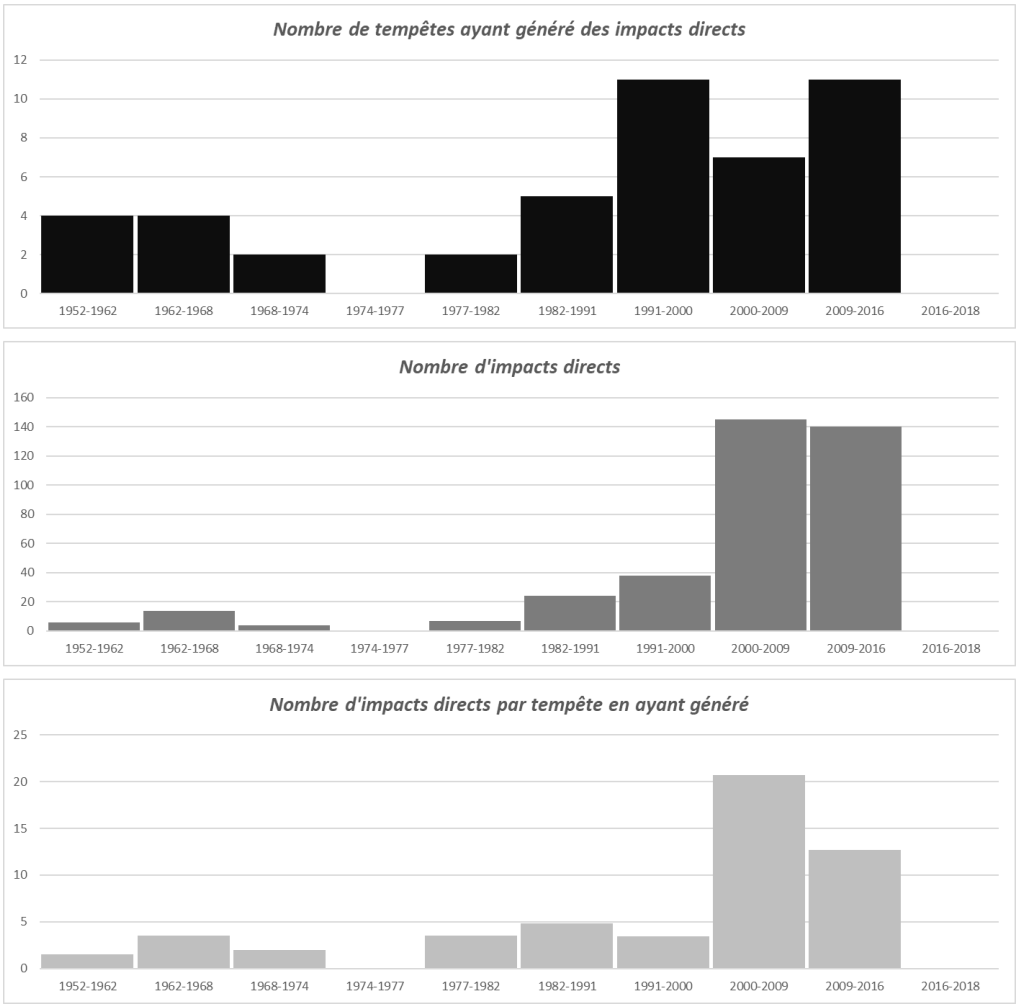


Illustration 38 - Indicateurs sur les tempêtes : Pour chaque période étudiée, nombre de tempêtes ayant généré des impacts directs, nombre d'impacts directs et nombre moyen d'impacts directs par tempête en ayant généré

3.4.4. Premiers éléments de synthèse sur ces indicateurs

Au vu de ces indicateurs sur la pluviométrie, le niveau marin et les tempêtes, il est possible d'émettre l'hypothèse « *a priori* » que les périodes qui pourraient être les plus à même de s'accompagner d'un recul important de la falaise sont :

- 2009-2016, qui se caractérise par la pluviométrie la plus importante de toutes les périodes étudiées, par les niveaux marins les plus élevés de toutes les périodes étudiées (tant en niveaux moyens qu'en niveaux extrêmes) et par un nombre de tempêtes et d'impacts associés particulièrement important (notamment la tempête Xynthia du 28/02/2010 et les tempêtes de l'hiver 2013-2014).
- Puis 2000-2009, caractérisée également par des précipitations très importantes, un niveau marégraphique moyen très élevé bien que les niveaux extrêmes restent cette fois plus modérés, et un nombre de tempêtes assez important associé à de très nombreux impacts (essentiellement en raison de la tempête Johanna du 10/03/2008, qui reste un événement remarquable à l'échelle de la Bretagne).
- Puis les périodes 1991-2000 et 1977-1982 à peu près à équivalence, avec des pluviométries assez importantes (la période 1991-2000 se distinguant toutefois par

une pluviométrie estivale marquée), des niveaux marins plutôt moyens (les niveaux extrêmes étant surtout marqués sur la période 1977-1982). Concernant les tempêtes, ces deux périodes apparaissent cette fois comme moins exposées ; la période 1991-2000 a toutefois été marquée par un nombre assez important de tempêtes qui n'ont cependant pas occasionné beaucoup d'impacts.

A contrario, les périodes qui apparaissent « *a priori* » comme les moins défavorables pour le recul des falaises sont celles de 1968-1974 et 1974-1977, où la pluviométrie, les niveaux marins et l'occurrence des tempêtes sont les plus modérées de toute la période analysée. La période 1982-1991 apparait également comme assez moyenne, avec une pluviométrie inférieure à la moyenne, des niveaux marins peu élevés et des impacts significatifs occasionnés par les tempêtes, mais ne se détachant pas particulièrement.

Enfin, on remarque que la période 1962-1968 se distingue par de fortes précipitations, mais des niveaux marins qui restent modérés et des tempêtes dont le nombre d'impacts est resté assez faible.

4. Résultats et analyse

4.1. LA MINE D'OR

La position de la falaise de la plage de la Mine d'Or a donc été digitalisée depuis le Lomer au Nord jusqu'au Landrin au Sud, et son recul a pu être analysé sur 10 périodes contigües (correspondant à 11 positions de la falaise).

4.1.1. Résultats sur le long terme (période 1952-2018)

La vitesse moyenne du recul le long de la falaise de la Mine d'Or sur cette période de 66 ans est représentée à l'Illustration 39. On peut noter que le signal reste peu bruité sur cette période, du fait de l'incertitude réduite par des évolutions suffisamment significatives sur une grande période.

Ce résultat confirme les conclusions de Schroëtter (2013), qui annonçait que la partie Nord de la falaise, composée sur toute sa hauteur de la terrasse alluviale, reculait beaucoup moins que la partie Sud, où la falaise est essentiellement représentée par les altérites sous-jacentes.

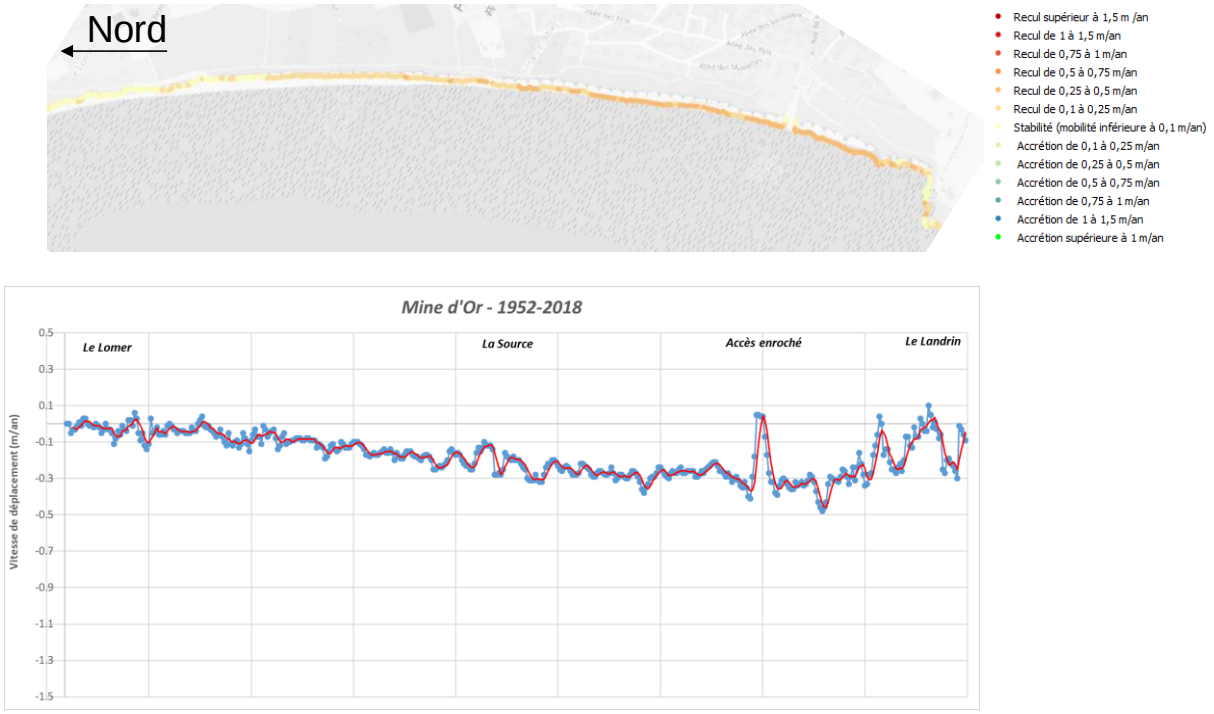


Illustration 39 – Vitesses de recul de la position de la falaise le long de la plage de la Mine d'Or (la représentation cartographique pivotée en haut est approximativement calée avec la courbe des vitesses en bas)

Les vitesses de recul obtenues (de 0 à 10 cm/an en partie Nord, de l'ordre de 15 à 20 cm/an à la Source, puis 30 cm/an en partie Sud, tandis que la pointe du Landrin ne subit pas de recul important généralisé) sont toutefois sensiblement plus faibles que celles initialement attendues d'après les données existantes (qui s'approchaient plutôt de 1 m/an pour la partie Sud).

Afin de vérifier la validité de ces valeurs, le même traitement sous DSAS a été réalisé à partir des traits de côtes réalisés et fournis par Cap Atlantique sur la période 1965-2016. Les

résultats obtenus confirment les ordres de grandeur obtenus dans la présente étude, avec une vitesse moyenne de recul au Sud de la Source de 25 cm/an.

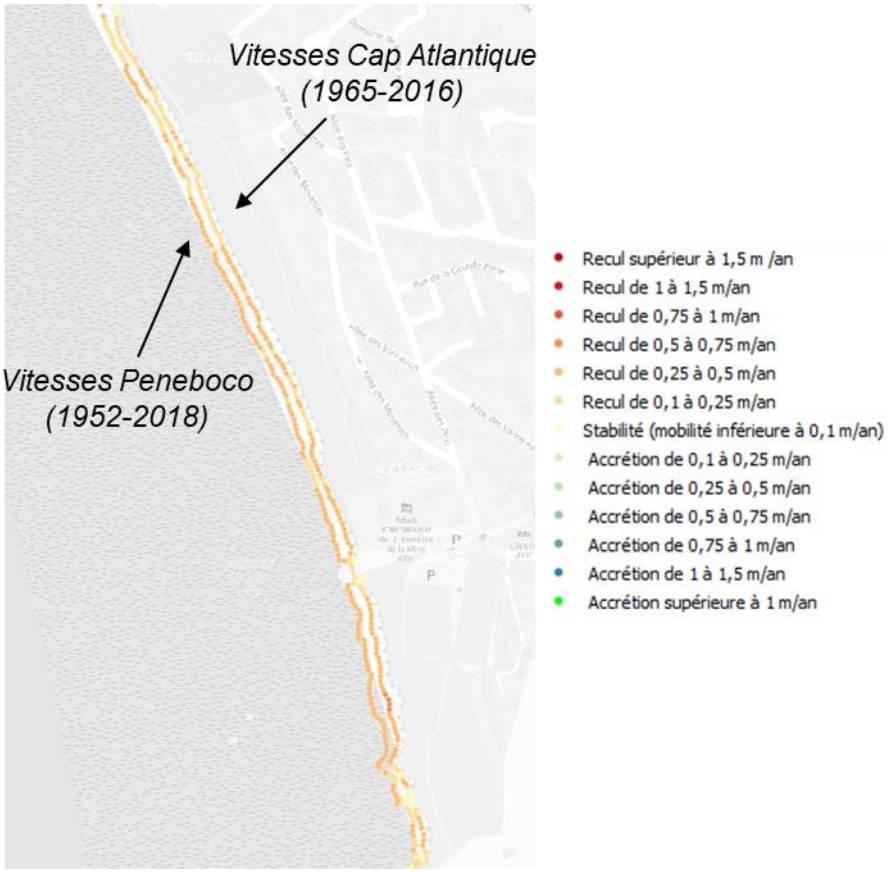


Illustration 40 – Comparaison des vitesses de recul obtenues sur la partie Sud de la plage de la Mine d'Or à partir des traits de côte 1952-2018 de la présente étude et des traits de côte 1965-2016 fournis par Cap Atlantique

L'explication de l'écart entre les valeurs obtenues et celles issues de la littérature peut être de 2 ordres :

- Les valeurs avancées par Schroëtter (2013) sur la période 1962-2000 (25 cm/an en partie Nord, 50 cm/an au Sud de la Source et 75 cm/an au Sud de l'accès enroché) correspondent à une estimation de l'ordre de grandeur du recul maximal ;
- Les valeurs obtenues à partir des données de la thèse de Blaise (2017) sur la période 1952-2010 (50 à 70 cm/an en partie Sud) sont vraisemblablement surestimées du fait d'une erreur de digitalisation de la tête de la falaise, liée à une mauvaise interprétation de la photographie : c'est l'ombre de la falaise qui semble avoir été digitalisée, et non la tête de la falaise, ce qui conduit dans le calcul approximativement à doubler l'estimation du recul, et donc des vitesses (Illustration 41).
- Pour ce qui est des valeurs de recul de l'INE (Indicateur National d'Erosion) sur la période 1952-2011, qui sont du même ordre de grandeur (recul supérieur à 0,5 m/an au Sud de la Mine d'Or), les traits de côte utilisés ne sont pas librement disponibles, mais comme c'est probablement la même photographie aérienne qui a été utilisée, il est possible que la même erreur d'interprétation de l'ombre de la falaise ait été faite.

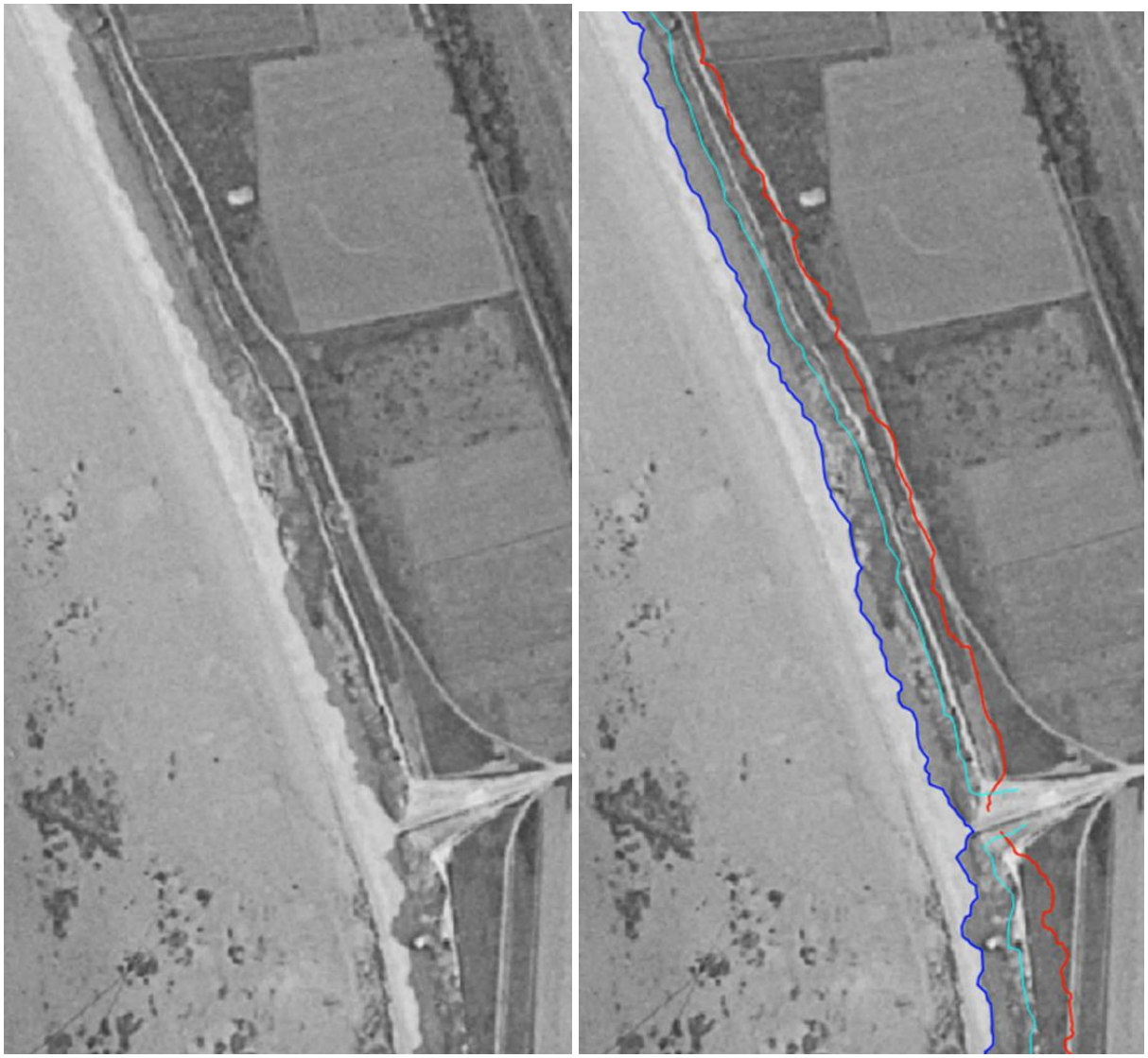


Illustration 41 – Aperçu de la photographie aérienne de 1952 au niveau de l'accès enroché (on peut noter l'orientation de l'ombre des arbres en haut à droite) et digitalisations disponibles (en bleu : sommet de falaise en 1952 de Blaise, 2017 ; en rouge : sommet de falaise en 2010 de Blaise, 2017 ; en turquoise : sommet de falaise en 1952 digitalisé pour la présente étude)

4.1.2. Résultats sur les différentes périodes

L'analyse du recul de la falaise sur chacune des 10 périodes étudiées a permis de déterminer, pour chacune d'elles et en chaque point de la falaise, les vitesses de recul associées (illustrations 42, 43 et 44). Toutefois, compte-tenu de la durée réduite de ces périodes (2 à 10 ans), l'incertitude sur ces valeurs reste très importante (paragraphe 3.2), conduisant à des signaux bruités, volontairement laissés apparents pour une meilleure appréhension de cette incertitude.

On peut également noter que ponctuellement dans le temps et l'espace peuvent apparaitre des valeurs positives, traduisant une avancée de la falaise qui n'est bien sûr par possible dans la réalité. Cela peut s'expliquer d'une part par l'incertitude sur la méthode, qui peut être du même ordre voire supérieure à la vitesse réelle de recul (paragraphe 3.2), ou d'autre part par la réalisation d'ouvrages spécifiques (enrochements notamment) qui se traduisent alors par une avancée du trait de côte.

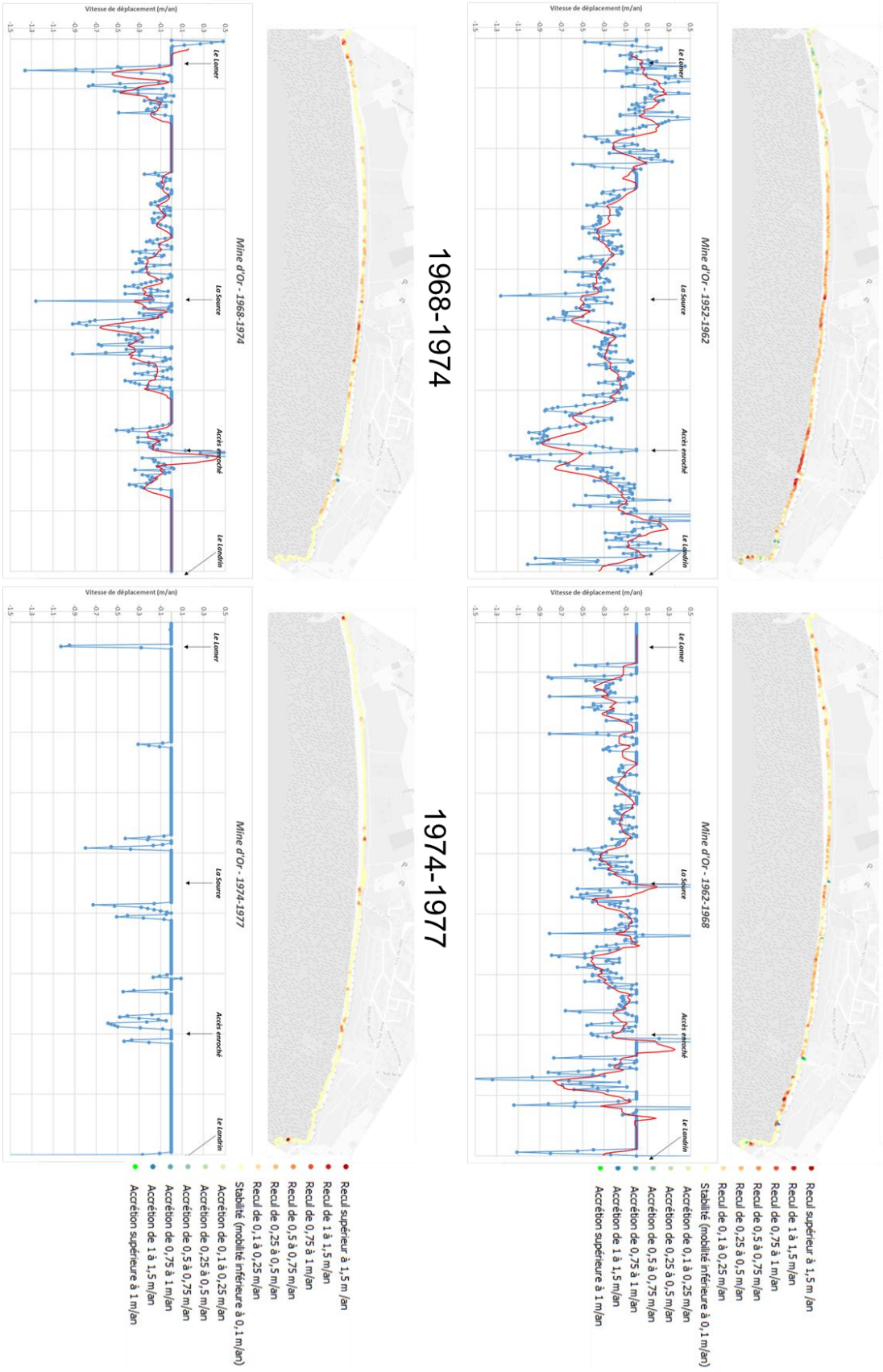


Illustration 42 – Vitesses de recul de la position de la falaise le long de la plage de la Mine d'Or sur les périodes 1952-1962, 1962-1968, 1968-1974, 1974-1977

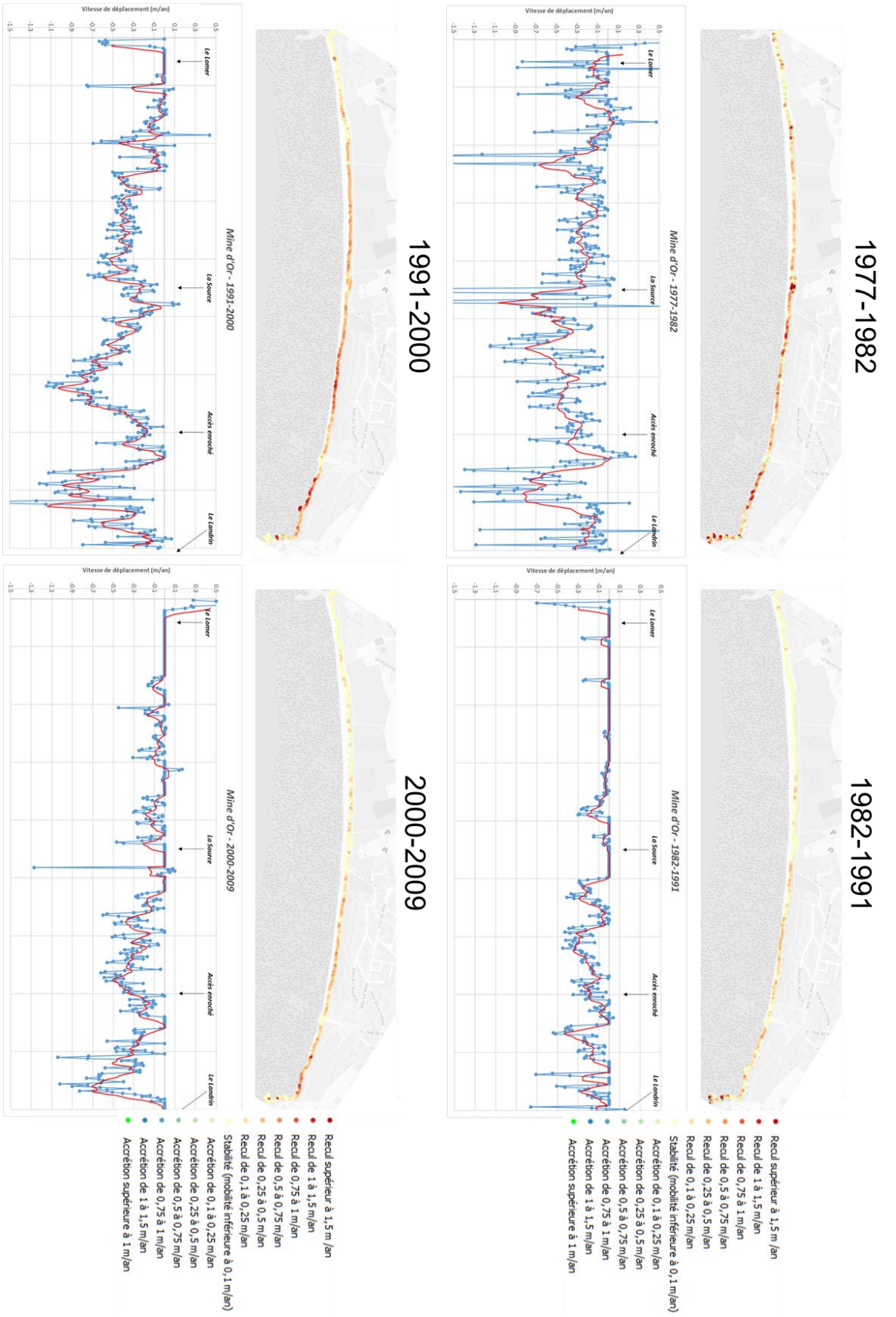


Illustration 43 – Vitesses de recul de la position de la falaise le long de la plage de la Mine d'Or sur les périodes 1977-1982, 1982-1991, 1991-2000, 2000-2009

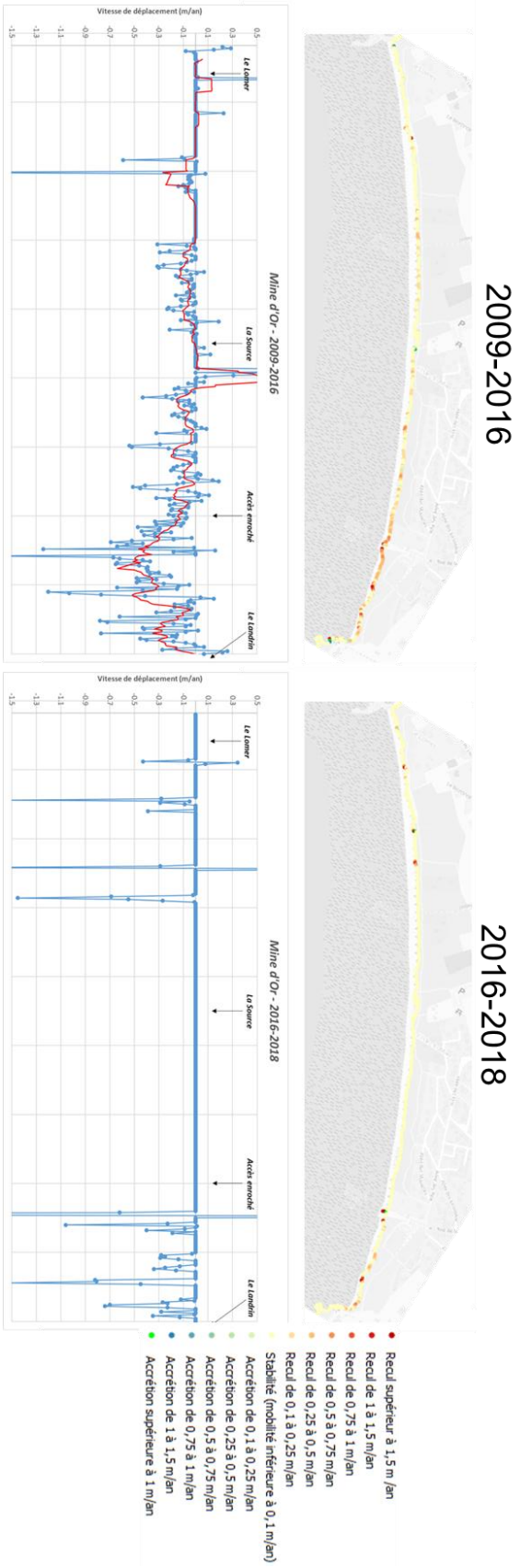


Illustration 44 – Vitesses de recul de la position de la falaise le long de la plage de la Mine d'Or sur les périodes 2009-2016, 2016-2018

L'Illustration 45 synthétise ces résultats en montrant l'évolution globale de la vitesse de recul de l'ensemble de la falaise de la Mine d'Or (i.e. pour chaque période la vitesse moyenne sur l'ensemble de la falaise). Ce résultat met notamment en évidence 2 périodes caractérisées par des vitesses de recul importantes : 1977-1982 et 1991-2000. Dans le détail, les vitesses maximales peuvent toutefois différer localement selon les secteurs et les périodes, atteignant par exemple 30 à 50 cm/an au Nord de la Source et jusqu'à 1 m/an au Sud de la Source.

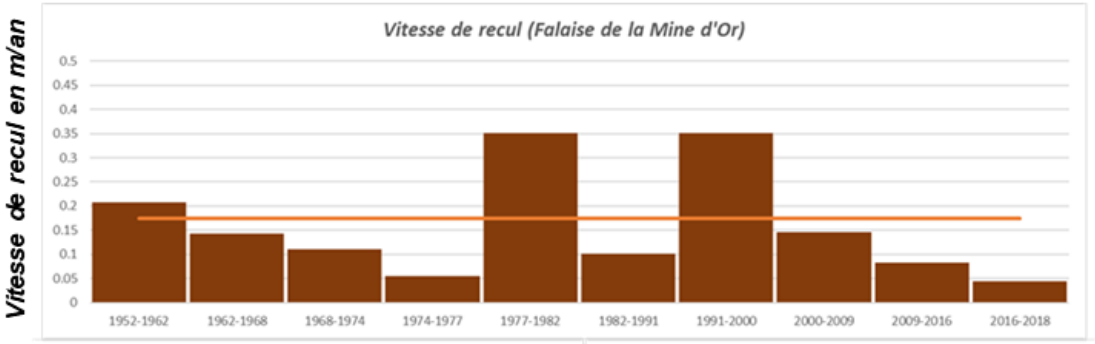


Illustration 45 – Evolutions de la vitesse de recul moyenne de la falaise de la Mine d'Or (la ligne orange représente la vitesse de recul moyenne sur l'ensemble de la période 1952-2018)

4.1.3. Confrontation aux différents indicateurs

La confrontation directe entre la vitesse de recul global de la falaise de la Mine d'Or et les indicateurs de pluviométrie et de niveau marin (Illustration 46) montre sur les premières périodes (jusqu'en 2000) certaines corrélations :

- Les périodes 1977-1982 et 1991-2000, qui correspondent aux plus forts reculs, se sont accompagnées de fortes précipitations et de forts niveaux marins ;
- Les périodes 1968-1974 et 1982-1991, caractérisées par des reculs modérés, s'accompagnent de précipitations et de niveaux marins modérés ;
- La période 1974-1977 se caractérise par un très faible recul conjugué avec des précipitations modérées et les niveaux marins les plus bas.

Toutefois, les périodes plus récentes (depuis 2000) ne laissent pas du tout apparaitre ces tendances : sur la période 2000-2009, et plus encore sur la période 2009-2016, les reculs observés restent modérés alors que ces périodes ont subi les précipitations les plus importantes et les niveaux marins les plus élevés de l'ensemble de la durée analysée. De même, ces 2 périodes 2000-2009 et 2009-2016 ont été particulièrement riches en tempêtes majeures (Johanna, Xynthia, hiver 2013-2014), ce qui ne semble pas se traduire en termes de recul de la falaise.

En complément, des analyses sur d'autres paramètres ont été réalisées afin de chercher une explication à cet écart. Ces analyses, portant par exemple sur la recherche de concomitances entre des mois à la fois pluvieux et avec de forts niveaux marins, ou sur le tracé de la vitesse de recul en fonction des différents paramètres, ne sont pas illustrées içi car elles se sont révélées peu concluantes : si des tendances apparaissent bien sur toutes les premières périodes, les périodes 2000-2009 et 2009-2014 restent nettement à l'écart des autres, du fait des reculs modérés mesurés sur ces périodes.

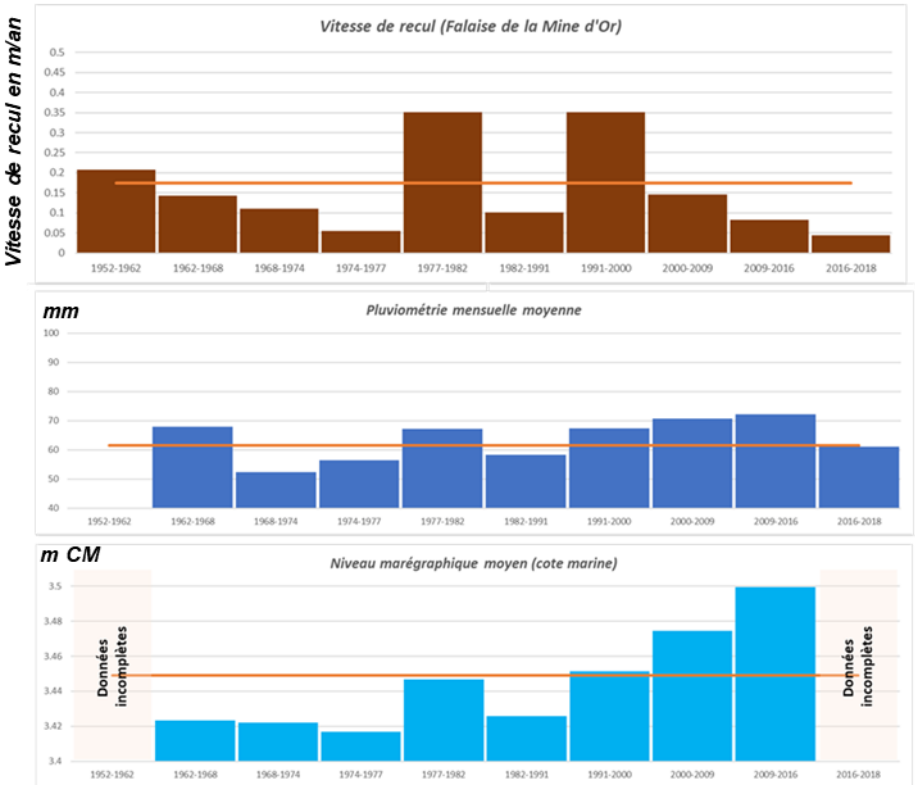


Illustration 46 – Confrontation entre les vitesses de recul globales de la falaise de la Mine d'Or pour chaque période (en haut) et les indicateurs de pluviométrie (au milieu) et de niveau marin (en bas)

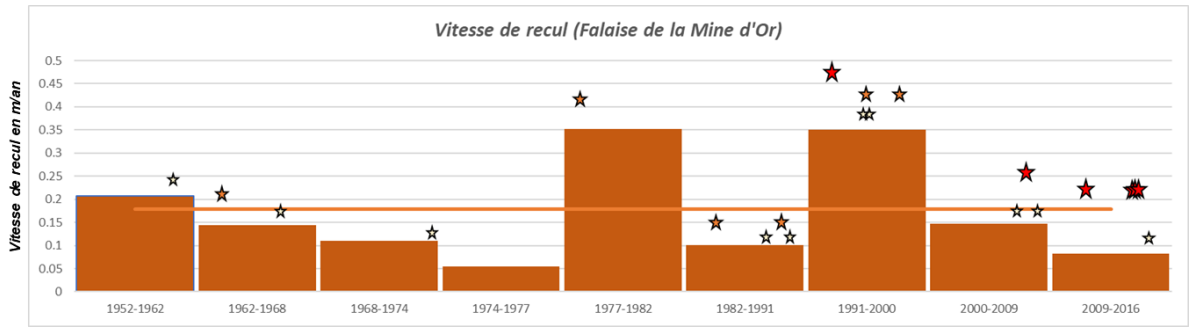


Illustration 47 – Vitesses de recul globales de la falaise de la Mine d'Or pour chaque période de 1952 à 2016 et dates des principales tempêtes recensées (les étoiles rouges, oranges et jaunes correspondent aux flèches de mêmes couleurs de l'Illustration 37)

Cette observation sur la période récente semblant assez paradoxale, un traitement similaire a été réalisé sur les traits de côte réalisés et fournis par Cap Atlantique afin de chercher à conforter ces observations. Cette comparaison s'est concentrée sur la partie Sud de la falaise, où les vitesses sont les plus importantes (Illustration 48). Cependant, les dates des photographies aériennes, et donc des positions de tête de falaise associées, utilisées étant différentes, les périodes considérées diffèrent également sensiblement, ce qui rend cette comparaison délicate…

Malheureusement, cette différence entre les périodes considérées ne permet pas de conclure de manière formelle sur le constat émis auparavant :

- Les données de Cap Atlantique permettent d'identifier une vitesse de recul maximale sur la période 1993-2004, ce qui semble compatible avec les vitesses de recul maximales obtenues ici sur la période 1991-2000 ;

- La période 1974-1981 sur les données de Cap Atlantique englobe la totalité de la période 1974-1977 (marquée par le recul le plus faible de ceux observés) et la majeure partie de la période 1977-1982 (marquée par un recul très important) considérées ici ;
- La période la plus récente issue des positions de la tête de la falaise de Cap Atlantique (2004-2016) se caractérise par un recul qui reste modéré (mais significatif), malgré des précipitations importantes.

Cette comparaison entre les données de la présente étude et les données de Cap Atlantique ne permet donc pas de confirmer ou d'infirmer catégoriquement l'hypothèse d'un « ralentissement » du recul ces dernières années.

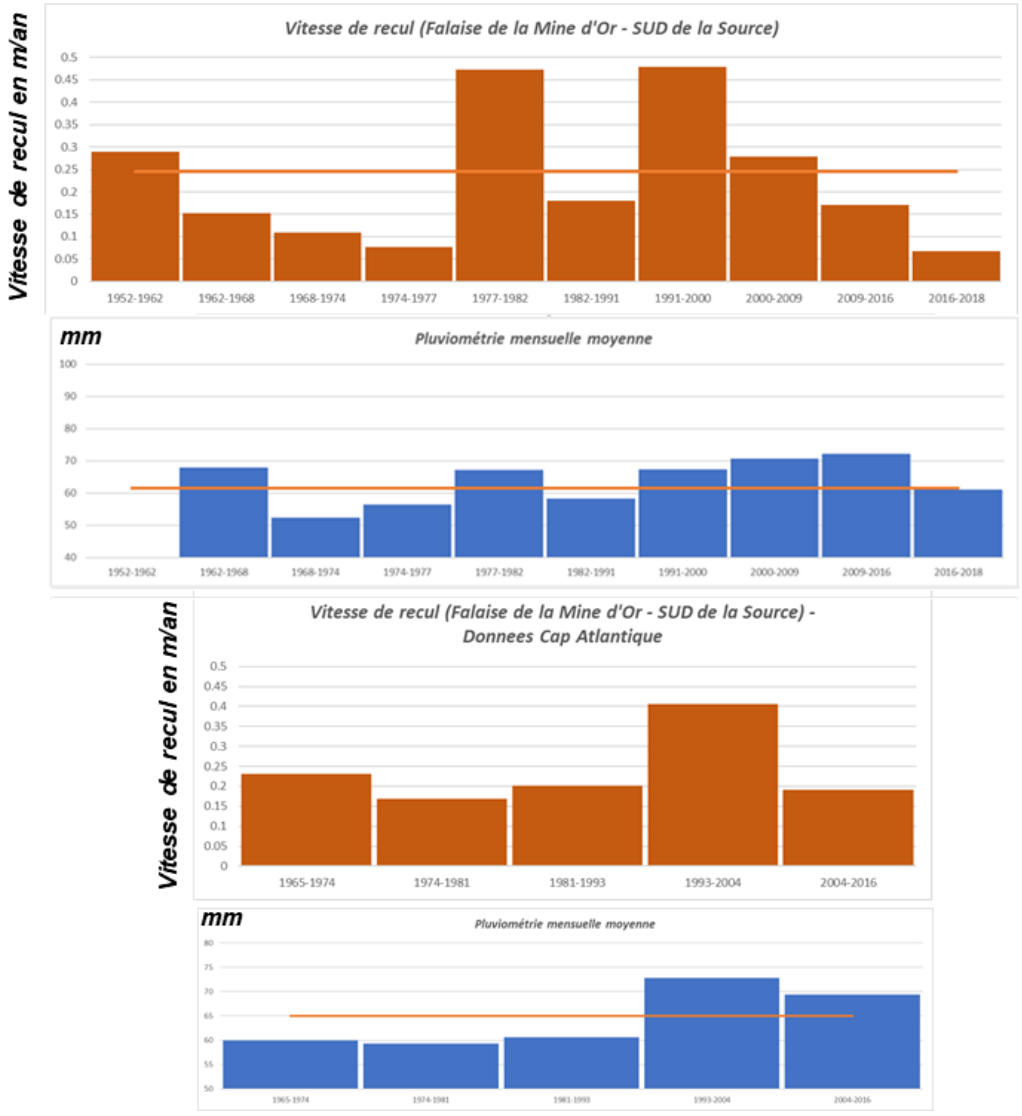


Illustration 48 – Comparaison entre les vitesses de recul pour chaque période au Sud de la plage de la Mine d'Or (en marron en haut), les pluviométries associées (en bleu en haut), les vitesses de recul sur le même secteur estimées à partir des traits de côte de Cap Atlantique (en marron en bas) et les pluvimétries associées (en bleu en bas)

Un tel ralentissement du recul de la falaise pourrait s'expliquer *a priori* de 2 façons :

- La modification d'aménagements (notamment hydrauliques) qui aurait pu contribuer à atténuer le phénomène ; cette hypothèse, la plus plausible, doit encore

être approfondie et vérifiée par la suite (interventions sur un puisard au niveau de l'accès enroché à la plage, suppression d'un parking en haut de falaise…)

- D'autres phénomènes physiques (par exemple le recul de la falaise peut conduire à l'éloigner de la mer si la plage reste stable, ce qui pourrait ralentir le déblayage des matériaux tombés par la mer).

4.2. LA POUDRANTAIS ET LE MARESCLE

4.2.1. Résultats sur le long terme (période 1952-2018)

La vitesse moyenne du recul des falaises le long de la Poudrantais et du Maresclé sur cette période de 66 ans est représentée à l'Illustration 49. Comme précédemment, on peut noter que le signal reste peu bruité sur cette période, du fait de l'incertitude réduite par des évolutions suffisamment significatives sur une grande période. Il convient également de noter que la côte sur ce secteur est représentée essentiellement par des falaises, mais aussi par des aménagements côtiers à la Poudrantais et par un petit massif dunaire au niveau de l'accès à la plage du Maresclé (Illustration 9).

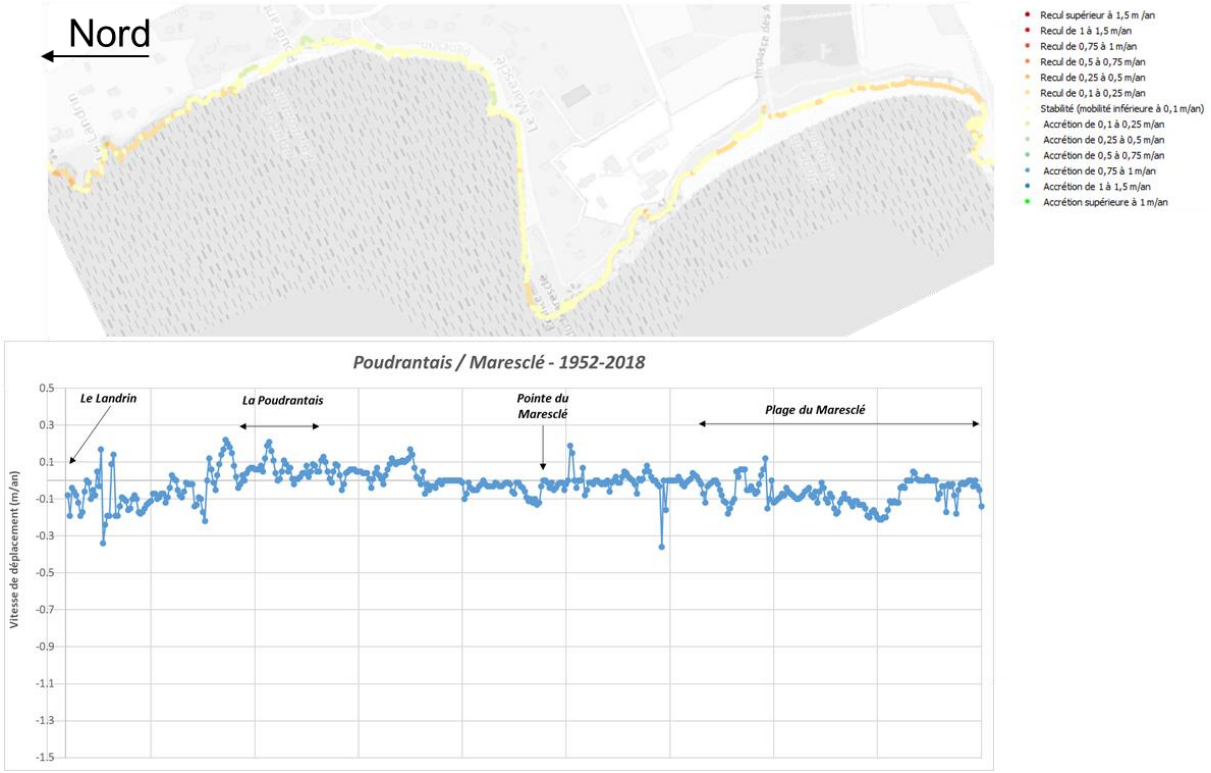


Illustration 49 - Vitesses de recul de la position du trait de côte le long de la Poudrantais et du Maresclé (la représentation cartographique pivotée en haut est approximativement calée avec la courbe des vitesses en bas)

Les vitesses de recul obtenues montrent que ces secteurs sont globalement stables, à l'exception du secteur Nord de la Poudrantais et du Sud de la Plage du Maresclé, où des reculs de l'ordre de 10 à 20 cm/an ont pu être observés.

4.2.2. Résultats sur les différentes périodes

L'analyse du recul des falaises sur chacune des 10 périodes étudiées a permis de déterminer, pour chacune d'elles et en chaque point de la falaise, les vitesses de recul associées

(illustrations 50, 51 et 52). Toutefois, là encore, compte-tenu de la durée réduite de ces périodes (2 à 10 ans), l'incertitude sur ces valeurs reste très importante (paragraphe 3.2), conduisant à des signaux bruités, volontairement laissés apparents pour une meilleure appréhension de cette incertitude.

On peut également noter que ponctuellement dans le temps et l'espace peuvent apparaitre des valeurs positives, traduisant une avancée de la falaise qui n'est bien sûr par possible dans la réalité. Cela peut s'expliquer d'une part par l'incertitude sur la méthode, qui peut être du même ordre voire supérieure à la vitesse réelle de recul (paragraphe 3.2), ou d'autre part par la réalisation d'ouvrages spécifiques (enrochements notamment) qui se traduisent alors par une avancée du trait de côte. Sur ce secteur, c'est notamment le cas pour la période 1968-1974 (aménagement et installation de la cale à la Poudrantais) et autour de l'accès à la plage du Maresclé, la présence d'un petit cordon dunaire conduit à de possibles phénomènes d'accrétion.

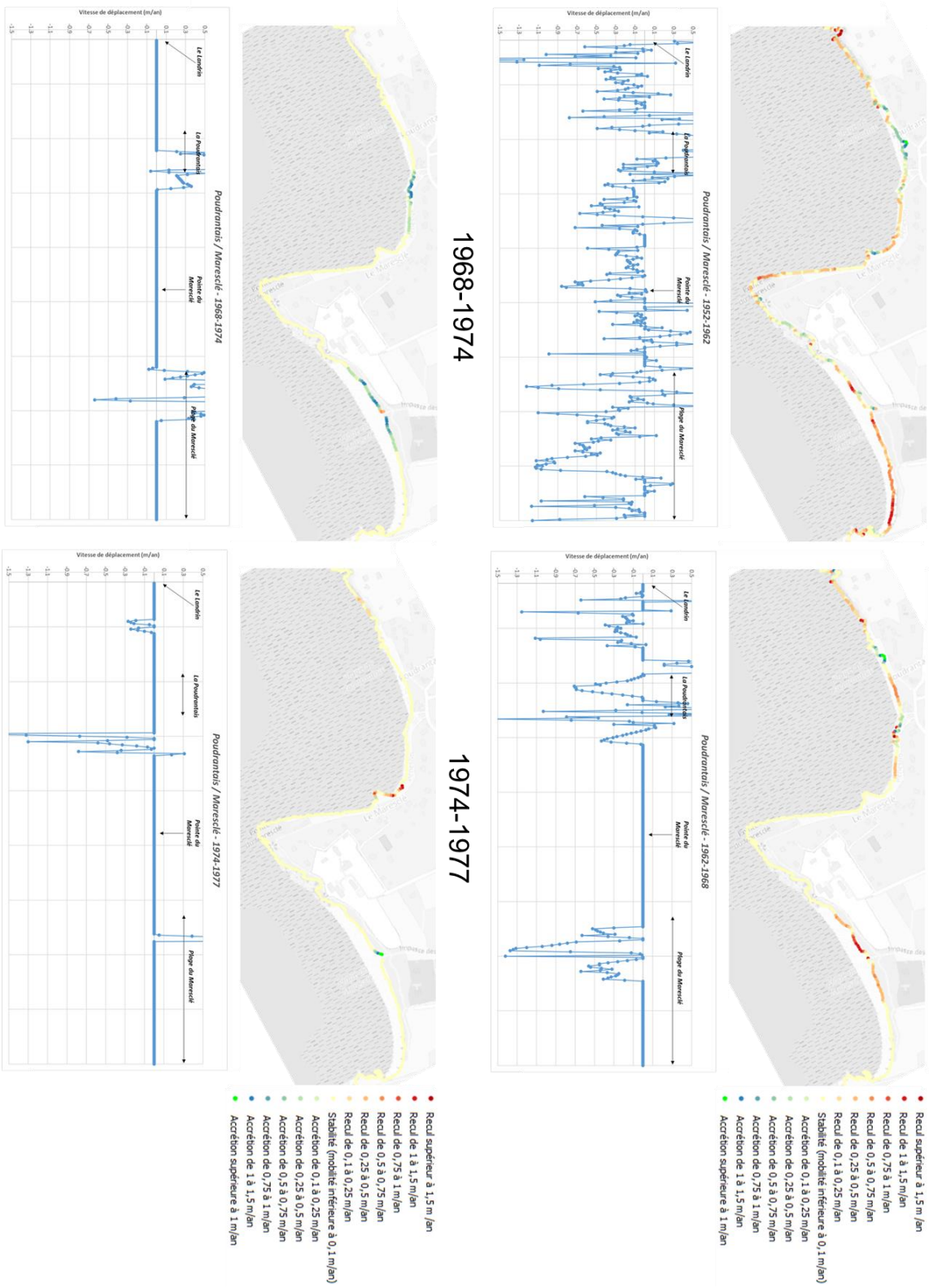


Illustration 50 – Vitesses de recul de la position du trait de côte à la Poudrantais et au Maresclé sur les périodes 1952-1962, 1962-1968, 1968-1974, 1974-1977

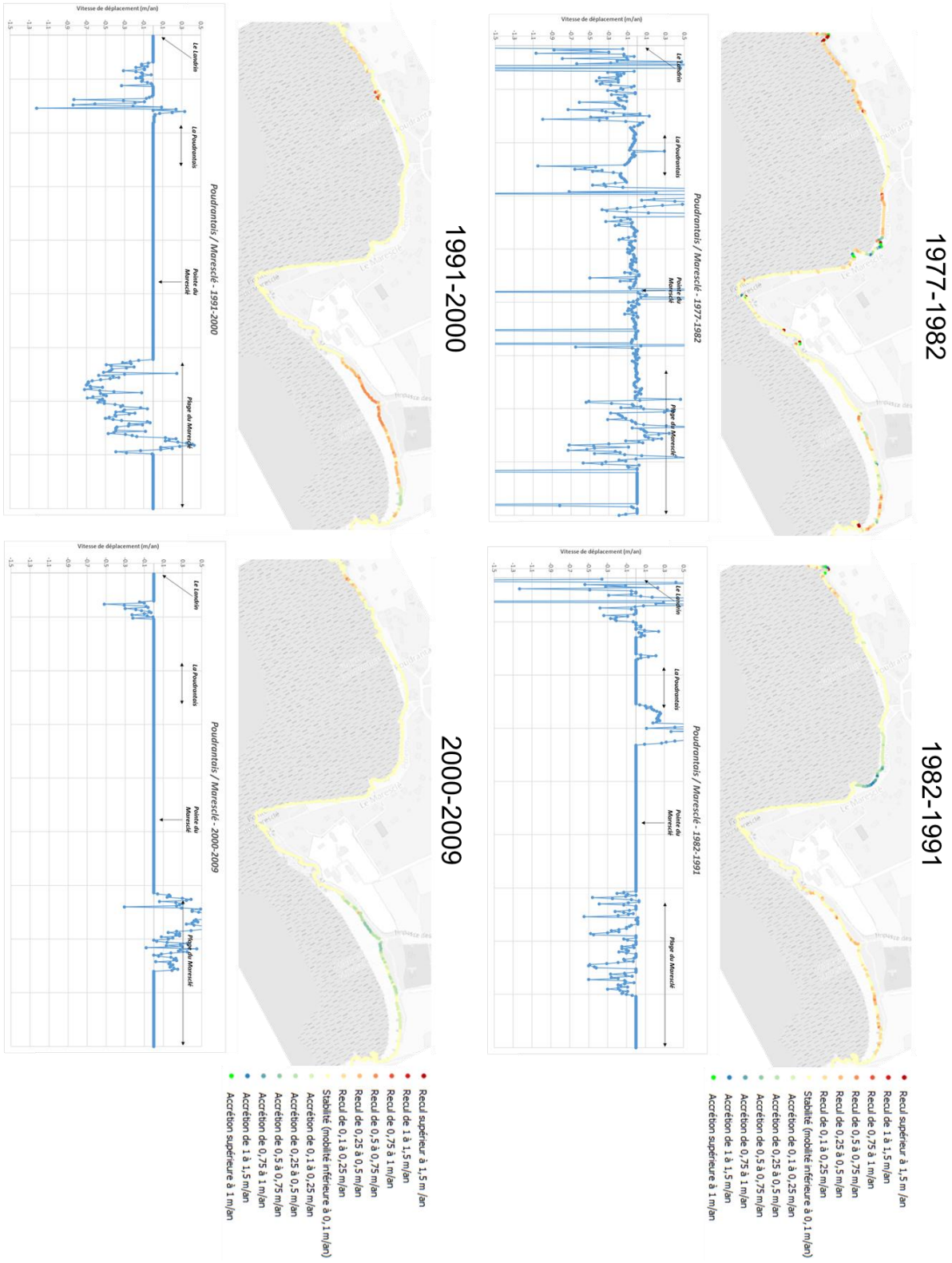


Illustration 51 – Vitesses de recul de la position du trait de côte à la Poudrantais et au Maresclé sur les périodes 1977-1982, 1982-1991, 1991-2000, 2000-2009

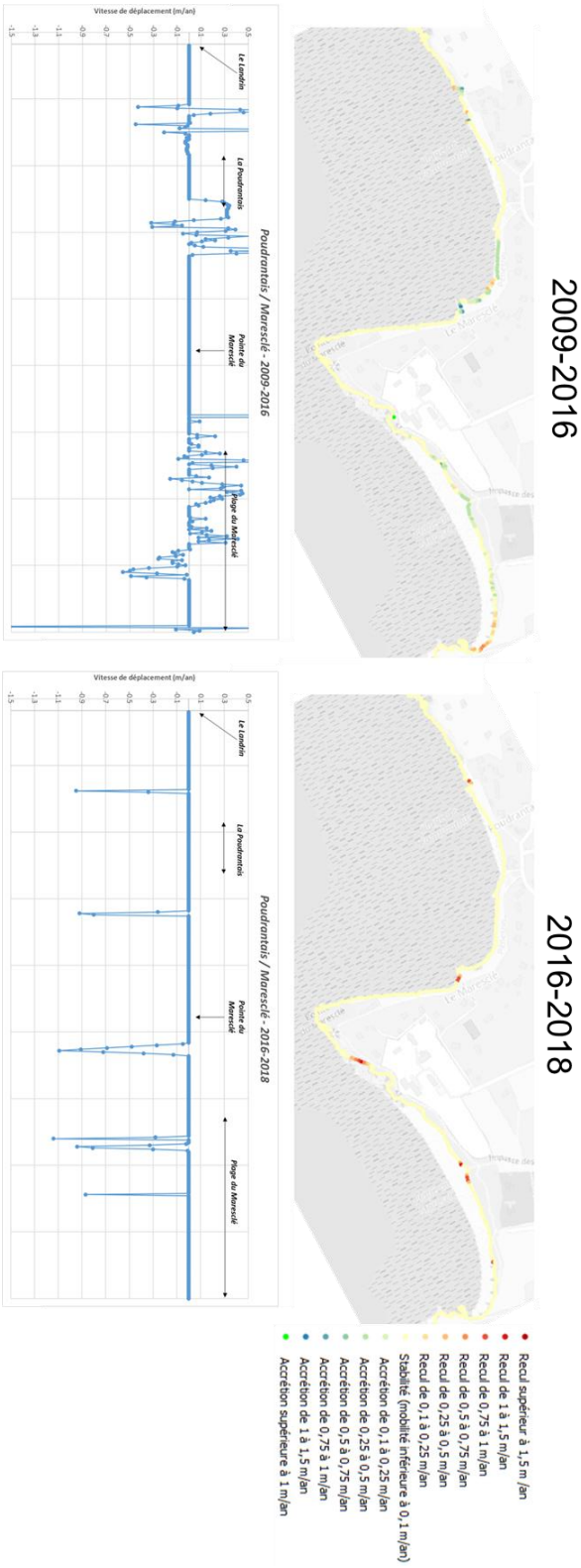


Illustration 52 – Vitesses de recul de la position du trait de côte à la Poudrantais et au Maresclé sur les périodes 2009-2016, 2016-2018

L'Illustration 53 synthétise ces résultats en montrant l'évolution globale de la vitesse de recul de l'ensemble des falaises du secteur Poudrantais-Maresclé (i.e. pour chaque période la vitesse moyenne sur l'ensemble du secteur, y compris le petit secteur sableux au niveau de l'accès à la plage du Maresclé qui ne correspond pas à des falaises).

Ce résultat reste toutefois difficile à interpréter tant les vitesses de recul restent faibles et fortement bruitées sur ce secteur. On peut noter que l'importante vitesse de recul négative (traduisant donc une « accrétion ») sur la période 1968-1974 s'explique en grande partie par les aménagements côtiers réalisés durant cette période à la Poudrantais et par une légère accrétion au niveau de l'accès à la plage du Maresclé, tandis que les faibles vitesses de recul négatives sur les périodes 2000-2009 et 2009-2016 s'expliquent à la fois par une légère accrétion au niveau de l'accès à la plage du Maresclé et par un bruit important. Les périodes qui semblent connaitre des reculs significatifs sont 1952-1962, 1962-1968, 977-1982 et 1991-2000.

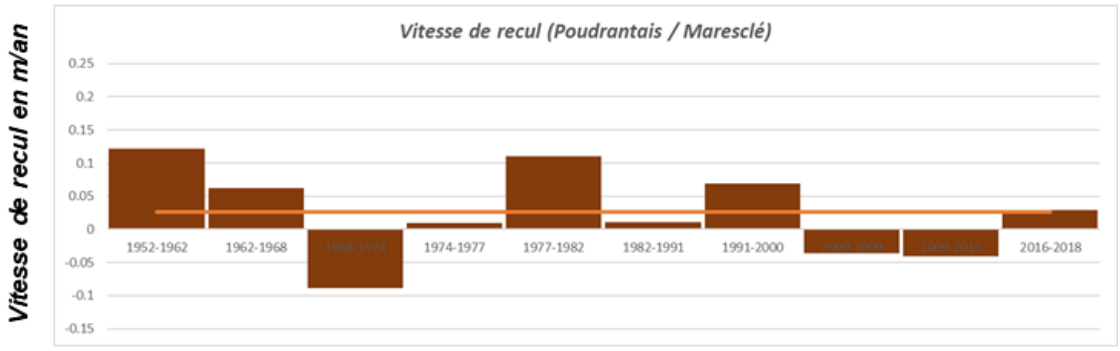


Illustration 53 – Evolutions de la vitesse de recul moyenne des falaises du secteur Poudrantais-Maresclé (la ligne orange représente la vitesse de recul moyenne sur l'ensemble de la période 1952-2018)

4.2.3. Confrontation aux différents indicateurs

Du fait des fortes incertitudes sur les faibles vitesses observées dans ce secteur, la confrontation avec les indicateurs de pluviométrie et de niveaux marins reste peu concluante (Illustration 54). Comme à la Mine d'Or, on peut noter que les reculs les plus significatifs observés sur les périodes 1962-1968, 1977-1982 et 1991-2000 correspondent à des périodes plutôt pluvieuses et souvent accompagnées de niveaux marins plutôt importants (sauf pour 1962-1968 où les niveaux marins restent modérés). Concernant les périodes 2000-2009 et 2009-2016 (particulièrement pluvieuses et avec des niveaux marins très importants), la position des falaises en elles-mêmes semble relativement stable, tandis que des phénomènes d'accrétion au niveau de la plage du Maresclé tendent à induire des vitesses de recul négatives, malgré les conditions météorologiques plutôt défavorables *a priori*.

Illustration 54 – Confrontation entre les vitesses de recul globales dans le secteur de la Poudrantais-Maresclé pour chaque période (en haut) et les indicateurs de pluviométrie (au milieu) et de niveau marin (en bas)

4.3. LA POINTE DU BILE (COTE OUEST)

4.3.1. Résultats sur le long terme (période 1952-2018)

La vitesse moyenne du recul des falaises le long de la façade occidentale de la Pointe du Bile sur cette période de 66 ans est représentée à l'Illustration 55. Comme précédemment, on peut noter que le signal reste peu bruité sur cette période, du fait de l'incertitude réduite par des évolutions suffisamment significatives sur une grande période. Il convient également de noter que la côte sur ce secteur est représentée essentiellement par des falaises, mais aussi par des aménagements côtiers sur certains secteurs (Illustration 9).

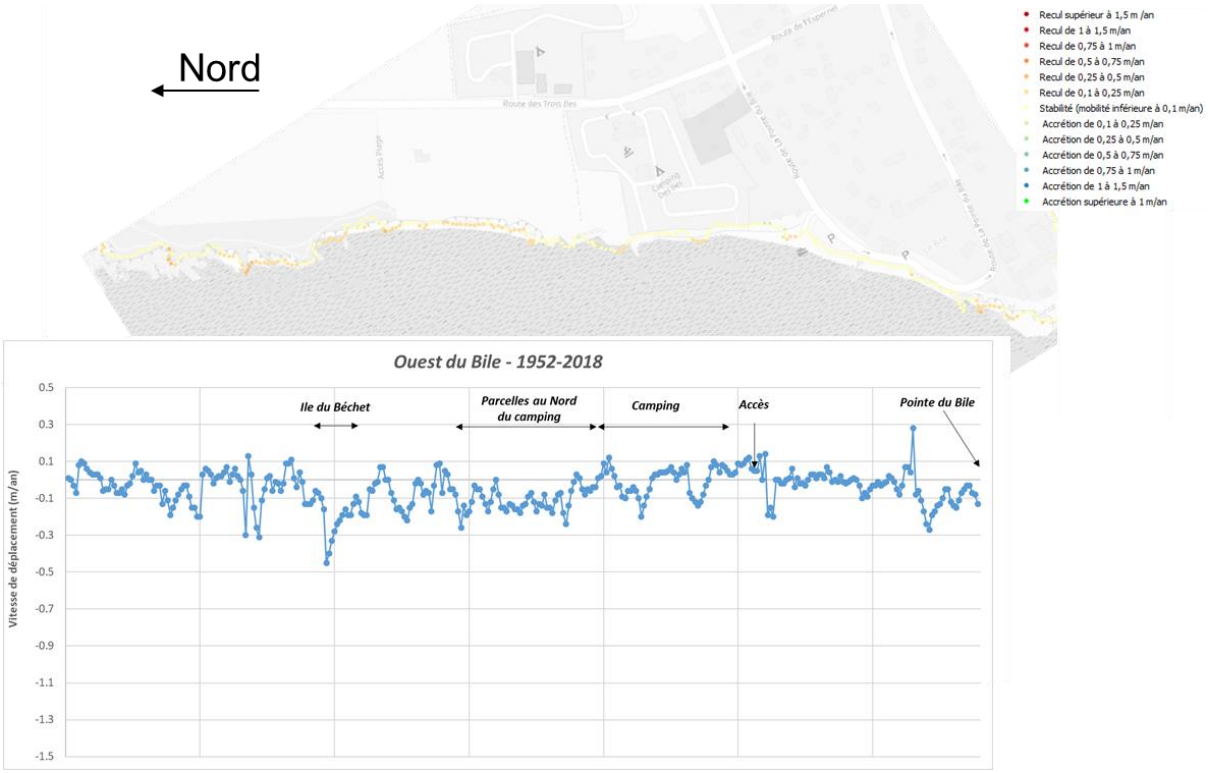


Illustration 55 - Vitesses de recul de la position des falaises le long de la façade occidentale de la Pointe du Bile (la représentation cartographique pivotée en haut est approximativement calée avec la courbe des vitesses en bas)

Les vitesses de recul obtenues montrent que ce secteur est globalement stable, à l'exception du secteur situé au Nord du camping, où des reculs de l'ordre de 10 à 20 cm/an peuvent être observés.

4.3.2. Résultats sur les différentes périodes

L'analyse du recul des falaises sur chacune des 10 périodes étudiées a permis de déterminer, pour chacune d'elles et en chaque point de la falaise, les vitesses de recul associées (illustrations 56, 57, 58). Toutefois, compte-tenu de la durée réduite de ces périodes (2 à 10 ans), l'incertitude sur ces valeurs reste très importante (paragraphe 3.2), conduisant à des signaux bruités, volontairement laissés apparents pour une meilleure appréhension de cette incertitude.

Il convient de plus de noter que sur ce secteur la photographie de 1962 a été difficile à caler en raison de la très faible urbanisation du secteur ; il en résulte un défaut de calage qui conduit à une erreur significative sur les résultats des périodes 1952-1962 et 1962-1968.

On peut également noter que ponctuellement dans le temps et l'espace peuvent apparaitre des valeurs positives, traduisant une avancée de la falaise qui n'est bien sûr par possible dans la réalité. Cela peut s'expliquer d'une part par l'incertitude sur la méthode, qui peut être du même ordre voire supérieure à la vitesse réelle de recul (paragraphe 3.2), ou d'autre part par la réalisation d'ouvrages spécifiques (enrochements notamment) qui se traduisent alors par une avancée du trait de côte. Sur ce secteur, c'est notamment le cas au niveau du camping et au niveau de l'accès à la plage juste au Sud de ce dernier, où des ouvrages de protection de type enrochements ont été installés au cours du temps.

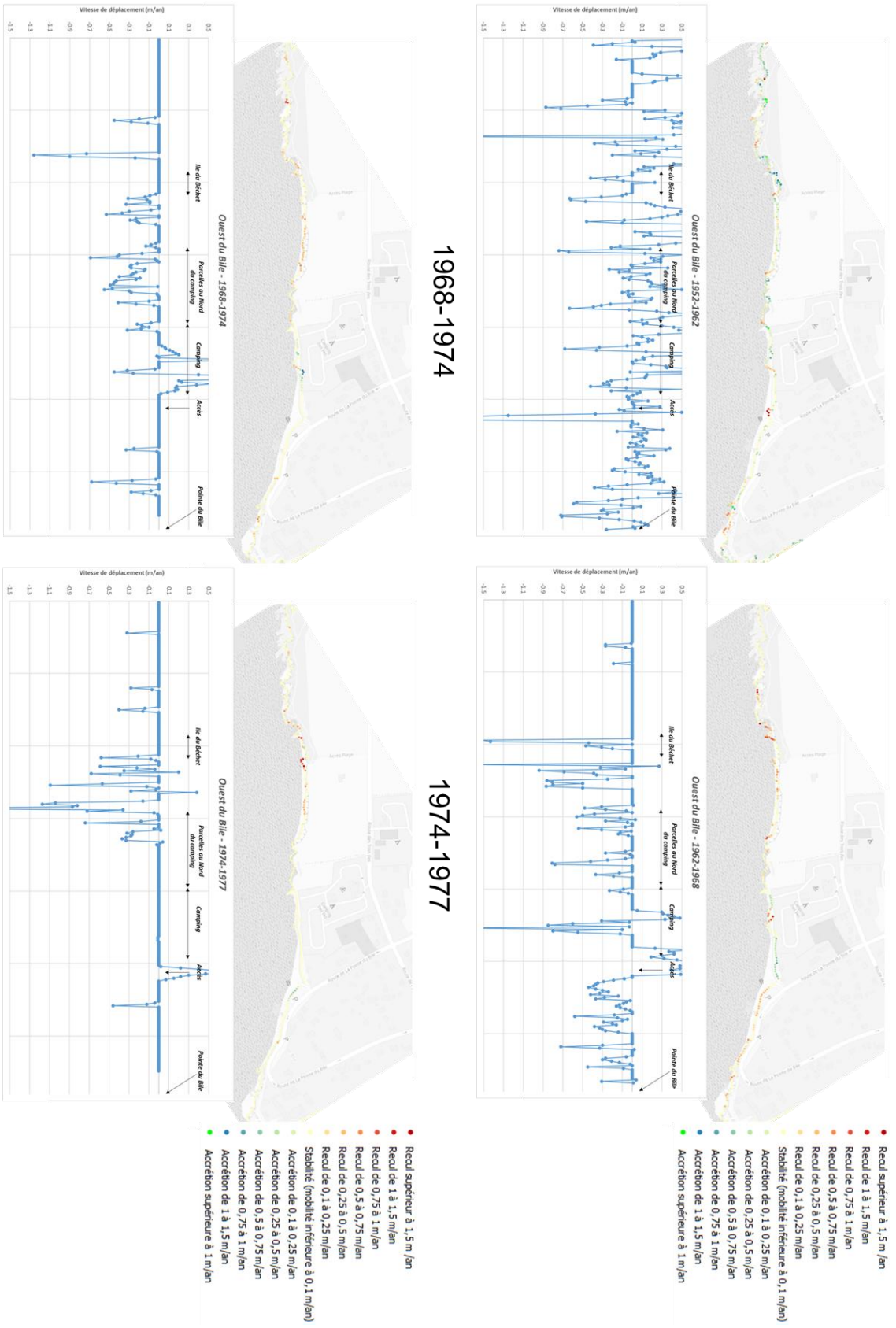


Illustration 56 – Vitesses de recul de la position des falaises de la facade occidentale de la Pointe du Bile sur les périodes 1952-1962, 1962-1968, 1968-1974, 1974-1977

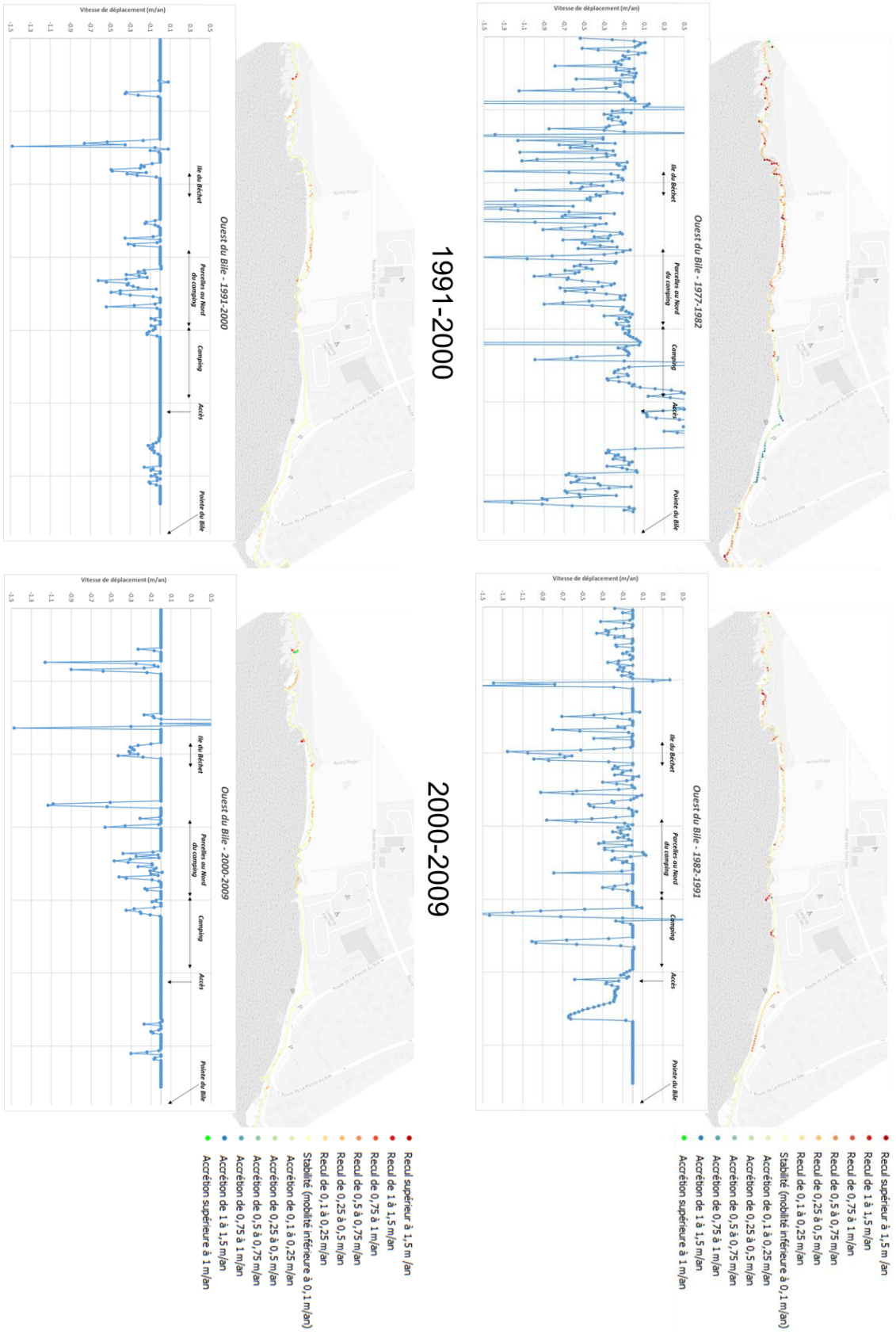


Illustration 57 – Vitesses de recul de la position des falaises de la facade occidentale de la Pointe du Bile sur les périodes 1977-1982, 1982-1991, 1991-2000, 2000-2009

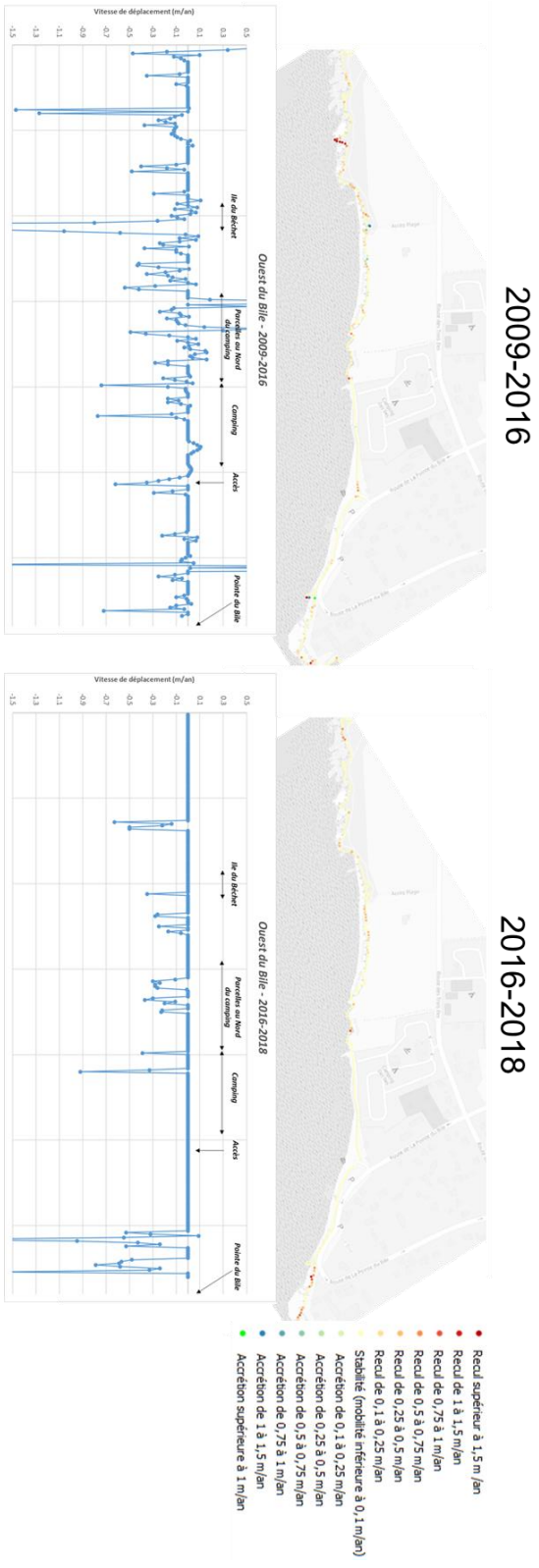


Illustration 58 – Vitesses de recul de la position des falaises de la facade occidentale de la Pointe du Bile sur les périodes 2009-2016, 2016-2018

L'Illustration 59 synthétise ces résultats en montrant l'évolution globale de la vitesse de recul des falaises de la façade occidentale de la Pointe du Bile (i.e. pour chaque période la vitesse moyenne sur l'ensemble du secteur). L'Illustration 60 représente le même résultat, en ne s'intéressant toutefois qu'au secteur du camping et des parcelles situées immédiatement au

Nord de ce dernier, car ce secteur semble connaitre un recul plus marqué que le reste de la zone.

Comme évoqué précédemment, les résultats correspondant aux 2 premières périodes ne sont pas significatifs en raison de difficultés de calage des photographies de 1962. Comme pour le secteur de la Poudrantais-Maresclé, les vitesses de recul observées sur les autres périodes sont globalement assez faibles, et incluent beaucoup de bruit et d'incertitudes, rendant délicate l'interprétation de ce recul. On peut toutefois noter que les périodes 1977-1982 et 1982-1991 de distinguent par des reculs plus marqués (jusqu'à 30 cm/an au niveau du camping et des parcelles situées plus au Nord).

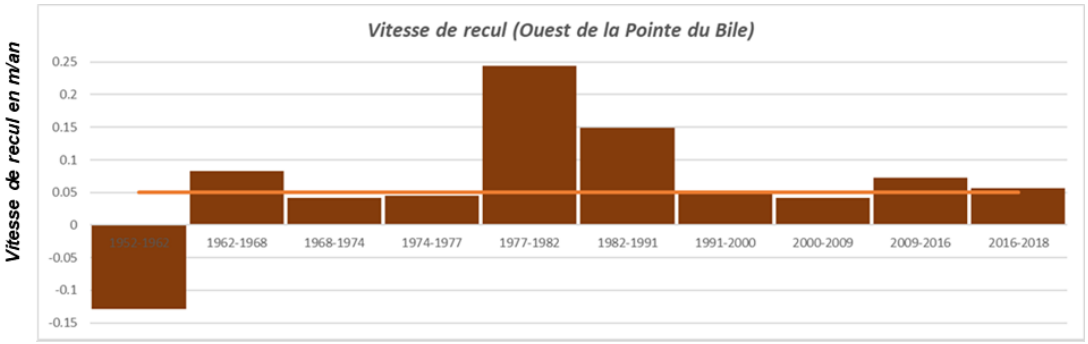


Illustration 59 – Evolutions de la vitesse de recul moyenne des falaises de la façade occidentale de la Pointe du Bile (la ligne orange représente la vitesse de recul moyenne sur l'ensemble de la période 1952-2018)

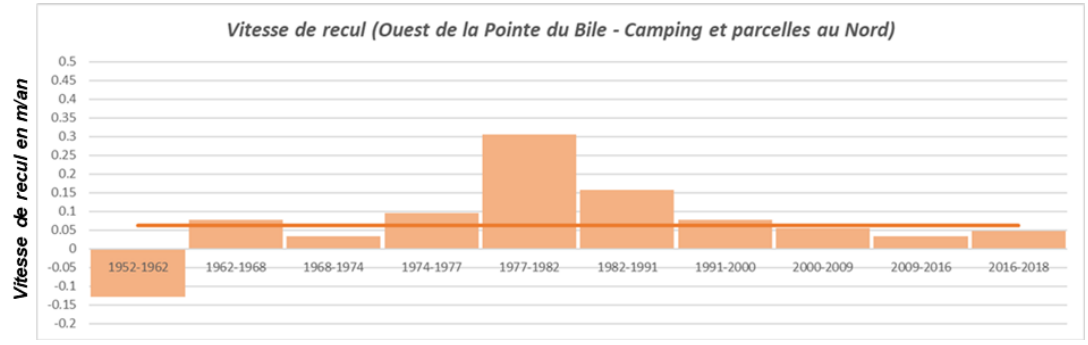


Illustration 60 – Evolutions de la vitesse de recul moyenne des falaises de la façade occidentale de la Pointe du Bile, uniquement au niveau du camping et des parcelles située juste au Nord de ce dernier (la ligne orange représente la vitesse de recul moyenne sur l'ensemble de la période 1952-2018)

4.3.3. Confrontation aux différents indicateurs

Comme sur le secteur Poudrantais-Maresclé, du fait des fortes incertitudes sur les faibles vitesses observées dans ce secteur, la confrontation avec les indicateurs de pluviométrie et de niveaux marins reste peu concluante (Illustration 61).

Comme à la Mine d'Or et sur le secteur Poudrantais-Maresclé, on peut noter un recul significatif sur la période 1977-1982, qui correspond à une période avec une forte pluviométrie et des niveaux marins élevés. Le recul significatif également observé sur la période 1982-1991 n'a lui par contre pas été observé sur les autres secteurs, et ne semble pas s'expliquer par les conditions météorologiques. Par contre, contrairement aux autres secteurs, la période 1991-2000 ne semble pas se distinguer par un recul important sur la façade occidentale de la Pointe du Bile en dépit des conditions météorologiques plutôt défavorables, de même que pour les autres périodes plus récentes.

Illustration 61 – Confrontation entre les vitesses de recul globales dans le secteur de la Poudrantais-Maresclé pour chaque période (en haut) et les indicateurs de pluviométrie (au milieu) et de niveau marin (en bas)

4.4. DE LA POINTE DU BILE A PONT-MAHE

4.4.1. Résultats sur le long terme (période 1952-2018)

Pour le secteur allant de la Pointe du Bile à Pont-Mahé, il convient de noter que les falaises ne représentent qu'une portion minoritaire du trait de côte : elles ne sont présentes que sur la façade orientale de la Pointe du Bile, à la Pointe de l'Espernel et à la petite pointe vers l'Est juste avant Pont-Mahé. L'essentiel des baies du Bile et du Palandrin se compose par contre de côtes sableuses, qui à la différence des falaises sont susceptibles de subir des phases d'accrétion (Illustration 9).

La vitesse moyenne du recul des falaises et des côtes sableuses entre la Pointe du Bile et Pont-Mahé sur cette période de 66 ans est représentée à l'Illustration 62. Comme précédemment, on peut noter que le signal reste peu bruité sur cette période, du fait de l'incertitude réduite par des évolutions suffisamment significatives sur une grande période.

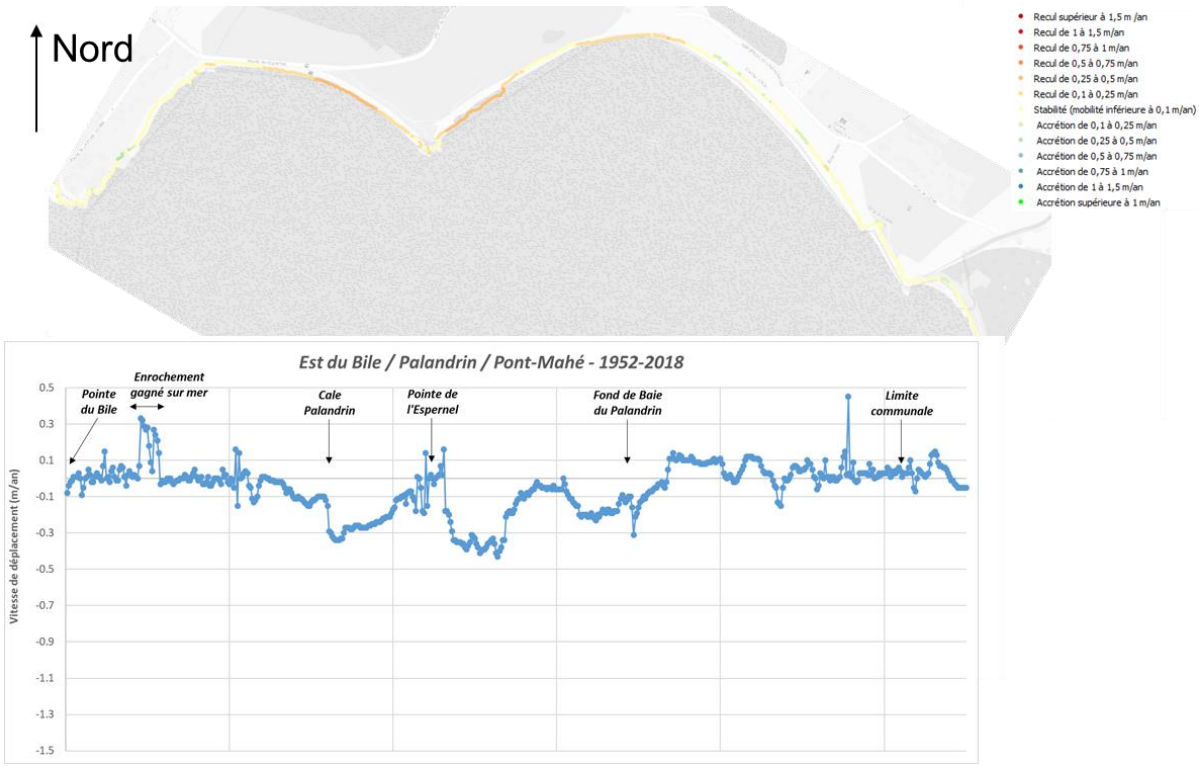


Illustration 62 - Vitesses de recul de la position des falaises et du trait de côte de la Pointe du Bile à Pont-Mahé (la représentation cartographique pivotée en haut est approximativement calée avec la courbe des vitesses en bas)

Les vitesses de recul obtenues montrent que les secteurs de falaise (façade orientale de la Pointe du Bile, Pointe de l'Espernel, pointe vers Pont-Mahé, cf Illustration 9) sont globalement stables, avec des reculs nuls ou imperceptibles. Les secteurs sableux dans les baies du Bile et du Palandrin semblent quant à eux présenter des reculs significatifs, jusqu'à 40 cm/an, mais une telle analyse diachronique sur 2 dates uniquement peut être trompeuse. L'analyse des différentes périodes montre en effet que si la partie Est de la Baie du Bile (non fixée par ouvrage) tend effectivement à reculer, les phénomènes dans la baie du Palandrin sont plutôt cycliques, avec des flux de sédiments qui semblent aller d'Ouest, et rendent ainsi l'analyse diachronique biaisée sur le long terme.

4.4.2. Résultats sur les différentes périodes

L'analyse du recul des falaises sur chacune des 10 périodes étudiées a permis de déterminer, pour chacune d'elles et en chaque point de la côte, les vitesses de recul associées (illustrations 63, 64, 65, 66). Toutefois, là encore, compte-tenu de la durée réduite de ces périodes (2 à 10 ans), l'incertitude sur ces valeurs reste très importante (paragraphe 3.2), conduisant à des signaux bruités, volontairement laissés apparents pour une meilleure appréhension de cette incertitude.

On peut également noter que ponctuellement dans le temps et l'espace peuvent apparaitre, au niveau des zones de falaise, des valeurs positives, traduisant une avancée de la falaise qui n'est bien sûr par possible dans la réalité. Cela peut s'expliquer d'une part par l'incertitude sur la méthode, qui peut être du même ordre voire supérieure à la vitesse réelle de recul (paragraphe 3.2), ou d'autre part par la réalisation d'ouvrages spécifiques (enrochements notamment) qui se traduisent alors par une avancée du trait de côte. Sur ce secteur, c'est notamment le cas au niveau de l'enrochement gagné sur la mer sur la façade orientale de la Pointe du Bile entre 1968 et 1974… Sur les secteurs sableux, des valeurs positives sont bien évidemment possibles, traduisant des phénomènes d'accrétion (avancée du trait de côte).

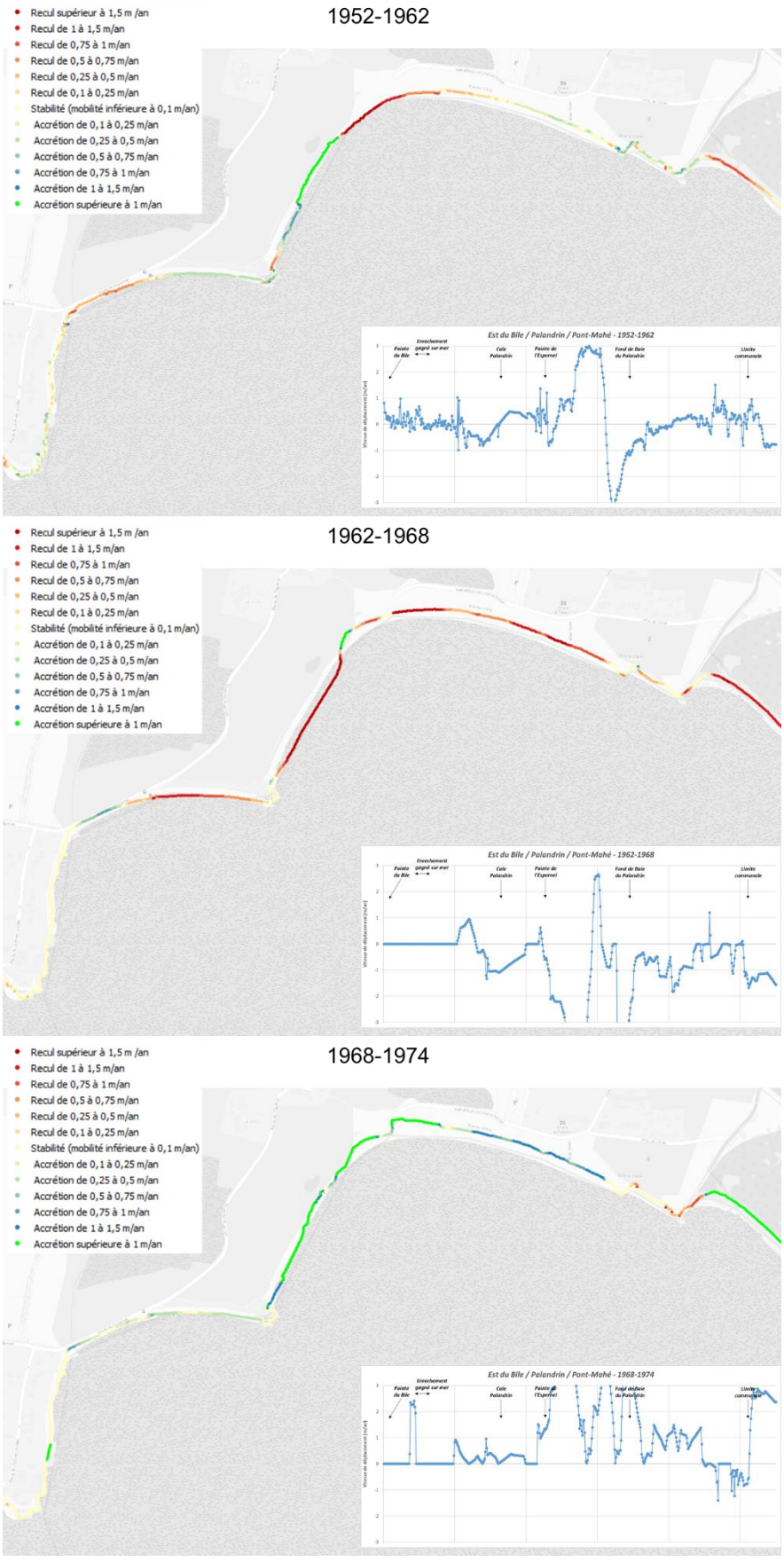


Illustration 63 – Vitesses de recul de la position des falaises et du trait de côte entre la Pointe du Bile et Pont-Mahé sur les périodes 1952-1962, 1962-1968, 1968-1974

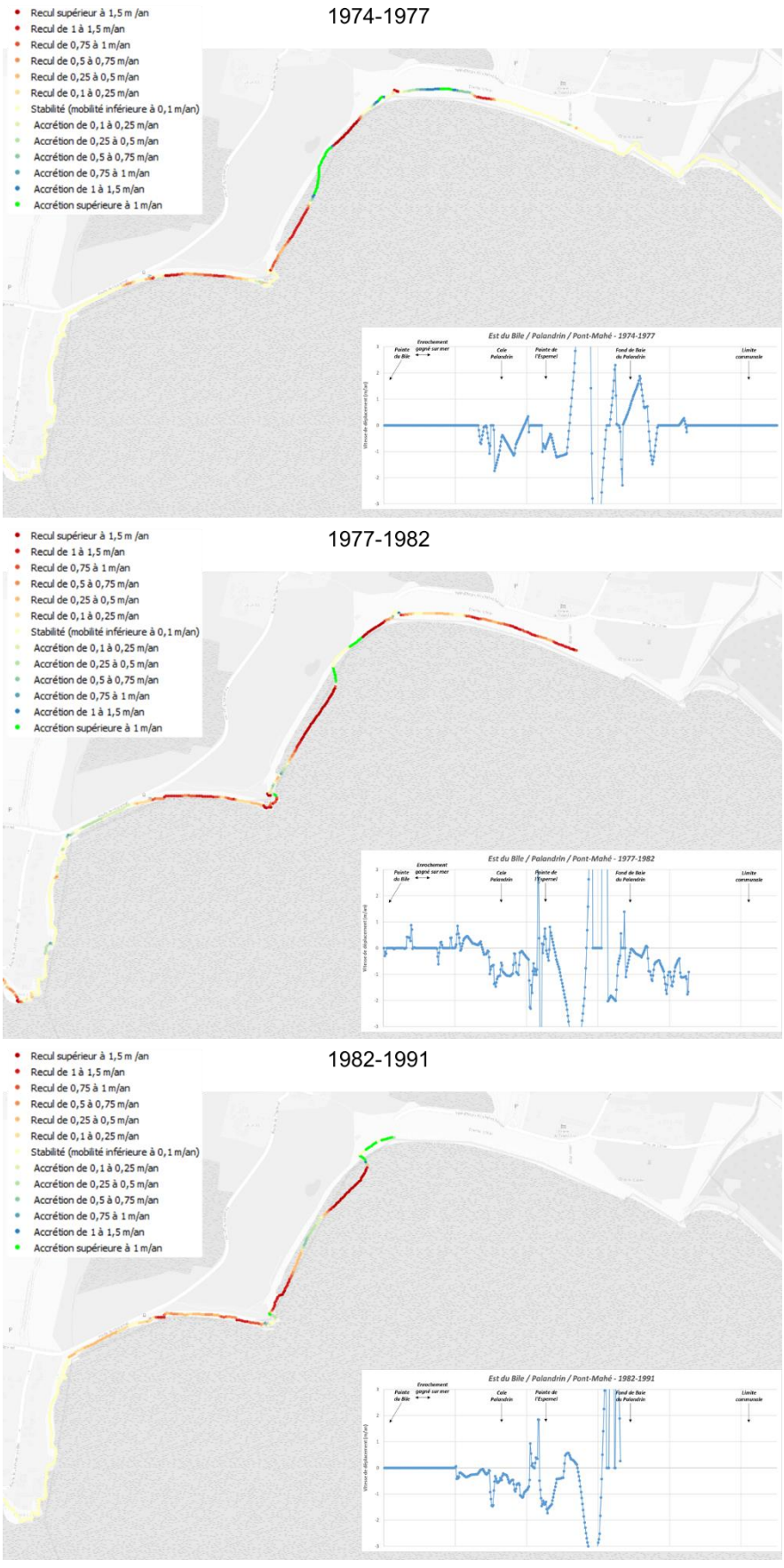


Illustration 64 – Vitesses de recul de la position des falaises et du trait de côte entre la Pointe du Bile et Pont-Mahé sur les périodes 1974-1977, 1977-1982, 1980-1991

Illustration 65 – Vitesses de recul de la position des falaises et du trait de côte entre la Pointe du Bile et Pont-Mahé sur les périodes 1991-2000, 2000-2009, 2009-2016

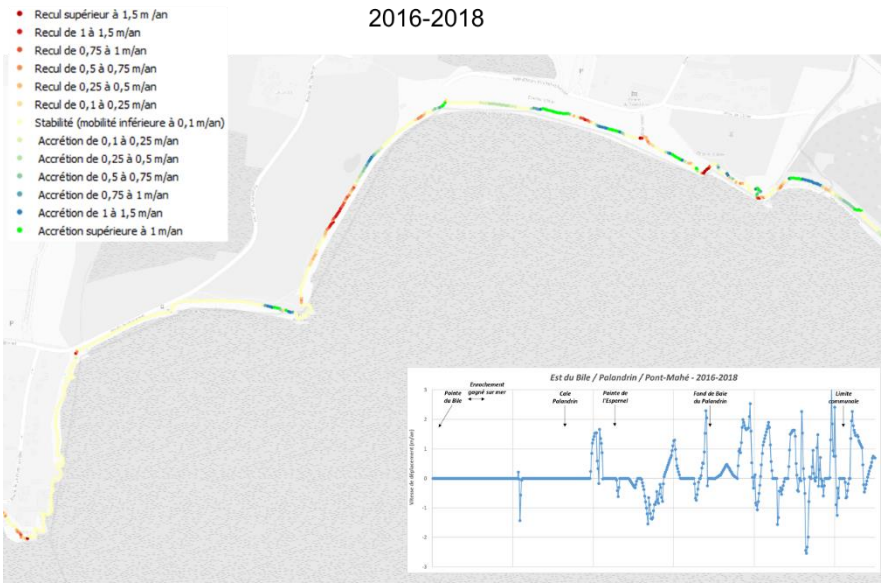


Illustration 66 – Vitesses de recul de la position des falaises et du trait de côte entre la Pointe du Bile et Pont-Mahé sur la période 2016-2018

Au final, les différents secteurs de falaises entre la Pointe du Bile et Pont-Mahé (façade orientale de la Pointe du Bile, Pointe de l'Espernel, Pont-Mahé) apparaissent particulièrement stables. Les côtes sableuses de la Baie du Bile et de la Baie du Palandrin sont quant à elles affectées de phénomènes cycliques sur plusieurs années, au gré des transits de sédiments pouvant être perturbés par des constructions d'ouvrages. Dans la Baie du Palandrin, notamment, des bancs sableux intertidaux se propageant d'Est en Ouest sur plusieurs années apparaissent nettement, se traduisant par des phénomènes d'accrétion lorsque le banc arrive et d'érosion lorsqu'il continue plus à l'Ouest. Ce phénomène rappelle ce qui peut nettement être observé au Nord de la commune de Pénestin, autour de l'anse de Camaret et plus à l'Est, où des bancs sableux intertidaux se propagent de manière cyclique, sur plusieurs années, depuis l'Ouest vers l'Est, vers l'intérieur de l'estuaire de la Vilaine.

Concernant les ouvrages côtiers, on peut noter :

- Sur la façade orientale de la Pointe du Bile, l'installation d'un aménagement enroché gagné sur la mer au cours de la période 1968-1974, aménagement repris et finalisé durant la période 1977-1982 ;
- La présence d'un ouvrage transversal type épi installé au niveau de la jonction entre la côte rocheuse de la Pointe du Bile et la côte sableuse de la Baie du Bile ; cet ouvrage a pu être installé entre 1952 (où il n'est pas perceptible sur les photographies aériennes) et 1962 (où il apparait nettement) ;
- Des ouvrages longitudinaux de type enrochement visant à fixer le trait de côte dans la Baie du Bile ; un premier, de près de 200 m de long entre l'ouvrage transversal évoqué précédemment et l'accès à la grève, apparait nettement pour protéger la route sur les photographies de 2009 (bien qu'il soit difficile de préciser s'il était présent sur les photographies précédentes) ; un second, nettement plus court (de l'ordre d'une vingtaine de mètres de long), apparait sur les photographies de 2016 (il n'était pas présent sur les photographies précédentes, y compris sur des photographies de 2013 disponibles) pour protéger la route juste à l'Est de l'accès à la grève : il est probable que l'installation des aménagements précédents ait amplifié l'érosion en aval de ce « point dur », ce qui a conduit à l'installation de cet aménagement.
- En tout état de cause, si l'érosion semble plus chronique dans la Baie du Bile que dans la Baie du Palandrin, il est à craindre que ces aménagements visant à fixer le

trait de côte ne conduise à une amplification des phénomènes d'érosion plus à l'Est, voire à une perturbation des apports de sédiments dans la Baie du Palandrin.

Du fait de ces caractéristiques (stabilité des falaises et érosion/accrétion cycliques sur la côte sableuse avec impact des ouvrages anthropiques), la confrontation de la mobilité des falaises et du trait de côte avec les indicateurs météorologiques n'est pas apparue pertinente sur ce secteur.

5. Conclusion et perspectives

L'objet de cette première phase du projet PENEBOCO était d'analyser l'évolution de la cinématique passée des falaises en lien avec les évènements climatiques (analyse de la position des falaises au cours du temps à partir de photographies aériennes anciennes et récentes et comparaison avec les conditions de forçage météo-océaniques), sur 4 sites de la commune de Pénestin choisis en concertation avec la mairie de Pénestin et la DDTM 56.

L'analyse des photographies aériennes anciennes menée dans cette étude a permis d'avancer un certain nombre de conclusions :

- A la Mine d'Or :
    - Le recul de la falaise est bien marqué, mais avec des vitesses de recul sensiblement moins importantes que celles attendues : comme avancé par Schroëtter (2013), la partie Nord de la falaise recule significativement moins vite que la partie Sud.
    - Les vitesses de recul au Nord de la Source sont typiquement de l'ordre de 10 cm/an (avec parfois sur des périodes plus courtes des vitesses pouvant atteindre l'ordre de 30 à 50 cm/an), alors qu'au Sud de la Source elles augmentent typiquement à 30 cm/an (avec parfois sur des périodes plus courtes des vitesses pouvant atteindre l'ordre de 1 m/an).
    - Si sur la majeure partie de la période analysée (de 1952 à 2000) le recul semble directement corrélé avec les conditions météo marines (notamment la pluviométrie et le niveau marin), il semble que la période récente (depuis 2000) se distingue par un recul limité malgré de fortes précipitations, des niveaux marins particulièrement élevés et une fréquence marquée de tempêtes importantes. Ce ralentissement pourrait s'expliquer par des modifications d'aménagement, notamment concernant la gestion des eaux pluviales (hypothèse restant à vérifier).
- A la Poudrantais et au Maresclé :
    - Les falaises reculent de façon beaucoup plus modérée, rendant l'analyse fragile : on atteint en effet les limites de la méthode, et l'ordre de grandeur des incertitudes peut alors devenir du même ordre, voire supérieur, aux vitesses de recul que l'on cherche à détecter.
    - Seuls 2 secteurs de falaise semblent se distinguer par des reculs significatifs, pouvant atteindre ou dépasser les 10 cm/an : le Nord de l'anse de la Poudrantais, vers le Landrin, et le Sud de la Plage du Maresclé.
- Sur la façade occidentale de la Pointe du Bile :
    - Comme à la Poudrantais/Maresclé, le recul des falaises reste modéré, ce qui complique l'analyse. Ce recul semble se produire de façon très ponctuelle et localisée (à la différence de la Mine d'Or où le recul est globalement généralisé).
    - Les parcelles situées au Nord du camping (dont le trait de côte a d'ailleurs été fixé par un enrochement) semblent toutefois reculer plus significativement, avec des vitesses pouvant atteindre ou dépasser les 10 cm/an.
- De la Pointe du Bile à Pont-Mahé :
    - Ce secteur correspond à une combinaison de côtes à falaises apparaissant stables (façade orientale de la Pointe du Bile, Pointe de l'Espernel, Pont-Mahé) et de côtes sableuses fortement mobiles avec une certaine cyclicité (baies du Bile et du Palandrin), bien qu'une tendance à l'érosion puisse être distinguée de part et d'autre de la Pointe de l'Espernel.

- L'ajout d'aménagement côtiers longitudinaux destinés à fixer le trait de côte dans la Baie du Bile peut se traduire par un accroissement de l'érosion en « aval dérive » de ces ouvrages ; ils pourraient par ailleurs perturber les transits sédimentaires qui sont clairement visibles dans la Baie du Palandrin (flèches sableuses se déplaçant d'Ouest en Est vers Pont-Mahé).

Le présent rapport conclue la phase 1 du projet PENEBOCO (PEnestin : EBOulement COtiers) qui visait à mieux comprendre les évolutions passées des falaises de la commune de Pénestin, et notamment de la falaise de la Mine d'Or. Il a permis de revoir à la baisse les vitesses de recul sur le long terme des falaises par rapport à ce qui était attendu a priori dans la bibliographie scientifique, de vérifier que certaines corrélations apparaissaient entre les vitesses de recul de la falaise de la Mine d'Or et les conditions météo-océaniques (les périodes de fort recul apparaissant comme à la fois très pluvieuses et avec des niveaux marins élevés), mais aussi de souligner un possible ralentissement de ce recul à la Mine d'Or, peut-être du fait d'aménagements hydrauliques récents (hypothèse restant à vérifier). Malgré ce ralentissement potentiel, il apparait que des reculs ponctuels parfois conséquents peuvent continuer à se produire, comme le montrent les événements récents et les analyses menées sur les périodes récentes.

Dans la phase 2 du projet PENEBOCO, l'installation d'une caméra pour le suivi de la falaise permettra de visualiser et mieux comprendre les mécanismes à l'origine du recul de la falaise (ruissellement et infiltration entrainant l'effondrement du haut de la falaise, nettoyage des matériaux tombés par la mer, éventuel sapement du pied de la falaise par la mer…). Enfin, la 3ème et dernière phase du projet visera à évaluer le recul possible de la falaise à l'échéance 100 ans sur la base des éléments des 2 premières phases.

6. Bibliographie

Bakkouch L., Bihr H., Ruggeri P., Follin J.-M., Simonetto E., Touzard P. (2015) - Comparaison de méthodes de recalage d'images pour le géoréférencement de clichés anciens. Revue XYZ • N° 142, pp. 53-61.

Blaise E. (2017) - Etude des dynamiques du trait de côte de la région Bretagne à différentes échelles spatio-temporelles. Mémoire de thèse de l'Université de Bretagne occidentale - Brest.

Bonnet S. (1998) – Tectonique et dynamique du relief : le socle armoricain au Pléistocène. Thèse de doctorat de l'Université de Rennes 1, Mémoire de Géosciences Rennes, 352 p.

Bonnet S. et Menier D. – Histoire géologique de la falaise de la Mine d'Or : A Pénestin, à la recherche d'un fleuve disparu. Guide géologique, 9 p.

Brault N., Guillocheau F., Proust, J.N., Nalpas T., Bun J.P., Bonnet, S., Bourquin S. 2001, Le système fluvio-estuarien pléistocène moyen-supérieur de Penestin (Morbihan) : une paléo-Loire ? Bulletin de la Société géologique de France t. 172, n° 5, pp. 563-572.

Bulteau T., Nicolae-Lerma A. et Lecacheux S. (2013) - Projet Climats de houle – Phase 2 : Analyse des valeurs extrêmes de vagues le long de la côte Atlantique et en Manche, Rapport BRGM/RP-62730-FR, 49 p., 26 fig., 3 ann.

Charles E., Idier D., Thiébot J., Le Cozannet G., Pedreros R., Ardhuin F. et Planton S. (2012) – Present wave climate in Bay of Biscay : Spaciotemporal variability and trends from 1958 to 2001. Journal of Climate, 25 (6), 2020-2039, doi : 10.1175/JCLI-D-11-00086.1.

Ferroniere G. (1921) – Notes de géologie Marine. Bull. Soc. Géol. Min. de Bretagne, II, spé., 187-211.

Guilcher A. (1948) – Le relief de la Bretagne méridionale de la baie de Douarnenez à la Vilaine. Le Roche-sur-Yon, Potier, 682 p.

Hédou F., Roche A., Trmal C., Moraud S., Deniaud Y. (2018) - Élaboration de l'indicateur national de l'érosion côtière. XV^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, La Rochelle, 29 au 31 mai 2018, Editions Paralia. DOI:10.5150/jngcgc.2018.07.

Landreau B. (2018) - Stratégie de gestion du trait de côte dans le Morbihan. Phase 1 : Caractérisation de la vulnérabilité des territoires littoraux. Rapport CEREMA, affaire C17OI0023.

Le Roy S., Voix F., Blaise E. avec la collaboration de Schroëtter J.M. et Bardeau M. (2020) – Caractérisation de la géomorphologie du trait de côte, vulnérabilité à l'érosion et inventaire des tempêtes dans le département du Morbihan (56). Rapport final. BRGM/RP-69485-FR, 163 p., 127 ill.

Menier D., Tessier B., Proust J.N., Baltzer A., Sorrel P., Traini C. (2010) - The Holocene transgression as recorded by incised-valley infilling in a rocky coast context with low sediment supply (southern Brittany, western France). Bull. Soc. géol. Fr., 2010, t. 181, no 2, pp. 115-128.

Menier D., Scalliet F., Proust J.N., Cassen S. (2009) – Contexte géomorphologique et paléoenvironnemental en Bretagne Sud au Pléistocène. Action collective de recherche (2003-2006) – Colloque international, Vannes 2007 : Autour de la table : Explorations archéologiques et discours savants sur des architectures néolithiques à Locmariaquer, Morbihan tTable des Marchands et Grand Menhir), pp. 800-813.

Moore L.J. (2000) - Shoreline Mapping Techniques. Journal of Coastal Research, vol. 16, n°1, p. 111–124.

Pian S., Regnauld H., Daire M.-Y, Proust J.-N., Shi B., Menier D., Lopez-Romero E. (2011) - Integration of Heritage Loss into Vulnerability Assessments of South Brittany Coastline (France) : Implications for Coastal Vulnerability Analyses, EspacesTemps.net, 17 p.

Pinot J.P. (1974) – Le pré-continent Breton, entre Penmarc'h, Belle-Ile et l'escarpement continental, étude géomorphologique. Lannion, Impram, 256 p.

Schroëtter J.-M. avec la collaboration de Bondis C. et Pillois F. (2013) – Compréhension des mouvements de terrain de la commune de Pénestin, Morbihan (56) : Retrait-gonflement des argiles ou érosion littorale. Rapport BRGM/RP-62681-FR, 83 p., 35 fig., 2 ann.

SHOM-CETMEF (2012) – Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique). Rapport SHOM. 144 p., 2 ann.

SHOM (2019) – Références altimétriques maritimes - Ports de France métropolitaine et d'outre-mer : Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée. 120 p. Edition 2019.

Thieler E.R., Himmelstoss E.A., Zichichi J.L., Ergul A. (2009) - Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 - An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change. Woods Hole, Massachusetts: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008–1278.

Vanney J.R. (1977) – Géomorphologie de la marge continentale sud-armoricaine. S.E.D.E.S., Paris, 473 p.

Van Vliet-Lanoë B., Hibsch C., Csontos L., Jegouzo S., Hallégouët B., Laurent M., Maygari A., Mercier D., Voinchet P. (2009), Seismically induced shale diapirism: the Mine d'Or section, Vilaine estuary, Southern Brittany, Int J Earth Sci (Geol Rundsch).

Van Vliet-Lanoë B., Bonnet S., Hallegouët B., Laurent M., (1997), Neotectonic and seismic activity in the Armorican and Cornubian Massifs: regional stress field with glacio-isostatic influence ?, J. Geodynamics Vol.24, Nos 1-4, pp. 219-239, Elsevier Science Ltd.

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - **www.brgm.fr**

Direction régionale Bretagne
2, rue de Jouanet
35700 – Rennes – France
Tél. : 02 99 84 26 70