Document public

Atlas des aléas littoraux (Érosion et Submersion marine) des départements d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère : Phase 1

Rapport final

BRGM/RP-65212-FR
Octobre 2015

SPPR

Document public

Atlas des aléas littoraux (Érosion et Submersion marine) des départements d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère : Phase 1

Rapport final

BRGM/RP-65212-FR
Octobre 2015

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets)
de Service public (Recherche) du BRGM 11-LIT-A34

J.-M. SCHROËTTER et E. BLAISE
Avec la collaboration de V. DEBERT, B. LE GALL, G. GILBERT, H. TISSOT, F. MEUNIER, J. AUDO, F. PILLIOS, M. PREMALLION, B. GOUYGOU ET S. SUANEZ

Vérificateur :

Nom : Yann BALOUIN / Eric PALVADEAU

Date : 30/10/2014 – 30/10/2015

Signature :

Approbateur :

Nom : Eric GOMEZ

Date : 30/10/2015

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Avertissement

Pour des commodités de lecture, ce rapport a été organisé en ***dix chapitres*** :

- ***un chapitre*** de présentation du contenu, rappel contractuel etc. ;
- et ***neuf chapitres*** correspondant au découpage réalisé des côtes d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère, appelé ***« Compartiment »***, tel que : ***Baie du Mont-Saint-Michel, Côte d'Émeraude, Baie de Saint-Brieuc, Côtes du Trégor-Goélo, Côtes du Nord-Finistère, Iroise, Baie d'Audierne et côtes du Sud-Finistère***.

Pour chaque chapitre, les différentes méthodologies ont été rappelées afin qu'une personne intéressée que par un seul « Compartiment » par exemple : Côte d'Émeraude, n'est à lire que le chapitre 1 et le chapitre 4 : ***Compartiment 3 : Côte d'Émeraude.***

Ce rapport est accompagné de données numériques constituant un Système d'Information Géographique (SIG) du littoral des départements de l'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère, d'environ 2070 km de linéaire de côtes.

La caractérisation du trait de côte a été réalisée pour une validité cartographique au 1/15 000.

Mots-clés : Littoral, Aléa, Submersion, Érosion, Géomorphologie, Tempêtes, Bretagne, Finistère, Côtes-d'Armor et Ille-et-Vilaine

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

SCHROËTTER J.-M. et BLAISE E., avec la collaboration de V. DEBERT, B. LE GALL, G. GILBERT, H. TISSOT, F. MEUNIER, J. AUDO, F. PILLIOS, M. PREMALLION, B. GOUYGOU, E. PLAVADEAU ET S. SUANEZ (2015) - Atlas des aléas littoraux (Érosion et Submersion marine) des départements d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère : Phase 1, Rapport final, BRGM/RP-65212-FR, 150 p., 94 ill., 3 ann., 1 CD.

© BRGM, 2015, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Cet atlas des aléas littoraux des départements de l'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère, est composé pour chaque compartiment de deux parties distinctes :

1. une partie synthèse bibliographique ;
2. et une partie acquisition de données.

La ***Partie « synthèse bibliographique »*** contient :

- une présentation du milieu humain et naturel (géographie, géomorphologie et géologie) ;
- des paramètres hydrodynamiques (Agitations de la mer) ;
- et des aléas érosion et submersion marine déclinés en éléments : ponctuels (points), linéaires de côtes en érosion et surfaciques (surface submergée),

tirés de la littérature sur le trait de côte des trois départements.

La ***Partie « acquisition »*** contient :

- le relevé et compilation de l'ensemble des mouvements de terrain littoraux ;
- le relevé et compilation de l'ensemble des cavités littorales ;
- des observations de dégâts ou de réparations sur des ouvrages littoraux ;
- une caractérisation géomorphologique du trait de côte ;
- l'analyse cinématique sur 60 ans environ des côtes d'accumulation,

qui ont permis la définition d'une prédisposition à l'érosion des côtes à falaises et l'analyse de la cinématique des côtes d'accumulation (plages de sables ou de galets), permettant de déterminer leur tendance à l'érosion ou à l'accrétion.

Cette partie intègre également le ***recensement des tempêtes ou évènements dommageables à la côte*** pour les trois départements en faisant la synthèse de données déjà existantes.

L'analyse porte sur ***2 070 km de côtes.*** Ainsi, pour faciliter la lecture, les données sont regroupées en neuf compartiments distincts nommés : Baie du Mont-Saint-Michel, la Côte d'Émeraude, la Baie de Saint-Brieuc, la côte du Trégor-Goélo, les côtes du Nord-Finistère, l'Iroise, la Baie d'Audierne et les côtes du Sud-Finistère.

L'ensemble des données issues des parties synthèse bibliographique et acquisition de terrain a été ***géoréférencé***, et un ***Système d'Information Géographique (SIG)*** a été créé pour une meilleure utilisation future. L'échelle de validité est celle du ***1/15 000***.

Chapitre 3 - COMPARTIMENT 2

Côte d'Émeraude

Sommaire

Chapitre 3 - COMPARTIMENT 2 5

***Côte d'Émeraude* 5**

1. La Côte d'Émeraude : Présentation 13

1.1. GEOGRAPHIE « HUMAINE » 14

1.2. PORTS PRINCIPAUX 18

1.3. ARRETES DE CATASTROPHES NATURELLES ET PLAN DE PREVENTION DES RISQUES NATURELS LITTORAUX (PPRNL) 20

1.4. GEOMORPHOLOGIE ET GEOLOGIE LITTORALE 21

2. Paramétres / Agents hydrodynamiques 35

2.1. LA MAREE 35

2.2. ETAT DE MER (VAGUES, HOULES ET NIVEAUX EXTREMES) 38

2.2.1. La Houle (et les vagues) 38

2.2.2. Niveaux extrêmes : surcotes et décotes 43

2.3. LES VENTS 48

3. Analyse historique des aléas littoraux 51

3.1. RISQUE NATUREL : QUELQUES RAPPELS 51

3.1.1. Les aléas 51

3.1.2. Les enjeux 51

3.1.3. Les risques 51

3.1.4. La vulnérabilité 51

3.2. L'EROSION LITTORALE ET LA SUBMERSION MARINE SUR LA COTE D'ÉMERAUDE 52

3.2.1. Avant-propos 52

3.2.2. Les points en érosion, submersion etc. sur le compartiment C2 53

3.2.3. Les linéaires en érosion ou en accrétion du compartiment C2 63

3.2.4. Les Surfaces submergées sur le compartiment C2 66

4. Acquisitions de terrain (Géomorphologie, Prédisposition à l'érosion et Cinématique du trait de côte) 73

4.1. « GEOMORPHOLIGIE » DU TRAIT DE COTE 73

4.1.1. Eléments de méthodologie 73

4.1.2. La « géomorphologie » du trait de côte des trois départements 78

4.2. PREDISPOSITION A L'EROSION DES COTES A FALAISES 82

4.2.1. Le levé de terrain ayant trait à l'érosion 82
4.2.2. Synthèse des éléments relevés lors de la phase terrain 85
4.2.3. Les critères d'évaluation de la prédisposition des côtes rocheuses à l'érosion 94
4.2.4. La prédisposition à l'érosion des falaises littorales 97

4.3. LES COTES D'ACCUMULATION 101
4.3.1. INTRODUCTION 101
4.3.2. METHODOLOGIE 101
4.3.3. CINEMATIQUE DU TRAIT DE COTE DU COMPARTIMENT C2 105

5. Evènements tempétueux dommageables 109

5.1. INTRODUCTION 109

5.2. METHODOLOGIE 109
5.2.1. La Base de Donnée de l'UBO (Université Bretagne Occidentale) 109
5.2.2. Les évènements recensés lors de PPRL 109
5.2.3. Création d'un format pour une base de données commune 110
5.2.4. Établissement de fiches récapitulatives 111

5.3. ANALYSE DES RESULTATS 112

5.4. REPARTITION DES EVENEMENTS UR LE COMPARITMENT C2 115

6. Synthèse & conclusions 121

7. Bibliographie & webographie 123

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation du compatiment 2 entre la baie du Mont-Saint-Michel à l'est et la baie de Saint-Brieuc (à cheval sur les départements des Côtes-d'Armor (22) de l'Ille-et-Vilaine (35)). 13

Illustration 2 : Vue de manoirs en bord de mer à Dinard (35) et vue de la cité corsaire de Saint-Malo (35) (source : Le mensuel de Rennes, Juillet 2010). 14

Illustration 3 : Communes de la Côte d'Émeraude (en rouge plein : trait de côte SHOM-IGN HistoLittV2.0, en noir : le bâti (BD Bati IGN). 15

Illustration 4 : Classe de population pour les communes du compartiment C2 : Côte d'Émeraude (Source INSEE, 2009). 16

Illustration 5 : Indice de vieillissement pour les communes du compartiement C2 : Côte d'Émeraude (Source INSEE : 2009). 17

Illustration 6 : Rapport résidences secondaires/logement principaux pour les communes du compartiment C2 : Côte d'Émeraude (Source INSEE, 2010). 18

Illustration 7 : Carte de localisation des ports du compartiment C2 : Côte d'Émeraude (Source RefMar2013 du SHOM). 19

Illustration 8 : Références Altimétriques Maritimes pour les sites de la zone de marée des abords de Saint-Malo et de la Côte d'Émeraude (Source RefMar2013 du SHOM). 19

Illustration 9 : Arrêtés de catastrophes naturelles « littoraux » pour les communes de la Côte d'Émeraude (Source GASPAR ; prim.net).... 21

Illustration 10 : Falaises de migmatite entre Saint-Lunaire et Saint-Briac, depuis la pointe de la Garde Guérin, regard vers l'ouest (© 2013, BRGM/M. Prémalion). 21

Illustration 11 : Extrait de la carte géologique au 1/1 000 000 (ed. BRGM) du Compartiment C2 : 1 : intrusions granitiques, 2 : migmatites, paragneiss et micaschistes de Saint-Malo, 3 : schistes, grès et phtanites du Briovérien, 4 : tonalites, diorites et gabbros, 5 : séries sédimentaires cambro-ordociennes : grès armoricains. 22

Illustration 12 : À gauche : érosion différentielle le long des épontes d'un filon de dolérite, amenant à la création de cavité littorale (© 2011, BRGM/F. Aubertin) ; à droite : production des boules d'altération par l'érosion marine des filons de dolérite (© 2013, BRGM/M. Prémalion).... 23

Illustration 13 : Vue aérienne de l'usine marémotrice de la Rance et de son barrage : en haut à droite la rance, en bas à gauche, la Manche (© B. Marembert, www-survoledefrance.fr). 24

Illustration 14 : Géomorphologie et bathymétrie du compartiment C2 : Côte d'Émeraude.... 25

Illustration 15 : Carte géologique des formations marines superficielles pour la partie ouest du compartiment C2 : Côte d'Émeraude (d'après Bonnot-Courtois et al., 2002b). 27

Illustration 16 : Évolution du marais de Ploubalay en Polder, 22 (patrimoine.region-bretagne.fr).28

Illustration 17 : Évolution historique du marais maritime de Saint-Malo. 30

Illustration 18 : Géomorphologie de la Plage du Sillon et de Pramé – Rochebonne (Source : GoogleEarth2014).... 31

Illustration 19 : A : Carte postale dela pointe de la Blanche au début du XX^{ème} siècle ; B : Recul de la dune et C : son aménagement en 1950-1960 ; D : Constuction de la digue de la Blanche pour protéger l'isthme de Saint-Jacut-de-la-Mer ; E : Digue de la Blanche actuelle.... 33

Illustration 20 : Amplitude du marnage en Bretagne (d'après les données du SHOM) (dans Stephan, 2009). 35

Illustration 21 : Présentation de la zone cartographiée et roses des courants entre le cap Fréhel et Saint-Malo (Bonnot-Courtois, 2002, d'après Dagorne, 1966 et 1968). 36

Illustration 22 : Champs de courants résiduels lagrangiens entre le cap Fréhel et Cancale (Garreau, 1993). 37

Illustration 23 : Localisation des bouées produisant des données de houles in situ sur le compartiment C2 : Côte d'Émeraude (Source : ANEMOC). En haut : Les Minquiers 2, en bas : Saint-Malo. 38

Illustration 24 : Histogramme des fréquences de hauteurs de houle (en m) et des périodes (en s) pour la bouée Saint-Malo et la campagne 03501 (Source : ANEMOC – CEREMA). 39

Illustration 25 : Direction de provenance des vagues pour la bouée Les Minquiers 2 pour la campagne 02202 (Source : ANEMOC – CEREMA).... 40

Illustration 26 : Rose des houles au large de Saint-Malo (1988 - 2007, durée 3h, Houles NEXTRA). 41

Illustration 27 : Plans de houles du Golfe Normand-breton : **A** : Dir O, Per 6s, NivEau BM ; **B** : Dir ONO, Per 6s, NivEau BM ; et **C** : Dir NO, Per 6s, NivEau BM (d'après SOGREAH, LCHF). 42

Illustration 28 : Résultats des statistiques pour le port de Saint-Malo par rapport à l'IGN 69, en haut – hauteur d'eau, en bas - surcote/decote (© CETMEF/SHOM 2012). 43

Illustration 29 : Niveaux extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) pour différentes périodes de retour 10, 20, 20 et 100 ans (© CETMEF/SHOM 2012).... 44

Illustration 30 : Niveau de mer moyen (en m) à Saint-Malo (PM = pleine mer ; BM = basse mer). 44

Illustration 31 : Carte des niveaux extrèmes de pleine mer sur une période de retour de 10, 50 et 100 ans (SHOM et CETMEF, 2012). 45

Illustration 32 : Illustration de la surcote de pleine mer et de la décote de basse mer (CETMET/SHOM, 2012). 46

Illustration 33 : Compilation de surcotes à partir d'articles des journaux et de rapports d'études sur le compartiment C2 et Saint-Malo (PPRL Saint-Malo et cette étude). 47

Illustration 34 : Période de retour des surcotes de pleine-mer à Saint-Malo par rapport à l'IGN 69, en gras valeurs expérimentales ; en pointillés ajustement statistique (© CETMEF/SHOM 2012). 47

Illustration 35 : À gauche : Fréquence des vents en fonction de leur provenance en % (Dinard 1981-2000) ; à droite : Fréquence des vents en fonction de leur provenance en % (Dinard 2006-2010). 48

Illustration 36 : En haut : roses des vents à Saint-Briac, à l'année (2012)puis en avril-mai-juin ; en bas : roses des vents à Saint-Malo, à l'année puis en octobre-janvier-août (Source : Windfinder). 49

Illustration 37 : Schéma synthétique des définitions d'aléas, enjeux et risques (COCORISCO). 51

Illustration 38 : Champs attributaires associés aux données d'aléa littroaux saisies : à gauche : les ponctuels, au milieu : les linéaires et à droite : les surfaciques. 53

Illustration 39 : Extrait de l'étude du Laboratoire de géomorphologie marine de Dinard, géomorphologie du trait de côte et relevés ponctuels (Bonnot-Courtois et Lançon, 2004). 54

Illustration 40 : Localisation du site concernant l'instabilité de talus à Port Saint-Géran, commune de Plevenon (L.R.P.C., 2011). 55

Illustration 41 : Situation du périmètre en érosion, commune de Saint-Jacut-de-la-mer (LRPC Saint Brieuc, 2005). 56

Illustration 42 : Localisation des sites en érosion, commune de Saint-Cast-le-Guildo (L.R.P.C, 2008). 57

Illustration 43 : Localisation du site en érosion plage de la Mare, commune de Saint-Cast-le-Guildo (L.R.P.C, 2010). 58

Illustration 44 : Localisation du site en érosion plage de la Mare, commune de Saint-Cast-le-Guildo (L.R.P.C, 2010). 58

Illustration 45 : Situation du périmètre d'étude sur le site de la Goéletterie sur fond cadastral ; Synthèse des témoignages d'érosion du site (L.R.P.C, 2006). 59

Illustration 46 : Situtation du périmètre d'étude du site du Marégraphe sur fond cadastral ; synthèse des témoignages d'érosion du site (L.R.P.C., 2006). 60

Illustration 47 : Synthèse bibliographique des aléas littoraux ponctuels du compartiment C2. .. 61

Illustration 48 : Synthèse bibliographique des aléas littoraux linéaires du compartiment C2. 65

Illustration 49 : Localisation de la zone inondée depuis 1960 sur la commune de Saint-Malo (Cariolet, 2010). 66

Illustration 50 Carte de modélisation d'une zone comprise entre 0 - 8,60 m (L.R.P.C. Saint-Brieuc 2011) 68

Illustration 51 : Synthèse bibliographique des aléas littoraux surfaciques du compartiment C2 70

Illustration 52 : Synthèse bibliographique des aléas littoraux surfaciques du compartiment C2 71

Illustration 53 : Sources composants le trait de côte HistolittV2.0 pour la Bretagne. 74

Illustration 54 : Schéma de principe de caractérisation du trait de côte. 74

Illustration 55 : Patchwork des cartes géologiques au 1/50 000 pour les trois départements concernés (en rouge : harmonisation de l'Ille-et-Vilaine ; en rose : des Côtes-d'Armor et en bleu : du Finistère ; en surcharge : harmonisation des trois départements). 75

Illustration 56 : Minute de terrain au niveau de Camaret-sur-Mer (29). 76

Illustration 57 : Module de Young et coefficient de Poisson pour quelques familles de roches (Mestat, 1993). 77

Illustration 58 : Ordre de résistance des minéraux à l'altération (Goldich, 1938). 78

Illustration 59 : Synthèse du linéaire côtier étudié pour les départements d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère. 78

Illustration 60 : Tableau des formations géologiques littorales simplifiées des côtes rocheuses des départements d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère (sont présents les linéaires altérés, sains et érodés). 79

Illustration 61 : linéaire en kilomètre des diiférents linéaires de cotes rocheuses. 80

Illustration 62 : Tableau des formations géologiques littorales simplifiées des côtes meubles des départements d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère (sont présents les linéaires altérés, sains et érodés). 82

Illustration 63 : GPS © Trimble Juno3B. 83

Illustration 64 : Dictionnaire d'attributs réalisé pour cette étude. 84

Illustration 65 : Schéma de principe d'un glissement de terrain (Landevennec, 29). 85

Illustration 66 : Schéma de principe d'un glissement banc sur banc (A : Binic, 22 ; B : Cap à la Chèvre, 29). 86

Illustration 67 : Schéma de principe d'un glissement de dièdres (A : Kerfany, 29 ; B : Plouha, 22). 86

Illustration 68 : Schéma de principe d'un éboulement/Chute de blocs (A : Pointe du Van, 29 ; B : Planguenoual, 22). 87

Illustration 69 : Ravinement important des formations superficielles composées de sols sombres épais (1 m) sur un manteau latéritique (Cap à la Chèvre, 29). 87

Illustration 70 : Sous-cavage (A : secteur Saint-Coulomb, 35 ; B : Plouha, 22). 88

Illustration 71 : Effondrement sur la bordure nord de l'anse de Dinan (Camaret, 29). 88

Illustration 72 : A : Glissement de terrain en tête de falaise sur la base des altérites meubles (Cap à la Chèvre, Crozon 29) ; B : Glissement le long de failles orientées vers le vide et formation de cavité dans la zone d'action des vagues (Morgat, Crozon 29) ; C : Érosion différentielle et formation de boutonnières d'érosion (Pointe de Pen Hir, Camaret 29) ; D : Bloc glissé de plusieurs milliers de m3, entre Camaret et la pointe des Espagnols (29), suivant un plan N150 satellite de la faille Kerforne. 90

Illustration 73 : Recensement des mouvements de terrain, des cavités et impacts ou réparation sur ouvrages littoraux. 92

Illustration 74 : Recensement des mouvements de terrain, des cavités et impacts ou réparation sur ouvrages littoraux. 93

Illustration 75 : Tableau d'attribution des notes du degré d'altération pour les formations géologiques littorales. 95

Illustration 76 : Tableau d'attribution des notes du degré d'érosion pour les formations géologiques littorales. 95

Illustration 77 : Tableau d'attribution des notes en fonction de la densité de mouvements de terrain (nombre de mouvements de terrain par kilomètre linéaire pour chaque formation géologique littorale). 96

Illustration 78 : Tableau d'attribution des notes en fonction de la densité cavités (nombre de cavités par kilomètre linéaire pour chaque formation géologique littorale). 97

Illustration 79 : Note finale de prédisposition à l'érosion des formations géologiques littorales des départements de l'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère. 98

Illustration 80 : Note finale de prédisposition à l'érosion des côtes à falaises du compartiment C2. 99

Illustration 81 : Note finale de prédisposition à l'érosion des côtes à falaises du compartiment C2. 100

Illustration 82 : En haut : physionomie des plages selon l'exposition : A. plage de fond de baie – B. plage ouverte – C. plage d'estuaire – D. plage de poche ; En bas : physionomie des plages selon la morphologie : A. plage adossée – B. cordon dunaire – C. forme fuyante. 102

Illustration 83 : Limite de trait de côte retenue : A et B. limite de la végétation dunaire – C. sommet ou pied de falaise – D. pied de l'aménagement de protection. 103

Illustration 84 : Campagnes photographiques disponibles. 104

Illustration 85 : Principe du Digital Shoreline Analysis System. 105

Illustration 86 : Synthèse du linéaire côtier de la zone d'étude. 105

Illustration 87 : Évolution et caractérisation des côtes meubles du compartiement C2. 106

Illustration 88 : Synthèse de la géomorphologie des côtes meubles du trait de côte du compartiment C2. 107

Illustration 89 : Champs créés pour chaque évènement tempétuaux dommageable : à gauche : leur thématique, à droite : le nom de chaque champ. 111

Illustration 90 : En haut : nombres de tempêtes par décennie ; à droite : Nombre de tempêtes par saison, enfin en bas : Nombre de tempêtes par mois de d'année par compartiments. 113

Illustration 91 : En haut : nombre de tempêtes par département, en bas : Nombre de tempête. 114

Illustration 92 : En haut : tpe d'aléa avant et après 1950 - En bas : type d'aléa par tempêtes. 115

Illustration 93 : Cartes postales de l'évènement du 29 octobre 1905 (source : archives départementales 35). 119

Illustration 94 : Carte synthétique des évènements dommageables pour le compartiment C2. 120

Liste des annexes

8. Annexe 1 : Recensement des évènements dommageables 127

9. Annexe 2 : Vielles cartes historiques 129

10. Annexe 3 : Graphiques d'évolution des plages 133

1. La Côte d'Émeraude : présentation

La côte d'Émeraude appartient au Golfe de Saint-Malo, et son nom exprime la couleur de la mer qui la borde depuis la Pointe du Grouin (35) jusqu'à celle du Cap Fréhel (22). Elle est la transition entre une grande sœur plus imposante, la baie de Saint-Brieuc et la réputée baie du Mont-Saint-Michel (Illustration 1).

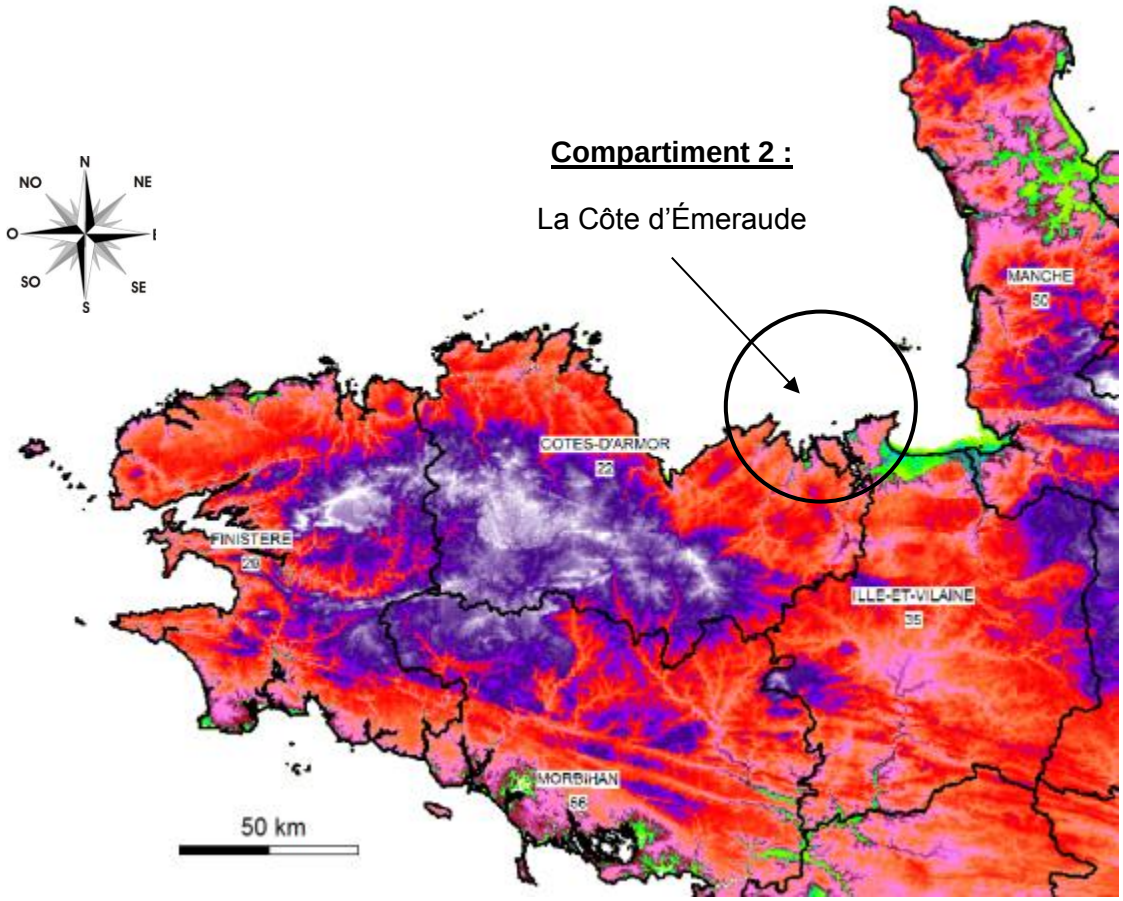


Illustration 1 : Localisation du compatiment 2 entre la baie du Mont-Saint-Michel à l'est et la baie de Saint-Brieuc (à cheval sur les départements des Côtes-d'Armor (22) de l'Ille-et-Vilaine (35)).

À cheval sur les départements des Côtes-d'Armor et d'Ille-et-Vilaine, ce compartiment s'étend sur environ 191 km. Il est traversé par un bras de mer d'une vingtaine de kilomètres, la ria de la Rance, et découpé par les trois baies principales, d'ouest en est, celle de la Fresnaye, celle de l'Arguenon et celle de Lancieux (Illustration 3).

Si le compartiment C1 était réputé mondialement, celui-ci contient la cité de l'Aleth (actuel quartier de Saint-Servan à Saint-Malo) qui était à l'origine, une cité gauloise, où se sont succédé des explorateurs et marins de renom tels que Jacques Cartier, Duguay-Trouin ou Robert Surcouf. À la belle époque, c'est toute la côte d'Émeraude qui devient une station balnéaire prisée par les « élégantes » et où s'enchaine face à la mer, de belles demeures et manoirs cossus, depuis Dinard jusqu'à Saint-Cast-le-Guildo, en passant par Saint-Lunaire et Saint-Briac (Illustration 2).

Illustration 2 : Vue de manoirs en bord de mer à Dinard (35) et vue de la cité corsaire de Saint-Malo (35) (source : Le mensuel de Rennes, Juillet 2010).

1.1. GEOGRAPHIE « HUMAINE »

En raison de la présence du barrage hydroélectrique de la Rance, il a été considéré que les communes situées en arrière de celui-ci, n'étaient peu ou pas exposées aux aléas littoraux érosion littorale et submersion marine.

Ainsi dix-huit communes sont donc concernées sur la façade maritime du compartiment (C2) Côte d'Émeraude, (Illustration 3).

Ce sont d'est en ouest, les communes de :

- Cancale, Saint-Coulomb, Saint-Malo, La Richardais, Dinard, Saint-Lunaire, Saint-Briac-sur-Mer pour les communes bretillaines ;
- et de Lancieux, Ploubalay, Trégon, Saint-Jacut-de-la-Mer, Chéhen, Saint-Lormel, Saint-Cast-le-Guildo, Matigon, Pléboulle Fréhel et Plévenon pour les communes costarmoricaines.

Les communes de La Richardais, Ploubalay, Trégon, Créhen, Saint-Lormel, Matignon, Pléboule et la façade de Fréhel coté sur C2, ont leur littoral situé en fond de baie, donc relativement protégé par rapport aux agents météo-marins mais en revanche dans des zones basses, alors que les autres communes sont directement exposées aux agents météo-marins (Illustration 3).

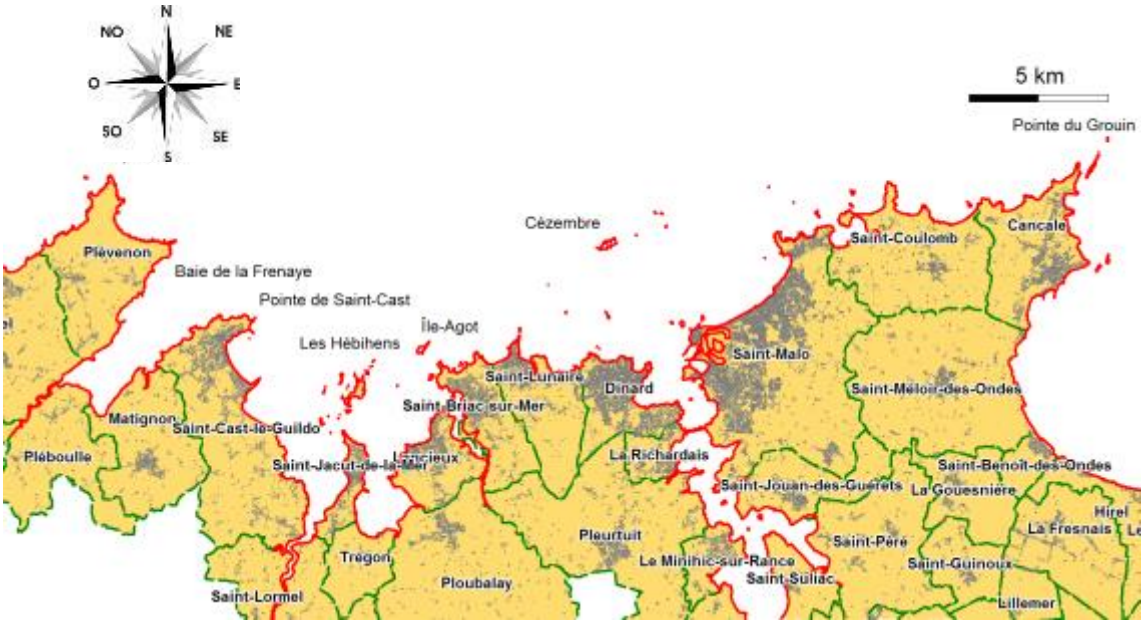


Illustration 3 : Communes de la Côte d'Émeraude
(en rouge plein : trait de côte SHOM-IGN HistoLittV2.0, en noir : le bâti (BD Bati IGN).

Les zones habitées des communes de Saint-Malo, Dinard, Saint-Lunaire, Saint-Briac-sur-Mer, Lancieux, Saint-Jacut-de-la-Mer et de Saint-Cast-le-Guildo sont proches à très proches du trait de côte.

Ces 18 communes correspondent à une population totale de **88 076** personnes.

Les communes les plus habitées sont les communes de Saint-Malo (47 032 habitants), suivie de Dinard (10 727 habitants), Cancale (5 366 habitants) et Saint-Cast-le-Guildo (3 496 habitants), d'après les sources INSEE 2009.

Les autres communes ont des populations qui s'échelonnent entre 700 et 2400 habitants environ, hormis pour Trégon qui ferme la marche, avec seulement : 237 habitants (Illustration 4).

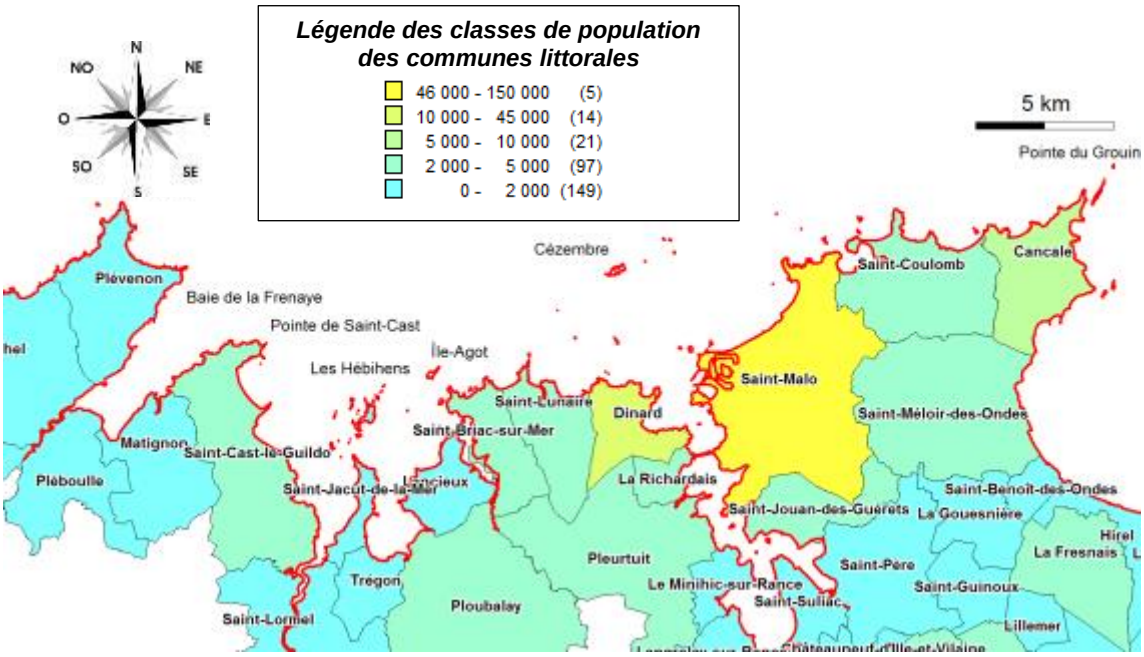


Illustration 4 : Classe de population pour les communes du compartiment C2 : Côte d'Émeraude (Source INSEE, 2009).

La commune de Saint-Malo, sort malgré tout du lot des communes de ce compartiment, avec sa population de 47 032 habitants et une situation géographique bien particulière, située au-dessus d'un ancien marais maritime, maintenant entièrement anthropisé.

En ce qui concerne, la répartition des âges de la population, l'indice de vieillissement : rapport entre la population des plus de 65 ans et plus et celle des moins de 20 ans, montre que :

- trois communes ont des indices de vieillissement, inférieurs à 100, montrant des populations vieillissantes, il s'agit de Saint-Coulomb, La Richardais et Saint-Lunaire ;
- douze communes ont des indices de vieillissement compris entre 100 et 200, montrant des populations dans lesquelles les moins de 20 ans sont légèrement supérieurs aux 65 ans. Il s'agit des communes de : Cancale, Saint-Malo, Dinard, Saint-Briac-sur-Mer, Lancieux, Ploubalay, Trégon, Créhen, Saint-Lormel, Matignon, Pléboulle et Fréhel ;
- enfin, les communes de Saint-Jacut-de-la-Mer et de Saint-Cast-le-Guildo, ont des indices compris entre 200 et 300 et la commune avec la population la plus jeune est celle de Plévenon.

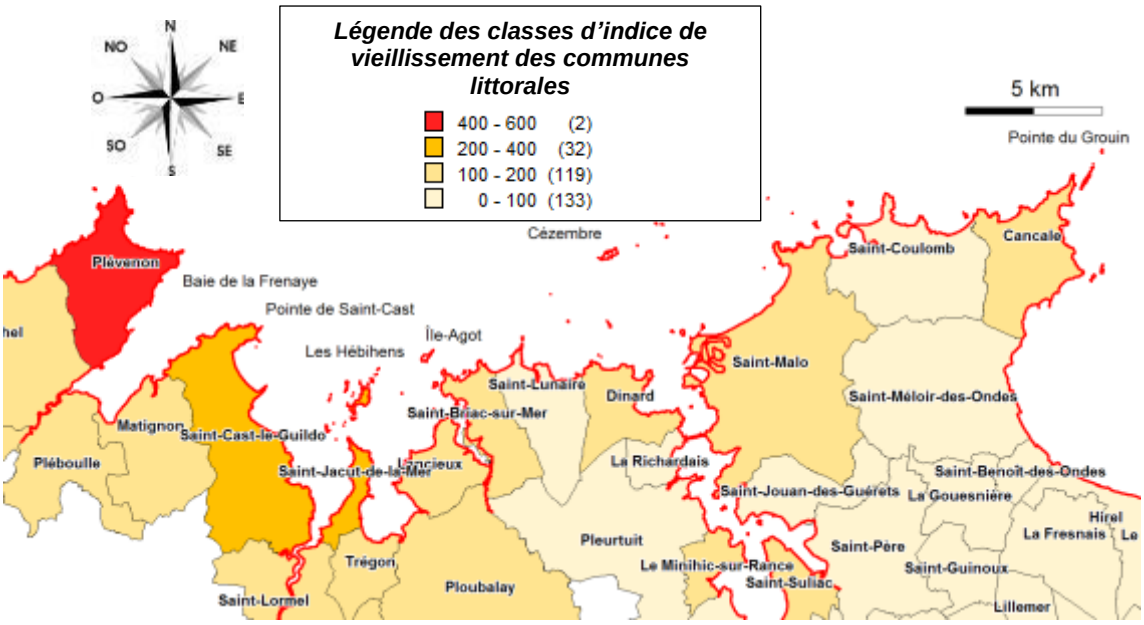


Illustration 5 : Indice de vieillissement pour les communes du compartiement C2 : Côte d'Émeraude (Source INSEE : 2009).

À l'échelle de la Côte d'Émeraude, la classe d'âge 45-59 ans est la plus représentative mais les plus de 60 ans sont tout de même nombreux. La population de la Côte d'Émeraude est donc une population peu active et assez âgée.

La Côte d'Émeraude, située à quelques heures de la capitale nationale, desservi par une ligne de TGV jusqu'à Saint-Malo, et bénéficiant d'une aura de prestige avec ses attraits touristiques maritimes comme historiques, voit pluri-annuellement sa population varier.

Ces mouvements de populations saisonnières sont illustrés à l'aide du rapport entre les logements principaux et les résidences secondaires.

Concernant la cohérence territoriale de la Côte d'Émeraude, elle se divise en deux SCoT regroupant 16 communes littorales :

- le SCoT du Pays de Dinan, dont deux EPCI composés de 7 communes littorales :
  - la Communauté de Communes du Pays de Matignon avec 5 communes littorales : Saint-Cast-Le-Guildo, Matignon, Pleboulle, Plevenon, Fréhel,
  - la Communauté de Communes de Plancoët Val d'Arguenon avec 2 communes littorales : Saint-Jacut-de-la-Mer, Créhen.

  Le Pays de Dinan est essentiellement rural. L'agriculture est la principale utilisation du sol. Il comprend une façade côtière de 65 km, dont 20 km sur l'estuaire amont de la Rance. C'est cette bande côtière qui concentre l'essentiel du patrimoine naturel du Pays (Cap Fréhel, baie de l'Arguenon et de Lancieux, estuaire de la Rance) ;

- le SCoT du Pays de Saint-Malo, dont deux EPCI composés de 9 communes littorales :
  - la Communauté de Communes de la Côte d'Émeraude avec 6 communes littorales (Dinard est hors CC) : La Richardais, Saint-Lunaire, Saint-Briac-sur-Mer, Lancieux, Poubalay, Trégon,

- la Saint-Malo Agglomération avec 3 communes littorales : Cancale, Saint-Coulomb, Saint-Malo.

Le Pays de Saint-Malo est largement tourné vers la mer. Son littoral présente une richesse patrimoniale exceptionnelle - estuaires, vasières, prés-salés, dunes, falaises, etc. - accueillant une flore et une faune remarquables, le pays intérieur étant marqué par de grands étangs. Le littoral accueille une importante activité conchylicole (dont l'estuaire de la Rance).

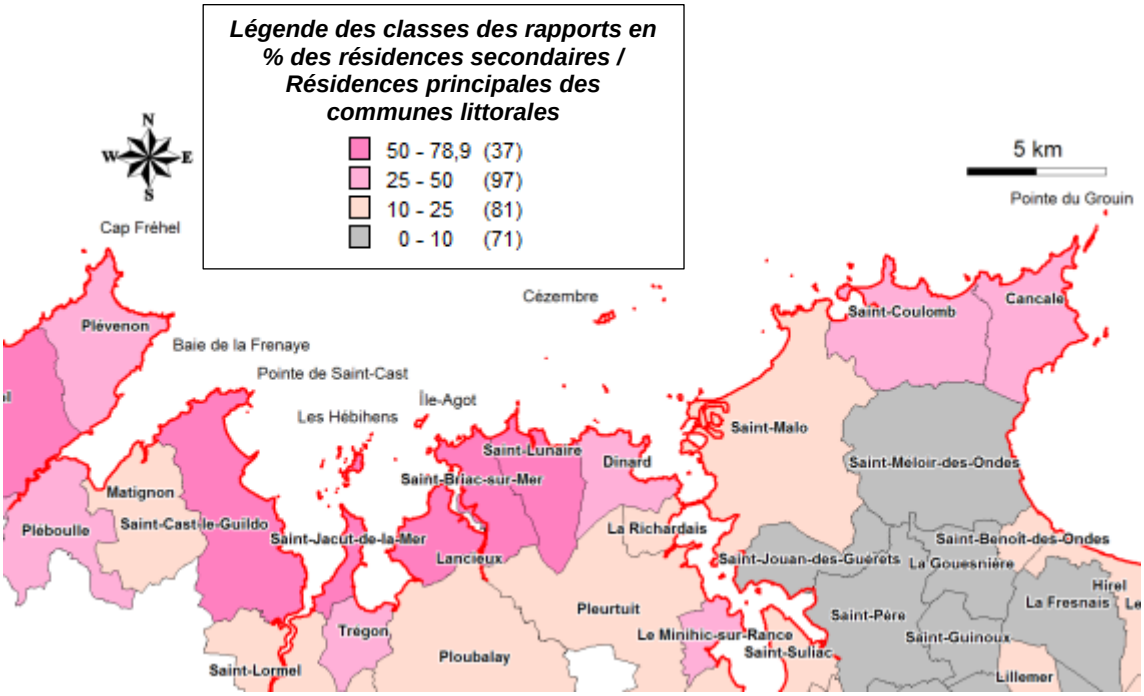


Illustration 6 : Rapport résidences secondaires/logement principaux pour les communes du compartiment C2 : Côte d'Émeraude (Source INSEE, 2010).

L'ensemble des communes de la Côte d'Émeraude sera regroupé au sein du PNR Rance-Côte d'Émeraude.

1.2. PORTS PRINCIPAUX

Pour la Côte d'Émeraude, le port de Saint-Malo est le port de référence principal. Il est accompagné par deux autres sites ou ports de référence secondaires, que sont Saint-Cast-le-Guildo et les Îles des Hébihens (face au village de Saint-Jacut-de-la-Mer).

Le port de référence de Saint-Malo est ainsi, comme pour le compartiment C1, le port, possédant un observatoire permanent de mesure de la marée et des données marégraphiques (Illustration 7).

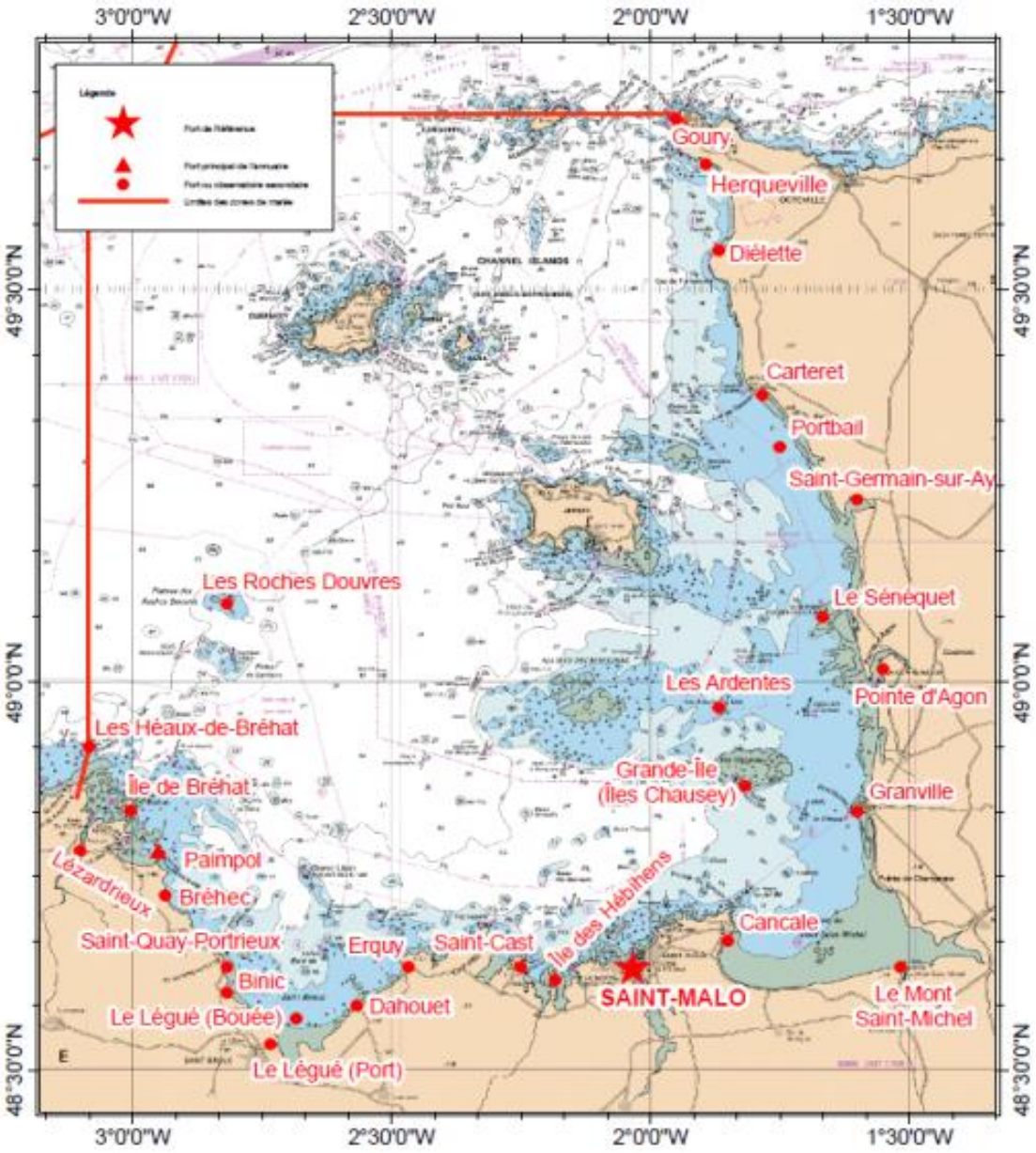


Illustration 7 : Carte de localisation des ports du compartiment C2 : Côte d'Émeraude (Source RefMar2013 du SHOM).

Dans ces ports secondaires comme dans celui de référence, il est possible de connaitre la côte altimétrique en IGN69 (référence altimétrique nationale) du zéro hydrographique (niveau des plus basses mers) ZH/Ref (Illustration 8).

Nom	Repère fondamental			Organisme	Date	ZH/RF	RF/Ref	ZH/Ref	ZHGRS80	Ref
Saint-Malo	N.Q.K3L3-45			IGN	1985	14.485	8.196	-6.289	41.98	IGN69
Île des Hébihens[2]	S	48 37 N	02 11 W			13.33	12.00	09.10	06.65	04.15	01.45	00.02
Saint-Cast	S	48 38 N	02 15 W			13.31	12.00	09.15	06.64	04.15	01.45	00.03

Illustration 8 : Références Altimétriques Maritimes pour les sites de la zone de marée des abords de Saint-Malo et de la Côte d'Émeraude (Source RefMar2013 du SHOM).

1.3. ARRETES DE CATASTROPHES NATURELLES ET PLAN DE PREVENTION DES RISQUES NATURELS LITTORAUX (PPRNL)

L'analyse de la base de données des arrêtés de catastrophes naturelles GASPAR, téléchargée durant l'été 2012, montre qui existe 25 arrêtés de catastrophes naturelles ayant pour description de façon univoque un aléa littoral, c'est-à-dire un arrêté intitulé : inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues ou Inondations, coulées de boue et chocs mécaniques liés à l'action des vagues.

La commune de Saint-Malo est la seule commune avec 3 arrêtés intitulés, dont un est intitulé : « Inondations, coulées de boue et chocs mécaniques liés à l'action des vagues », alors que les deux autres sont intitulés : « Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues ». Les périodes respectives de ces arrêtés sont le 19 février 1996, le 27 février 1990 et le 10 mars 2008.

Les communes ayant deux arrêtés sont les communes de Lancieux, Matignon, Fréhel et Saint-Cast-le-Guildo. Les Communes de Lancieux et de Saint-Cast-le-Guildo sont concernées par deux évènements les 25 décembre 1999 et 10 mars 2008, alors les communes de Matignon et Fréhel, sont concernées par des évènements des 19 février 1996 et 25 décembre 1999.

Enfin alors que les communes de : Créhen, Pléboule, Langrolay-sur-Rance, Pleudihen-sur-Rance, Ploubalay, Plouër-sur-Rance, Saint-Jacut-de-la-Mer, Saint-Lormel, Saint-Sanson-sur-Rance, Trégon et la Vicomté-sur-Rance, ne sont concernées par l'évènement du 25 décembre 1999, les communes de Saint-Briac, Dinard et Saint-Coulomb ne sont concernées que par l'évènement du 10 mars 2008.

Le 25 décembre 1999, le niveau de mer théorique pour le marégraphe de Saint-Malo, était de 12,75 m au-dessus du zéro hydrographique pour un coefficient de 102.

Le 10 mars 2008, le niveau de mer théorique était de 12,86, pour un coefficient de 106.

Un autre arrêté de catastrophe naturelle intitulé : « Tempête », existe pour le compartiment C2 et dont l'ensemble des communes sont concernées, pour l'évènement du 15 octobre 1987. Ce jour-là, le niveau de mer théorique était de 9,90 m pour un coefficient de 104. La tempête de 1987, fut l'une des plus importantes tempêtes que la péninsule bretonne ait essuyée.

À l'heure actuelle, sur ce compartiment, seule la commune de Saint-Malo, bénéficie d'un Plan de Prévention des Risques Naturels Littoraux (PPRNL), pour la submersion marine, prescrit le *22 septembre 2010 (nouveau prescrit le 28 avril 2011)*.

L'ensemble des arrêtés sont résumés et synthétisés dans le tableau ci-dessous (Illustration 9), tirés de la base données GASPAR du MEDDE (www.prim.net).

LIB_COMMUNE	LIB_RISQUE_JO	DAT_DEB	DAT_FIN	DAT_PUB_ARRETE	DAT_PUB_JO
Créhen	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Lancieux	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Lancieux	Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	09/03/2008	10/03/2008	15/05/2008	22/05/2008
Langrolay-sur-Rance	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Matignon	Inondations, coulées de boue et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	19/02/1996	20/02/1996	17/07/1996	04/09/1996
Matignon	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Pléboulle	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Fréhel	Inondations, coulées de boue et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	19/02/1996	20/02/1996	17/07/1996	04/09/1996
Fréhel	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Pleudihen-sur-Rance	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Ploubalay	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Plouër-sur-Rance	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Saint-Cast-le-Guildo	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Saint-Cast-le-Guildo	Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	10/03/2008	10/03/2008	15/05/2008	22/05/2008
Saint-Jacut-de-la-Mer	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Saint-Lormel	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Saint-Samson-sur-Rance	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Trégon	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Vicomté-sur-Rance	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999
Dinard	Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	10/03/2008	10/03/2008	07/08/2008	13/08/2008
Saint-Briac-sur-Mer	Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	09/03/2008	10/03/2008	07/08/2008	13/08/2008
Saint-Coulomb	Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	09/03/2008	10/03/2008	07/08/2008	13/08/2008
Saint-Malo	Inondations, coulées de boue et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	19/02/1996	21/02/1996	17/07/1996	04/09/1996
Saint-Malo	Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	27/02/1990	01/03/1990	24/07/1990	15/08/1990
Saint-Malo	Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	10/03/2008	10/03/2008	07/08/2008	13/08/2008

Illustration 9 : Arrêtés de catastrophes naturelles « littoraux » pour les communes de la Côte d'Émeraude (Source GASPAR ; prim.net).

1.4. GEOMORPHOLOGIE ET GEOLOGIE LITTORALE

Ce compartiment C2 : Côte d'Émeraude, appartient entièrement au domaine orogénique cadomien : chaîne de montagne s'étant créée entre 700 et 520 millions d'années (Ma).

D'ouest en est, depuis la Pointe du Grouin (au nord de Cancale), armée par une intrusion granitique claire, et jusqu'au environ de Notre-Dame-du-Guildo (Plage des 4 vaux), la côte est composée par des roches métamorphiques de haut-grade, constituées de migmatites, paragneiss de Langrolais et micaschistes, de l'unité ou massif de Saint-Malo (en violet avec trait en pointillé; 580-670 Ma) (Illustration 11).

Elles décrivent des falaises comprises entre 40 m dans le secteur de la Pointe du Grouin (à l'est), à 10 et 20 m d'altitude NGF vers l'estuaire de l'Arguenon (Illustration 10).

Illustration 10 : Falaises de migmatite entre Saint-Lunaire et Saint-Briac, depuis la pointe de la Garde Guérin, regard vers l'ouest (© 2013, BRGM/M. Prémalion).

À partir de Notre-Dame-du-Guildo (Plage des 4 vaux) et jusqu'à l'Anse des Sévignés avant le Cap Fréhel, les lithologies changent, et la côte est composée de schistes, grès et phtanites du Briovérien (en violet sans trait en pointillé; 580-670 Ma), puis de roches magmatiques métamorphisées (transformées et déformées), comme des gabbros, tonalites et diorites (en rouge sombre ; 580-670 Ma), avant de finir sur les séries sédimentaires des grès roses à rouges du Cap Fréhel (les grès armoricains datés du Cambro-Ordovicien (en vert ; 435-540 Ma) (Illustration 10). Les trois pointes de Saint-Cast, de la Garde et du Bay, correspondent à des intrusions de roches magmatiques acides de monzo- et grano- diorites.

L'altitude des falaises rocheuses augmentent au nouveau vers l'ouest, passant de la vingtaine de mètres à 40 m sur la rive gauche de l'Arguenon pour atteindre les plus élevées du compartiment avec 70 m NGF au cap Fréhel.

Enfin l'ensemble de ces formations géologiques sont traversées par des intrusions de forme « filonique » de roches basaltiques (les dolérites, datés à 200/300 Ma (réf. dans Balèvre *et al*. 2013) ; filons qui ont pour orientation des directions Nord-Sud à N150 (en orange sur l'Illustration 11). Sur le littoral, leur altération et l'érosion marine dégage des boules caractéristiques de couleur noire (Illustration 12).

Illustration 11 : Extrait de la carte géologique au 1/1 000 000 (ed. BRGM) du Compartiment C2 : 1 : intrusions granitiques, 2 : migmatites, paragneiss et micaschistes de Saint-Malo, 3 : schistes, grès et phtanites du Briovérien, 4 : tonalites, diorites et gabbros, 5 : séries sédimentaires cambro-ordociennes : grès armoricains.

Les structures tectoniques dans ce secteur du Massif Armoricain sont préférentiellement des directions N045, d'âge cadomien, mais on retrouve les directions nord-sud à N150, tardi-hercynienne.

L'érosion littorale emprunte souvent les filons de dolérites, créant des cicatrices pouvant être très profonde vers les terres (de 10 jusqu'à 50 m de profondeur) (Illustration 12).

Illustration 12 : À gauche : érosion différentielle le long des épontes d'un filon de dolérite, amenant à la création de cavité littorale (© 2011, BRGM/F. Aubertin) ; à droite : production des boules d'altération par l'érosion marine des filons de dolérite (© 2013, BRGM/M. Prémalion).

Sur environ 70 km, ce linéaire de côte est découpé et entaillé par plusieurs baies et estuaires.

Depuis La Pointe du Grouin jusqu'à Notre-Dame-du-Guildo, les échancrures d'érosion abritant des plages de sable et les estuaires (les estuaires de la Rance et du Frémur pour les principaux), sont orientées vers le Nord, recoupant le bâti structural géologique cadomien.

Pour certaines d'entre-elles, derrière des massifs dunaires, on retrouve des marais maritimes holocènes plus ou moins importants, comme c'est notamment le cas au niveau de la Plage du Verger, de l'Anse Du Guesclin, du Havre de Lupin, de Saint-Malo et de la baie de Lancieux (Polders de Ploubalay) (Illustration 15).

Alors que depuis Notre-Dame-du-Guido et jusqu'au Cap Fréhel, l'orientation dominante de ces baies et estuaires, est nord-est, comme le montre la baie de la Fresnaye, ou la Plage de Pen Guen ou encore la Grande Plage de Saint-Cast-le-Guildo.

L'articulation se fait par l'intermédiaire et autours de la presqu'île de Saint-Jacut-de-la-Mer (Illustration 15).

On retrouve au cœur de ce compartiment C2, la présence de l'une des rias les plus importantes de la côte nord bretonne, la ria de la Rance. Depuis les années 60, l'estuaire de la Rance est coupé des agents météo-marins par le barrage de l'usine marémotrice, mis en service en 1966-1967. L'installation de l'usine est venue modifier durablement l'hydrologie et, par effet de bilan, la sédimentologie et l'écologie de ce milieu (Illustration 13).

Illustration 13 : Vue aérienne de l'usine marémotrice de la Rance et de son barrage : en haut à droite la rance, en bas à gauche, la Manche (© B. Marembert, www-survoledefrance.fr).

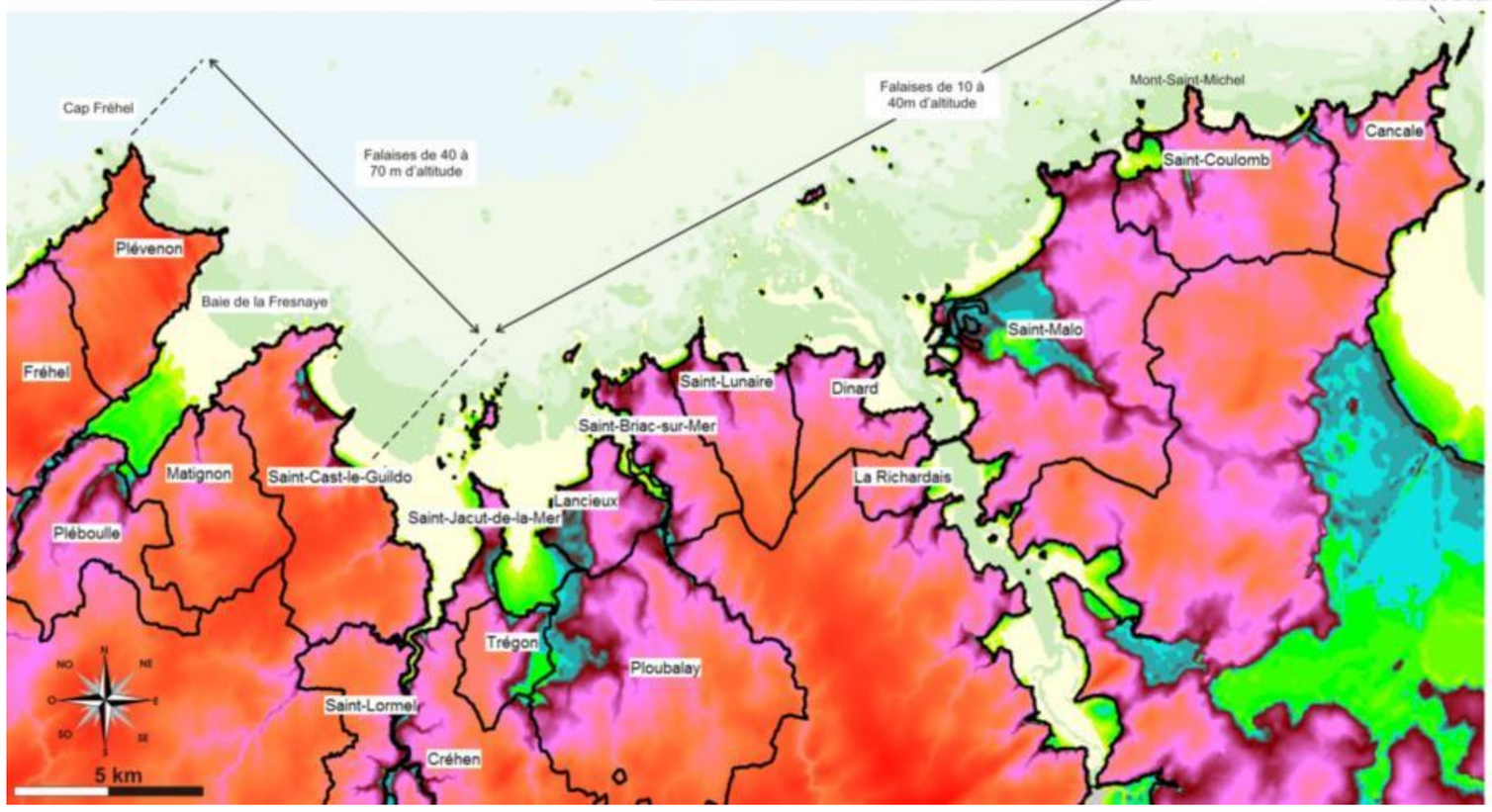
Ainsi le barrage a très nettement diminué l'agitation du plan d'eau, les variations des niveaux marins (avec de périodes d'étale plus longues) et des amplitudes plus faibles, et par conséquent un modification de la répartition de la salinité dans l'estuaire (Bonnot-Courtois *et al*., 2002, pour une revue). L'autre conséquence de cette modification de la marée dans l'estuaire et sa force (diminution des courants de flot et jusant), est après une vingtaine d'années de fonctionnement, une augmentation de l'extension des sédiments vaseux et une diminution des sédiments grossiers (cailloutis remplacés par des sables moyens à grossiers). Aux abords de l'usine marémotrice, les courants d'exploitation de la marée ont augmenté entrainant un décapage des sédiments meubles du fond de l'estuaire.

A : Vue de l'Anse des Sévignés depuis le Cap Fréhel (Vue vers le Sud-Est)

B : Vue de la baie de la Fresnaye (Vue vers l'Ouest, depuis Matignon)

C : Vue d'une plage adossée et de la limite saisonnière du niveau de sable (avant la pointe de Minga)

D : Géomorphologie des falaises depuis la pointe du Grouin et Saint-Malo)



Géomorphologie et bathymétrie du compartiment C2 : Côte d'Emeraude

(Mnt à 25 m IGN, et Bathy IFRMER)

Illustration 14 : Géomorphologie et bathymétrie du compartiment C2 : Côte d'Émeraude

La géologie marine de ce compartiment C2 fut réalisé dans le cadre d'un programme IFREMER de recherches sur la répartition de la crépidule, à l'échelle du golfe normand-breton, depuis la baie de Saint-Brieuc jusqu'à celle du Mont Saint-Michel. Cette cartographie des formations superficielles marines couvrait les domaines infralittoral (entre -10 et -40 mètres environ) et intertidal (estran). Une seconde cartographie, fut réalisée et menée par l'UMR 8586 PRODIG du CNRS et le laboratoire de Géomorphologie et Environnement littoral de Dinard, lors de la réalisation de la phase opérationnelle du Rebent Bretagne (Illustration 15). Cette seconde cartographie correspond à la mise à jour des données au niveau des baies (domaine intertidal) (Illustration 16).

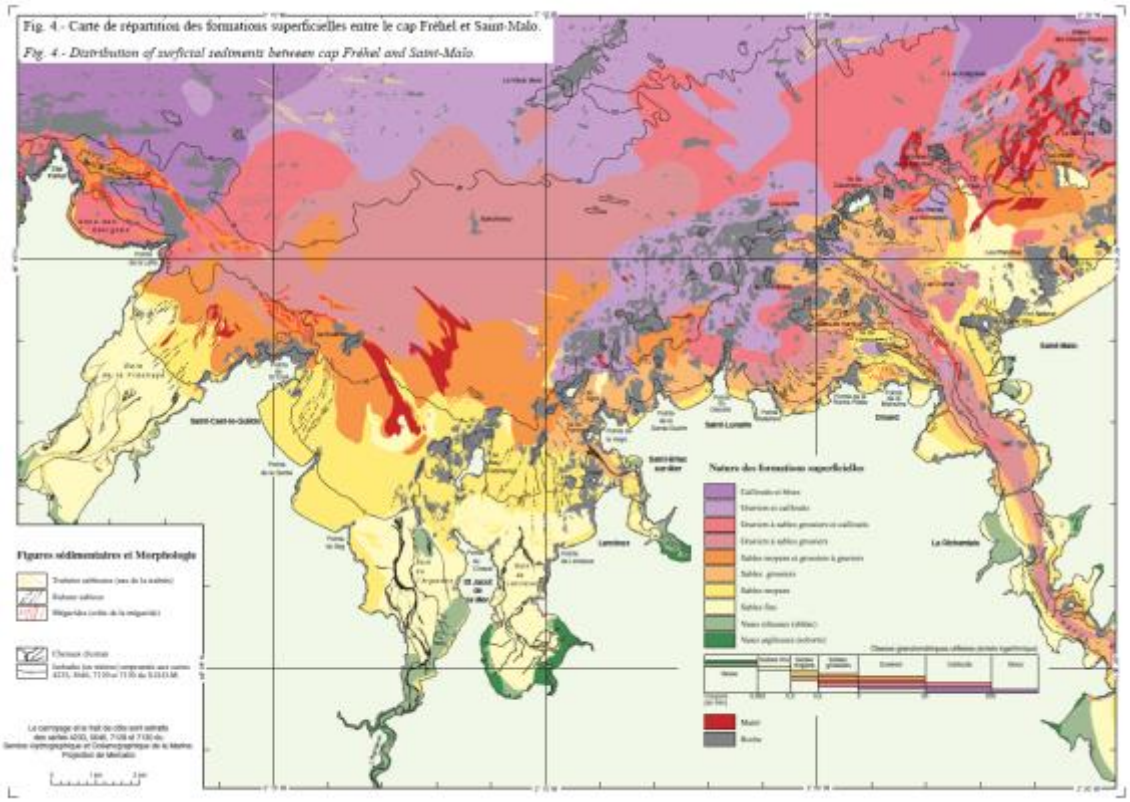


Illustration 15 : Carte géologique des formations marines superficielles pour la partie ouest du compartiment C2 : Côte d'Émeraude (d'après Bonnot-Courtois et al*., 2002b).*

La répartition des sédiments depuis le domaine infralittoral jusqu'au domaine intertidal, va être le reflet à la fois de la géomorphologie du compartiment C2 mais aussi des agents météo-marins (hydrodynamique) (Illustrations 14 et 15).

L'avant-côte constituée par une multitude d'affleurements rocheux en écueil et îles, telles que celles des Hébihens, Agot, de Cézambre ou encore du Grand Chevret, qui soulignent la présence d'un platier rocheux sur environ 1,5 à 4 km du trait de côte (2,5 à 7 milles marins) (Illustrations 14 et 15) et la prédominance de sédiments grossiers, témoignent de la vigueur des agents hydrodynamiques sur la partie orientale du compartiment depuis la pointe du Grouin jusqu'aux Hébihens. Ainsi, le domaine infralittoral présente un gradient granulométrique décroissant du large vers la côte, avec l'omniprésence de faciès très grossiers au large (Bonnot-Courtois *et al*., 2002) (Illustration 15) ; alors que sur la partie occidentale du compartiment, le panel granulométrique va couvrir l'ensemble du spectre depuis les faciès grossiers jusqu'aux vases de fond de baie, soulignant une énergie qui s'atténue peu à peu à la côte.

Hormis pour le secteur du Cap Fréhel, où l'abrupt des falaises et de la bathymétrie, ne permettent pas le développement de plages (le niveau des basses mers se trouvant à proximité du trait de côte, la plage est constituée de blocs effondrés en pied de falaise à l'anse des Sévignés et de sables grossiers, graviers et cailloutis vers le large (Illustrations 14 et 15)) ; dans les parties abritées comme la baie de la Fresnaye, les sédiments deviennent de plus en plus fins du large vers l'intérieur. Le fond de la baie est en colmatage progressif avec l'installation d'un schorre, sur des sédiments vaseux souvent lités par le rythme des marées. Cette même configuration se retrouve dans les baies de l'Arguenon et de Lancieux (Larsonneur, 1980)

Sur la partie orientale, l'édification de cordons littoraux et d'estrans sableux, au cours de la transgression flandrienne, a permis d'isoler plusieurs marais maritimes, comme celui de Saint-Malo, de 450 ha, et situé plus bas que les pleines mers de vive-eau, mais aussi à l'anse de Rothéneuf ou du Verger. L'énergie des vagues à la côte semble être plus forte sur cette partie occidentale du compartiment où le gradient granulométrique depuis le domaine infralittoral à celui intertidal est plus élevé.

À quelques kilomètres à l'est de Saint-Malo, le tombolo des Chevrets s'étire sur environ 1 300 m suivant une direction ouest-est, soulignant comme pour celui de Saint-Malo anthropisé (digues du Sillon et de Paramé), une influence ouest des agents météo-marins.

La tendance historique montre l'anthropisation progressive des marais maritimes par la réalisation de digues plus ou moins solides.

Ainsi, le polder de Ploubalay, situé au fond de la baie de Beaussais, s'étend sur environ 70 ha et est isolé de la mer par une digue en terre, localement recouverte de pierres et longue de 1 800 mètres. Ce marais de Ploubalay, autre marais holocène important du secteur et autre zone basse, sera progressivement anthropisé, lors de grands travaux d'endiguement réalisés par les moines bénédictins de Saint-Jacut-de-la-Mer, à partir de 1390. La digue en pierres, appelée « Digue des Moines », aurait été édifiée sous François 1er, au début du 16ème siècle, pour assécher les terrains situés autour des fermes de Buglais, de la Briantais et de Villeu. C'est en tout et pour tout trois ouvrages qui viendront clore les terrains du polder gagnés sur la mer : la digue des Moines, la digue de la Roche sur Lancieux et la digue des Marais Neufs sur Ploubalay. La digue de la Roche date du 18ème siècle, la digue des Marais Neufs a été construite après 1774, car elle ne figure pas sur la carte des Ingénieurs Géographes du Roi, après1776 (Illustration 16).

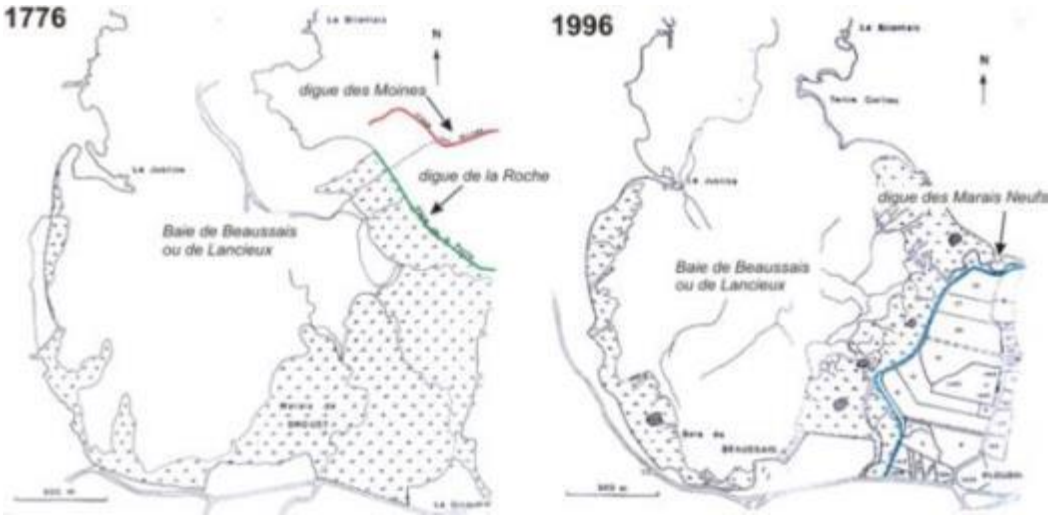


Illustration 16 : Évolution du marais de Ploubalay en Polder, 22 (patrimoine.region-bretagne.fr).

En arrière de Saint-Malo, le marais maritime sur lequel repose une grande partie de l'agglomération, va être lui aussi progressivement anthropisé pour faciliter le chargement et le déchargement des bateaux, à l'abri derrière la cité fortifiée, à la fois des agents météo-marins mais aussi des éventuelles attaques.

Alors qu'à l'époque romaine, la cité de l'Aleth est située sur le promontoire rocheux occidental du havre de Saint-Malo, à Saint-Servan et qu'elle correspond à un port sur l'estuaire de la Rance, l'activité humaine et l'urbanisation vont migrer vers le rocher de Kalnach, situé face à la mer, et protégeant le marais holocène de Saint-Malo au IX^{ème} siècle. Son développement va se faire du XII^{ème} au XIV^{ème} siècle, avec l'édification des premières fortifications et l'organisation du mouillage dans la large anse vaseuse et protégée de « Mer bonne ». La première digue est construite sur la partie orientale du marais, en 1374 ; elle fait 635 mètres de long et forme la retenue du Routhouan (de 15 ha).

Au XVI^{ème} siècle, la cité de Saint-Malo est une cité insulaire, où le Sillon est le seul accès à pieds secs. Les différents évènements saisonniers météo-marins venant rompre régulièrement ce cordon, des empierrements sont édifiés à partir de 1509 pour lutter contre les franchissements de la mer. Des moulins à vent s'implantent et cette chaussée endommagée par plusieurs évènements tempétueux sera reconstruite et renforcée après chaque évènement au début du XVIII^{ème} siècle. L'activité portuaire est croissante, avec Saint-Malo qui devient l'un des ports les plus importants.Elle se localise au niveau de l'anse de « Mer Bonne », abritée derrière les remparts.

Avec l'arrivée des guerres contre les grandes puissances maritimes (Hollande et Angleterre), qui menacent sa sécurité, le port se transforme en port pour la marine de guerre. Au début du XVIII^{ème} siècle, la partie orientale du marais est endiguée pour le développement de l'activité agricole et l'implantation d'activités portuaires. Les deux digues de 585 mètres et de 700 mètres, réalisées en 1713, prennent appui sur les îlots des Talards.

Illustration 17 : Évolution historique du marais maritime de Saint-Malo.

En 1836, un bassin à flot dans le prolongement de l'ancienne grève du Sillon, est construit et les quais qui bordent la partie Sud des remparts sont protégés par la jetée du Môle des Noires, en 1842. La construction du bassin va entrainer, entre 1886 à 1907, la transformation en quai de la digue du Val et de la digue de Rocabey (1843) et l'assèchement des grèves. En 1885, deux bassins à flot sont mis en service et en 1935, le port à marée est fermé par des écluses, ce qui a pour conséquence de limiter les débordements de la mer sur les quartiers bas de Saint-Malo.

La chaussée du Sillon fut endommagée à plusieurs reprises par les tempêtes (1811, 1849, 1856, 1869, etc.). Progressivement, l'ancien Sillon est maçonné afin de préserver les industries et la route. Au XX^{ème} siècle, la digue prend sa forme actuelle sur plus de 900 mètres de long entre le Château et la cale de la Piperie. La construction de la digue de Paramé, depuis la Cale de la Piperie jusqu'au bas du boulevard de Rochebonne, est réalisée entre 1833 et 1913, ce qui a pour conséquence d'accroitre l'urbanisation du marais (DHI et Le Cornec, 2013).

L'ensemble de ces aménagements auront pour conséquence une modification hydrodynamique du secteur.

Ainsi, afin de se protéger des assauts de la mer, la création des digues du sillon et de Paramé, viennent faire obstacle aux forçages météo-marins qui pouvaient survenir l'hiver et lors des grandes marées de vives eaux. Ainsi on observe un bourrelet d'estran au niveau de la cale de la Piperie, qui se traduit par une nette rupture de pente entre la haute plage et le milieu de plage, qui n'existe pas du côté de Rochebonne (Bonnot-Courtois et Lafond, 1994). Sur la partie Rochebonne, la plage serait ainsi moins large ce qui entraîne une faible dissipation des houles incidentes, ce qui est attesté par la faible présence de rochers affleurant sur l'estran. Ainsi de part et d'autre de l'épi de la Hoguette, il existe une différence de niveau de plus d'un mètre, de la topographie de la plage, nettement plus bas du côté Rochebonne. Au niveau de la cale de la Piperie, le bourrelet de sable montre une remontée importante jusqu'à 12,60 m, alors qu'il était à 9,75 à Rochebonne.

Les écueils de l'avant plage sont responsables de la formation de tombolos (immergés ou non) ou de queues de comètes en arrière de ces écueils (comme à la cale de la Piperie), ce qui entraine des apports sédimentaires depuis le domaine infralittoral vers le domaine intertidal et l'accumulation du sable (Bonnot-Courtois et Lafond, 1994).

À l'inverse, à l'est de l'épi de la Hoguette, la plage est sujette à l'énergie et à l'action des houles qui convergent par réfraction sur les fonds dans cette zone comprise entre l'épi de la Hoguette et la pointe de Rochebonne.

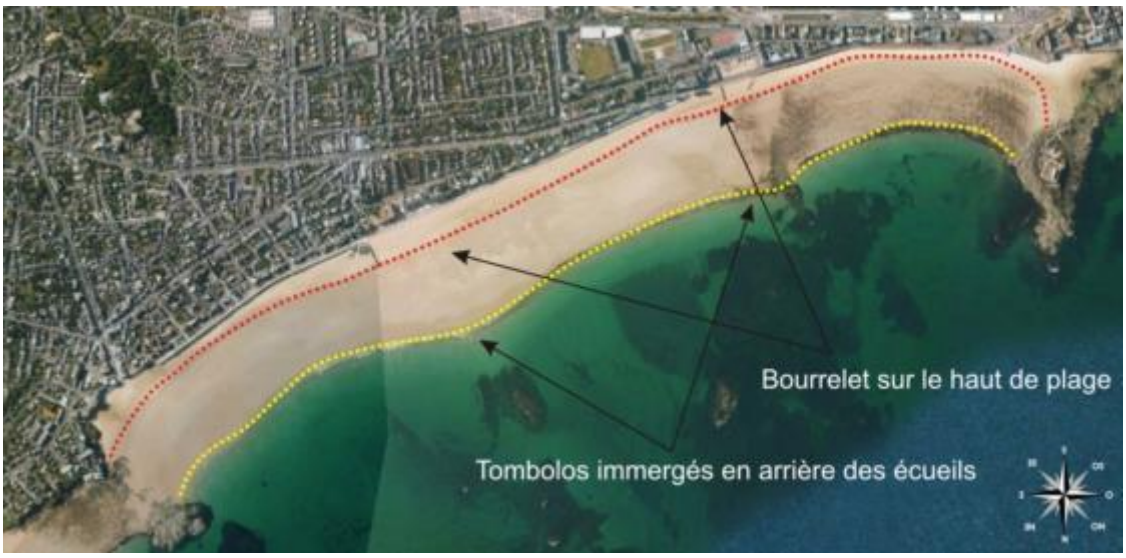


Illustration 18 : Géomorphologie de la Plage du Sillon et de Pramé – Rochebonne (Source : GoogleEarth2014).

Une autre des digues emblématiques de ce compartiment C2 (Côte d'Émeraude) est la digue de la Banche qui fut édifiée par l'État en 1862, sur les vestiges d'une digue plus ancienne, que l'État entretenait depuis 1855, à Saint-Jacut-de-la-Mer. Cette digue est venue protéger les terres labourables et la jonction de la presqu'île avec le hameau de Biord (au sud de l'isthme). Ainsi alors que sur sa partie est, cette étroite langue de terre était protégée par la digue des Moines, la partie ouest, exposée aux vagues levées par les vents dominants d'ouest, devait être régulièrement consolidée suite aux évènements de tempêtes de 1857 et 1862.

L'évènement du 2 mars 1869 fit reculer la dune dite des Cimetières Neufs et endommagea la cale de Béchet. La digue fut alors prolongée de 390 m, et restaurée de nouveau en 1875 et 1876 puis en 1887 et 1899. La digue mesurait à l'origine 800 m de longueur, et en 1902, la digue était de nouveau consolidée sur une longueur de 382 m avec un enrochement sur 629 m.

Cependant, des réparations furent encore nécessaires tout au long de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, en particulier en 1919, en 1921, en 1933 et surtout après la tempête de février 1935, où la digue fut entièrement détruite, par déchaussement des fondations. La tempête du 31 octobre 1936 enleva une vingtaine de mètres à l'édifice qui fut de nouveau restauré (en modifiant le profil de la crête). Un enrochement sur une longueur de 500 m, à 225 m des pieux en bois et des tourelles en maçonnerie servant de brise-lames, fut aménagé. 200 poteaux ou ducs l'Albe et des « tourillons » en pierre de deux mètres de diamètre et d'un mètre de hauteur, servaient à protéger le sillon originel en faisant office de brise-lames.

Ces défenses ont pratiquement disparu aujourd'hui et la digue est uniquement défendue par des enrochements. Plus au Sud, entre le Rocher Plat et la pointe de la plage du Rieux, la dune a reculé de plusieurs dizaines de mètres. Un enrochement continu s'est avéré indispensable, dont le dernier tronçon a été réalisé en 1980 (s*ource : patrimoine.region-bretagne.fr*).

Ces aménagements dans la baie de l'Arguenon ou du Guildo, à Saint-Jacut-de-la-Mer, soulignent que la baie de la Beaussais devait être soumise à une dynamique sédimentaire importante avant que ne soit construite la digue de la Blanche.

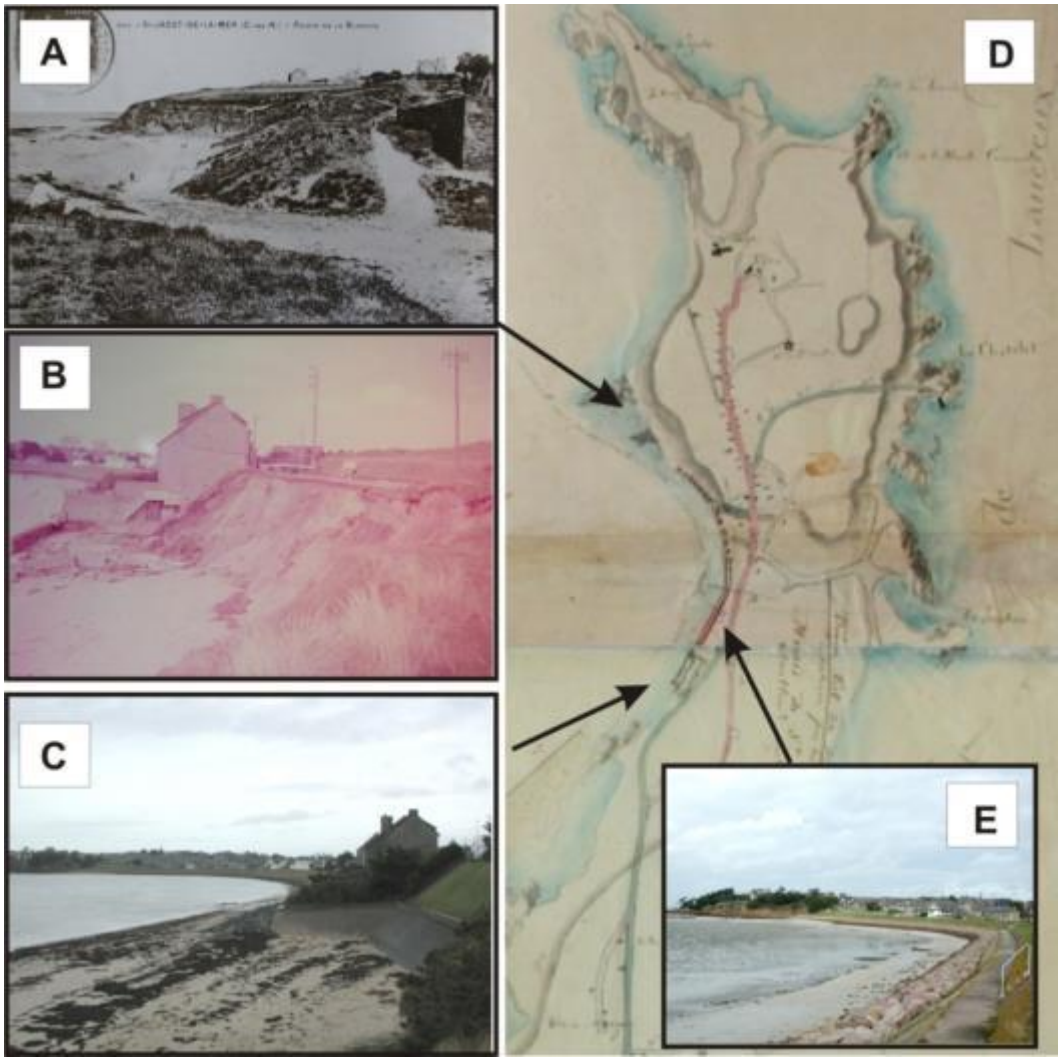


Illustration 19 : A : Carte postale dela pointe de la Blanche au début du XX^{ème} siècle ; B : Recul de la dune et C : son aménagement en 1950-1960 ; D : Constuction de la digue de la Blanche pour protéger l'isthme de Saint-Jacut-de-la-Mer ; E : Digue de la Blanche actuelle.

2. Paramétres / Agents hydrodynamiques

2.1. LA MAREE

La marée est une onde oscillatoire périodique du niveau de la mer due aux effets conjugués de l'attraction de la Lune et du Soleil sur les particules liquides des océans (Ehrhold, 1999). Le caractère périodique de la marée a 3 cycles :

- cycles de pleine-mer : cycle semi-diurne de 12h25 ;
- cycles mensuel ou semi-lunaire : cycle de vive-eau/morte-eau (interaction entre le soleil, la terre et la lune) ;
- cycle annuel : cycle solstice/équinoxe lié à la variation de la distance de la terre au soleil.

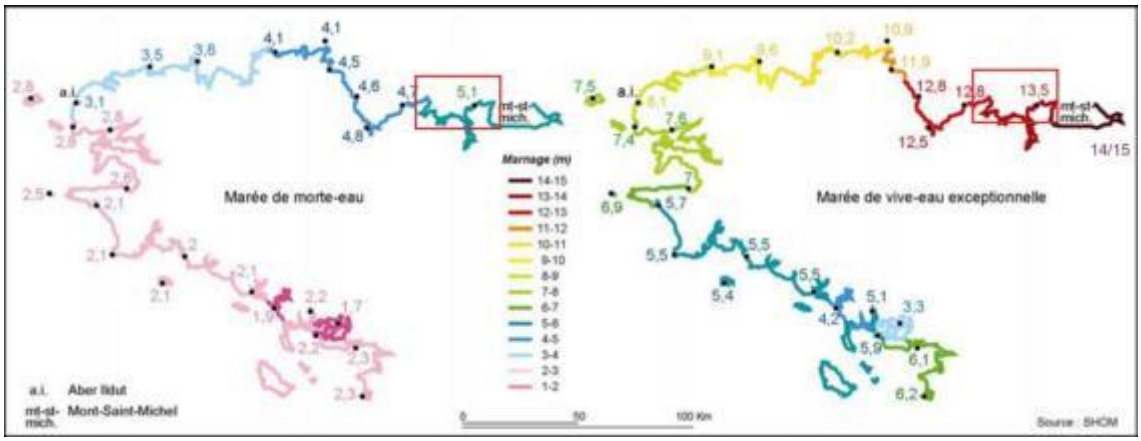


Illustration 20 : Amplitude du marnage en Bretagne (d'après les données du SHOM) (dans Stephan, 2009).

Les courants les plus violents sont au nord de la Bretagne et plus particulièrement dans le golfe de Saint-Malo, où ils atteignent 4 nœuds à 3 ou 4 km des côtes. À proximité du littoral, leurs vitesses atteignent les 2 nœuds (L.C.H.F., 1987). Le golfe normand-breton, est caractérisé par des courants de marée dissymétrique entre le flot et le jusant, dissymétrie qui s'accentue vers l'est (5h17 pour le flot contre 7h05 pour le jusant à Saint-Malo, d'après le SHOM).

Même si les courants de marée sont indissociables du marnage, leurs vitesses ne sont pas en relation directe avec l'amplitude de ce même marnage, mais plutôt en relation avec la morphologie sous-marine (bathymétrie) du site. Ainsi, les secteurs étroits tels que les chenaux, entrée de baies, passage de cap et autres, auront des vitesses élevés alors que les rades, baies et autres secteurs ouverts auront des vitesses plus faibles.

Au flot, les courants portent dans la direction de propagation de l'onde de marée. Au jusant ; ils portent dans la direction opposée. L'intensité des courants de flot est supérieure à celle des courants de jusant.

Dans le secteur de Saint-Malo, les courants de marée sont alternatifs, orientés est-sud-est au flot et ouest-nord-ouest au jusant. Par coefficient de 95, les vitesses peuvent atteindre 1,3 m/s 2h30 avant la pleine mer.

Les intensités maximum des courants peuvent dépasser 1,5 m/s. Les forts courants de marée se rencontrent plus précisément dans le secteur des Roches Douvres (Saint-Malo),

sur la partie maritime de l’estuaire de la Rance et également à l’abord des caps : Cap Fréhel, Pointe de Saint-Cast, Pointe de la Garde Guérin, Pointe de la Vache et du Grouin (Illustrations 20 & 21). Les maxima de courant restent faibles au fond des baies (Bonnot-Courtois, 2002).

Les vitesses de courant de marées avoisinent les 2 à 3 nœuds, mais autour de la Pointe du Grouin, ils peuvent facilement atteindre les 6 à 7 nœuds (Lelièvre, 2000).

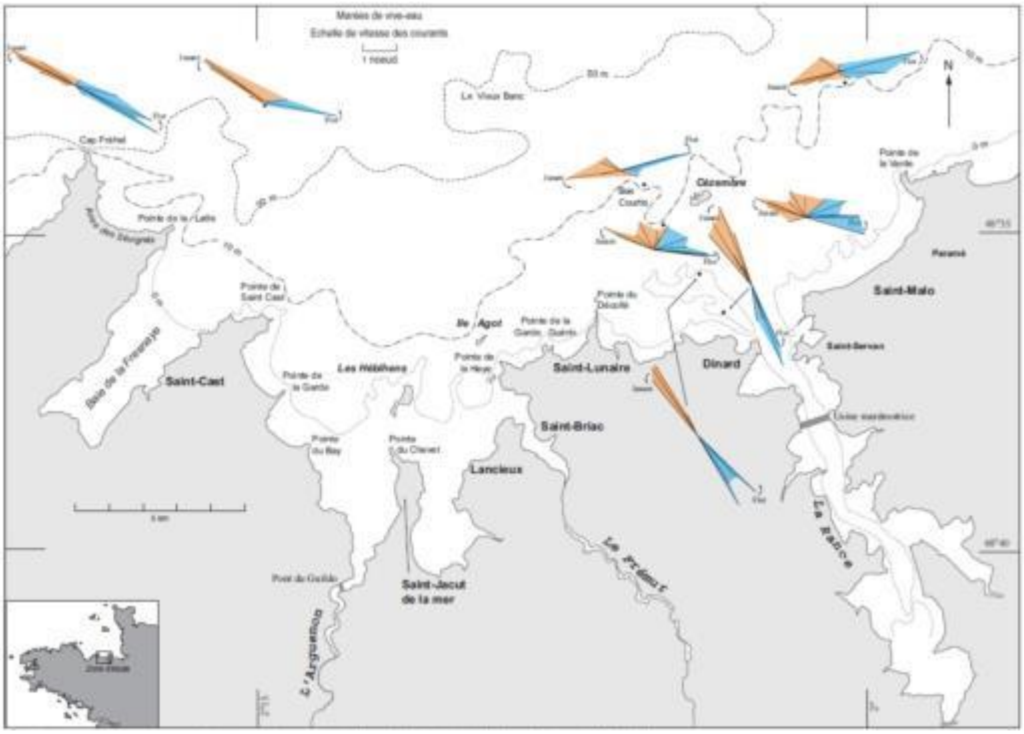


Illustration 21 : Présentation de la zone cartographiée et roses des courants entre le cap Fréhel et Saint-Malo (Bonnot-Courtois, 2002, d’après Dagorne, 1966 et 1968).

Au cap Fréhel, les roses de courants ont une orientation est-sud-est au flot et ouest-nord-ouest au jusant. Au large de Saint-Malo, elles pivotent et s’orientent à l’est au flot et à l’ouest au jusant.

À l’embouchure de la Rance, la chenalisation renforce le caractère alternatif des courants qui sont dirigés vers le sud-est au flot et en direction strictement opposée au jusant (Dagorne, 1966, 1968).

Entre le cap Fréhel et Saint-Malo, les courants résiduels lagrangiens (Garreau, 1993) ont des vitesses faibles, de l’ordre de quelques cm/s. La variation de l’orientation du trait de côte et les changements rapides de la bathymétrie dans les secteurs de haut-fond engendrent des disparités de directions des vecteurs des courants résiduels. Une succession de tourbillons anticycloniques et cycloniques se succèdent à une distance de moins de 6 km de la côte. Au-delà vers le large, les courants résiduels lagrangiens décrivent une trajectoire courbe, passant du sud-est au nord-est.

La circulation près du littoral est peu active, sans échange avec les eaux du large, ce qui entraîne un faible renouvellement des masses d’eau dans les fonds de baies (baie de La Fresnaye, baie de Lancieux) (Bonnot-Courtois, 2002).

Entre l'île Agot et Cézembre (isobathes 10 et 20 mètres), les fonds présentent une multitude d'affleurements rocheux sous forme d'écueils et de platiers. Dans ce secteur on observe une augmentation des champs de courants résiduels, la propagation de la marée étant renforcée entre le plateau des Minquiers et le massif de Saint-Malo. Les platiers rocheux qui se prolongent vers le nord-est au large de Cézembre dispersent les courants et protègent la frange côtière des houles de nord-ouest (Bonnot-Courtois, 2002).

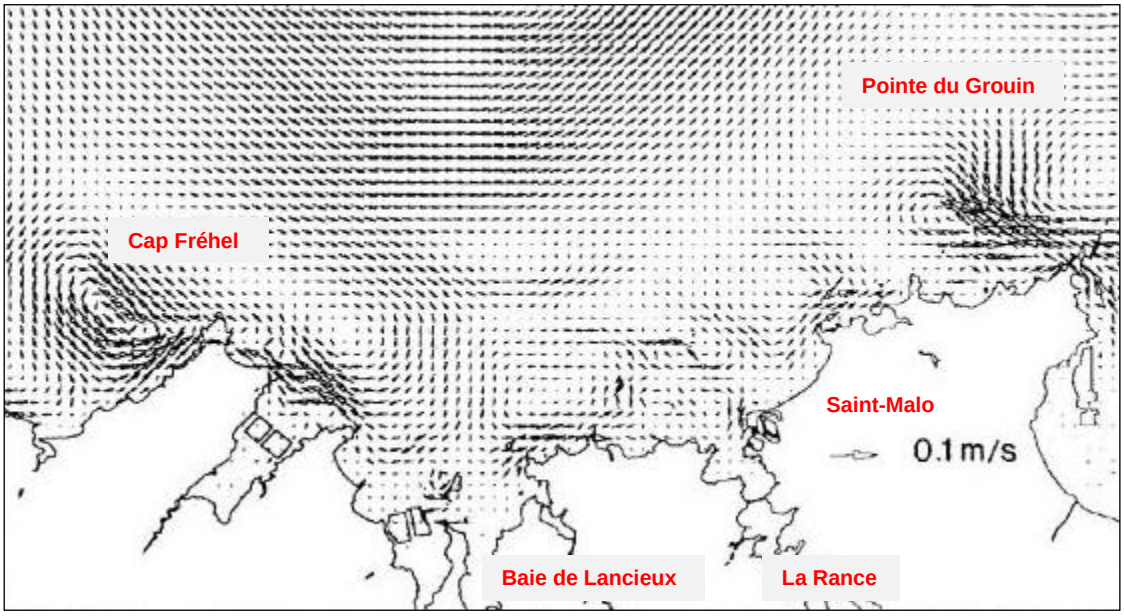


Illustration 22 : Champs de courants résiduels lagrangiens entre le cap Fréhel et Cancale (Garreau, 1993).

Dans la baie de Lancieux les courants suivent les contours de la baie, au flot comme au jusant. Tandis que dans l'estuaire de l'Arguenon, leur circulation est plus complexe en raison de la présence de nombreux décrochements et pointes au flot comme au jusant (Bousquet, 1967) Dès qu'un obstacle survient, des courants giratoires apparaissent (mouvement giratoire anticyclonique sur la rive occidentale et mouvement cyclonique sur la rive orientale). La propagation de l'onde de marée est guidée à la fois par le rétrécissement de l'estuaire et par le frottement sur le fond (ce phénomène engendre un mascaret par fort coefficient de marée) (Vaucourt, 1992). Le domaine intertidal est soumis à un fort régime hydrodynamique, en raison du marnage qui approche 14 mètres en période de vive-eau. L'amplitude de la marée augmente d'ouest en est, et, pour un coefficient de marée de 95, le marnage passe de 10 m au cap Fréhel à 11 m à Saint-Servan, les plus grandes marées de vive-eau atteignant 13,60 m à Saint-Malo (Dagorne, 1966 et 1968).

À Saint-Malo, l'amplitude des marées atteint 13,60 m en grande vive-eau. Dans le secteur de Saint-Malo, les courants de marée sont orientés vers l'est-sud-est au flot et l'ouest-nord-ouest au jusant (Bonnot-Courtois, 1992).

D'après un relevé depuis vingt ans des conditions marégraphiques, les marées de coefficient supérieur à 90 représentent 18 % des marées. Ces grandes marées subissent des surcotes dans 25 % des cas.

2.2. ÉTAT DE MER (VAGUES, HOULES ET NIVEAUX EXTREMES)

2.2.1. La Houle (et les vagues)

Les houles, sont un agent fondamental des transports sédimentaires, en provoquant la remise en suspension et le déplacement des sédiments déposés sur les fonds marins des domaines infralittoral et intertidal. En fonction de son angle d'incidence à la côte, la houle génère des courants plus ou moins parallèles au rivage (la dérive littorale) qui entrainent un transport sédimentaire tout aussi parallèle, dans la zone de déferlement des vagues. Ainsi, c'est la houle qui est à l'origine de l'évolution des profils de plages et des fonds, et par conséquent de l'érosion du littoral.

À la côte, le paramètre fondamental de la houle qui viendra s'ajouter à un niveau de mer élevé (dépression + fort coefficient de marée), sera la hauteur du train de houles, créant les vagues déferlantes. Cet ajout au niveau marin ou *wave set-up,* dépendra de la géométrie de l'ouvrage de défense, du profil de la plage ou de la bathymétrie d'avant-plage (de l'estran), qui entraineront le franchissement des ouvrages côtiers, augmentant l'aléa submersion marine.

Les houles au large ont des caractéristiques (longueur d'onde, hauteur, période, célérité) qui dépendent de la vitesse et de la durée du vent, sur l'étendue d'eau qu'il affecte (le fetch). La base de données ANEMOC (Atlas Numérique d'États de Mer Océanique et Côtier) a été construite à partir de simulations rétrospectives sur une période de 23 ans et 8 mois pour la façade Atlantique, Manche, Mer du Nord. Les simulations ont été effectuées avec le logiciel de modélisation des états de mer TOMAWAC, développé par EDF-LNHE avec le soutien du CETMEF. Ce logiciel modélise l'évolution en espace et en temps du spectre directionnel de variance de la surface de la mer.

Les informations pour le compartiment C2 sur la houle sont disponibles à travers l'interrogation de deux boues: Campagne n° 03501 – Saint-Malo) et Campagne 02202 Les Minquiers 2 (Illustration 23).

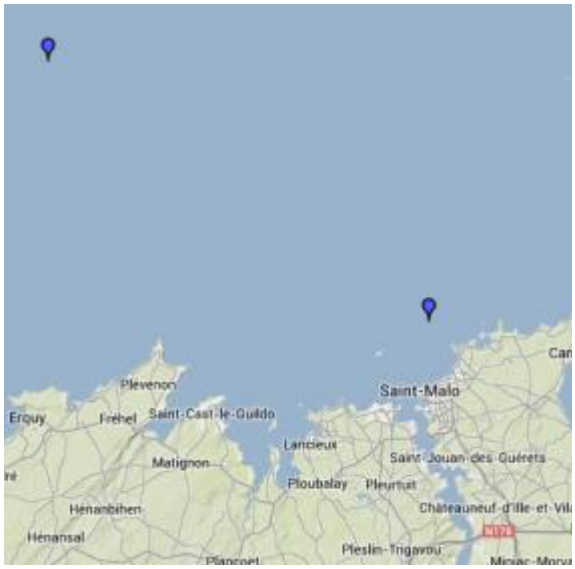


Illustration 23 : Localisation des bouées produisant des données de houles in situ sur le compartiment C2 : Côte d'Émeraude (Source : ANEMOC). En haut : Les Minquiers 2, en bas : Saint-Malo.

La première offre des données sur la période de 1,22 ans, du 9 août 1993 au 23 septembre 1995 alors que la seconde offre des données sur la période de 1,39 ans du 31 mars 2011 au 8 novembre 2012.

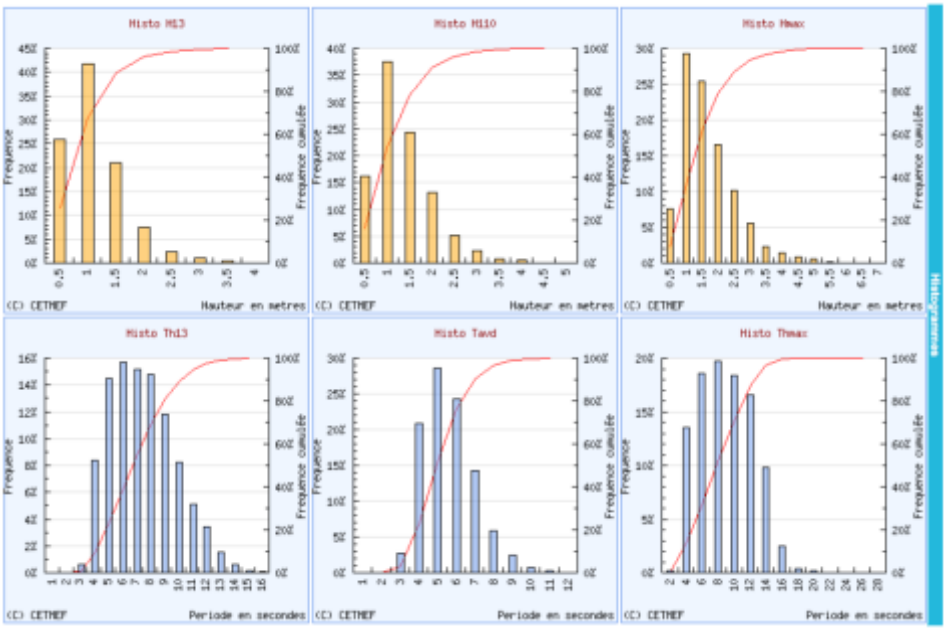


Illustration 24 : Histogramme des fréquences de hauteurs de houle (en m) et des périodes (en s) pour la bouée Saint-Malo et la campagne 03501 (Source : ANEMOC – CEREMA).

La bouée Saint-Malo montre que les houles ont des hauteurs significatives (valeur moyenne du tiers supérieur des hauteurs des vagues observées sur une durée de 30 mn (**$H_{1/3}$**)) qui se répartissent autour du mètre, et des périodes significatives (définies par la valeur moyenne des périodes du tiers supérieur des plus grandes vagues observées sur une durée de 30 mn) autour de 5 à 8 secondes.

Pour des hauteurs de la plus grande vague observée sur une période de 30 mn (Hmax), les hauteurs significatives sont autour de 1 à 1,5 mètre et période de la vague de la plus grande hauteur observée sur une durée de 30 mn (Tmax), de 6 à 12 secondes (Illustration 24).

Ces données semblent être en accord avec les houles mesurées en 1964 au large du cap Fréhel (Allen, 1982), qui montraient une hauteur significative (Hs) d'environ 0,80 m, avec une période moyenne la plus fréquente comprise entre 8 et 9 secondes. Pour Saint-Malo, la période de houle est aussi en moyenne de 9 secondes. 79 % des houles ont une période comprise entre 6 et 12 secondes. Le creux maximal enregistré est de 1,9 m (Bonnot-Courtois, 1992).

La bouée Les Minquiers 2, au large montre que la propagation de houles est orientées ouest-nord-ouest – nord-nord-ouest et de hauteur comprise entre 0,5 et 1 mètre (Illustration 25).

Analyse statistique $H_{1/3}$					
	$H_{1/3}$ (m)	$T_{H1/3}$ (s)		Dir (°)	
Max	4.0	8.1		282	
≥ Q99%	≥ 2.5	de 5.6	à 11.4	de 176	à 328
≥ Q95%	≥ 1.9	de 5.1	à 12.6	de 156	à 42
≥ Q75%	≥ 1.2	de 4.3	à 15.6	de 105	à 83
≥ Q50%	≥ 0.8	de 3.6	à 15.6	de 111	à 107
≥ Q10%	≥ 0.3	de 2.6	à 15.6	de 147	à 145
≥ Q1%	≥ 0.2	de 2.5	à 15.6	de 147	à 145

Analyse statistique H_{max}					
	H_{max} (m)	T_{Hmax} (s)		Dir (°)	
Max	7.6	12.5		286	
≥ Q99%	≥ 4.3	de 5.5	à 15.5	de 157	à 358
≥ Q95%	≥ 3.2	de 3.9	à 15.5	de 156	à 65
≥ Q75%	≥ 2.0	de 3.0	à 22.1	de 95	à 86
≥ Q50%	≥ 1.4	de 2.5	à 22.1	de 19	à 16
≥ Q10%	≥ 0.6	de 1.5	à 22.1	de 147	à 145
≥ Q1%	≥ 0.3	de 1.3	à 22.1	de 147	à 145

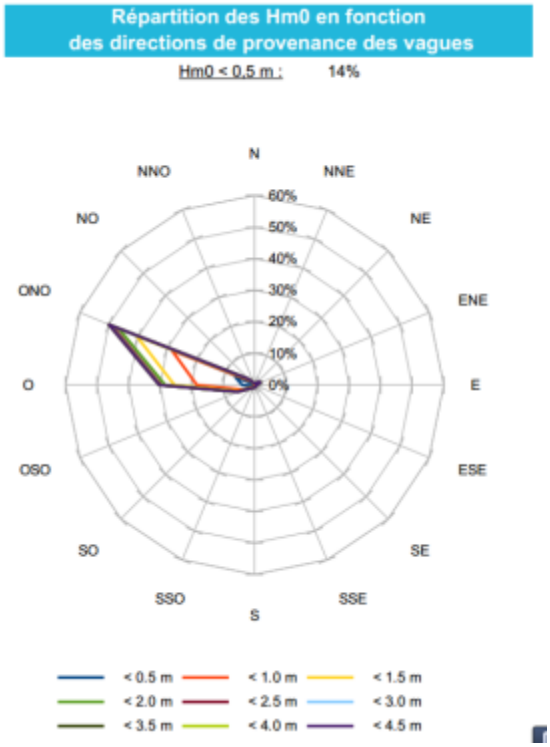


Illustration 25 : Direction de provenance des vagues pour la bouée Les Minquiers 2 pour la campagne 02202 (Source : ANEMOC – CEREMA).

Les roses des agitations (LCHF, 1984) soulignent aussi la prédominance des houles de secteur ONO et des amplitudes maximales supérieures à 4 m. À Saint-Malo, des mesures réalisées entre 1990 et 1992 donnent des hauteurs significatives les plus fréquentes comprises entre 0,50 et 0,70 m, avec une période moyenne d'environ 5 secondes (STNMTE[1], 1995).

La rose des fréquences de directions de houle dans le secteur du Cap Fréhel (Spagnuolo, 1984) montre que les houles dominantes sont de secteur ouest. D'après les mesures de périodes et amplitudes de houles, effectuées par le Laboratoire National d'Hydraulique en 1964, elles atteignent une hauteur maximale de 0,80 mètres avec une période de 10 à 12 secondes.

Le devenir des houles à la côte, est fonction de la profondeur, qui lorsque celle-ci est supérieure à la moitié de la distance qui sépare deux crêtes de houles successives (longueur d'onde), celles-ci se diffusent sans déformation. Mais en parvenant sur le plateau continental, le train de houle subit des modifications se traduisant par une diminution de la longueur d'onde et de la vitesse de propagation, et un accroissement de la cambrure des vagues ce qui entraine soit :

(1) la réfraction sur les fonds, par une modification de la direction de propagation à l'approche des petits fonds, qui réorientent les crêtes de houle ;

(2) la diffraction que l'on peut observer autour de brise-lames, jetées, épis etc. où les crêtes de houle sont réorientées et *perpendicularisées* à l'ouvrage ;

(3) la réflexion, qui correspond au renvoi contre un ouvrage ou une côte de l'onde réfléchie par rapport à une onde incidente ;

[1] Service Technique de la Navigation Maritime et des Transmissions de l'Equipement

(4) le *shoaling* qui correspond à une déformation de la houle dès que la profondeur devient inférieure à environ la moitié de la longueur d'onde ;

(5) le frottement sur les fonds qui a pour effet de dissiper l'énergie de la houle causant une réduction de la hauteur des vagues et enfin ;

(6) le déferlement qui intervient lorsque la hauteur de houle est supérieure à environ 80 % de la profondeur, avec trois sortes de déferlement : le *déferlement glissant* qui intervient sur des pentes faibles, le *déferlement plongeant* qui intervient sur des pentes moyennes, et le *déferlement gonflant* qui intervient sur des pentes fortes.

Le rapport de BONNEFILLE et GERMAIN (1971) concernant le renforcement de la digue de Paramé, présente les caractéristiques des houles sur le Plateau de Rance, avec une période de la houle la plus fréquente de 9 secondes, et de la houle longue la plus fréquente de 13 secondes. 79 % des houles ont une période comprise entre 6 et 12 secondes. Le creux maximal enregistré est de 1,9 mètre le 6 avril 1967, mais EDF avait observé un creux de 2,4 mètres en Rance, à la pointe de la Jument, le 5 avril 1962.

Le houlographe installé au large de Saint-Malo depuis fin 1989 a enregistré une hauteur de vague beaucoup plus importante, de 7 mètres, lors des tempêtes du début de l'année 1990. Un plan de vague montre une convergence nette des orthogonales et une augmentation des valeurs de l'énergie au niveau de la digue de Paramé, et particulièrement à l'est de l'épi de la Hoguette.

La reconstitution des états de mer sur la période octobre 1988 - mars 2007 au large de Saint-Malo conduit à la rose des houles présentée dans l'illustration 26 (PPRL Saint-Malo, 2013).

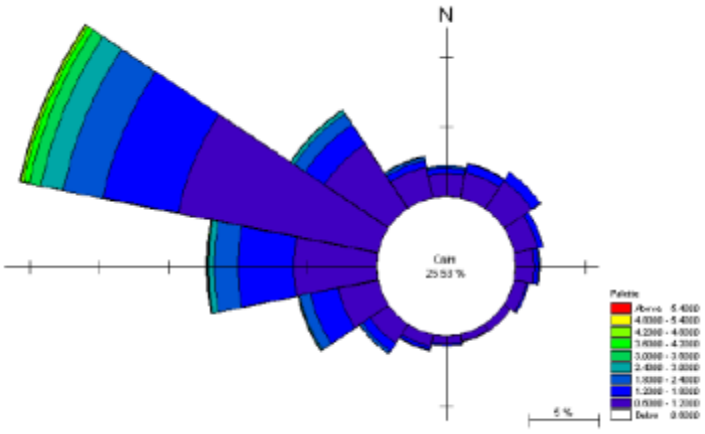


Illustration 26 : Rose des houles au large de Saint-Malo (1988 - 2007, durée 3h, Houles NEXTRA).

La propagation générale des houles du golfe normand-breton à la côte est encore mal connue à cause d'une géomorphologie et bathymétrie complexe (îles, hauts fonds, platiers, bancs de sables) (Illustration 27).

Ces irrégularités vont fortement influencer la propagation de la houle et des vagues et peuvent créer localement des effets de sites. Cependant, de part son orientation vers le nord-est, la partie depuis le cap Fréhel vers Notre-Dame-du-Guildo sera un secteur moins exposé aux houles venant de l'ONO, ainsi que les fonds des baies à l'abri des agitations du large à cause de la diffraction de ces houles autour des pointes, en particulier par le cap Fréhel lui-même ou la pointe de Saint-Cast. La partie orientale en revanche, depuis Notre-Dame-du-Guildo jusqu'à la pointe du Grouin, sera plus exposée et malgré l'amortissement sur les nombreux hauts-fonds et écueils qui tapissent l'avant-côte depuis les Hébihens à

l'embouchure de la Rance, et au-delà, localement la houle pourra passer au travers de ces protections naturelles comme sur le secteur de la *digue de la Blanche* ou *de Paramé* par exemple (Illustration 27).

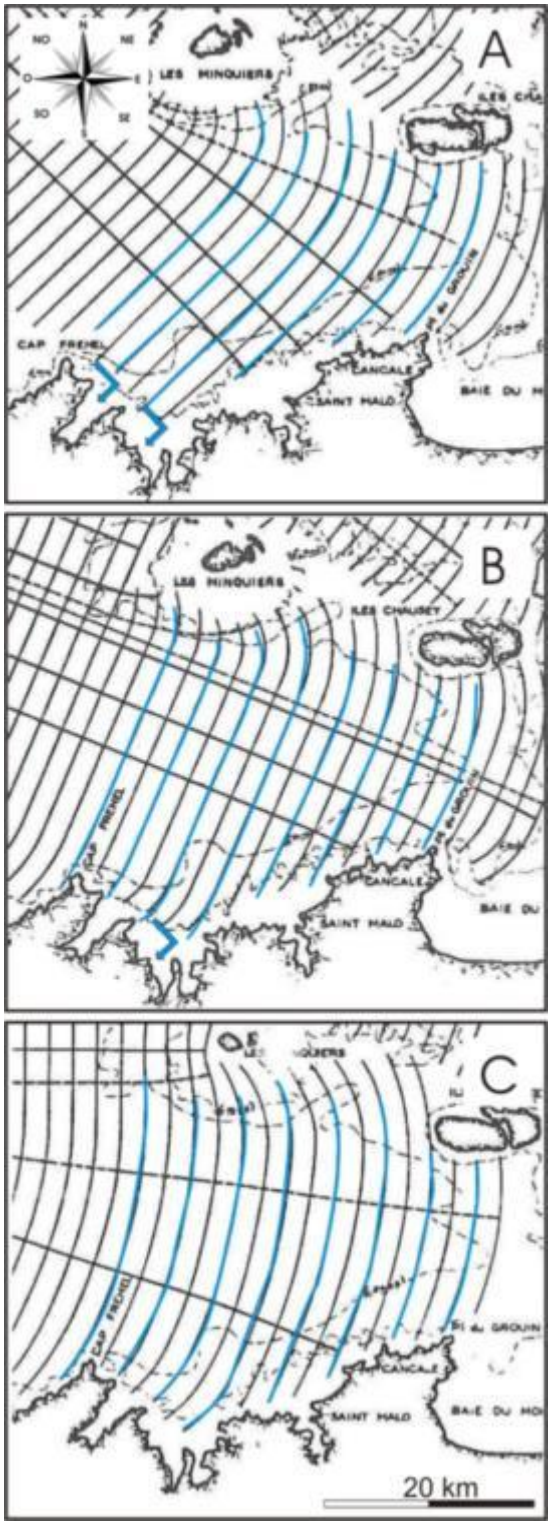


*Illustration 27 : Plans de houles du Golfe Normand-breton : **A** : Dir O, Per 6s, NivEau BM ; **B** : Dir ONO, Per 6s, NivEau BM ; et **C** : Dir NO, Per 6s, NivEau BM (d'après SOGREAH, LCHF).*

2.2.2. Niveaux extrêmes : surcotes et décotes

Les ***niveaux de mer extrêmes*** sont calculés et donnés par le SHOM et le CETMEF. Ces données ont été récemment actualisées, en 2012. Précédemment, les niveaux dataient de 2008 (Simon, 1994 et 2008).

Le territoire métropolitain est découpé en différentes zones, fonction des ports de référence, dont les observatoires sont permanents et pour lesquels il existent plus de 10 années de mesures effectives. Ils existent cependant quelques exeptions.

Les niveaux extrêmes sont calculés pour des périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans sur les côtes de La Manche et de l'Atlantique et les altitudes des niveaux sont fournies par rapport à la référence altimétrique IGN69.

La Côte d'Émeraude, appatient à la zone « Bretagne-Nord » qui comprend le littoral situé entre la Pointe d'Agon (Manche) et Roscoff (Finistère). Les ports de référence concernés pour cette zone, sont les ports de Saint-Malo et Roscoff auxquels s'ajoutent des sites secondaires, pris en compte pour les calculs en pleine mer et en basse mer. La Côte d'Émeraude a donc pour port de référence le port de Saint-Malo.

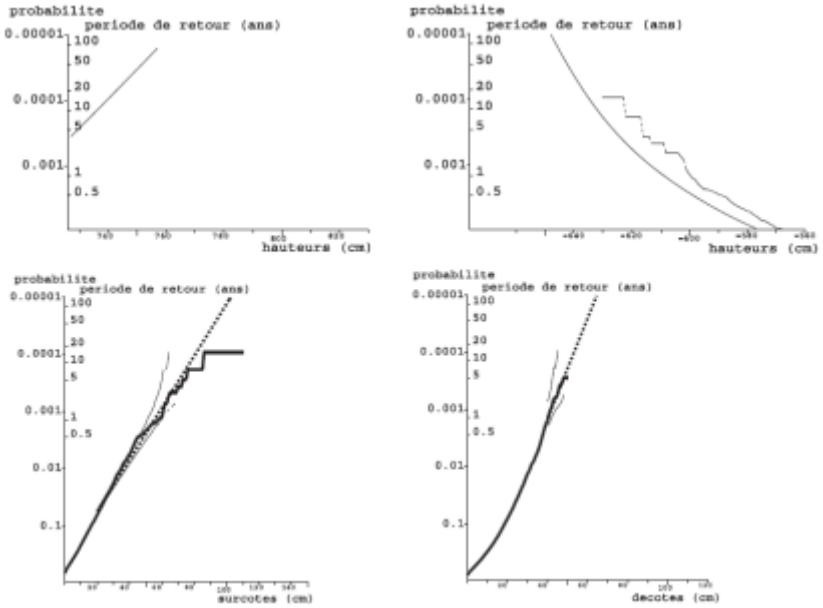


Illustration 28 : Résultats des statistiques pour le port de Saint-Malo par rapport à l'IGN 69, en haut – hauteur d'eau, en bas - surcote/decote (© CETMEF/SHOM 2012).

L'illustration 28 correspond aux résultats de l'analyse statistique des niveaux de mer, pour le port de Saint-Malo, et ils tiennent compte des effets atmosphériques

Le trait plein, correspond aux probabilités d'observer des hauteurs de pleines mers supérieures (ou basses mers inférieures) à une valeur donnée, traduite en terme de périodes de retour associées.

Les traits pointillés présentent les résultats d'observations, la courbe continue est une loi théorique issue de l'analyse statistique des données observées.

Les cartes des niveaux extrêmes sur la côte d'Émeraude (Illustration 31), montre que :

- pour une période de retour de 10 ans, le niveau extrême de pleine mer varie entre 7,50 m à la pointe du Grouin, et 7,00 m au Cap Fréhel ;Pour une période de retour de

50 ans, le niveau extrême de pleine mer varie entre 7,70 m à la pointe du Grouin, et 7,20 m au Cap Fréhel ;Pour une période de retour de 100 ans,le niveau extrême de pleine mer varie entre 7,80 m à la pointe du Grouin, et 7,25 m au Cap Fréhel.

Plus précisément, pour le PPRL de Saint-Malo, les valeurs sont obtenues par analyse statistique aux marégrammes du port de référence et sont disponibles dans « Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique » (© CETMEF/SHOM 2012), pour les périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans (Illustration 29 et 31) :

Période de retour	***10 ans***	***20 ans***	***50 ans***	***100 ans***
Niveau marin (en m, IGN 69)	7,2/7,3	7,34	7,43	7,49

Illustration 29 : Niveaux extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) pour différentes périodes de retour 10, 20, 20 et 100 ans (© CETMEF/SHOM 2012).

Il est intéreesant de mettre ces valeurs en relation avec les niveaux d'eau moyens en morte-eau (ceof. 45) et vive-eau (ceof. 95) pour la peline mer (PM) et la basse mer (BM), par exemple pour le port de Saint-Malo (Illustration 30).

Port	***Vive eau moyen***		***Morte eau moyen***		**Niveau moyen**
	PM	**BM**	**PM**	**BM**	
Saint-Malo	7,05	1,05	5,5	2,65	6,76

Illustration 30 : Niveau de mer moyen (en m) à Saint-Malo (PM = pleine mer ; BM = basse mer).

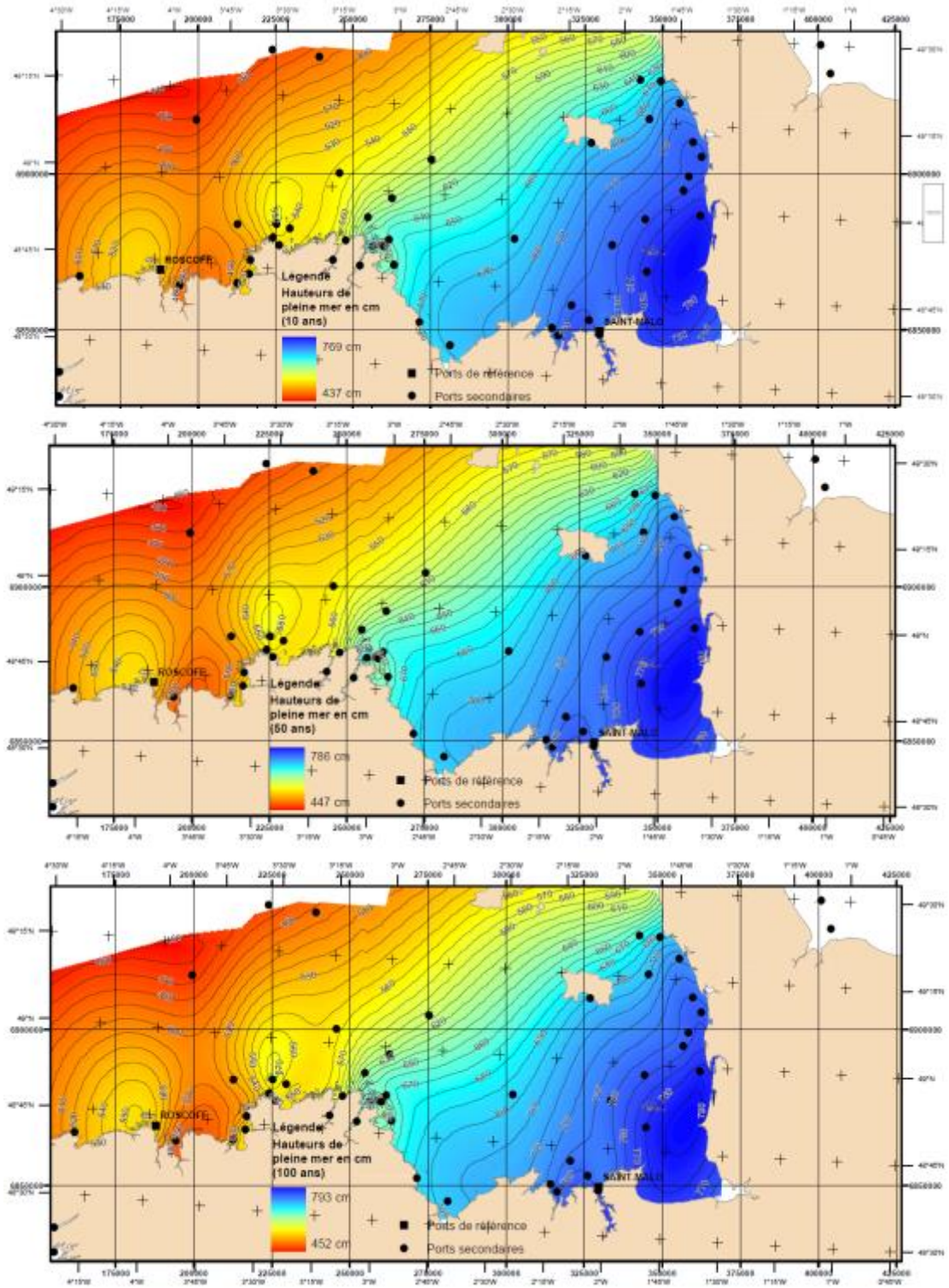


Illustration 31 *: Carte des niveaux extrêmes de pleine mer sur une période de retour de 10, 50 et 100 ans (SHOM et CETMEF, 2012).*

La ***surcote/décote*** instantanée est la différence, à un instant t, entre la hauteur d'eau observée et la hauteur d'eau prédite. On parle de surcote quand cette différence est positive, décote quand elle est négative. La surcote/décote a principalement une origine météorologique : elle est générée, lors du passage de dépressions ou d'anticyclones, par les variations de pression atmosphérique et par les vents. Elle peut avoir également d'autres origines : vagues, seiches, tsunamis, … (CETMEF/SHOM, 2012).

La surcote de pleine mer est la différence entre la hauteur de pleine mer observée et la hauteur de pleine mer prédite (marée astronomique), les instants d'occurrence de ces deux niveaux pouvant être décalés dans le temps (Illustration 32). De même, la décote de basse mer est la différence entre la hauteur de basse mer observée et la hauteur de basse mer prédite.

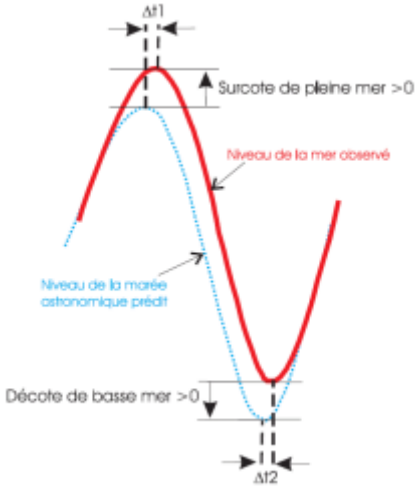


Illustration 32 : Illustration de la surcote de pleine mer et de la décote de basse mer (CETMET/SHOM, 2012).

L'inventaire des évènements tempétueux qui accompagne cette étude, avait aussi pour objectif la compilation de valeurs de surcote disponibles dans les diverses sources consultées.

Ainsi à travers l'extraction des valeurs provenant d'articles de journaux, des rapports d'études ou des études plus spécifiques, il a été possible de dresser le tableau ci-dessous (Illustration 33).

La synthèse des mesures disponibles des surcotes/décotes montre une moyenne de 0,50 m, avec une surcote maximale à une date récente de 1,41 m (en 2008) et une surcote de 2 m, à une date ancienne de 1869.

Période	Surcote (en m)	Coef de marée	Source (dans PPRL Saint-Malo)
05/03/1962	0,15	114/116	*Laboratoire de géomorphologie de Dinard (Univ. Sorbonne/CNRS) - SOCOTEC*
31/10/1967	0,15/0,30	112	*Laboratoire de géomorphologie de Dinard (Univ. Sorbonne/CNRS) - SOCOTEC*
29/03/1979	0,45	113	*Laboratoire de géomorphologie de Dinard (Univ. Sorbonne/CNRS) - SOCOTEC*
27/02/1990	0,55	106/108	*SOCOTEC*
10/03/2008	1,41	106	*Norois n°215 - Enregistrement du marégraphe (SHOM)*
27/02/2010	0,88	102	*SHOM*
01/03/2010	0,6	112	*Ouest France (forums.infoclimat.fr*
Période	**Surcote (en m)**	**Coef. Marée**	**Source (Cette étude et recoupée avec d'autres sources)**
28/02/1869	2	117	B Gouygou (BRGM) / E LE CORNEC (GEOS)
28/03/1888	0,5	114	B Gouygou (BRGM) / E LE CORNEC (GEOS)
04/04/1962	0,13/0,18	117	B Gouygou (BRGM) / E LE CORNEC (GEOS)
05/04/1962	0,15	117	H Tissot (BRGM)
09/10/1964	0,33	84	F Bouttes (CETMEF)/JM Schroetter (BRGM)
17/01/1965	0,6	98	F Bouttes (CETMEF)/JM Schroetter (BRGM)
17/01/1965	0,18/0,6	104	B Gouygou (BRGM) / E LE CORNEC (GEOS)
31/11/1967	0,3	112	F Bouttes (CETMEF)/JM Schroetter (BRGM)
31/10/1967	0,15/0,30	91	H Tissot (BRGM)
31/10/1967	0,1/0,3	91	B Gouygou (BRGM) / E LE CORNEC (GEOS)
26/03/1979	0,51	95	H Tissot / V Debert / JM Schroetter (BRGM) / F Bouttes (CETMEF)
29/03/1979	0,05	114	B Gouygou (BRGM) / E LE CORNEC (GEOS)
20/02/1990	0,7	107	V Debert (BRGM)
27/02/1990	0,55	107	B Gouygou (BRGM) / E LE CORNEC (GEOS)
01/04/1994	0,45	66	B Gouygou (BRGM) / E LE CORNEC (GEOS)
09/03/2008	1	106	H Tissot (BRGM)
10/03/2008	1	106	B Gouygou (BRGM) / E LE CORNEC (GEOS)
31/03/2010	0,6	112	B Gouygou (BRGM) / E LE CORNEC (GEOS)

Illustration 33 : Compilation de surcotes à partir d'articles des journaux et de rapports d'études sur le compartiment C2 et Saint-Malo (PPRL Saint-Malo et cette étude).

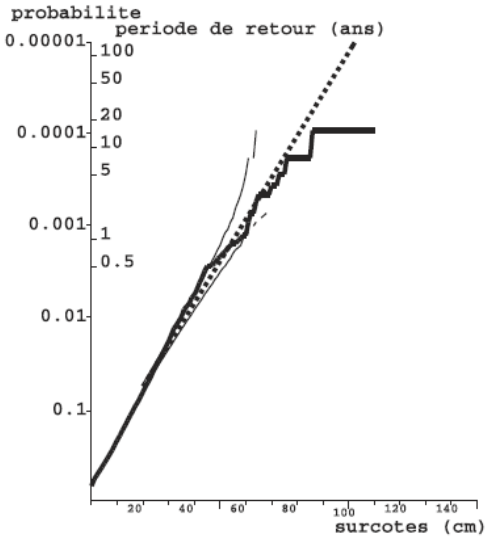


Illustration 34 : Période de retour des surcotes de pleine-mer à Saint-Malo par rapport à l'IGN 69, en gras valeurs expérimentales ; en pointillés ajustement statistique (© CETMEF/SHOM 2012).

P.A. Pirazzoli, dans le cadre du Projet DISCOBOLE[2] (2006), dans la partie intitulée « Contribution à la Tâche 5 : calcul de hauteur des niveaux d'eau extrêmes sur le littoral français », a estimé les surcotes pour le port de Saint-Malo, a 1,40 m pour une période de retour de 10 ans, 1,70 m pour 50 ans et 1,80 m pour 100 ans.

[2] **D**onnées pour le d**I**mensionnement des **S**tructures **C**ôtières et des **O**uvrages de **BO**rd de mer à **L**ongue **Échéance**

2.3. LES VENTS

Les données provenant de l'aéroport de Dinard-Pleurtuit et celles du sémaphore de Saint-Cast, montrent une prédominance des vents de secteur ouest.

Ces vents sont souvent la conséquence des perturbations atlantiques se déplaçant fréquemment vers l'est-nord-est (Bonnot-Courtois, 1992).

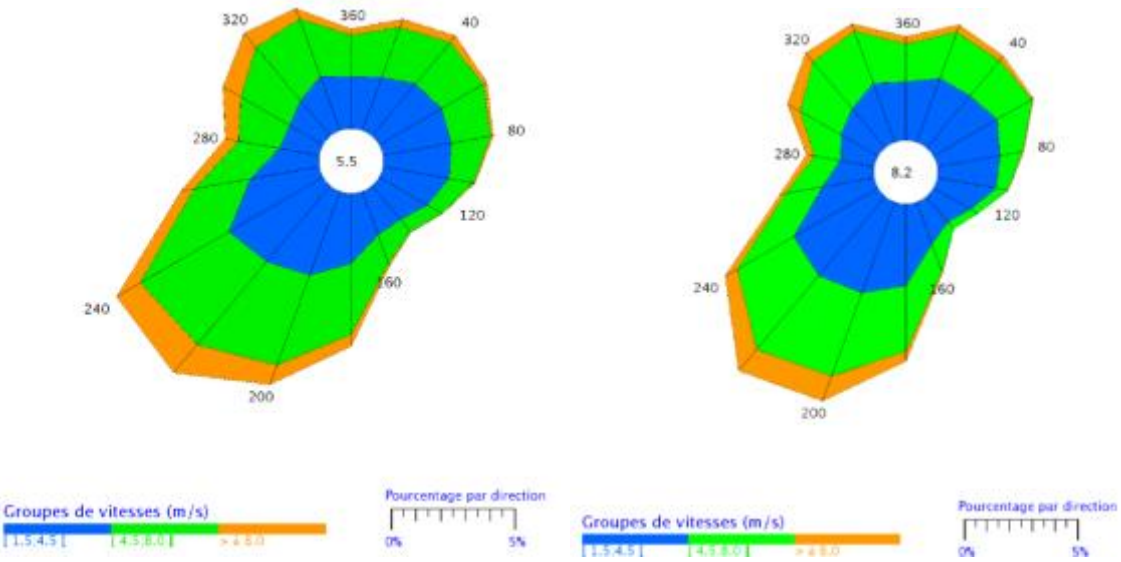


Illustration 35 : À gauche : Fréquence des vents en fonction de leur provenance en % (Dinard 1981-2000) ; à droite : Fréquence des vents en fonction de leur provenance en % (Dinard 2006-2010).

Sur la Côte d'Émeraude, les vents dominants sont de secteur sud-ouest, tout au long de l'année, avec des périodes de février à mai et septembre où les vents peuvent être de secteur nord-est (Lelièvre, 2000). Les vents les plus forts sont de novembre à février avec certains atteignant les 9 m/s (Fournier, 1992).

Au printemps, les vents dominants sont toujours de secteur sud-ouest mais avec une tendance générale à une remontée vers le nord-ouest, alors qu'en été, les vents de secteur ouest dominent. À l'automne, les vents se renforcent particulièrement dans le secteur ouest à sud-ouest (Bonnot-courtois, 1992).

Sur la bordure septentrionale, des houles assez longues se développent grâce à un fetch de 200 km alors que le fetch d'est est réduit à 30-60 km mais la force et la durée du vent sont plus importantes (Le Bris, 2000).

Les vents les plus forts soufflent généralement du secteur Ouest compris entre 200° (sud-sud-ouest) et 320° (nord-ouest). Depuis 1973, la fréquence des vents qui soufflent à plus de 10 m/sec à Dinard est en moyenne de 25 % et ceux qui ont une vitesse comprise entre 8 et 10 m/sec représentent également 25 % des vents qui règnent pendant les grandes marées (Bonnot-Courtois, 1992).

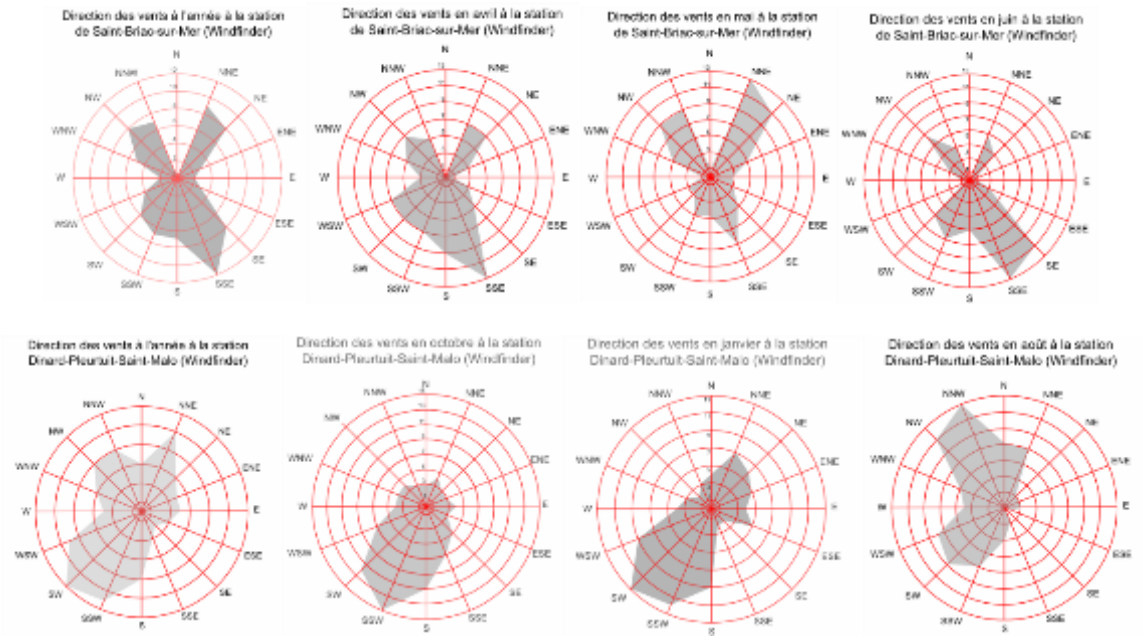


Illustration 36 : En haut : roses des vents à Saint-Briac, à l'année (2012)puis en avril-mai-juin ; en bas : roses des vents à Saint-Malo, à l'année puis en octobre-janvier-août (Source : Windfinder).

3. Analyse historique des aléas littoraux

3.1. RISQUE NATUREL : QUELQUES RAPPELS

Avant de présenter la synthèse des aléas sur la côte d'Émeraude, quelques rappels s'imposent sur les termes aléa, enjeu, risque et vulnérabilité.

Illustration 37 : Schéma synthétique des définitions d'aléas, enjeux et risques (COCORISCO).

3.1.1. Les aléas

L'aléa est la probabilité d'occurrence d'un phénomène naturel donné. On ajoute à cette notion, la notion d'intensité, de durée du phénomène (Ministères de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, de l'Équipement, des Transports et du Logement, 1997).

3.1.2. Les enjeux

Les enjeux et la vulnérabilité sont associés aux activités humaines (habitations, infrastructures, patrimoine, activités économiques etc.). La vulnérabilité dépend des éléments exposés et de leurs résistances ou de leurs comportements face aux aléas. Elle est caractéristique d'un site à un moment donné et n'est pas intrinsèque, il existe une vulnérabilité pour chaque aléa. Comme cette grandeur est fonction de l'activité humaine, elle est donc évolutive (Ministères de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, de l'Équipement, des Transports et du Logement, 1997).

3.1.3. Les risques

La notion de risque inclut deux dimensions : les aléas et les enjeux. C'est la mesure de la situation dangereuse qui résulte de la conjonction de ces deux paramètres. On caractérise donc un risque par le niveau de danger c'est-à-dire la probabilité d'occurrence d'un évènement donné et de l'intensité de l'aléa. Mais également par la gravité des conséquences de l'évènement pouvant affecter les enjeux. Il n'y a donc ni risque sans aléa, ni risque sans enjeux (Ministères de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, de l'Equipement, des Transports et du Logement, 1997).

3.1.4. La vulnérabilité

La vulnérabilité exprime le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux. On peut distinguer la vulnérabilité économique et la vulnérabilité humaine. La première traduit le degré de perte ou d'endommagement des biens et des activités exposés à l'occurrence d'un phénomène naturel d'intensité donnée. La vulnérabilité humaine évalue

les préjudices potentiels aux personnes, dans leur intégrité physique et morale. Elle s'élargit également à d'autres composante de la société (sociale, psychologiques, culturelles, etc.) et tente de mesurer sa capacité de réponse à des crises. (Ministères de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, de l'Equipement, des Transports et du Logement, 1997)

3.2. L'ÉROSION LITTORALE ET LA SUBMERSION MARINE SUR LA COTE D'ÉMERAUDE

3.2.1. Avant-propos

La synthèse des différents aléas du compartiment a été réalisée en fonction de la disponibilité des études traitant du sujet et de leur contenu réutilisable au pas, compte tenu du fait que le choix avait été fait de rassembler l'ensemble des données dans un système d'information géographique.

Ainsi trois types de données ont été récoltés :

- des données ponctuelles (ou fichiers de points), correspondant à des observations ponctuelles d'érosion sur le trait de côte comme des mouvements de terrain, des brèches dans des cordons dunaires ou de galets, etc. ;
- des données linéaires (ou fichiers de polylignes), correspondant à des secteurs du trait de côte étudié et connu comme étant en érosion. Le support utilisé à ces tronçons de trait de côte en érosion, a été le trait de côte HistoLitt V2.0 de l'IGN et du SHOM ;
- et enfin, des données surfaciques (ou fichiers de polygones), correspondant à une cartographie précise d'une inondation liée à la mer ou submersion marine.

Ces données ont été saisies et géoréférencées, et ont été produits et associés des champs (champs attributaires de type texte, caractères numériques etc.), contenant diverses informations, comme :

Pour les ponctuels (Illustration 34) : ***Identifiant*** : ID ; ***Numéro de compartiment*** : COMPART ; ***Cordonnées X et Y*** : XL2E ; YL2E ; ***INSEE de la commune impactée*** : INSEE_communes ; ***Nom de la commune*** : Noms_communes ; ***L'échelle d'origine du document quand s'était possible*** : Echelle_dorigine ; ***Le lieu de la commune impacté*** : Lieux_impactes ; ***L'aléa*** : Aleas ; ***Les données*** : Donnees ; ***Les causes de l'érosion si possible*** : Cause_erosion ; ***Les sources de l'aléa 1 et 2*** ; et enfin le ***cadre de cette étude***, le ***lieu où la saisie*** a été faîte, les ***commanditaires de l'étude*** et la ***date de saisie***.

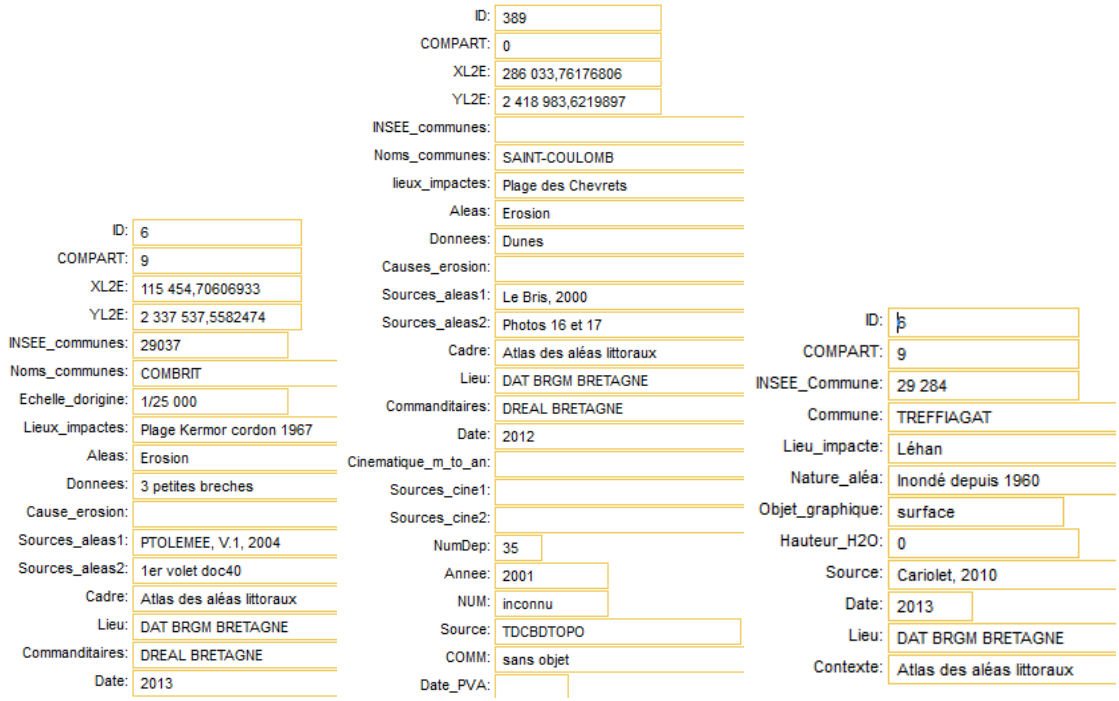


Illustration 38 : Champs attributaires associés aux données d'aléa littroaux saisies : à gauche : les ponctuels, au milieu : les linéaires et à droite : les surfaciques.

Pour les linéaires, d'autres champs se sont ajoutés comme la cinématique évaluée par la bibliographie sur ce tronçon de trait de côte et les champs originels du trait de côte HistoLitt V2.0, correspond à la source du trait.

Enfin, pour les surfaciques correspondants essentiellement à la submersion marine, un champ nommé *objet_graphique*, précise si l'objet géoréférencé correspond à une surface donc un polygone ou s'il correspond à un point car pour cet aléa, il existait des points donnant la hauteur d'eau lors de la submersion.

3.2.2. Les points en érosion, submersion etc. sur le compartiment C2

Il a été possible, grâce aux informations récoltées dans les différents documents consultés, d'attribuer aux points des informations complémentaires comme la nature de l'objet érodé par exemple, quand celles-ci étaient disponibles. Les lignes qui suivent proviennent de quelques exemples extraits de la bibliographie. Les cartes synthétiques apparaissent à la fin du paragraphe.

La source principale de données est l'étude d'envergure, dont l'emprise est celle de tout le linéaire côtier du département des Côtes-d'Armor, qui sur une demande de la DDTM des Côtes-d'Armor, avait été réalisée par le laboratoire de géomorphologie marine de Dinard – CNRS. Elle correspond à une cartographie de la géomorphologie du trait de côte, et au relevé d'observations ayant pour thématique les aléas littoraux.

Ces relevés sont :

- soit des mouvements de terrain sur falaises dures ou meubles ;
- soit des brèches ou traces d'érosion ou submersion ;
- soit du piétinement de massifs dunaires.

La géomorphologie côtière intégrait la nature des ouvrages anthropiques, et classait les falaises en deux catégories : dure ou meuble. Les pans de falaises vifs et sur lesquels il n'était pas possible d'individualiser un mouvement de terrain, ont été cartographiés comme étant en érosion.

L'illustration ci-dessous (39), est un extrait de ce travail réalisée par Bonnot-Courtois et Lançon en 2004.

Le support à leur cartographie a été les cartes topographies de l'IGN au 1/25 000.

Hélas, ce travail important n'a pas été géoréférencé et bancarisé sous la forme d'un SIG (Système d'Information Géographique). De cette étude, ont été extraites et géoréférencées, les observations ponctuelles d'aléas littoraux.

Illustration 39 : Extrait de l'étude du Laboratoire de géomorphologie marine de Dinard, géomorphologie du trait de côte et relevés ponctuels (Bonnot-Courtois et Lançon, 2004).

D'autres sources de données proviennent des visites d'inspection sur le sentier du littoral réalisées par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc (LRPC), sur les communes de Plévenon, Saint-Jacut-de-la-Mer, Saint-Cast-le-Guildo ou encore Saint-Malo. L'objectif de ces études est de réaliser un diagnostic de la servitude de passage, et des désordres qui ont pu s'y produire.

Sur la commune de ***Plévenon***, le diagnostic géotechnique réalisé par le Laboratoire Régional de Saint-Brieuc, en 2011, sur un secteur situé sur le versant ouest du vallon de Port ***Saint-Géran,*** sur une section d'une cinquantaine de mètres de la côte, au Nord de la baie de Fresnaye et à l'est de ***Plévenon***, montre des signes d'érosion (Illustration 40).

Illustration 40 : Localisation du site concernant l'instabilité de talus à Port Saint-Géran, commune de Plevenon (L.R.P.C., 2011).

Dans ce secteur, la falaise littorale se dégrade lentement sous l'influence principale de processus d'altération et d'érosion continentale et marine. Le périmètre de l'étude est constitué de formations superficielles qui recouvrent le substratum rocheux du versant. Ces dépôts périglaciaires (composés de coulées de solifluxion limoneuses ou loessiques), sont de faible cohésion et constituent une matrice meuble. Cette falaise est soumise à des processus d'érosion résultant de l'intervention d'agents subaériens (eau de ruissellement et eau d'infiltration). À ces phénomènes, s'ajoute la dynamique marine responsable du sapement des matériaux en pied de falaise et de la formation de sous-cavages. Ainsi des cicatrices, des loupes de glissements et des chutes de blocs ont été observés à plusieurs endroits.

Sur la commune de Saint-Jacut-de-la-Mer, le diagnostic réalisé par le LRPC, en 2005, sur une section du sentier littoral, située sur environ 60 mètres au Nord de la plage des Haas, est sujette à l'érosion (Illustration 41).

Illustration 41 : Situation du périmètre en érosion, commune de Saint-Jacut-de-la-mer (LRPC Saint Brieuc, 2005).

Sur ce site, à côtes rocheuses découpées, le versant accuse une pente très forte dans sa partie supérieure, qui s'adoucie à sa base. En contre bas, on observe une grève soumise aux marées. La falaise est constituée de roches métamorphiques, surmontées de formations superficielles plus ou moins meubles. Sur l'ensemble du linéaire de la falaise, il est possible d'observer des chutes de blocs et glissements, affectant autant la parie rocheuse que la partie meuble. Les facteurs déclenchant le phénomène sont variés, mais la cause principale serait la pression hydrostatique due à la pluviométrie.

Sur la commune de ***Saint-Cast-Le-Guildo***, l'intervention du L.R.P.C., en 2008, a permis de diagnostiquer un risque d'instabilité des versants.

Trois sites ont été étudiés à proximité du ***port du Vallais*** (Illustration 42) :

- le site n° 1 correspond à une section de versant dominant le port de Vallais, et se développant sur une distance de 70 mètres ;
- le site n° 2 est une section de versant de 170 mètres ;
- le site n° 3 est une section de versant de 70 mètres.

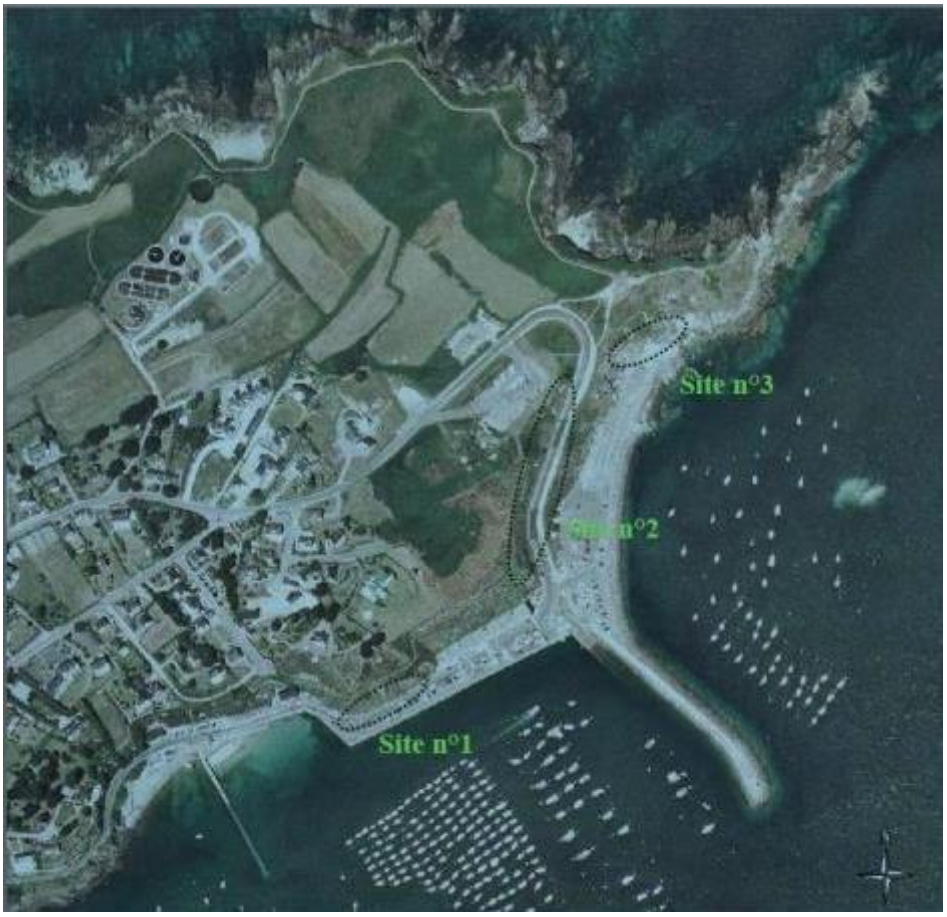


Illustration 42 : Localisation des sites en érosion, commune de Saint-Cast-le-Guildo (L.R.P.C, 2008).

Le massif rocheux constituant le substratum est composé de roches métamorphiques de type gneiss, surmonté d'un manteau de formations superficielles plus ou moins meubles (constituées par un mélange d'altérites et de formations allochtones type dépôts de pente « head »).

Prédisposés aux instabilités, ces versants présentent une activité visible. Des chutes, glissements de plaquettes, de dalles, voire de compartiments rocheux ont laissé des cicatrices visibles sur les parois rocheuses. Les facteurs initiateurs de la rupture sont : la topographie (pente forte), la structure du massif rocheux, combinés au cycle gel-dégel ou à l'action de la végétation, mais c'est souvent la pression hydrostatique due à la pluviométrie qui est la cause principale du mouvement. Malgré une forte fréquentation des sites n° 1 et n° 2, ceux-ci ne présentent qu'un risque faible à modéré en raison des volumes mobilisables peu importants et d'une probabilité d'impact de la chaussée ou des véhicules y circulant ou stationnant en rive.

Sur le site n° 3, le risque apparaît fort en raison d'une très forte probabilité d'impact du sentier ou des véhicules qui circuleraient ou stationneraient sur le terre-plein en contrebas du versant et des volumes mobilisables importants.

En 2010, un second diagnostic du L.R.P.C., sur la commune de ***Saint-Cast-le-Guildo*** identifie sur un site qui correspond à une portion côtière de la falaise est de la ***plage de la Mare***, des traces d'érosion se développant sur environ 150 mètres (Illustrations 43 et 44).

Illustration 43 : Localisation du site en érosion plage de la Mare, commune de Saint-Cast-le-Guildo (L.R.P.C, 2010).

Le trait de côte est irrégulier suite à une érosion différentielle induite par les variations latérales de la géologie. Les formes saillantes témoignent de la présence de substrat rocheux offrant de la résistance aux divers agents érosifs et à contrario, les formes rentrantes témoignent de la présence de substrat meuble offrant peu de résistance à l'érosion.

Illustration 44 : Localisation du site en érosion plage de la Mare, commune de Saint-Cast-le-Guildo (L.R.P.C, 2010).

L'action des agents d'érosion continentaux et marins mais également l'action anthropique ont engendré de multiples désordres sur l'ensemble du site.

En effet, les phénomènes d'érosion continentale et marine conduisent, sous l'influence de la gravité et d'agents de transport (eau), au départ progressif de particules ou à la rupture brutale d'un ensemble de matériaux. Cette érosion se traduit par un modelé d'usure qui

prend la forme : d'un escarpement abrupte sur toute la hauteur de falaise associé à des dépressions (ravines) et des cavités anthropiques. On observe également une rupture de pente entre la base rocheuse subverticale marquée par des sous-cavages importants et le profil moins redressé du sommet constitué de glissements plus ou moins stabilisés.

Les mécanismes d'évolution de la falaise côtière prennent la forme de mouvements de terrain successifs de type glissement, aggravé par des actions anthropiques et auxquels s'ajoute l'action de la mer en pied de falaise. Les mouvements brusques de compartiments rocheux, résultant du développement de mécanismes de rupture au niveau des plans de faiblesse constitués par le réseau de fracturation, découpent le massif rocheux.

Enfin, un diagnostic de risque géologique a été réalisé sur les sites de la ***Goéletterie*** et du ***Marégraphe***, ville de ***Saint-Malo*** (L.R.P.C., Avril 2006). Ces deux sites sont localisés sur la rive droite de l'estuaire de la Rance et présentent des signes d'instabilités.

Le site de la ***Goéletterie*** (Illustration 45), se développe sur environ 300 mètres, son versant est orientée N20, avec une dizaine de mètres de hauteur et accuse une pente générale assez forte de l'ordre de 50°. En contrebas, on observe une grève soumise aux marées qui attaquent régulièrement le pied du versant. Un sentier littoral de 1 m de large longe le versant en crête.

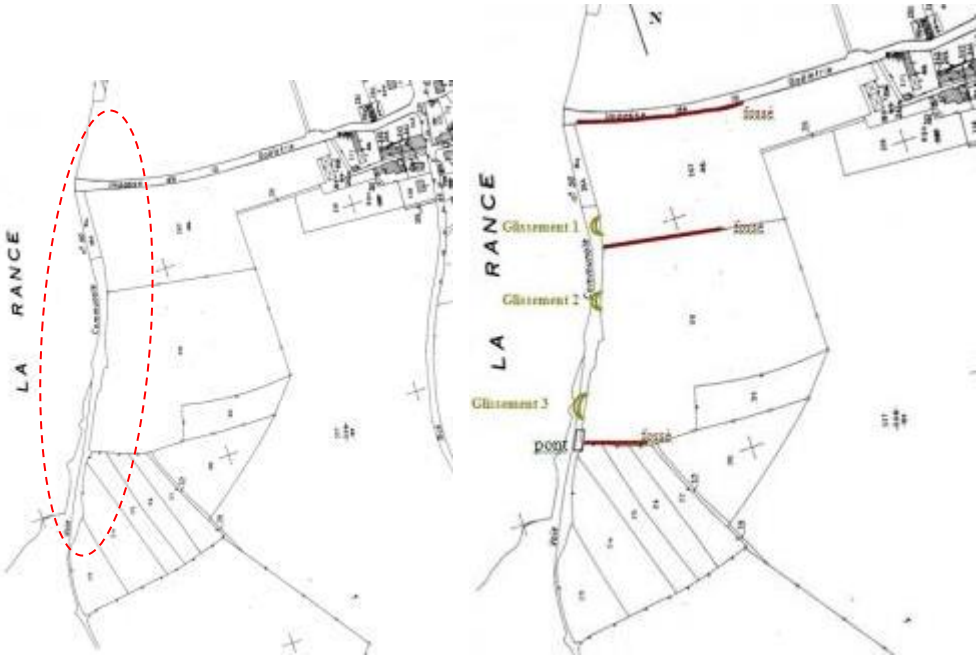


Illustration 45 : Situation du périmètre d'étude sur le site de la Goéletterie sur fond cadastral ; Synthèse des témoignages d'érosion du site (L.R.P.C, 2006).

Le contexte géologique est celui de roches métamorphiques les migmatites et gneiss, sous-jacentes à des formations meubles périglaciaires de type dépôts de pente. Cet empilement est présent sur tout le linéaire avec une épaisseur de l'ordre de deux mètres. Les formations meubles constituent des terrains sensibles à l'érosion marine qui s'exerce en bas de pente, mais également à l'érosion résultant des eaux de ruissellement et d'infiltration. De multiples témoignages résultants de l'érosion sont visibles : glissements de type circulaires ou rotationnels[3], fissures de tension, brèche dans la végétation, ravines des terres agricoles situées en amont du versant dues aux activités humaines (pratiques culturales), etc.

[3] Déplacement d'une masse de matériaux le long d'une surface de rupture se développant au sein d'une zone de faible résistance (L.R.P.C., 2006)

Sur le second site, celui du ***Marégraphe***, sur une section de versant rocheux se développant sur environ 40 mètres au niveau de la cité d'Aleth, et orienté N80/N90, cet escarpement rocheux de 5 à 10 mètres de hauteur accuse une pente subverticale dans sa partie supérieure et s'adoucit vers sa base (Illustration 46).

Concernant son cadre géologique, ce versant est entaillé dans le complexe rocheux des migmatites de Saint-Malo. Cette formation correspond à un ensemble de roches métamorphiques anciennes présentant une foliation[4] plus ou moins marquée, l'aspect de la roche évoluant entre le gneiss et le granite.

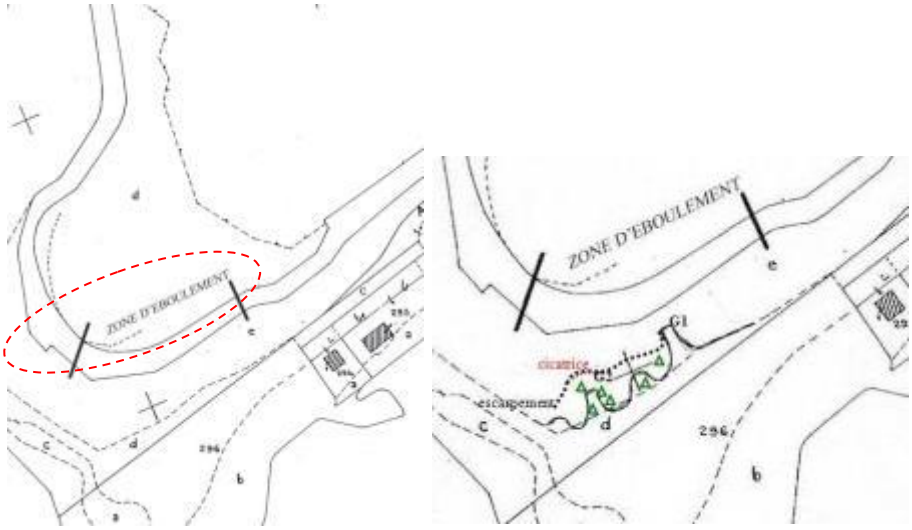


Illustration 46 : Situtation du périmètre d'étude du site du Marégraphe sur fond cadastral ; synthèse des témoignages d'érosion du site (L.R.P.C., 2006).

Les formations rocheuses constituant le substratum sont marquées par plusieurs familles de discontinuités de direction et pendage divers, découpant ainsi la masse rocheuse en blocs de taille variable. Ces discontinuités permettent la pénétration de l'eau, ce qui engendre des mécanismes d'altération puis d'érosion. Les massifs rocheux sont dominés par des formations superficielles plus ou moins meubles (roche résiduelle appelée altérite) issues de l'altération chimique. Ce type de versant à forte déclivité et forte fracturation est par nature instable. Ainsi de multiples témoignages de l'instabilité du versant ont été observés sur l'ensemble du linéaire : glissements, chutes de masses rocheuses (pierres, blocs ou compartiments), cicatrices dans la paroi, etc. Sur ce site, il est évalué à un volume de matériaux rocheux mobilisable lors d'un événement pouvant aller jusqu'à quelques m^3 (chutes de blocs) mais la modalité la plus courante est la chute de pierres (éléments individuels de volume < 1 dm^3).

L'ensemble des informations récoltées sont synthétisées sur la carte qui suit : illustration 47.

[4] « Structure visible dans certaines roches métamorphiques où, à la schistosité, s'ajoute une différenciation pétrographique entre les lits formant ainsi des feuillets, d'où en section un aspect rubané. »

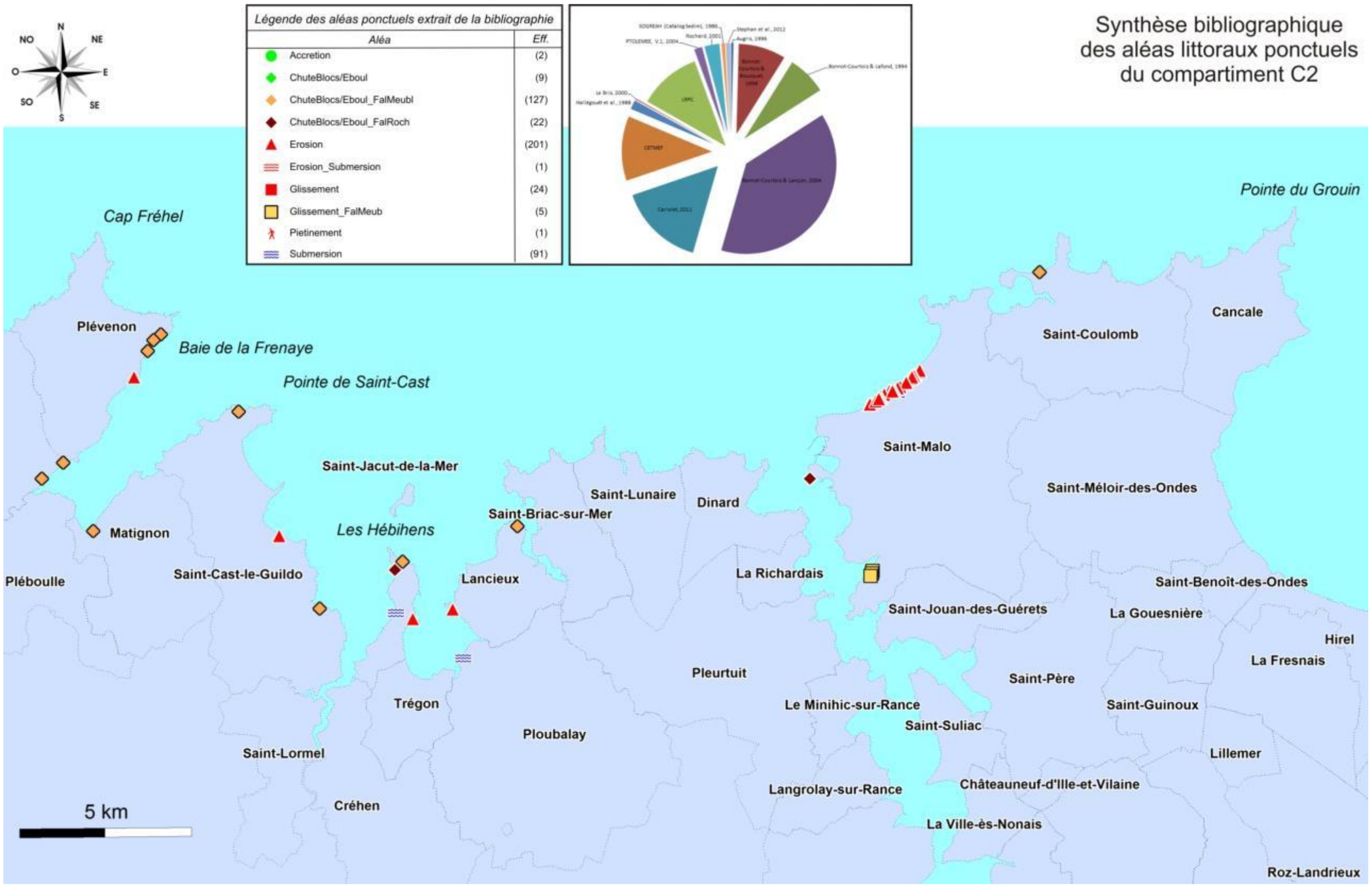


Illustration 47 : Synthèse bibliographique des aléas littoraux ponctuels du compartiment C2.

3.2.3. Les linéaires en érosion ou en accrétion du compartiment C2

Pour les secteurs de linéaire de côte, il a aussi été possible, grâce aux informations récoltées dans les différents documents consultés, d'attribuer au trait de côte une vitesse d'érosion ou d'accrétion, quand celles-ci étaient disponibles mais aussi la nature de celui-ci. Les lignes qui suivent proviennent de quelques exemples extraits de la bibliographie. Les cartes synthétiques apparaissent à la fin du paragraphe.

Comme pour le recensement des aléas ponctuels, ont été intégrés ici les linéaires de côte qui avaient été observés en érosion dans l'étude réalisée par le laboratoire de géomorphologie marine de Dinard - CNRS.

La géomorphologie côtière de cette étude intégrait la nature des falaises en deux catégories : dure ou meuble et les pans de falaises vifs et sur lesquels il n'était pas possible d'individualiser un mouvement de terrain, et ont ainsi été cartographiés comme étant en érosion (Illustration 39 ci-dessus, extrait du travail réalisée par Bonnot-Courtois et Lançon en 2004).

À cette étude d'ajoute les travaux réalisés par Le Bris (2000), sur le massif dunaire de la plage des Chevrets à ***Saint-Coulomb***, qui subit une érosion importante et continue faute de protection. À l'ouest, les ganivelles ont prouvé leur efficacité, une dune embryonnaire s'est formée. Le havre de ***Rothéneuf*** est en voie de comblement (Le Bris, 2000)

Sur ***Saint-Malo***, en termes de linéaire côtier, de nombreux dégâts ont été inventoriés principalement dans la partie est de la digue de Paramé. En effet, le très bas niveau du sable et la disparition du bourrelet d'estran du côté de ***Rochebonne*** favorisent l'attaque directe de l'ouvrage par les houles (Bonnot-Courtois et Lafond, 1994). Les raisons pourraient se situer dans la convergence des orthogonales de houles entre ***Rochebonne*** et l'épi de la ***Hoguette,*** mis en évidence par Bonnefille et Germain (1971) et l'augmentation de l'agitation ajoutée à l'exposition directe aux houles de nord-ouest dominantes.

Sur la partie ouest de l'aménagement, la protection aux plus fortes houles par les platiers rocheux de l'avant-côte, qui amortissent les fortes houles pourrait être une explication à ce bilan contrasté d'est en ouest (Bonnot-Courtois et Lafond, 1994).

Les données géomorphologiques et topographiques montrent qu'aucun transit longitudinal préférentiel ne semble avoir lieu sur la plage de **Paramé**. De plus, la plage de **Paramé** est encadrée par deux pointes rocheuses, celle de **Rochebonne** à l'est et les îles de migmatites de la partie intra-muros de Saint-Malo et du Fort National à l'ouest, ce qui limite les échanges avec les plages voisines et fait que cette plage fonctionne comme un système sédimentaire indépendant. Par contre, les mouvements de sable dans le profil sont relativement importants puisque l'on observe régulièrement des démaigrissements ou des remontées du sable au niveau de la haute plage, tandis que le niveau de la basse plage reste relativement constant (Bonnot-Courtois et Lafond, 1994).

La violence des vents, l'amplitude de la marée et des houles font de la région de ***Saint-Malo***, une côte particulièrement exposée. L'analyse historique des dégâts ayant affecté la digue de ***Paramé*** met en évidence les conditions marégraphiques et météorologiques pour lesquelles des dommages sont apparus ainsi que la localisation de ces dégâts sur l'ouvrage. (Bonnot-Courtois et Lafond, 1994). Depuis le début du siècle, tous les dégâts ont eu lieu lors de vive-eau (coeff. > 90). La situation météorologique était caractérisée par le passage de dépressions importantes, avec des vents soufflant de secteur ouest à des vitesses de l'ordre de 10 m/s. Au cours de ces grandes marées, des surcotes de plusieurs dizaines de centimètres étaient enregistrées à la pleine mer. Enfin, l'essentiel des dommages se situe

dans la partie Est de l'ouvrage, comprise entre Rochebonne et l'épi de La Hoguette (Bonnot-Courtois et Lafond, 1990).

La synthèse des aléas littoraux du linéaire côtier du compartiment C2 : Côte d'Émeraude, est résumée dans les illustrations qui suivent (Illustration 48).

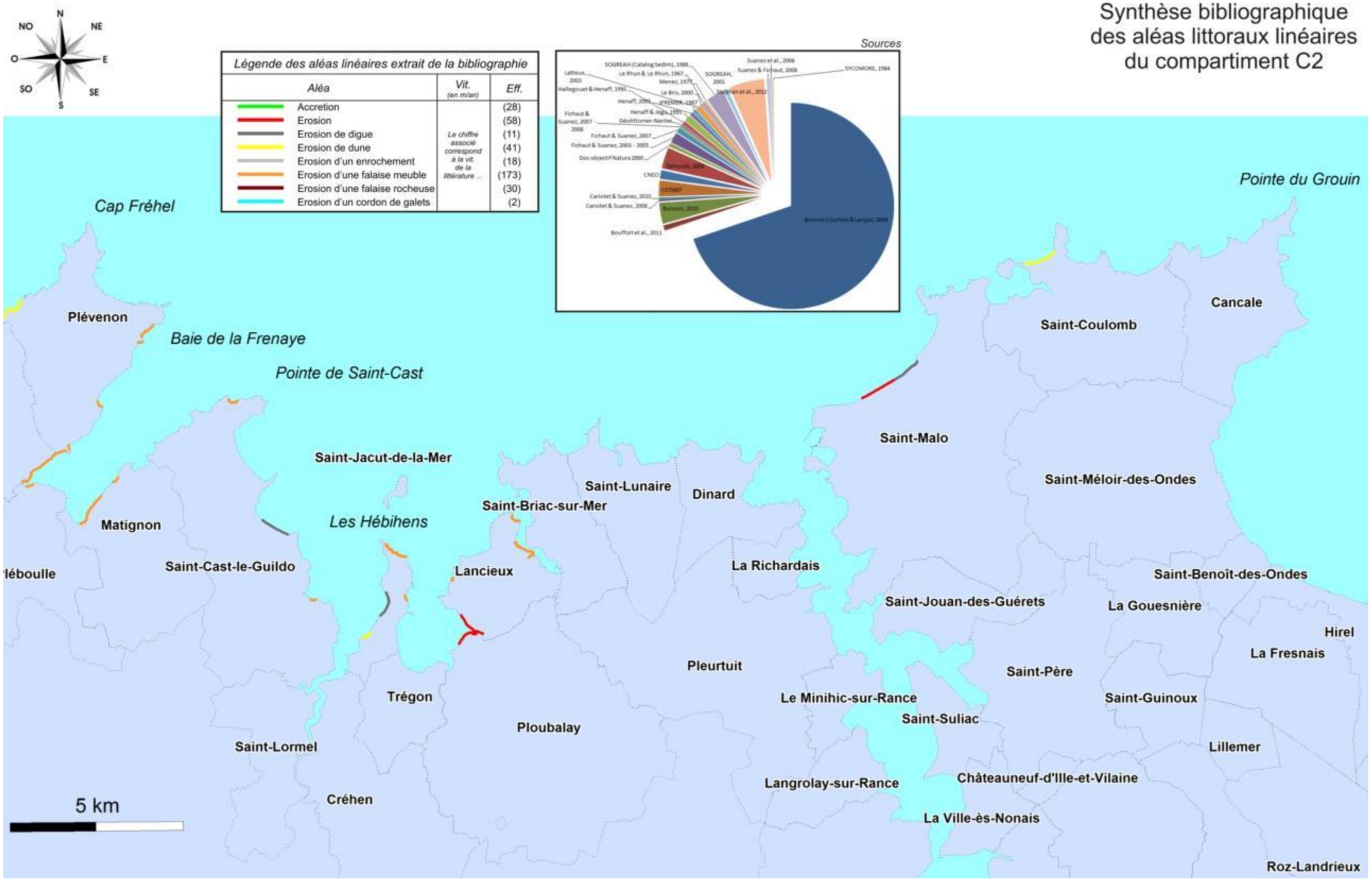


Illustration 48 : Synthèse bibliographique des aléas littoraux linéaires du compartiment C2.

3.2.4. Les Surfaces submergées sur le compartiment C2

Peu de documents cartographiques des submersions marines passées existent, hormis sur deux secteurs tirés des travaux de thèse de Cariolet (2010). Dans ses travaux de doctorat, J.-M. Cariolet a reconstitué les inondations survenues en 1960 et en 2008, au niveau de la digue de Paramé, sur la commune de Saint-Malo (Illustrations 49, 51 et 52).

Cariolet en 2010 a également reconstitué la zone inondée de 1962, sur le secteur qui a été le plus touché entre le Sillon et la digue de Rochebonne, en arrière de la Grande Plage, sur Saint-Malo.

Le 5 avril 1962, plusieurs caves ont été inondées suite à l'ouverture d'une brèche dans la digue de Paramé. Des phénomènes de franchissement ont également été observés au niveau du Sillon, et l'hôtel de ville a été envahi par les eaux. Le 12 janvier 1978, les vagues ont franchi les digues du Sillon et de Rochebonne. La place Chateaubriand, située intra-muros, a été inondée. Selon la presse locale, l'eau serait entrée par la porte Saint-Thomas. Le 27 février 1990, la chaussée du Sillon et le Boulevard Pasteur ont été envahis par la mer. Derrière la digue de Rochebonne, plusieurs habitations ont été inondées. Le 20 février 1996, suite à un fort coup de vent de nord-est, la chaussée du Sillon a été submergée. Le 28 octobre de la même année, des phénomènes de franchissement ont été observés au niveau de la digue de Rochebonne. Un enfant a été emporté par les vagues. Le 10 mars 2008, la Chaussée du Sillon a de nouveau été envahie par le franchissement de vagues

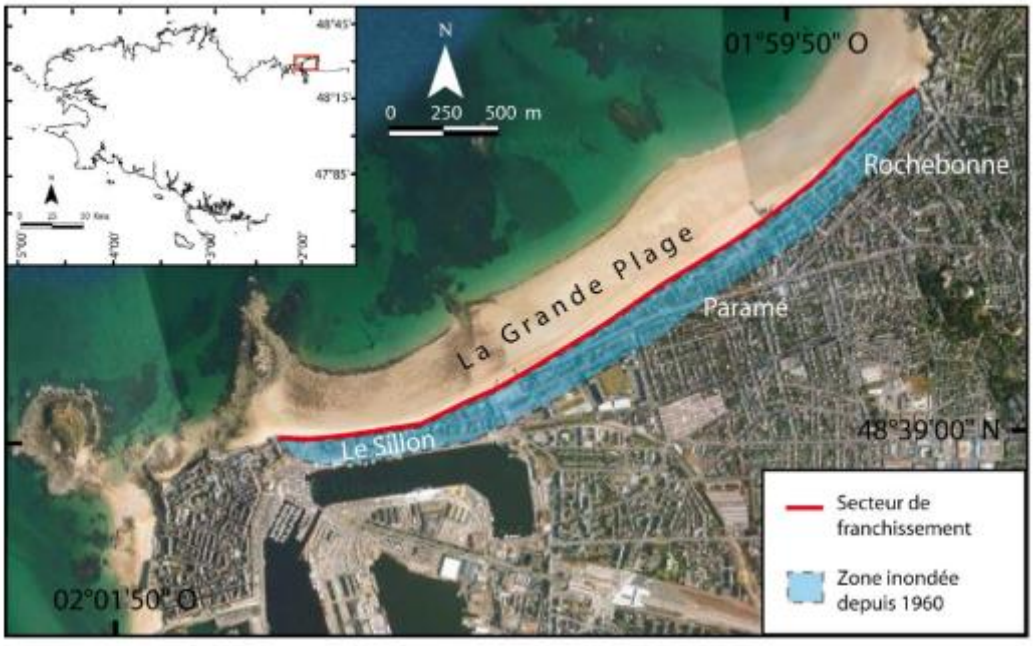


Illustration 49 : Localisation de la zone inondée depuis 1960 sur la commune de Saint-Malo (Cariolet, 2010).

Le ***second*** document est la cartographie réalisé par le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc (LRPC) en 2010, à travers l'établissement du Plan de Prévention des Risques Submersion Marine (PPR SM), sur la commune de Saint-Malo (Illustration 49). Saint-Malo, implantée dans une large dépression parcourue par la rivière du Routhouan, correspond à un secteur susceptible d'être inondé par un évènement de marée significatif (submersion marine). Cette dépression correspond à une zone basse du centre-ville, contenue entre la cité intra-muros à l'ouest, Paramé à l'est et Saint-Servan au sud. Elle se rapporte aux secteurs protégés par des ouvrages maritimes (datant en partie des XIX^{ème} et

XX^{ème} siècles) : les digues du Sillon, de Paramé, Palmié, au nord et les ouvrages portuaires dont le Môle des Noires, écluse du Naye, à l'ouest.

Ce secteur correspond à l'ancien marais maritime qui a été comblé par des formations récentes (argiles) et qui est limité par des roches métamorphiques (granulites feuilletées). Ce marais est protégé au nord par un cordon dunaire établi entre l'ancien village de Paramé à l'est et le rocher de Saint-Malo (actuelle cité intra-muros) à l'ouest. Les risques de submersion marine sont dus à la pénétration de l'eau de mer par les différents ouvrages maritimes, ce risque est amplifié par un phénomène de percolation par les bassins ou les digues et par un manque d'entretien des ouvrages.

La modélisation du périmètre submersible a été réalisée en utilisant le MNT BD Topo de l'IGN et le niveau marin extrême centennal du SHOM établi à la côte de 7,60 mètres.

La cartographie établie repose sur l'hypothèse suivante : la zone comprise entre les altitudes 0 et 8,60 m est la limite correspondant au niveau marin de période de retour 100 ans + 1 m (d'après la circulaire Xynthia du 7 avril 2010).

Cette modélisation dite « statique », correspond à la projection d'un niveau de mer sur les parois d'un réceptacle susceptible de se remplir (Illustration 50).

Une autre possibilité est celle de la modélisation dynamique qui peut être très complexe avec l'intégration de modèles dits de vague à vague. L'illustration 52, correspond à l'ouverture d'une brèche dans la digue pendant une heure temps, correspondant à la durée du niveau de pleine-mer, avant l'amorce de sa redescente (Illustration 51 et 52).

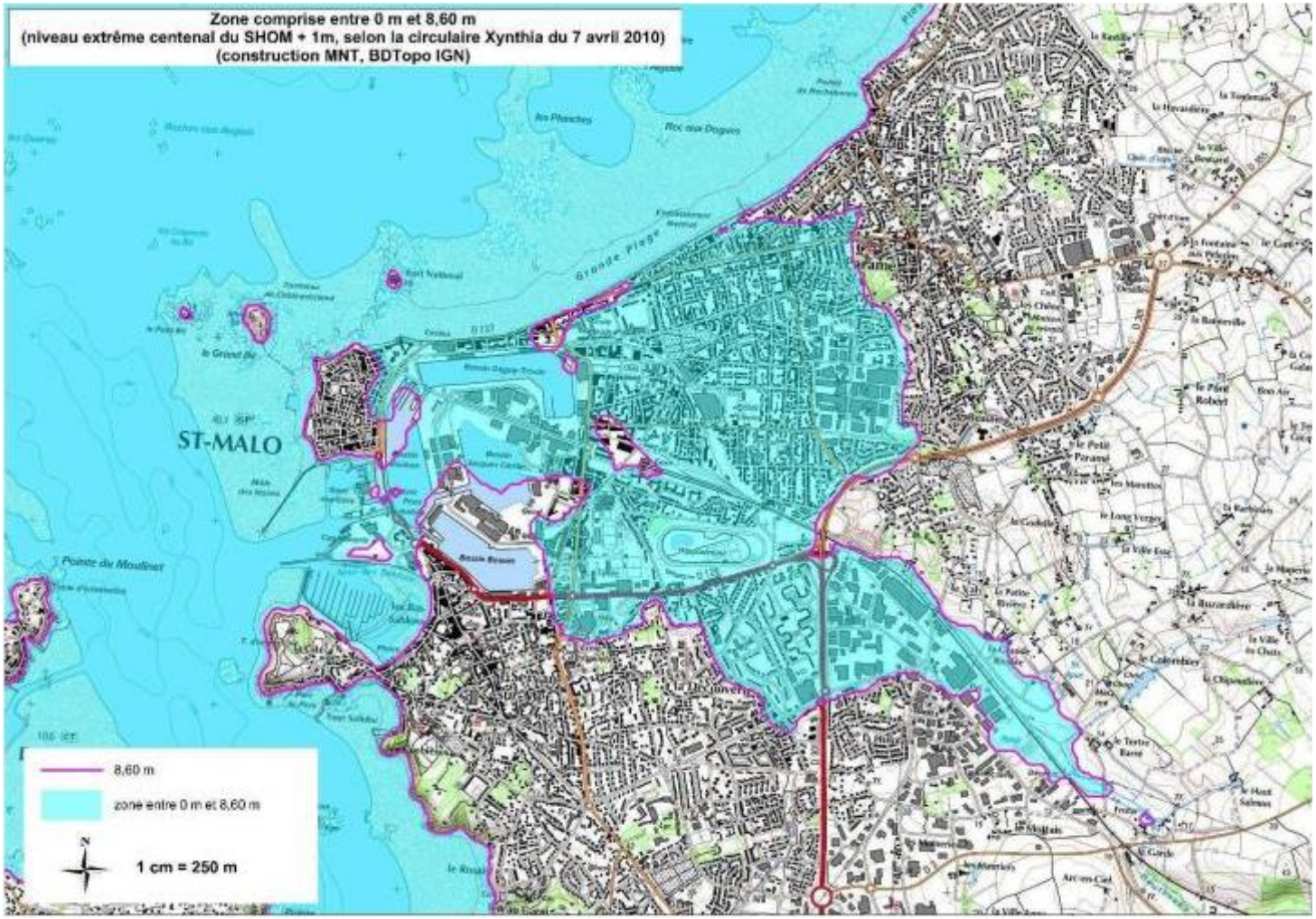


Illustration 50 Carte de modélisation d'une zone comprise entre 0 - 8,60 m (L.R.P.C. Saint-Brieuc 2011)

Enfin un ***troisième*** document correspond à une modélisation d'une rupture hypothétique de la digue au niveau de la digue de Paramé (SOGREAH, 2001).

La digue de Paramé est un ouvrage fragile puisque le parement de pierres est posé directement sur le sable de la dune. Elle ne peut donc subir le moindre dégât sans qu'un manque d'étanchéité ne risque de provoquer le départ du sable sous-jacent et donc la déstabilisation des pierres ayant pour conséquence un démantèlement de l'ouvrage. De plus, la pente du perré est telle que la réflexion des vagues y est spectaculaire, même par temps relativement calme (Bonnot-Courtois et Lafond, 1994).

En cas de rupture de la digue de Paramé, les zones inondables représentent 450 ha. Elles comportent des installations commerciales, industrielles, scolaires et militaires ainsi que la gare SNCF et la zone portuaire donc un patrimoine relativement important. De plus, cela concerne une population d'environ 20 000 habitants (Bonnot-Courtois et Lafond, 1994).

La digue de Paramé est constituée d'un noyau de sable issu de la formation naturelle d'un cordon sableux. Elle n'a aucune fonction de dissipation d'énergie de la houle mais est un tremplin idéal à l'assaut des vagues. Elle est donc vulnérable aux agents hydrodynamiques (SOGREAH, 2001) :

- entre l'épi de la Hoguette et Rochebonne : plus vulnérable car la plage n'est pas large et sensible car l'énergie des houles est peu dissipée. De plus les rochers sont peu nombreux ;
- de l'épi de la Hoguette à la cale de la Piperie : présence d'îlots et de platiers rocheux qui protègent cette partie ouest de la digue. Accumulation de sables visible près de la cale.

La modélisation (Illustrations 51 et 52) de SOGREAH (2001), correspond à une ouverture d'une brèche de la digue de Paramé, pendant une heure.

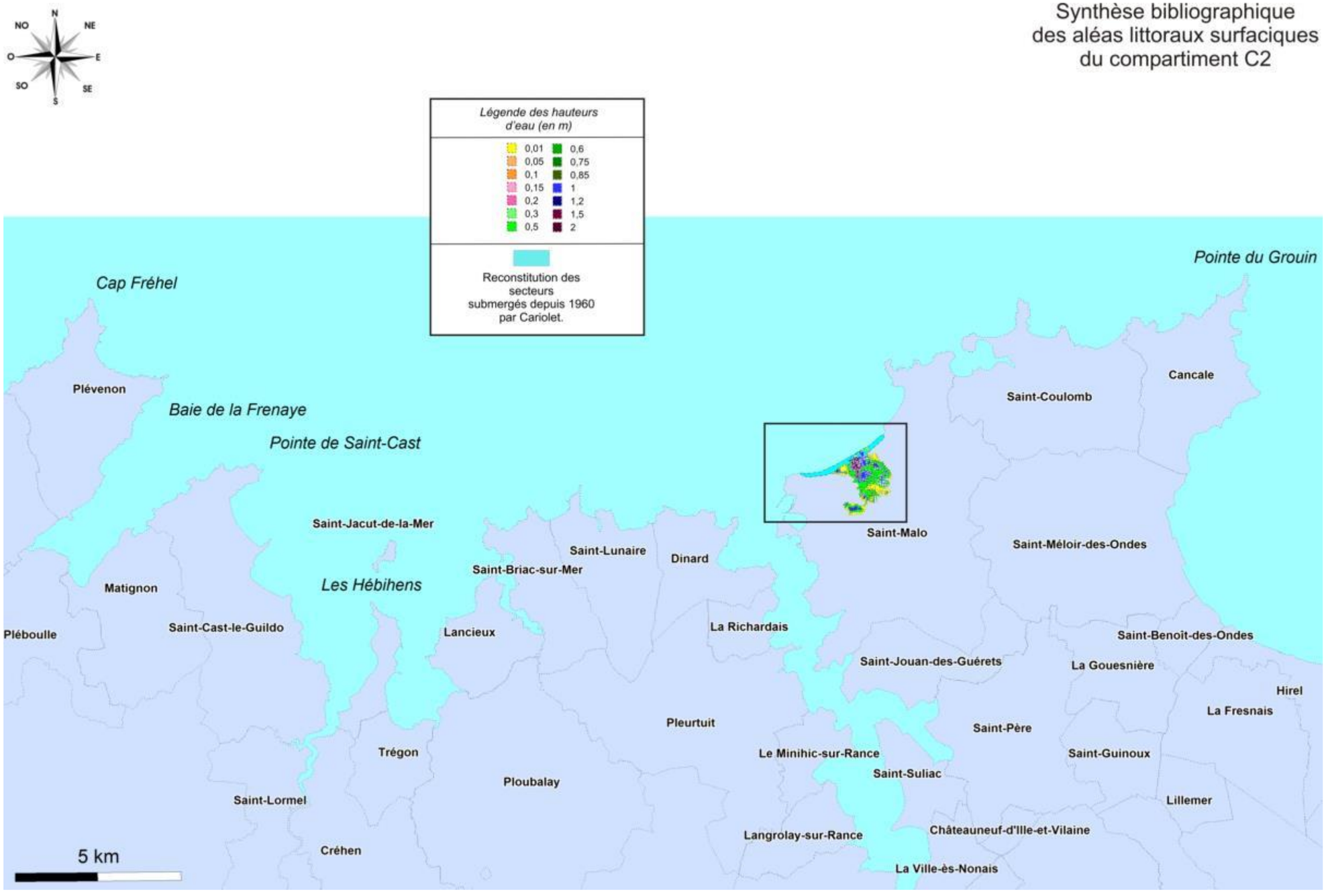


Illustration 51 : Synthèse bibliographique des aléas littoraux surfaciques du compartiment C2

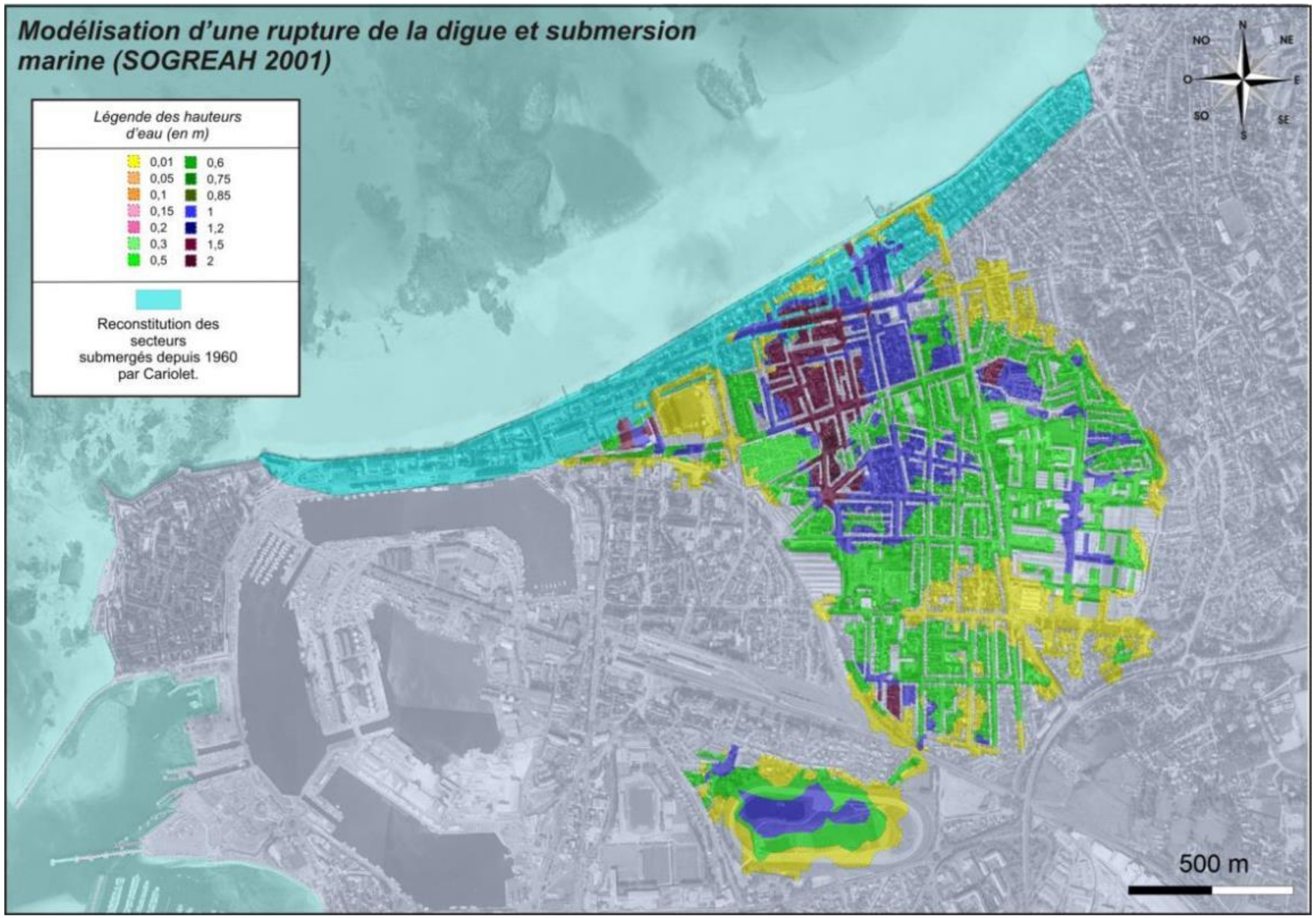


Illustration 52 : Synthèse bibliographique des aléas littoraux surfaciques du compartiment C2

4. Acquisitions de terrain (Géomorphologie, Prédisposition à l'érosion et Cinématique du trait de côte)

4.1. « GEOMORPHOLIGIE » DU TRAIT DE COTE

4.1.1. Éléments de méthodologie

Avant de pouvoir évaluer la prédisposition à l'érosion des côtes rocheuses, il a été nécessaire de déterminer et fixer quelles pouvaient être (1) les données possiblement utilisables et (2) sur quels éléments méthodologiques se baser, comme :

- quel trait de côte support de la géomorphologie ?
- quelle géologie pour ce trait de côte support ?
- quelle géomorphologie ?
- quels évènements l'ayant détérioré utiliser ?
- enfin comment caractériser ces évènements ayant trait à l'érosion de ce trait de côte ?

Quel trait de côte (TdC) support utilisé pour sa caractérisation « géol-morphologique » ?

Deux possibilités cartographiques pouvaient être envisagées. L'utilisation d'un TdC déjà existant tel que le trait de côte HistoLitt V2.0 (TdCH) construit par le SHOM et l'IGN ou la création d'un TdC à partir de différents marqueurs géomorphologiques caractéristiques des côtes rocheuses et extraits d'images aériennes.

La première solution a été celle retenue car elle avait pour principal avantage de fournir un support cohérent avec une certaine homogénéité d'échelle et de précision (Description techniques des spécificités, SHOM/IGN 2007), pour les documents réglementaires.

Prenant pour hypothèse que le trait de côte correspond à la laisse des plus hautes mers dans le cas d'une marée astronomique de coefficient 120 et dans des conditions météorologiques normales (pas de vent du large, pas de dépression atmosphérique susceptible d'élever le niveau de la mer) ; le produit TdCH modélise cette entité théorique par un ensemble de polylignes 2D.

Pour la région Bretagne, les sources sont : à 65,4 % le TDCBDTOPO, à 28,63 % le TDCBDORTHO et à 5,96 % le TDC25 000 (Illustration 53).

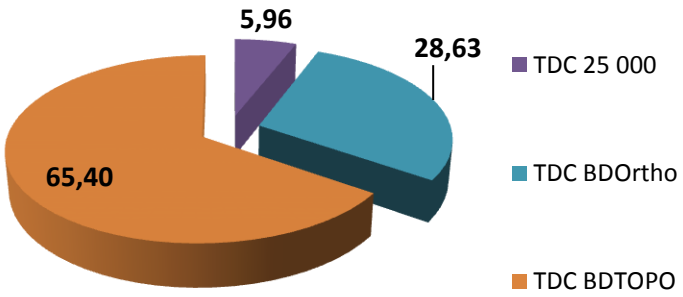


Illustration 53 : Sources composants le trait de côte HistolittV2.0 pour la Bretagne.

Caractérisation du trait de côte

Suite à des discussions lors de différents comités techniques, des options ont été ajoutées afin d'enrichir de TdC, comme notamment la présence de la nature de l'estran sur les côtes basses (sables, galets, graviers, sables et graviers), pouvant donner des indications sur la dynamique sédimentaire sur l'avant-plage, contributions apportées par Chantal Bonnot-Courtois et Alain Hénaff.

Le BRGM a proposé l'ajout d'un trait continental car avec un tel découpage des côtes bretonnes, comblées par des formations superficielles diverses (dépôts de pente de type « head », cordons de sable ou de galets), les vitesses de recul du trait de côte allaient tout autant elles aussi être très hétérogènes, mais qui se limiteront à l'étendu de ces formations dites superficielles.

Ainsi, la géomorphologie du TdC s'est structurée autour du trait de côte HistolittV2.0 par l'ajout d'un avant et d'un arrière Trait de côte, l'AvTDC pour l'estran et un ArTDC pour l'étendue de la formation superficielle considérée (Illustration 54).

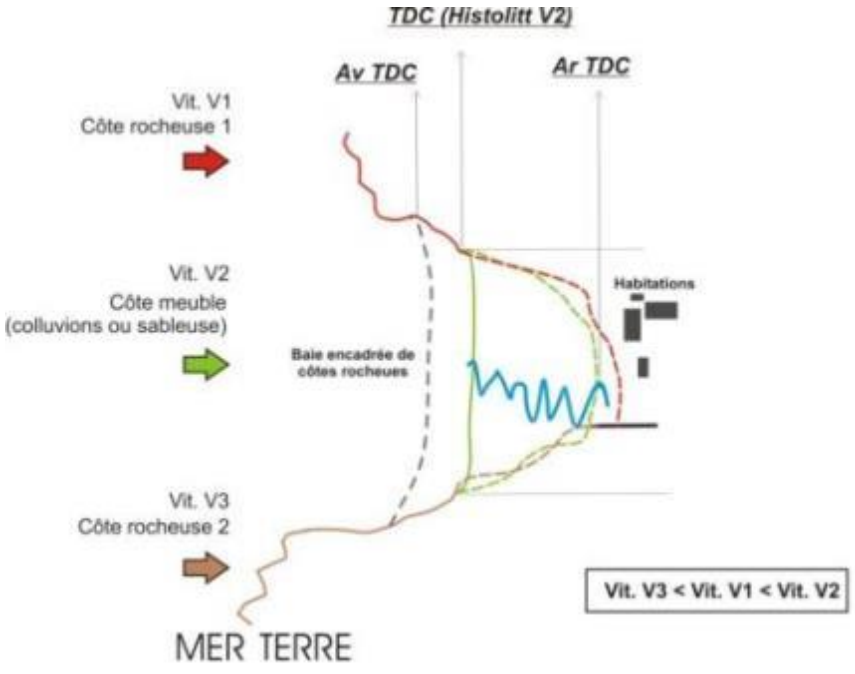


Illustration 54 : Schéma de principe de caractérisation du trait de côte.

Quelle géologie pour le Trait de côte des trois départements (22, 29 et 35) ?

Cette partie a été faite ***en plusieurs étapes***.

La ***première étape*** a consisté en la r***éalisation d'une carte géologique harmonisée pour les trois départements***.

À partir de la meilleure échelle disponible en France métropolitaine sur la géologie du sous-sol, celle du 1/50 000 des cartes géologiques de la France du BRGM, pour chaque département français, constitué en moyenne par plus d'une vingtaine de cartes géologiques, ont été harmonisées à cette même échelle (1/50 000), lors de la réalisation des cartes départementales des argiles pour la caractérisation de leur aléa en retrait et gonflement en période de sècheresse (Illustration 55).

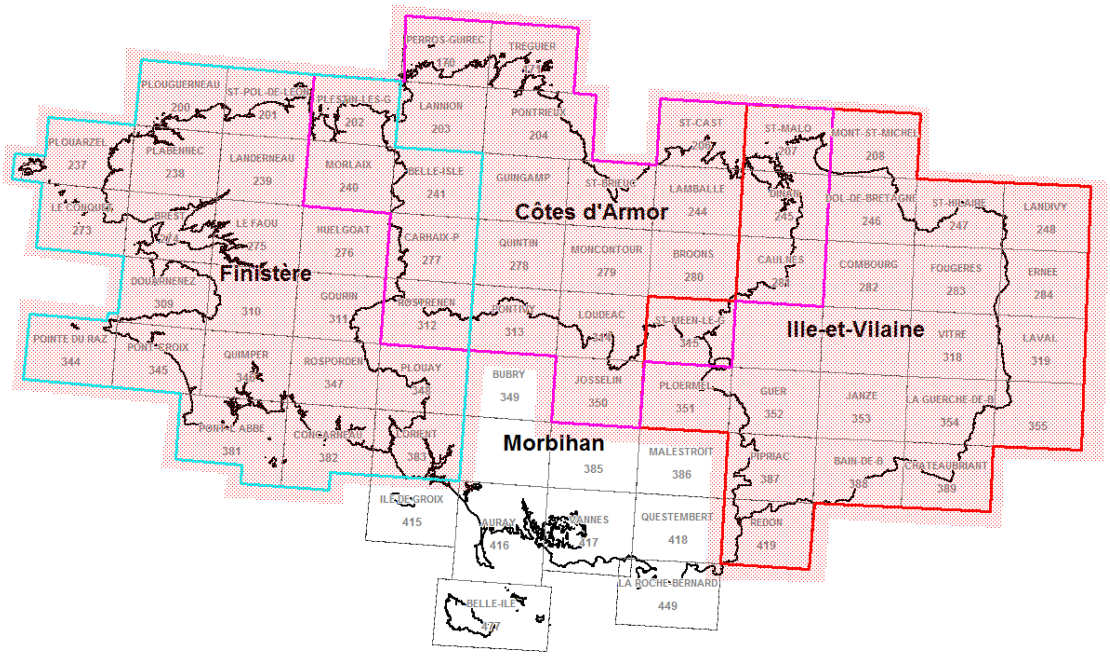


Illustration 55 : Patchwork des cartes géologiques au 1/50 000 pour les trois départements concernés (en rouge : harmonisation de l'Ille-et-Vilaine ; en rose : des Côtes-d'Armor et en bleu : du Finistère ; en surcharge : harmonisation des trois départements).

À partir de cette géologie homogène à l'échelle du département, il a été nécessaire de réaliser une harmonisation de ces trois cartes géologiques départementales harmonisées des départements du Finistère, des Côtes-d'Armor et d'Ille-et-Vilaine.

Ensuite, cette géologie sub-régionale a été affectée automatiquement par croisement entre elle et le vecteur du TdCH, dans un SIG.

À la géologie issue des cartes au 1/50 000 du BRGM, les investigations de terrain sont venues préciser la géologie des côtes basses et des côtes composées par des dépôts de pente meubles souvent cartographiés que parcimonieusement à l'échelle du 1/50 000.

La deuxième étape est venue compléter la première par ***une acquisition de la géologie plus traditionnelle par l'utilisation d'une minute de terrain***.

Pour le littoral brétillain (Ille-et-Vilaine, 35) et celui du Finistère (29), à la méthodologie décrite ci-dessus d'attribution automatique d'une géologie au trait de côte, les investigations de terrain depuis l'automne 2012 à la fin de l'été 2013, sont venues corriger directement les

erreurs d'attribution automatique. Les précisions de terrain ont porté essentiellement sur les côtes basses, et les côtes meubles et sur l'attribution de secteur de roches altérées ou en érosion.

Pour le littoral des Côtes-d'Armor (22), il a été possible de s'appuyer sur une étude existante réalisée par Chantal Bonnot-Courtois et Gentiane-Lançon (CNRS) sur la caractérisation de l'aléa érosion sur le littoral des Côtes-d'Armor, contenant sur tout le littoral costarmoricain à une précision au 1/25 000, la géomorphologie côtière, les aménagements et les aléas. Grâce au croisement des informations des cartes de cette étude, avec les cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM et les investigations de terrains de l'été 2011 du BRGM, la géomorphologie a pu être affinée.

Lors des campagnes de terrain, des minutes de terrain ont été réalisées dont le support a été le Scan 25 de l'IGN, agrandi à l'échelle du 1/15 000.

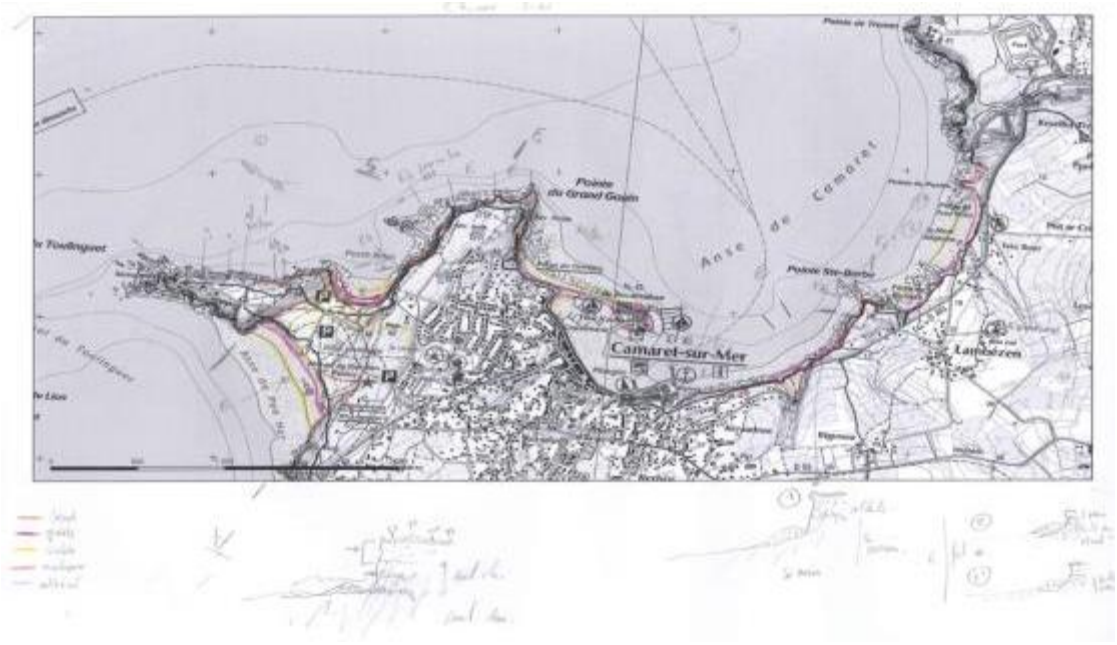


Illustration 56 : Minute de terrain au niveau de Camaret-sur-Mer (29).

Ainsi de nombreuses informations qui ne figuraient pas sur les cartes géologiques, telles que la géologie (***roche saine ou altérée, côtes meubles,*** etc.), ***les secteurs en érosion***, ***la nature de l'estran ou encore les extensions des formations meubles, ont pu être retranscrits***. Ces observations de terrain ont donc permis un enrichissement supplémentaire ***avec secteur sain et altéré ou encore en érosion ou pas***.

Pour des commodités cartographiques de rendu à l'échelle du 1/15 000, l'avant trait de côte a été positionné sur le « 0 » NGF des Scan25IGN. Sa nature (sableuse, à galets, vaseuse, rocheuse) a pu être définie grâce aux investigations de terrain sur le Finistère et l'Ille-et-Vilaine, et en s'appuyant sur les cartes de l'étude de C. Bonnot-Courtois, complétée par les images satellites en libre accès sur http://www.bing.com/maps/ ou https://www.google.fr/maps.

Enfin, l'arrière trait de côte, comme l'extension des formations superficielles a été le plus délicat à tracer. Les cartes géologiques au 1/50 000 sont venues apporter l'information de présence ou pas, mais le tracé s'est appuyé sur les Scan25IGN et sur l'interprétation à partir de l'analyse de la végétation, de l'occupation des sols des images satellites (http://www.bing.com/maps/ ou https://www.google.fr/maps).

La ***troisième étape importante***, a été la ***simplification*** de cette géologie des trois départements.

Avec 475 caissons ou polygones correspondants chacun à une formation géologique, il n'était pas possible de réellement faire une analyse sur les prédispositions de tant de formations géologiques à l'érosion.

Un ***travail de simplification de la géologie*** a permis le regroupement de ces 475 formations géologiques en :

- ***11*** formations géologiques pour les côtes rocheuses ;
- et ***14*** formations géologiques pour les côtes meubles.

Le regroupement des formations géologiques des côtes rocheuses s'est faite sur :

- la lithologie (regroupement des formations géologiques de même nature ou de la même famille), tel que : les leucogranites, granites et granodiorites ou l'ensemble des formations géologiques volcaniques acides, ou encore des alluvions avec les colluvions ou dépôts de pentes périglaciaires ;
- l'expertise du géologue régional ;
- la connaissance du comportement mécanique des formations géologiques, comme le Module de Young et le Coefficient de Poisson (Illustration 57) ;

Matériau	*Module de Young E (GPa)*	*Coefficient de Poisson ν*
Granite	10 – 80	0.25 – 0.35
Basalte	20 – 70	0.25 – 0.35
Quartzite	30 – 90	0.12 – 0.15
Gneiss	10 – 60	0.25 – 0.35
Schiste	7 – 50	0.15 – 0.20
Calcaire très compact	60 – 80	0.25 – 0.35
Calcaire compact	30 – 60	0.25 – 0.35
Calcaire peu compact	10 – 30	0.25 – 0.35
Calcaire tendre	2 – 10	0.25 – 0.35
Marne	0.05 – 1	0.25 – 0.35
Grés	5 – 60	0.25 – 0.35
Molasse	1.5 – 5	0.25 – 0.35
Marbre	80 – 110	0.27 – 0.3
Gypse	2 – 6.5	0.27 – 0.3

Illustration 57 : Module de Young et coefficient de Poisson pour quelques familles de roches (Mestat, 1993).

- et sur le comportement des minéraux des formations géologiques face à l'altération comme par exemple l'ordre établi par Goldich (1938) de résistance des minéraux à l'altération (Illustration 58).

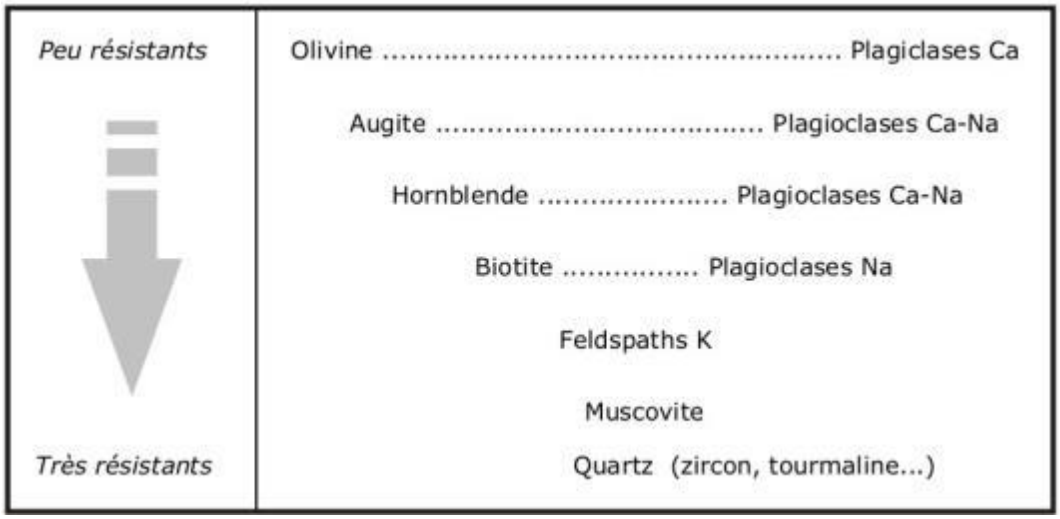


Illustration 58 : Ordre de résistance des minéraux à l'altération (Goldich, 1938).

4.1.2. La « géomorphologie » du trait de côte des trois départements

Synthèse générale

Cette cartographie (1) de la géologie des côtes à falaises et de la géomorphologie/géologie des côtes d'accumulation, du trait de côte, précise au 1/15 000, permet de dresser un état des lieux du trait de côte des trois départements (d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère).

Pour un ***linéaire total de côte*** de ***2 071,5*** km étudié, le trait de côte est composé à ***25,8*** % d'***aménagements anthropiques*** (digues, murs, épis, quais etc.), soit un linéaire de ***534,8*** km.

Les ***côtes naturelles*** sont composées de ***486,19*** km de ***côtes meubles*** (alluvions estuariens, colluvions de pente, côtes d'accumulation sableuses et à galets etc.), soit ***23,46*** % et de ***1051,5*** km de ***côtes rocheuses***, soit ***50,74*** % (Illustration 59).

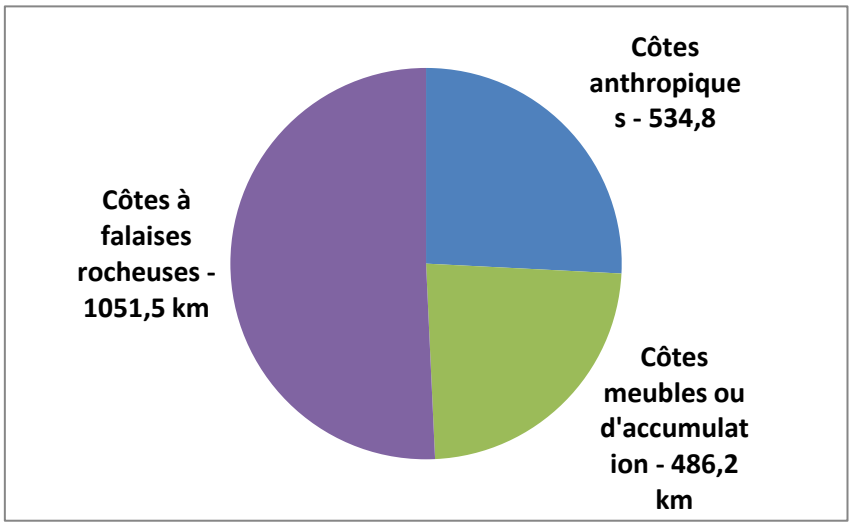


Illustration 59 : Synthèse du linéaire côtier étudié pour les départements d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère.

L'identification sur le terrain de linéaire interprété en érosion (sur les côtes meubles comme rocheuses), permet de dresser ce bilan de ***230,93*** km de côte ***en érosion*** soit ***11,14*** %.

Pour les ***côtes rocheuses***, le linéaire en érosion est de ***77,84*** km, soit ***7,40*** %, alors que pour les côtes meubles, le linéaire en érosion est de ***153,06*** km en érosion, soit ***31,49*** %.

Pour la partie anthropique de ce linéaire côtier sur les ***534,8*** km, ***7,7*** km soit sur ***1,4*** %, a été observé endommager.

Synthèse par formations géologiques littorales

Pour l'ensemble des trois départements, il a été possible de caractériser :

- les différents linéaires de côtes rocheuses sains et altérés ;
- les différents linéaires de côtes rocheuses comme meubles en érosion ou pas.

Le linéaire des côtes rocheuses des trois départements est constitué (Illustrations 60 et 61) :

1. de ***roches*** de la famille des ***granites*** (***459*** km) ;
2. suivi de ***261*** km de côtes de ***roches métamorphiques*** (des micaschistes, gneiss aux migmatites) ;
3. ***156*** km de ***roches sédimentaires déformées (schisto-gréseuses)*** ;
4. ***63*** km de roches de type grés ***armoricain*** ;
5. ***33*** km ***de roches plutoniques à volcaniques basiques*** ;
6. ***27*** km de différents ***filons rocheux*** ;
7. ***23*** km de ***roches métamorphiques basiques*** ;
8. ***14*** km de ***roches volcano-sédimentaires*** ;
9. ***11*** km de ***roches volcanites et métavolcanites acides*** ;
10. Et enfin « *anecdotiquement* » ***0.4*** km de ***roches quartzitiques ou localement mylonitiques***.

		en km	*altéré*	*en érosion*	*altéré en érosion*	*Total*	*Roch alt./Roch saine*		*En érosion/Non érodé*	
	Trait de côte (total 22, 29 et 35)							**en %**		**en %**
Falaises rocheuses et meubles	**Roches granitiques**	406,80	34,20	10,90	7,50	459,40	0,08	**8,41**	0,04	**4,17**
	Roches metamorphiques	233,36	12,68	7,65	8,01	261,70	0,09	**8,58**	0,06	**6,36**
	Roches metamorphiques basiques	19,83	0,55	0,31	2,74	23,43	0,16	**16,34**	0,15	**14,97**
	Roches sédimentaires (schisto-gréseuses)	121,76	6,14	3,60	25,29	156,79	0,25	**25,07**	0,23	**22,59**
	Roches de type gres armoricain	61,33	0,84	0,88		63,05	0,01	**1,35**	0,01	**1,42**
	Roches volcano-sédimentaires	14,25	0,32	-	-	14,57	0,02	**2,25**	-	**-**
	Roches plutoniques a volcaniques basiques	24,00	1,48	0,00	8,02	33,50	0,40	**39,58**	0,31	**31,48**
	Roches volcanites et metavolcanites acides	10,72	0,22	-	-	10,94	0,02	**2,05**	-	**-**
	Roches quartzitiques (ou localement mylonitiques)	0,40	-	-	-	0,40	-	**-**	-	**-**
	Filons rocheux	22,90	1,88	0,54	2,40	27,72	-	**-**	-	**-**
	Depots de pente (colluvions aux alluvions)	75,64	-	92,25	-	167,89	-	**-**	1,22	**121,96**

Illustration 60 : Tableau des formations géologiques littorales simplifiées des côtes rocheuses des départements d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère (sont présents les linéaires altérés, sains et érodés).

Les formations géologiques qui finalement apparaissent avec un faible linéaire, avaient été extraites des 475 de l'harmonisation géologique des trois départements et retenues car elles pouvaient constituer des hétérogénéités : points résistants ou meubles pouvant être le siège d'aléa ponctuel.

Enfin, les formations géologiques de type ***dépôts de pente (des colluvions aux alluvions)***, qui correspondent à des falaises d'altitudes variées entre 1 m à 15/20 m, et qui correspondent à une géomorphologie intermédiaire entre les côtes rocheuses et les côtes meubles, font un linéaires côtier de ***167*** km.

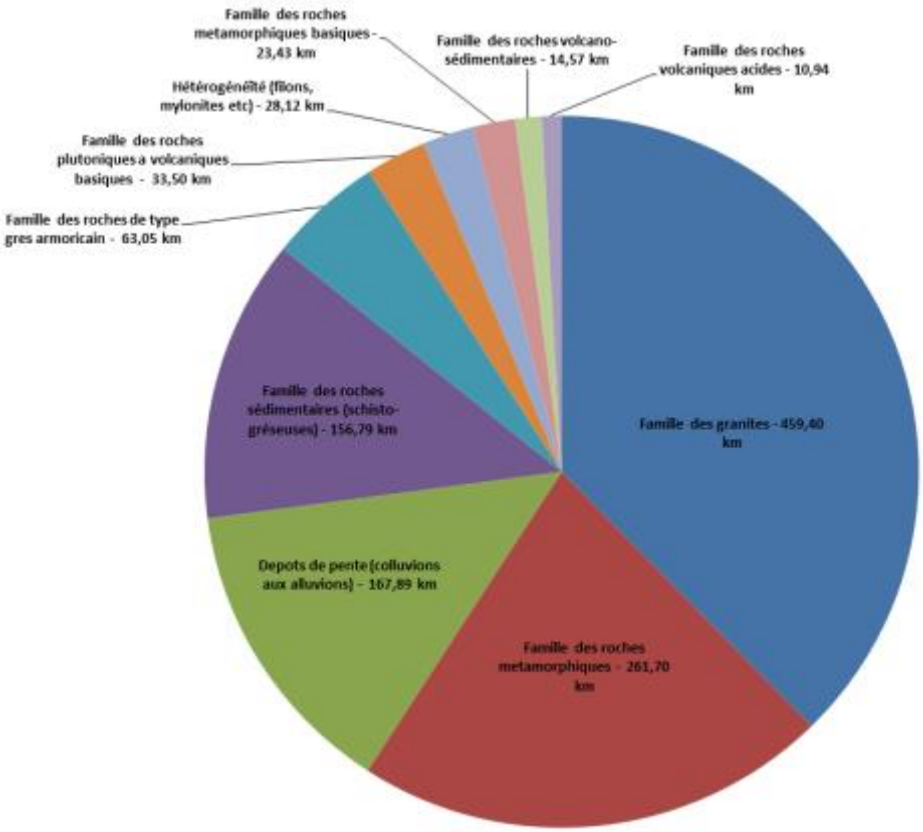


Illustration 61 : linéaire en kilomètre des diiférents linéaires de cotes rocheuses.

Synthèse sur l'altération des formations géologiques littorales

Un ***rapport entre le linéaire altéré et sain (non altéré)***, a été réalisé afin d'avoir une image du degré d'altération des différents linéaires de côtes rocheuses, (Illustration 60).

Les formations géologiques qui présentent ***un rapport [linéaire altéré/linéaire sain]*** le plus important, sont les :

1. ***roches plutoniques à volcaniques basiques*** avec ***39*** % de leur linéaire altéré ;
2. suivies par les ***roches sédimentaires (schisto-gréseuses)*** avec ***25*** % ;
3. puis par les ***roches métamorphiques basiques*** avec ***16*** % ;
4. Les ***roches granitiques et métamorphiques*** ont un linéaire de côte altérée égal de ***8*** % environ ;
5. et enfin les ***roches sédimentaires de type grés armoricain et volcano-sédimentaires*** sont très peu altérées avec respectivement ***1,35*** et ***2,25*** % de leur linéaire côtier.

Ces ***résultats*** confirment dans un premiers temps, ***l'ordre de résistance des minéraux à l'altération de Goldish (1938),*** mais dans un deuxième temps, montrent que pour les côtes rocheuses des trois départements, ***si les roches composées de minéraux facilement altérables comme celles basiques sont les plus altérées, les roches contenant le plus de discontinuités intrinsèques comme acquises, sont elles aussi tout autant altérables*** telles que les roches sédimentaires (schisto-gréseuses).

Synthèse sur l'érosion des formations géologiques littorales

• Sur les côtes rocheuses

La même démarche a été réalisé mais cette fois-ci par la réalisation d'un rapport entre ***linéaire en érosion et « sain »*** (Illustration XX). Les formations géologiques qui présentent ***un rapport [linéaire en érosion/linéaire sain]*** le plus important, sont les :

1. ***roches plutoniques à volcaniques basiques*** avec ***31*** % de leur linéaire en érosion ;
2. suivies par les ***roches sédimentaires (schisto-gréseuses)*** avec ***22*** % ;
3. puis par les ***roches métamorphiques basiques*** avec ***14*** % ;
4. Les ***roches granitiques et métamorphiques*** ont un linéaire de côte en érosion sensiblement identique avec respectivement **4,7** et ***6,36 %*** environ ;
5. et enfin les ***roches sédimentaires de type grés armoricain*** ont un linéaire côtier en érosion faible de ***1,42*** %.

Pour les formations géologiques restantes, leur linéaire n'a pas été observé en érosion.

Cependant, les dépôts de pente (des colluvions aux alluvions), présentent un linéaire en érosion supérieur à leur linéaire « stable », ce qui les placent comme la formation géologique à falaises la plus mobile du littoral des trois départements avec 121 %.

Ces ***résultats*** confirment dans un premiers temps, ***les données mécaniques qui caractérisent les différentes lithologies (Illustration 57, d'après Mestat, 1993)***, mais dans un deuxième temps, ***bousculent ces premières confirmations en montrant un lien direct entre altération et érosion***.

Ainsi pour les formations géologiques des côtes rocheuses des trois départements (formation des dépôts de pente exclue***), les linéaires de roches en érosion se corrèlent assez bien avec les linéaires de roches en altération, soulignant l'importance que l'altération peut jouer dans la mobilité des falaises, en diminuant les leur résistance mécanique***.

• Sur les côtes meubles

Pour les côtes meubles ou à accumulation, tels que les cordons dunaires de sables ou de galets, les flèches etc. (Illustration 62), cette approche n'est pas des plus adaptées mais malgré tout ***le rapport entre linéaire en érosion et « stable »***, montre que :

1. les ***flèches de sable*** sont des objets géomorphologiques très mobiles avec ***99*** % en érosion ;
2. suivies par les ***cordons dunaires*** (de sable), à ***55*** % ;
3. Les ***plages adossées et autres plages*** (plagettes), ont respectivement ***14*** et ***10*** % de leurs linéaires en érosion ;
4. et enfin les ***cordons de galets*** n'ont, eux, que ***7*** % de leur linéaire observé en érosion.

		en km	altéré	en érosion	altéré en érosion	Total	En érosion/Non érodé	
Côtes basses et anthropiques	Cordon de galets	58,67	-	4,27	-	62,94	0,07	7,28
	Plage de galets	1,99	-	-	-	1,99	-	-
	Queue de comete de galets	0,10	-	-	-	0,10	-	-
	Fleche de galets	15,58	-	0,14	-	15,72	-	-
	Tombolo de galets	0,52	-			0,52		
	Cordon de sable et galets	2,23	-	-	-	2,23	-	-
	Plage sablo-graveleuse	12,42	-	0,37	-	12,79	0,03	2,98
	Cordon dunaire sableux	83,29	-	46,02	-	129,31	0,55	55,25
	Fleche de sable	8,25	-	8,20	-	16,45	0,99	99,39
	Tombolo sableux	0,68		1,22		1,90		
	Plage de sable (adossée)	3,08	-	0,44	-	3,52	0,14	14,29
	Plages autres (plagettes adossées etc.)	1,65	-	0,18	-	1,83	0,11	10,91
	Plages ou alluvions perches (sablo-graveleux)	4,80	-	-	-	4,80	-	-
	Marais maritime ou Estuaire	64,20	-	-	-	64,20	-	-
	Cote anthropique	527,15	-	7,65	-	534,80	0,01	1,45

Illustration 62 : Tableau des formations géologiques littorales simplifiées des côtes meubles des départements d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère (sont présents les linéaires altérés, sains et érodés).

4.2. PREDISPOSITION A L'EROSION DES COTES A FALAISES

Pour évaluer la prédisposition à l'érosion, quatre critères ont été mis en place.

1 - le ***rapport linéaire sain - linéaire en érosion*** par formation géologique ;

2 - le ***rapport linéaire sain - linéaire altéré*** par formation géologique ;

3 - la ***densité de mouvement de terrain au kilomètre linéaire*** par formation géologique ;

4 - et la ***densité de cavités au kilomètre linéaire*** par formation géologique.

4.2.1. Le levé de terrain ayant trait à l'érosion

Pour le département des Côtes-d'Armor, le levé de terrain s'est fait pendant l'été 2011, et a été complété à l'hiver 2011-2012. Pour les autres départements (Ille-et-Vilaine et Finistère), le levé a été réalisé lors de l'automne 2012 et de l'hiver à la fin de l'été 2013. Seulement quatre agents ont arpenté les 2000 km environ de littoral.

Plusieurs types d'éléments ont été relevés :

1. l'ensemble des ***mouvements de terrain*** (cf. paragraphe ci-dessous sur la typologie mouvements relevés) ;
2. l'ensemble des ***cavités*** liées à l'action des vagues ;
3. et pour les côtes anthropisées (aménagées), l'ensemble des ***réparations*** réalisées sur les ouvrages (quais, digues, épis) ou ***impacts*** (dommages) quand il était possible de les observer.

Afin d'accélérer ce processus d'acquisition des données, les agents étaient munis d'un ***GPS © Trimble Juno 3B***, contenant déjà dans l'appareil, les bases de données nécessaires à renseigner pour une ***acquisition numérique***.

L'acquisition numérique

Les données de terrain ont été acquises grâce à un GPS © Trimble Juno 3B (Illustration 63). Ce GPS permet :

- d'obtenir une précision en temps réel de 2 à 5 m grâce au SBAS (Satellite-Based Augmentation System). Cette précision peut atteindre 1 à 3 m grâce au post-

traitement. Ces précisions sont suffisantes pour permettre de localiser précisément les objets géographiques ;

- d'acquérir des données de trois types : des pointes, des lignes ou des surfaces.

Illustration 63 : GPS © Trimble Juno3B.

Préparations avant l'acquisition des données

Avant l'acquisition de nouvelles données, il est nécessaire des définir dans l'appareil le système de coordonnées géographiques, de la précision voulue ou attendue, ou encore du pas d'acquisition.

Préalablement, un dictionnaire d'attribut est défini en fonction de la nature de l'acquisition. Le dictionnaire d'attribut correspond à l'ensemble des caractéristiques ou observations (attributs) qui seront relevés sur le terrain et rattachées à l'objet géographique levé, et qui seront directement stockées en temps réel dans l'outil de saisi.

Il permet un travail uniforme d'un opérateur à un autre, avec par exemple, la possibilité de bloquer l'acquisition d'un attribut, tant que le précédent n'a pas encore été identifié. Ces attributs levés directement sur le terrain permettent un gain de temps car de l'acquisition terrain, l'opérateur peut passer directement à son système d'information géographique et à la gestion de ces champs attributaires.

Deux logiciels sont nécessaires pour l'acquisition des données.

Le logiciel © PathFinder, développé par la société © Trimble, est outre un véritable logiciel SIG, un logiciel dans lequel il est possible de créer les dictionnaires d'attributs mais aussi de réaliser un traitement différentiel des données acquises afin d'en améliorer la précision.

Le second logiciel ©Terrasync Pro, est un aussi SIG embarqué sur le GPS portatif et qui permet la gestion des données géoréférencées (vecteurs, rasters, ponctuels), consultables directement sur le terrain pour aider à l'acquisition ou la mise à jour. © TerraSync Pro permet aussi la synchronisation de l'ensemble des données embarquées et des données préparées sur l'ordinateur de bureau.

Les données collectées sont de deux types, on distingue :

- les données ponctuelles telles que les mouvements de terrain, les cavités, les impacts ou les réparations d'ouvrage ou encore les observations ponctuelles diverses (brèche de cordons etc.) ;
- les données linéaires permettant de relever des pieds et les crêtes de falaise ou les limites de végétation sur les côtes meubles.

Acquisition des données

L'acquisition des données avec le © Trimble Juno3B, ne peut se faire qu'avec un minimum de quatre satellites connectés pour qu'à chaque point acquis, la précision soit la meilleure possible. La réception du signal peut être perturbée si l'opérateur se situe en pieds de falaise, et si celle-ci est située entre les satellites et l'opérateur. Pour la Bretagne, les falaises d'exposition nord, sont les moins bien-orientées pour une acquisition optimale. Les acquisitions trop proches de la surface de l'eau (de la mer) sont aussi perturbées par l'agitation de surface. Il est important que l'opérateur soit vigilant en surveillant la précision affiché par le GPS et la présence de la correction en temps réel active de l'appareil même s'il est possible de faire une correction des données en post traitement.

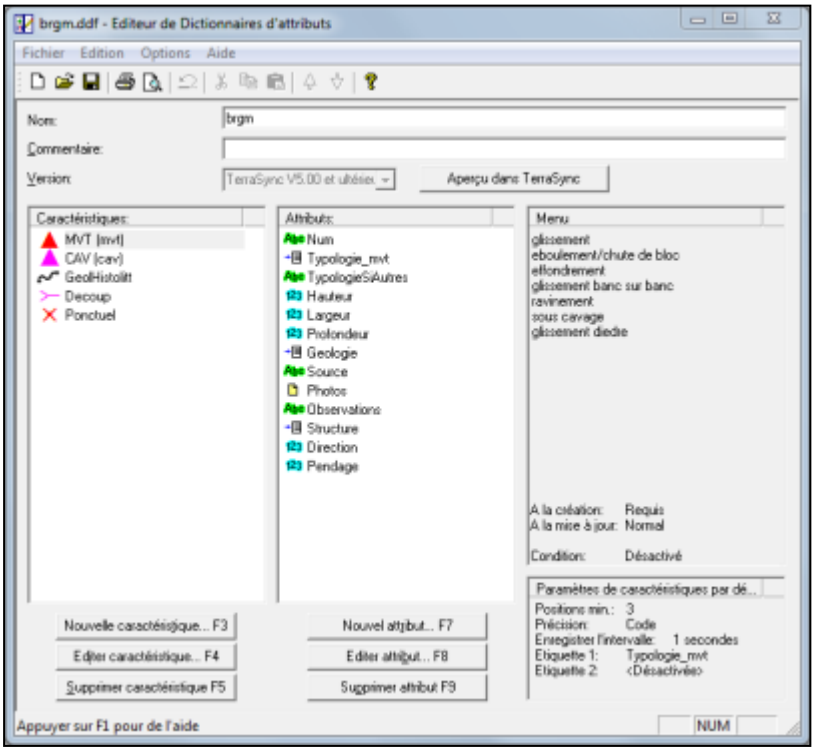


Illustration 64 : Dictionnaire d'attributs réalisé pour cette étude.

Après avoir transférer les données sur l'ordinateur grâce au logiciel © Pathfinder, celles-ci doivent être post-traitées. Ce post-traitement correspond à faire une comparaison à partir de l'heure et de la date d'acquisition des données avec la station GPS fixe la plus proche du secteur d'acquisition. Cette correction dite aussi « de différentielle », est une étape majeure qui permet d'améliorer considérablement la précision des mesures. Le post-traitement effectué, les données sont prêtes pour être exportées vers un SIG (Système d'Information Géographique) au format © Esri shapefile, ou mid/mif ou encore dxf, avec les champs attributaires prédéfinis dans le dictionnaire d'attribution (Illustration 64).

Au moment de l'acquisition des données, les différents champs attributaires du dictionnaire d'attribut prédéfinis tels que la typologie, la hauteur, la largeur et la profondeur ou encore la

géologie (roche sédimentaire, roches granitique, sable…), sont acquis avec le mouvement de terrain. Enfin d'autres informations comme la direction, le pendage de la structure tectonique principale responsable de l'objet géographique ainsi qu'une photographie et des éléments de précision viennent compléter les attributions du GPS (Illustration 64).

4.2.2. Synthèse des éléments relevés lors de la phase terrain

Les mouvements de terrain littoraux

- **La typologie des mouvements de terrain littoraux**

Une nomenclature des instabilités des falaises, dépendant de différents facteurs (principalement la géologie et la morphologie) et s'appuyant sur la nomenclature nationale utilisée lors des inventaires départementaux des mouvements de terrain (www.bdmvt.fr), a été établie pour le littoral des trois départements auscultés.

Les critères de définition concernent à la fois le type de mécanisme de déformation, de rupture et de déplacement des matériaux, le type de matériaux déplacés ainsi que le volume de matériaux déplacés.

Glissements de terrain (illustration 65)

Les glissements de terrain correspondent à des déplacements de terrains le plus souvent meubles le long d'une surface de rupture.

Les facteurs de prédisposition sont différentes lithologies depuis le sol, à des massifs fracturés, des formations superficielles meubles. La géométrie du plan de glissement est fonction de la topographie.

Les facteurs aggravants sont souvent de fortes précipitations, des actions anthropiques en aval comme en amont, l'action des vagues en pied de falaise qui déblayent le bourrelet (Illustration 65).

Illustration 65 : Schéma de principe d'un glissement de terrain (Landevennec, 29).

Glissements banc sur banc (illustration 66)

Les glissements banc sur banc correspondent à des déplacements de terrains le long d'une surface correspondant à l'inclinaison du plan stratigraphique des roches, orienté vers le vide.

Les facteurs de prédisposition sont différentes lithologies mais surtout des roches sédimentaires ayant été basculées ou plissées. La géométrie de la discontinuité est fonction de l'histoire géologique de la formation géologique en cause (Illustration 66).

Les facteurs aggravants sont souvent de fortes précipitations, des actions anthropiques en aval comme en amont, l'action des vagues qui érode le pied de falaise.

Illustration 66 : Schéma de principe d'un glissement banc sur banc (A : Binic, 22 ; B : Cap à la Chèvre, 29).

Glissements de dièdres (illustration 67)

Les glissements de dièdres correspondent à des déplacements de terrains le long d'au moins deux surfaces (discontinuités), sécantes pour individualiser un élément (bloc, gros bloc etc).

Les facteurs de prédisposition sont différentes lithologies mais surtout des roches avec au moins deux générations de fracturation sécantes. La géométrie des discontinuités est fonction de l'histoire géologique de la formation géologique en cause, autant intrinsèque qu'acquise (Illustration 67).

Les facteurs aggravants sont souvent de fortes précipitations, des actions anthropiques en aval comme en amont, l'action des vagues qui érode le pied de falaise.

Illustration 67 : Schéma de principe d'un glissement de dièdres (A : Kerfany, 29 ; B : Plouha, 22).

Éboulement, chute de blocs (illustration 68)

Les éboulements ou chutes des blocs sont des phénomènes rapides ou événementiels mobilisant des éléments rocheux plus ou moins homogènes avec peu de déformation préalable d'une pente abrupte jusqu'à une zone de dépôt (Illustration 68).

Les facteurs de prédisposition sont la présence d'un massif rocheux, de conglomérats, et de nombreuses discontinuités : stratigraphiques, tectoniques.

Les facteurs aggravants sont souvent de fortes précipitations, des actions anthropiques en aval comme en amont et la végétation.

Illustration 68 : Schéma de principe d'un éboulement/Chute de blocs (A : Pointe du Van, 29 ; B : Planguenoual, 22).

Ravinement (illustration 69)

Le ravinement est le résultat de l'érosion de la tâte de falaise essentiellement. Il se produit surtout pour des têtes de falaises composées de formations géologiques meubles telles que des altérites (allotérites et isaltérites), des dépôts de pente ou une forte épaisseur de sols, par l'action des eaux météoritiques (Illustration 69).

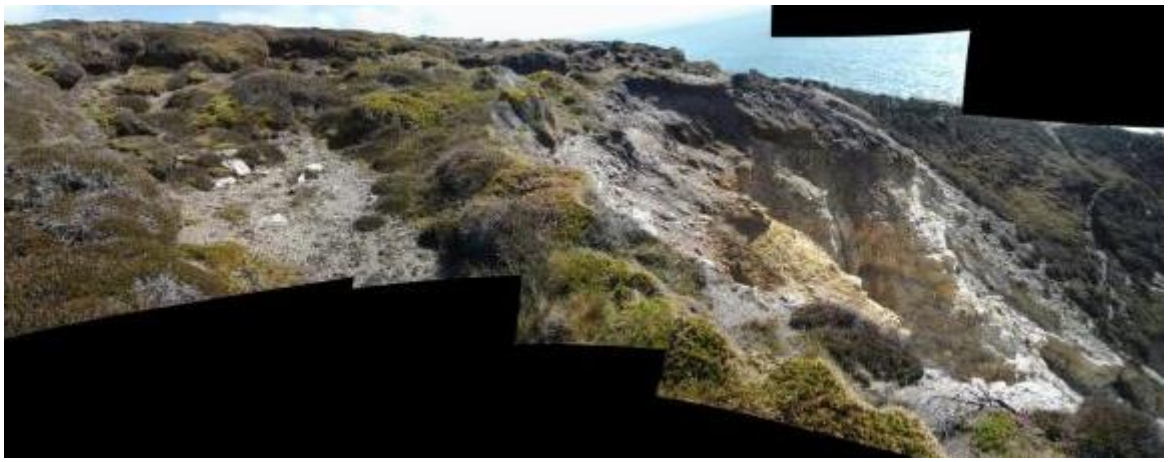


Illustration 69 : Ravinement important des formations superficielles composées de sols sombres épais (1 m) sur un manteau latéritique (Cap à la Chèvre, 29).

Sous-cavage (illustration 70)

Le sous-cavage est essentiellement présent en pied de falaise, et il est essentiellement lié à l'action des vagues. Le sous-cavage emprunte différentes hétérogénéités de la formation géologique en jeu, à partir du moment où celles-ci se situent au niveau de la mer. Il correspond au développement d'une érosion régressive frontale ou latérale, suivant des

plans de fracturation, des plans de failles, des intrusions magmatiques mineures (filons de dolérites ou de quartz), des plans de stratification etc (Illustration 70).

Les tempêtes associées à de hauts niveaux marins sont des conjonctures favorables à leur formation.

Illustration 70 : Sous-cavage (A : secteur Saint-Coulomb, 35 ; B : Plouha, 22).

Effondrement (illustration 71)

Les effondrements sont la conséquence de l'évolution prononcée du phénomène précédent qui aboutit à la rupture du toit d'une cavité souterraine qui s'est formée dans la zone d'action des vagues.

Les facteurs de prédisposition sont l'existence de discontinuités situées dans la zone d'action des vagues pour générer une cavité (dissolution, etc.) et la proximité de la surface (Illustration 71).

Les facteurs aggravants sont souvent les tempêtes associées à de hauts niveaux marins et de fortes précipitations.

Illustration 71 : Effondrement sur la bordure nord de l'anse de Dinan (Camaret, 29).

- **Synthése des mouvements de terrain**

2 537 mouvements de terrain ont été recensés sur le littoral des trois départements. Leur répartition géographique se fait pour l'essentiel sur les falaises rocheuses mais aussi sur les falaises meubles composées soit de dépôts de pente soit de cordons dunaires sableux ou à galets.

96,50 % des volumes de ces mouvements de terrain font moins de ***5 000 m3***, soit un effectif total de ***52.***

2,13 % des volumes font moins de ***20 000 m3***, soit un effectif total de ***54***, et ***0,9 %*** des volumes sont supérieur à ***50 000 m3***, pour un effectif total de ***23***, et enfin ***4*** sont inférieurs à ***100 000 m3*** et ***4*** les plus importants sont inférieurs à ***167 000 m3***.

Les volumes mis en jeux augmentent avec l'augmentation des hauteurs de falaises. Ainsi c'est sur la presqu'Île de Crozon dans le Finistère (29) (depuis le port de Morgat et jusqu'à la pointe des Espagnols) et sur la façade Ouest de la baie de Saint-Brieuc (sur la commune de Plouha, aux alentours de la pointe du même nom), que se situent les mouvements de terrain les plus importants. Dans ces deux secteurs, les hauteurs de crête frôlent la centaine de mètres d'altitude à légèrement supérieur. Les figures ci-dessous illustrent quelques exemples prix sur la presqu'Île de Crozon, de mouvements de terrain les plus importants (Illustration 72 A, B, C et D).

- **Quelques mouvements de terrain importants ou particuliers**

Les investigations de terrain ont permis d'observer quelques mouvements de terrain de tailles assez importantes ou présentant un caractère singulier.

En **A** (Illustration 72), à partir du Cap de la chèvre et allant vers le Nord sur la commune de Crozon, on remarque la présence de tête de glissement qui moutonnent la topographie. La stratigraphie est aval pendage (orientée vers la mer) et la partie supérieure de la falaise semble altérée.

Ces têtes de glissements se suivent sur environ une centaine de mètres, décrivant un mouvement de terrain de type glissement de 20 m de hauteur, 80 de large, aggravé par la topographie littorale, le déblaiement des matériaux glissés par la mer et les eaux de ruissellement.

En **B** (Illustration 72), les fameuses grottes de Morgat sur la commune de Crozon, sont le résultat de l'érosion le long de plans de fracturation / de failles, N070 et pentées vers la mer et de plans N020 verticaux perpendiculaires à la falaise.

Le travail de sape de l'action des vagues le long des plans N020, et l'orientation favorable au glissement des plans N070, entraient la création des cavités au niveau des plus hautes mers, qui se matérialisent pas des effondrements.

En **C** (Illustration 72), au niveau de la pointe de Pen Hir (sur la commune de Camart-sur-Mer), le travail de l'érosion littorale le long de plans de fractures / failles sub Est-Ouest, rejoint la limite entre les grés armoricain très gréso-quartzitiques et une alternance de grés et schistes sombres.

Dès que la mer a franchi cette limite lithologique, elle génère des boutonnières d'érosion dans le matériel schisto-gréseux alors que les grés résistent. Ce processus d'érosion différentiel entre les grés *s.s.* et le matériel schisto-gréseux pourrait être à l'origine de la formation des fameux tas de pois.

Enfin en **D** (Illustration 72), depuis Camaret-sur-Mer en direction de la pointe des Espagnols, les falaises d'une altitude de 80 m environ, ont une orientation approximative N150, identique à la direction de la faille Kerforne.

Toujours suivant cette même orientation préférentielle, on remarque un bloc glissé de plusieurs centaines de mètres cubes.

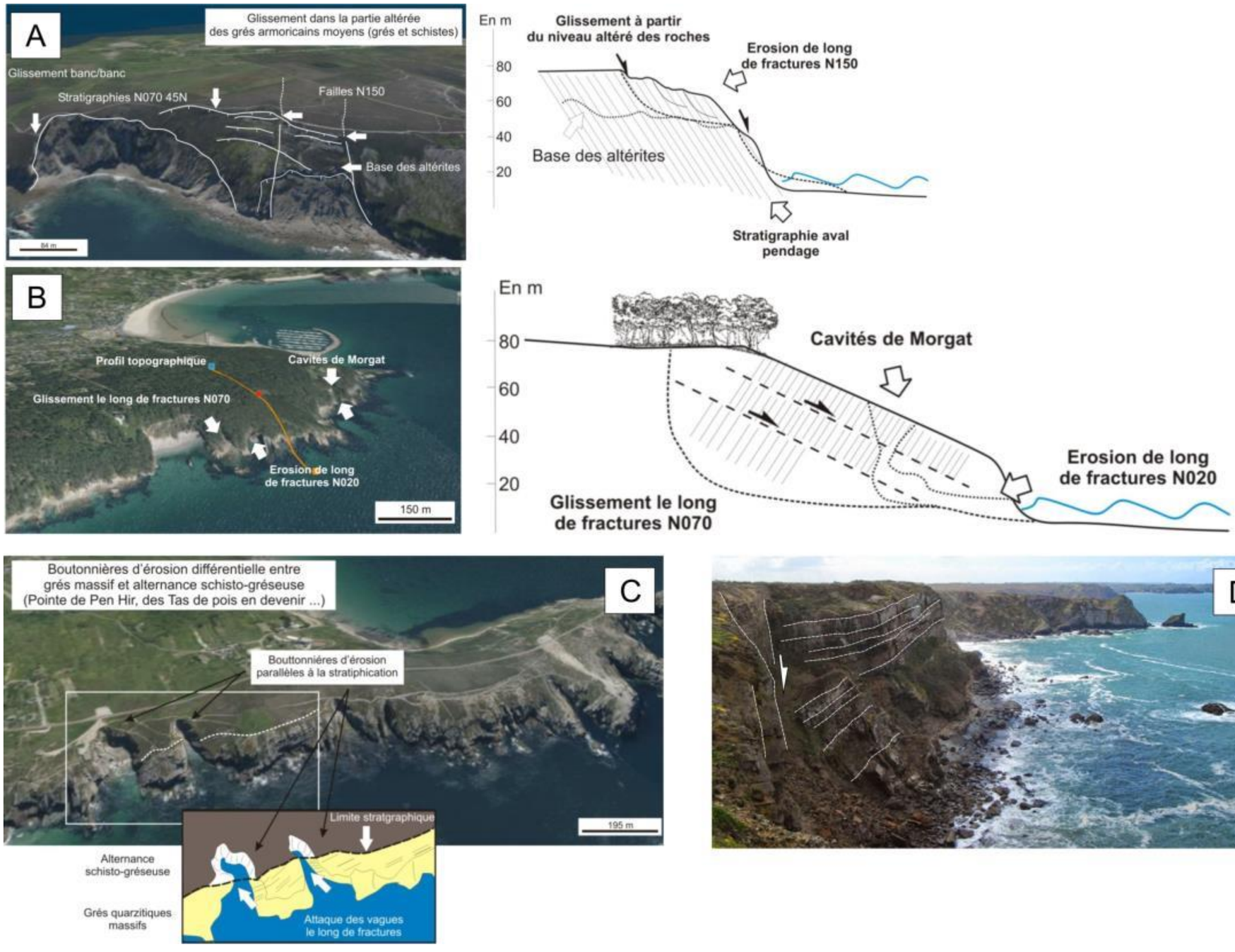


Illustration 72 : A : Glissement de terrain en tête de falaise sur la base des altérites meubles (Cap à la Chèvre, Crozon 29) ; B : Glissement le long de failles orientées vers le vide et formation de cavité dans la zone d'action des vagues (Morgat, Crozon 29) ; C : Érosion différentielle et formation de boutonnières d'érosion (Pointe de Pen Hir, Camaret 29) ; D : Bloc glissé de plusieurs milliers de m3, entre Camaret et la pointe des Espagnols (29), suivant un plan N150 satellite de la faille Kerforne.

Les cavités

1349 cavités ont été recensés sur le littoral des trois départements. Ces 1349 cavités correspondent à la compilation des cavités recensés lors des inventaires de cavités des départements de l'Ill-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère terminés en 2010, et des investigations de terrain réalisées au cours de cette étude.

Géographiquement, elles sont surtout situées d'ouest en est, autours de la presqu'Île de Crozon depuis le sud de la pointe du Raz jusqu'après la pointe Saint-Mathieu, dans les baies de Morlaix et Lannion, dans la baie de Saint-Brieuc et autours de la Rance.

Dès que l'altitude des côtes diminuent, le nombre de cavités lui aussi diminuent (Illustrations 73 et 74).

Les différentes observations

Lors des visites de terrain, différentes observations pouvant avoir un interêt sur la connaissance des aléas littoraux, mais qui ne rentraient pas le cadre d'inventaires de mouvements de terrain ou de cavités, ont été recensées.

Ces différentes observations ont été de deux ordres. Celles correspondant sur les ouvrages de protection du littoral, à des impacts : brèche, fissures, déterioration etc. et celles correspondant à des réparations (bétonnage d'une structure en moellons (digue, quai, épi etc.), reflexion de joints, greffes etc.).

D'autres observations ont pu être faites, comme des enrochements précaires ou sauvages, des traces d'érosion ou d'overwash (traces de laisses de haute-mer etc.) ou encore du piétinements notamment sur les côtes meubles sableuses (Illustrations 73 et 74).

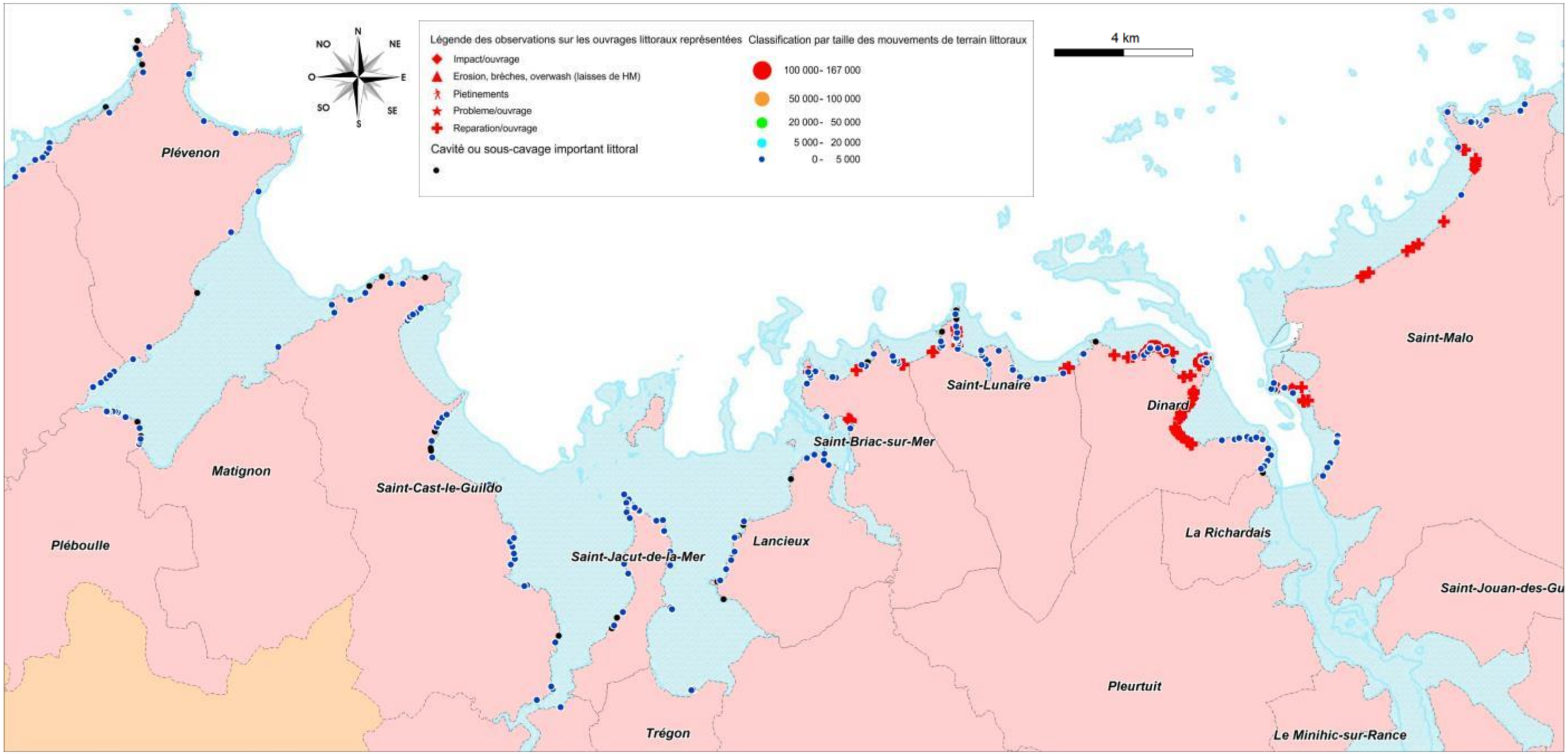


Illustration 73 : Recensement des mouvements de terrain, des cavités et impacts ou réparation sur ouvrages littoraux.

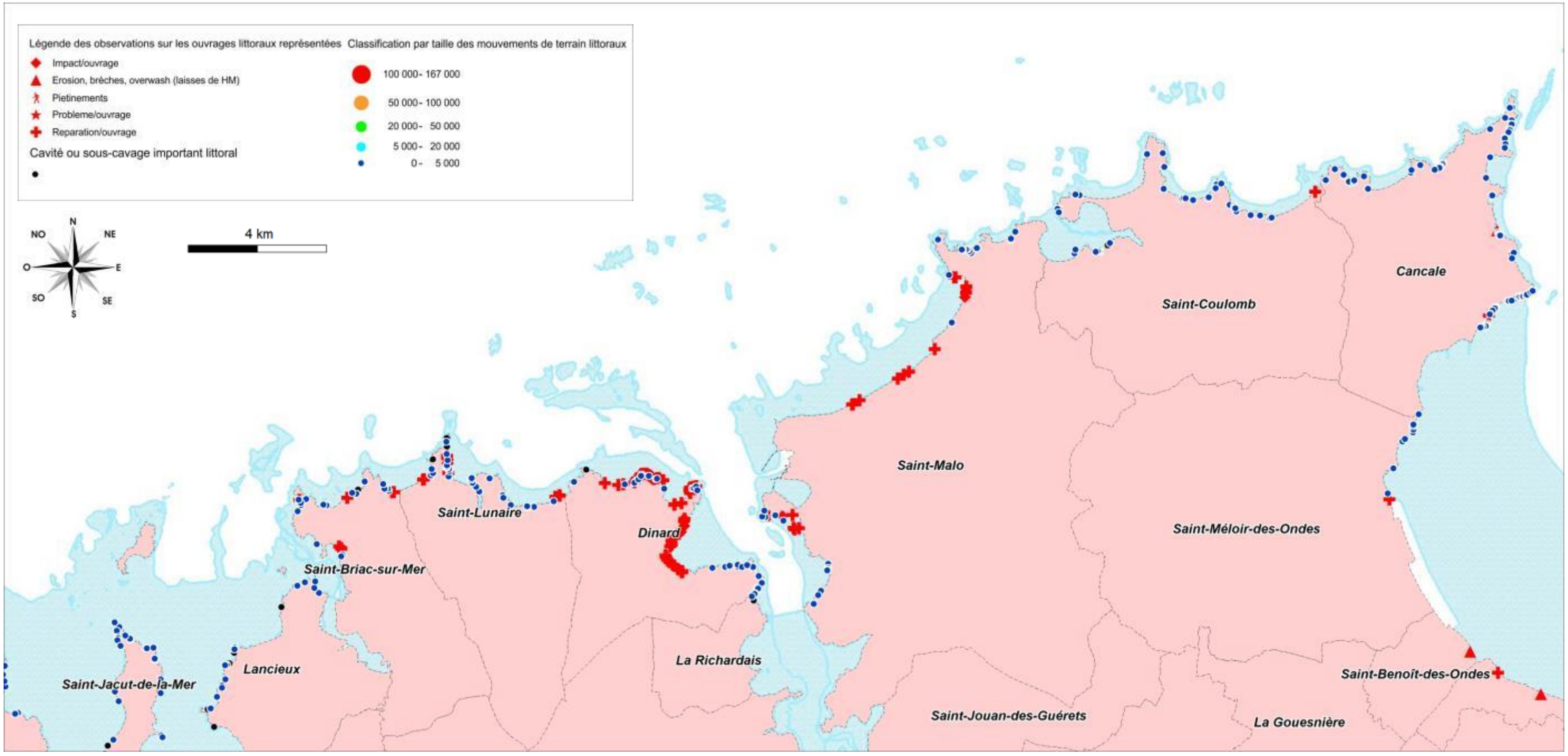


Illustration 74 : Recensement des mouvements de terrain, des cavités et impacts ou réparation sur ouvrages littoraux.

4.2.3. Les critères d'évaluation de la prédisposition des côtes rocheuses à l'érosion

Plusieurs méthodes ont été développées pour l'évaluation de l'aléa mouvement de terrain sur les falaises ou versants rocheux, sur des régions montagneuses (Baillifard, F. *et al*., 2003) où sur les régions côtières (Wildman et Hobbs, 2005 ; Pérez-Alberti et al., 2011 ou Marçot *et al*., 2009). Très souvent l'analyse porte sur la géomorphologie et la cinématique d'un marqueur géomorphologique, mais plusieurs autres critères peuvent être pris en compte (fracturation, altération, morphologie des falaises, altitude ou les nombres d'évènements recensés par linéaires de côtes considérées etc.).

L'analyse s'est ainsi portée par une analyse multicritère afin d'être au plus près de l'évaluation des phénomènes, et il s'est avéré que la prise en compte de critères tels que la géomorphologie très complexe des côtes rocheuse bretonnes ou la cinématique, pouvait être trop chronophage et irréalisable lorsque les linéaires de côtes étaient trop importants.

Il a été donc essentiel d'essayer de trouver des paramètres adaptés à la taille de l'objet géographique, à l'échelle de restitution, qui peuvent rendre compte des phénomènes mis en jeu afin de pouvoir restituer une analyse fidèle et qui balaye un espace géographique important.

Ainsi l'analyse des aléas littoraux des guides méthodologiques, c'est-à-dire, la caractérisation du trait de côte et l'analyse cinématique de son évolution, se sont avérés pour un trait de côte tel que celui de la Bretagne composé de falaises et versants rocheux pléthoriques, irréalisables. Cette méthodologie plus adaptée aux côtes d'accumulation, a été maintenue sur ce type de côtes, mais sur les côtes rocheuses, d'autres critères ont été utilisés.

Afin de pouvoir évaluer entre eux, les différents linéaires de côtes rocheuses, quatre critères ont été identifiés : le rapport entre linéaire de côtes saines et altérées, le rapport entre linéaire en érosion ou pas, la densité de mouvements de terrain et la densité de cavités au kilomètre linéaire pour chaque formation géologique.

Des notes au prorata des résultats obtenus par formations géologiques littorales, ont été affectées à chaque linéaire de côte, et les moyennes arithmétiques de ces notes, ont été considérées comme la note d'évaluation de la prédisposition à l'érosion.

Les tableaux qui suivent, illustrent les notes qui ont été attribuées à chaque formation géologique, en fonction des différents critères énoncés ci-dessus.

Les rapports de linéaires d'altération et d'érosion ont été discutés plus haut, ne sont discutés ici que l'attribution des notes.

Le rapport linéaire sain - altéré

Avec une répartition relativement homogène, le pourcentage de linéaire altéré par formation géologique permet l'attribution d'une note s'étalant de 1 à 5 (de faible à élevé respectivement) :

1. où la note sur le degré d'altération de 1 (faible) correspond aux formations géologiques ayant un pourcentage compris entre 1,35 et 2,25 telles que les roches de type grès armoricain, volcano-sédimentaires et les volcanites et métavolcanites acides ;
2. la note de 2 pour des pourcentages de 8,41 à 8,58 pour les roches granitiques et métamorphiques ;

3. de 3 pour un pourcentage de 16,34 pour les roches métamorphiques basiques ;
4. de 4 pour un pourcentage de 25,07 pour les roches sédimentaires (schisto-gréseuses) ;
5. et enfin de 5 (très élevé) pour un pourcentage de 39,58 pour les roches plutoniques à volcaniques basiques (Illustration 75).

			altéré	*en érosion*	*altéré en érosion*	*Total*	*Roch alt./Roch saine*		Note alt.
	Trait de côte (total 22, 29 et 35)	2084,22						en %	
Falaises rocheuses et meubles	Roches granitiques	406,80	34,20	10,90	7,50	459,40	0,08	8,41	2
	Roches metamorphiques	233,36	12,68	7,65	8,01	261,70	0,09	8,58	2
	Roches metamorphiques basiques	19,83	0,55	0,31	2,74	23,43	0,16	16,34	3
	Roches sédimentaires (schisto-gréseuses)	121,76	6,14	3,60	25,29	156,79	0,25	25,07	4
	Roches de type gres armoricain	61,33	0,84	0,88		63,05	0,01	1,35	1
	Roches volcano-sédimentaires	14,25	0,32	-	-	14,57	0,02	2,25	1
	Roches plutoniques a volcaniques basiques	24,00	1,48	0,00	8,02	33,50	0,40	39,58	5
	Roches volcanites et metavolcanites acides	10,72	0,22	-	-	10,94	0,02	2,05	1
	Roches quartzitiques (ou localement mylonitiques)	0,40	-	-	-	0,40	-	-	-
	Filons rocheux	22,90	1,88	0,54	2,40	27,72	-	-	-
	Depots de pente (colluvions aux alluvions)	75,64	-	92,25	-	167,89	-	-	-

Illustration 75 : Tableau d'attribution des notes du degré d'altération pour les formations géologiques littorales.

Le rapport linéaire sain – en érosion

En ce qui concerne l'attribution d'une note sur le degré d'érosion, une formation géologique se détache très nettement des autres. C'est celle qui correspond aux dépôts de pente des alluvions aux colluvions. Avec un pourcentage de 121 % de linéaire en érosion c'est-à-dire un linéaire en érosion supérieur à celui « sain », une note importante de 20 lui a été attribué car ce pourcentage correspond à 4 fois le second pourcentage le plus élevé. Pour les autres attributions de notes, le même schéma que celui-ci-dessus de l'altération, a pu être appliqué.

Avec une répartition relativement homogène, le pourcentage de linéaire en érosion par formation géologique permet l'attribution d'une note s'étalant de 1 à 5 (de faible à élevé respectivement) :

1. où la note de 1 (faible) correspond à la formation géologique des roches de type grès armoricain ;
2. de 2 pour des pourcentages de 4,17 à 6,36 telles que les roches granitiques et métamorphiques ;
3. de 3 pour un pourcentage de 14,97 pour les roches métamorphiques basiques ;
4. de 4 pour un pourcentage de 22,59 pour les roches sédimentaires (schisto-gréseuses) ;
5. et enfin de 5 pour un pourcentage de 31,48 pour les roches plutoniques à volcaniques basiques (Illustration 76).

		en km	*altéré*	*en érosion*	*altéré en éro*	*Total*	*En érosion/Non érodé*		Note_Ero
	Trait de côte (total 22, 29 et 35)	2084,22						en %	
Falaises rocheuses et meubles	Roches granitiques	406,80	34,20	10,90	7,50	459,40	0,04	4,17	2
	Roches metamorphiques	233,36	12,68	7,65	8,01	261,70	0,06	6,36	2
	Roches metamorphiques basiques	19,83	0,55	0,31	2,74	23,43	0,15	14,97	3
	Roches sédimentaires (schisto-gréseuses)	121,76	6,14	3,60	25,29	156,79	0,23	22,59	4
	Roches de type gres armoricain	61,33	0,84	0,88		63,05	0,01	1,42	1
	Roches volcano-sédimentaires	14,25	0,32	-	-	14,57	-	-	-
	Roches plutoniques a volcaniques basiques	24,00	1,48	0,00	8,02	33,50	0,31	31,48	5
	Roches volcanites et metavolcanites acides	10,72	0,22	-	-	10,94	-	-	-
	Roches quartzitiques (ou localement mylonitiques)	0,40	-	-	-	0,40	-	-	-
	Filons rocheux	22,90	1,88	0,54	2,40	27,72	-	-	-
	Depots de pente (colluvions aux alluvions)	75,64	-	92,25	-	167,89	1,22	121,96	20

Illustration 76 : Tableau d'attribution des notes du degré d'érosion pour les formations géologiques littorales.

La densité de mouvement de terrain

En ce qui concerne l'attribution d'une note correspondant à la densité de mouvements de terrain par kilomètre linéaire pour chaque formation géologique littorale, une formation géologique se détache très nettement des autres. C'est celle qui correspond aux formations très siliceuses (roches quartzitiques ou localement mylonitiques) et qui génèrent par leurs fortes résistances à l'érosion, localement des phénomènes d'érosion différentielle. Avec un nombre de 15 mouvements (de terrain) au kilomètre, une note importante de 20 lui a été attribuée. Pour les autres attributions de notes, le même schéma que ceux cités ci-dessus, a pu être appliqué (Illustration 77).

Avec une répartition relativement homogène, les densités de mouvements de terrain par formation géologique permettent l'attribution d'une note s'étalant de 1 à 5 (de faible à élevé respectivement):

1. où la note de 1 (faible) correspond aux formations géologiques des roches granitiques et roches volcanites et métavolcanites acides ;
2. de 2 aux roches métamorphiques, sédimentaires (schisto-gréseuses), de type grès armoricain, plutoniques à volcaniques basiques et aux dépôts de pente ;
3. de 3 aux roches métamorphiques basiques et volcano-sédimentaires ;
4. et enfin de 5 aux filons rocheux acides comme basiques.

			altéré	*en érosion*	*altéré en éro*	*Total*	Nbre/mvt	Mvt/km	Note_mvt
	Trait de côte (total 22, 29 et 35)	2084,22							
Falaises rocheuses et meubles	**Roches granitiques**	406,80	34,20	10,90	7,50	459,40	362	0,79	**1**
	Roches metamorphiques	233,36	12,68	7,65	8,01	261,70	633	2,42	**2**
	Roches metamorphiques basiques	19,83	0,55	0,31	2,74	23,43	101	4,31	**3**
	Roches sédimentaires (schisto-gréseuses)	121,76	6,14	3,60	25,29	156,79	514	3,28	**2**
	Roches de type gres armoricain	61,33	0,84	0,88		63,05	130	2,06	**2**
	Roches volcano-sédimentaires	14,25	0,32	-	-	14,57	54	3,71	**3**
	Roches plutoniques a volcaniques basiques	24,00	1,48	0,00	8,02	33,50	76	2,27	**2**
	Roches volcanites et metavolcanites acides	10,72	0,22	-	-	10,94	12	1,10	**1**
	Roches quartzitiques (ou localement mylonitiques)	0,40	-	-	-	0,40	6	15,00	**20**
	Filons rocheux	22,90	1,88	0,54	2,40	27,72	133	4,80	**5**
	Depots de pente (colluvions aux alluvions)	75,64	-	92,25	-	167,89	554	3,30	**2**

Illustration 77 : Tableau d'attribution des notes en fonction de la densité de mouvements de terrain (nombre de mouvements de terrain par kilomètre linéaire pour chaque formation géologique littorale).

On remarque que les hétérogénéités latérales dans les falaises comme la présence de filons qui soient basiques (c'est-à-dire en érosion négative) ou acides (c'est à dire en érosion positive) sont des lieux propices à la genèse de mouvements de terrain, comme pour les roches quartzitiques à localement mylonitiques.

La densité de cavités

La note correspondant à la densité de cavités par kilomètre linéaire pour chaque formation géologique littorale, le même schéma que ceux cités ci-dessus, a pu être appliqué (Illustration 78).

Avec une répartition relativement homogène, la densité de cavités (nombre de cavités par kilomètre linéaire pour chaque formation géologique littorale) permet l'attribution d'une note s'étalant de 1 à 5 (de faible à élevée respectivement) :

1. la note de 1 (faible) est attribuée aux formations géologiques telles que les roches granitiques, métamorphiques, métamorphiques basiques, plutoniques à volcaniques basiques et les dépôts de pente ;
2. de 2 pour les roches sédimentaires (schisto-gréseuses) et volcano-sédimentaires ;

3. de 3 pour les filons rocheux basiques comme acides ;
4. et enfin de 5 pour les roches de type grés armoricain.

			altéré	*en érosion*	*altéré en éro*	*Total*	Nbre/cav	Cav/km	Note_cav
	Trait de côte (total 22, 29 et 35)	2084,22							
Falaises rocheuses et meubles	**Roches granitiques**	406,80	34,20	10,90	7,50	459,40	398	0,87	**1**
	Roches metamorphiques	233,36	12,68	7,65	8,01	261,70	227	0,87	**1**
	Roches metamorphiques basiques	19,83	0,55	0,31	2,74	23,43	18	0,77	**1**
	Roches sédimentaires (schisto-gréseuses)	121,76	6,14	3,60	25,29	156,79	244	1,56	**2**
	Roches de type gres armoricain	61,33	0,84	0,88		63,05	355	5,63	**5**
	Roches volcano-sédimentaires	14,25	0,32	-	-	14,57	24	1,65	**2**
	Roches plutoniques a volcaniques basiques	24,00	1,48	0,00	8,02	33,50	19	0,57	**1**
	Roches volcanites et metavolcanites acides	10,72	0,22	-	-	10,94	1	-	**-**
	Roches quartzitiques (ou localement mylonitiques)	0,40	-	-	-	0,40	1	-	**-**
	Filons rocheux	22,90	1,88	0,54	2,40	27,72	62	2,24	**3**
	Depots de pente (colluvions aux alluvions)	75,64	-	92,25	-	167,89	55	0,33	**1**

Illustration 78 : Tableau d'attribution des notes en fonction de la densité cavités (nombre de cavités par kilomètre linéaire pour chaque formation géologique littorale).

Les résultats de cette étude sur la formation de cavités ou de sous cavage littoraux, corroborent les résultats déjà connus des inventaires des cavités souterraines départementaux (Schroetter et Peyras, 2010).

Ainsi les filons rocheux acides comme basiques montrent qu'ils sont propices à l'érosion différentielle, et que la formation géologique des roches de type grés armoricain qui bénéficie d'un inventaire précis, réalisé par les aires marines protégées, et qui avait été intégré à l'inventaire départemental des cavités souterraines des départements de l'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère, est une formation géologique qui en milieu littoral, génère des cavités dont les taille peuvent être importantes comme celles de la presqu'Île de Crozon (Schroetter et Peyras, 2010).

4.2.4. La prédisposition à l'érosion des falaises littorales

La note finale de prédisposition à l'érosion des formations géologiques littorales des départements de l'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère, est la moyenne arithmétique de l'ensemble de ces notes explicitées ci-dessus (Illustration 79).

Ainsi cette ***note finale*** de ***prédisposition à l'érosion des côtes rocheuses*** des départements de l'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère, montre que les familles de roches avec une faible prédisposition à l'érosion (***note finale de 1***) sont les roches de la famille des ***granites***, les roches ***métamorphiques*** (gneiss, micaschistes etc.), les ***volcanites*** et ***méta-volcanites acides***.

Ces trois formations géologiques sont suivies par aussi trois familles de roches (***note finale égale à 2***) : les roches de la famille des roches ***métamorphiques basiques***, les roches de ***type grés armoricain*** et les roches ***volcano-sédimentaires***.

Les familles de roches avec une ***note finale de 3*** soit une prédisposition à l'érosion moyenne sont les ***roches sédimentaires (schisto-gréseuses)*** et les roches ***plutoniques*** à ***volcaniques basiques***.

Les roches créant un contraste important avec les roches avoisinantes de parts leur nature et leur géométrie sont les roches ***quartzitiques localement mylonitiques*** et les ***filons rocheux***, qui génèrent une ***note finale de 4***.

Enfin, les ***dépôts de pente (des colluvions aux alluvions)***, qui localement peuvent atteindre des hauteurs de falaises de 10 m, ont ***la note finale la plus élevée de 5***. Cette

formation géologique littorales qui constitue le trait d'union mécanique mais géomorphologique entre les côtes rocheuses s.s. et les côtes meubles s.s., est la formation géologique littoral « à falaises », ayant les prédisposition à l'érosion la plus importante (Illustrations 80 à 81).

		en km	*altéré*	*en érosion*	*altéré en érosion*	*Total*	Moyenne	Note finale
	Trait de côte (total 22, 29 et 35)							
Falaises rocheuses et meubles	**Roches granitiques**	406,80	34,20	10,90	7,50	459,40	**1,5**	**1**
	Roches metamorphiques	233,36	12,68	7,65	8,01	261,70	**1,8**	**1**
	Roches metamorphiques basiques	19,83	0,55	0,31	2,74	23,43	**2,5**	**2**
	Roches sédimentaires (schisto-gréseuses)	121,76	6,14	3,60	25,29	156,79	**3,0**	**3**
	Roches de type gres armoricain	61,33	0,84	0,88		63,05	**2,3**	**2**
	Roches volcano-sédimentaires	14,25	0,32	-	-	14,57	**2,0**	**2**
	Roches plutoniques a volcaniques basiques	24,00	1,48	0,00	8,02	33,50	**3,3**	**3**
	Roches volcanites et metavolcanites acides	10,72	0,22	-	-	10,94	**1,0**	**1**
	Roches quartzitiques (ou localement mylonitiques)	0,40	-	-	-	0,40	**5,0**	**4**
	Filons rocheux	22,90	1,88	0,54	2,40	27,72	**4,0**	**4**
	Depots de pente (colluvions aux alluvions)	75,64	-	92,25	-	167,89	**7,7**	**5**

Illustration 79 : Note finale de prédisposition à l'érosion des formations géologiques littorales des départements de l'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère.

Illustration 80 : Note finale de prédisposition à l'érosion des côtes à falaises du compartiment C2.

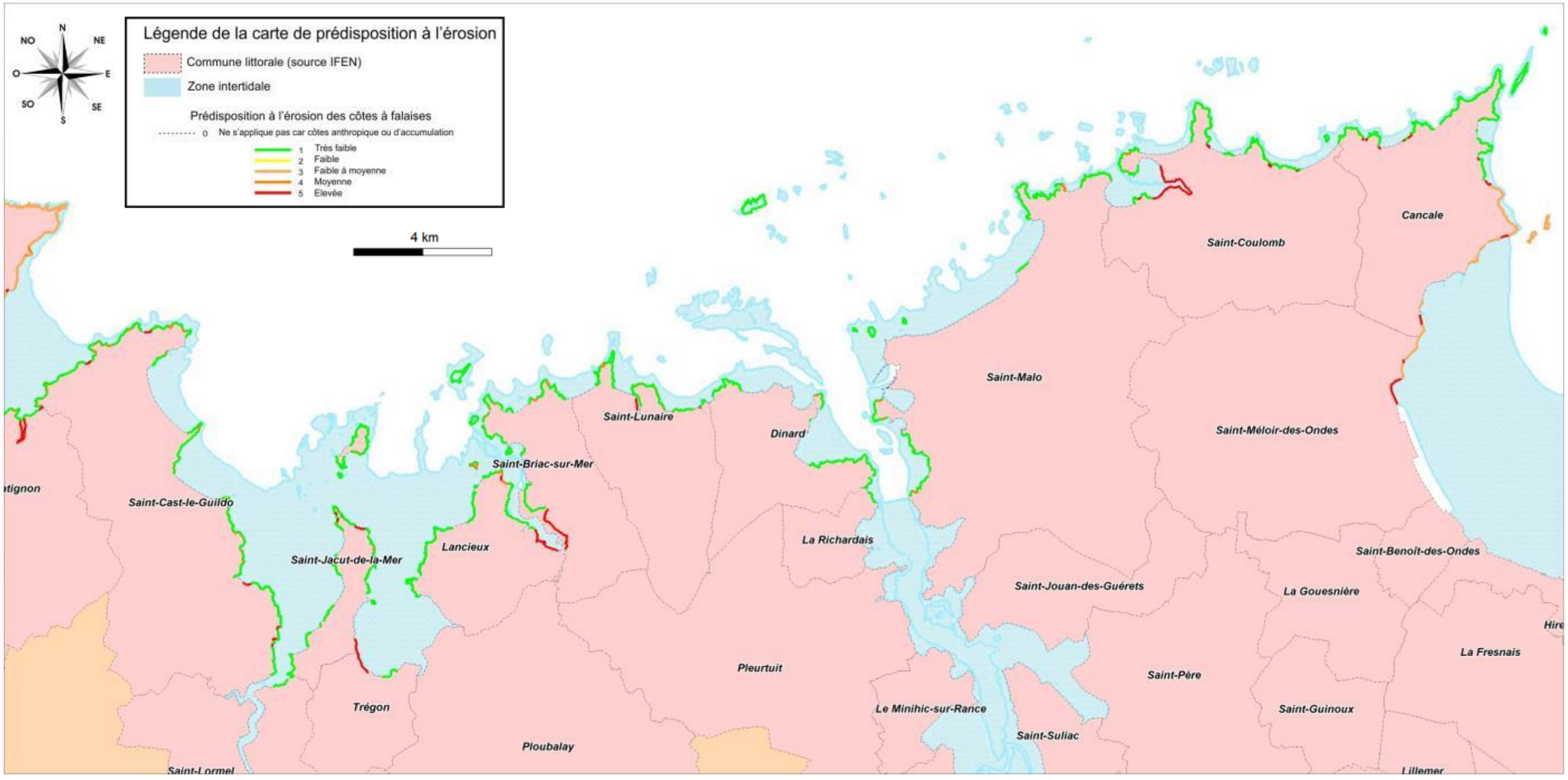


Illustration 81 : Note finale de prédisposition à l'érosion des côtes à falaises du compartiment C2.

4.3. LES COTES D'ACCUMULATION

La caractérisation et l'évolution du trait de côte sur les côtes sédimentaires du linéaire côtier des départements de l'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère, ont été réalisés pour une période semi-séculaire comprise entre 1950 et 2009. Ce travail a été réalisé par Emmanuel Blaise (BREST, UBO, IUEM), dans le cadre de son travail de doctorat, supervisé par le professeur Serge Suanez.

4.3.1. INTRODUCTION

L'analyse des parties de côtes d'accumulation du linéaire côtier des trois départements, a porté sur deux objectifs principaux :

- la caractérisation morpho-sédimentaire de ces côtes meubles ;
- et leur évolution littorale (accrétion, érosion, submersion marine) pour les périodes comprises entre 1949-2007 pour l'Ille-et-Vilaine, 1950-2008 pour les Côtes-d'Armor et 1952-2009 pour le Finistère.

Les seules données existantes, traitant de la cinématique du trait de côte à l'échelle de la région Bretagne, étaient celles du programme EROCOVUL (HENAFF *et al.,* 2006) et qui portait sur la période 1998-2003. Hélas, EROCOVUL ne renseignait que 30 % du linéaire breton, et montrait que 22 % de celui-ci était en érosion, 72 % était stable, et que 6 % était en accrétion. Mais malgré la synthèse de nombreuses études ponctuelles, il était difficile de faire une synthèse régionale car les méthodes d'analyse et/ou les indicateurs morphologiques du trait de côte utilisés pouvaient être très différents d'une étude à l'autre.

Ainsi, il nous est apparu donc nécessaire de mettre en place une méthode homogène à toutes les plages des trois départements.

La quantification de l'évolution du trait de côte des côtes meubles s'est faite pour une période moyenne identique (sur les soixante dernières années), au linéaire côtier à traiter, fonction de la disponibilité des campagnes de photographies aériennes et de leurs qualités.

Deux missions de photographies aériennes ortho-rectifiées pour les périodes comprises entre 1949-2007 pour l'Ille-et-Vilaine, 1950-2008 pour les Côtes-d'Armor et 1952-2009 pour le Finistère, ont été utilisées.

La première partie du travail a consisté à établir une classification des différents types de cotes sédimentaires en fonction de la morphologie et de la nature du matériel de ces dernières. Dans un second temps, il s'est agi de définir un (ou des) indicateur(s) permettant de définir la limite du trait de côte en fonction des caractéristiques morpho-sédimentaires du milieu. Enfin, le travail de numérisation et de quantification de la cinématique du trait de côte a été réalisé sous arc gis en suivant un protocole méthodologique aujourd'hui bien connu (Dolan *et al.* 1978 ; Cromwell *et al.* 1991 & 1997 ; Shosha *et al.* 1992 ; Fente *et al.* 1993 ; Douglas *et al.* 1998 ; Moore, 2000). Dans le cadre de cet article, nous ne présenterons que les résultats obtenus pour le département du Finistère.

4.3.2. MÉTHODOLOGIE

Typologie des différents types de côte sédimentaires

Afin d'avoir des critères de comparaison de l'analyse des différentes côtes d'accumulation, il a été nécessaire de créer une typologie des côtes basses qui s'est appuyer sur :

- une typologie préliminaire réalisée à l'aide de l'outil d'archives photographiques *Panoramio* disponible via le portail *Google Earth* ;
- les données photographiques acquises par le BRGM Bretagne dans le cadre de cette présente étude pour la validation de la typologie préliminaire ;
- et des validations-terrains finales lorsque s'était nécessaire.

Cette typologie a pris en compte plusieurs critères morpho-sédimentaires.

- l'exposition de la plage : plages de fond de baie, plages ouvertes, d'estuaire ou de poche (Illustration 82) ;
- un critère sédimentologique : plages de galets, plages de sables ou plages mixtes (sables et galets) ;
- et enfin un dernier critère morphologique tel que plages adossées (à une falaise), cordons dunaires, formes fuyantes (flèches de sables et de galets, tombolos), etc. (Illustration 82).

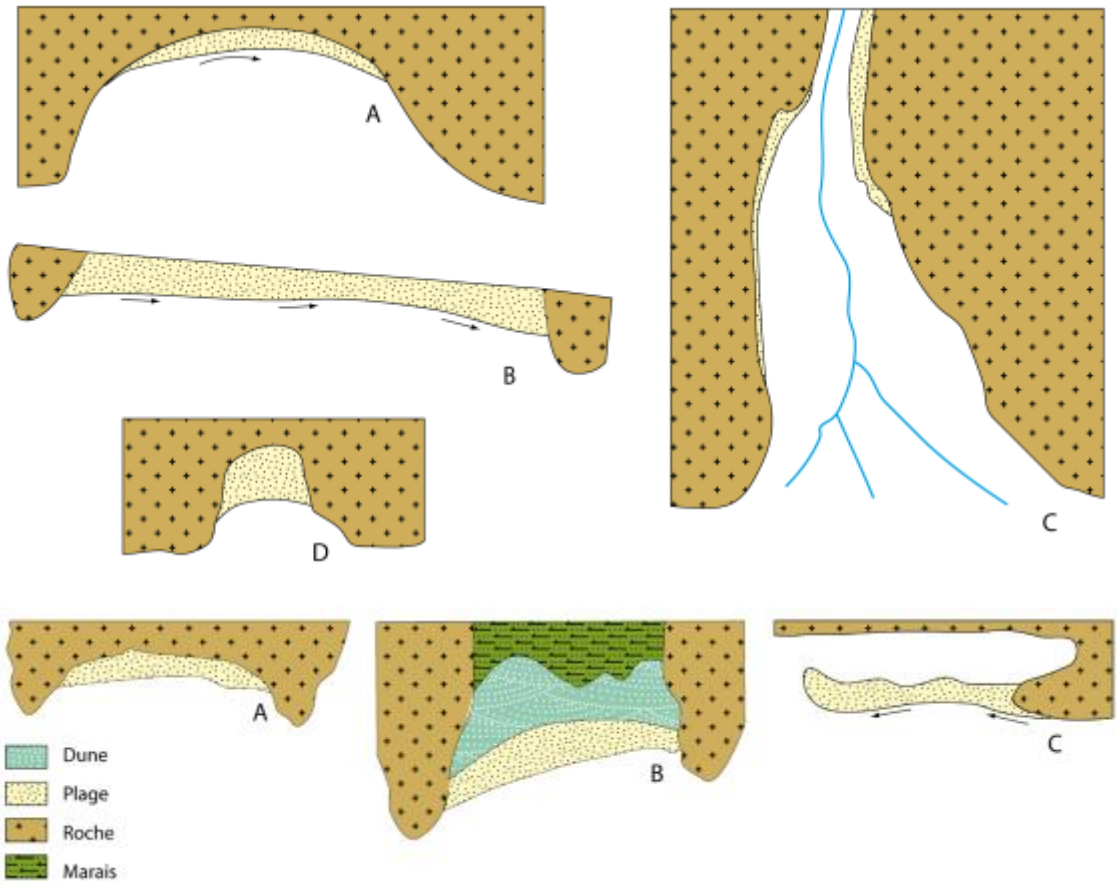


Illustration 82 : En haut : physionomie des plages selon l'exposition : A. plage de fond de baie – B. plage ouverte – C. plage d'estuaire – D. plage de poche ; En bas : physionomie des plages selon la morphologie : A. plage adossée – B. cordon dunaire – C. forme fuyante.

Choix d'une ligne de référence

En géomorphologie, le trait de côte repose obligatoirement sur une limite physiographique « fixe » que l'on peut suivre dans le temps et dans l'espace.

Néanmoins, cette limite diffère en fonction du type de côte et du contexte marégraphique. De très nombreuses études portant notamment sur l'analyse de la cinématique du trait de côte ont proposé un très large éventail de ligne de référence pouvant être classées en trois grandes familles que sont les indicateurs morphologiques, biologiques, et la position des différents niveaux d'eau (BOAK & TURNER, 2005).

Pour un travail uniforme, de typologie de plages en typologie de plages, une limite du trait de côte adaptée a été prise pour chaque environnement littoral.

La limite de végétation dunaire a été retenue pour les cordons dunaires, qui peut correspondre, soit au somment de l'escarpement de falaise lorsque la dune est érodée, soit à la limite des dunes embryonnaires de haut de plage lorsque le système plage/dune est en accrétion (Illustration ci-dessous).

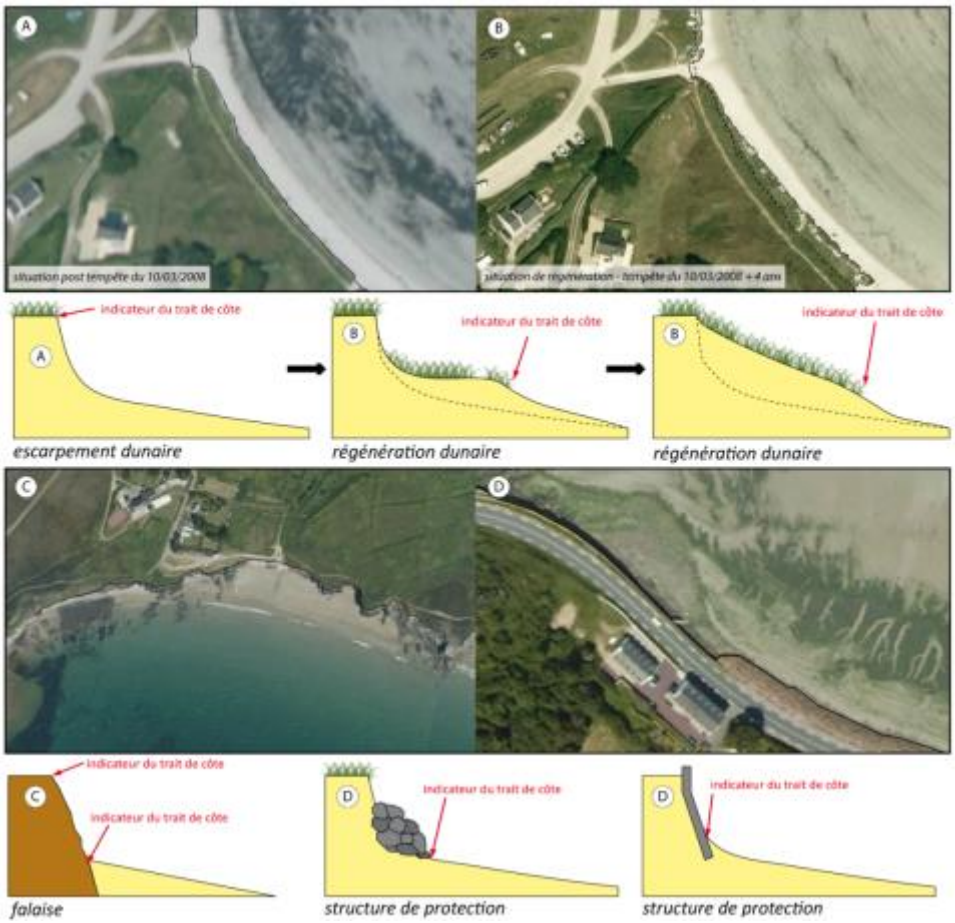


Illustration 83 : Limite de trait de côte retenue : A et B. limite de la végétation dunaire – C. sommet ou pied de falaise – D. pied de l'aménagement de protection.

La limite de végétation constitue la limite la plus pertinente pour l'étude de la dynamique du trait de côte en milieux dunaires en milieu macro tidal, ceci notamment en raison du contraste élevé et perceptible entre le sable (clair) et la végétation (sombre) sur les photographies aériennes (Moore *et al*., 1999 ; Priest, 1999 ; Boak & Turner, 2005). D'autres parts, la végétation saisonnière quasi invisible sur les photographies aériennes anciennes, est facilement dissociable de la végétation pérenne sur les ortho-photographies de 2009.

La végétation supra littorale a été choisie pour les cordons de galets « végétalisés » ainsi que pour les crêtes sommitales falaises meubles. Pour les falaises rocheuses, le pied de falaise ou le haut de falaise (suivant le contraste et l'exposition de l'ortho-photographie de 1952) ont été retenues. Pour les formes fuyantes mobiles telles que les flèches de galets à pointe libre, c'est le pied du revers qui a été choisi (Stéphan, 2011). Pour finir, lorsque le trait de côte était fortement anthropisé, le contact entre la plage et l'ouvrage a été retenu (Moore *et al.,* 1999) (Illustration 83).

Outil utilisé pour l'évolution du trait de côte

La digitalisation du trait de côte a été réalisée à même l'écran à l'aide du logiciel ArcGIS d'ESRI, à partir de deux séries d'ortho-photographies IGN (missions de mai à juin 1952 et de mai 2009) référencées en Lambert 93 (Illustration 84). Les marges d'erreur inhérentes à l'ortho-correction et au géo-référencement des photographies aériennes, ainsi qu'à la digitalisation du trait de côte, ont été estimées à +/-5 m.

Année	Département	Nature
1949	35	Photographie aérienne noir et blanc ortho-rectifiée -IGN
1950	22	Photographie aérienne noir et blanc ortho-rectifiée -IGN
1952	29	Photographie aérienne noir et blanc ortho-rectifiée -IGN
2007	35	Ortho-photographie couleur IGN
2008	22	Ortho-photographie couleur IGN
2009	29	Ortho-photographie couleur IGN

Illustration 84 : Campagnes photographiques disponibles.

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 (Douglas *et al.,* 1998 ; 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 est de 50 m. Cette valeur est celle de départ ; il est possible que certains transects aient été espacés ou rapprochés suivant la pertinence de leur position automatique (Illustration 85).

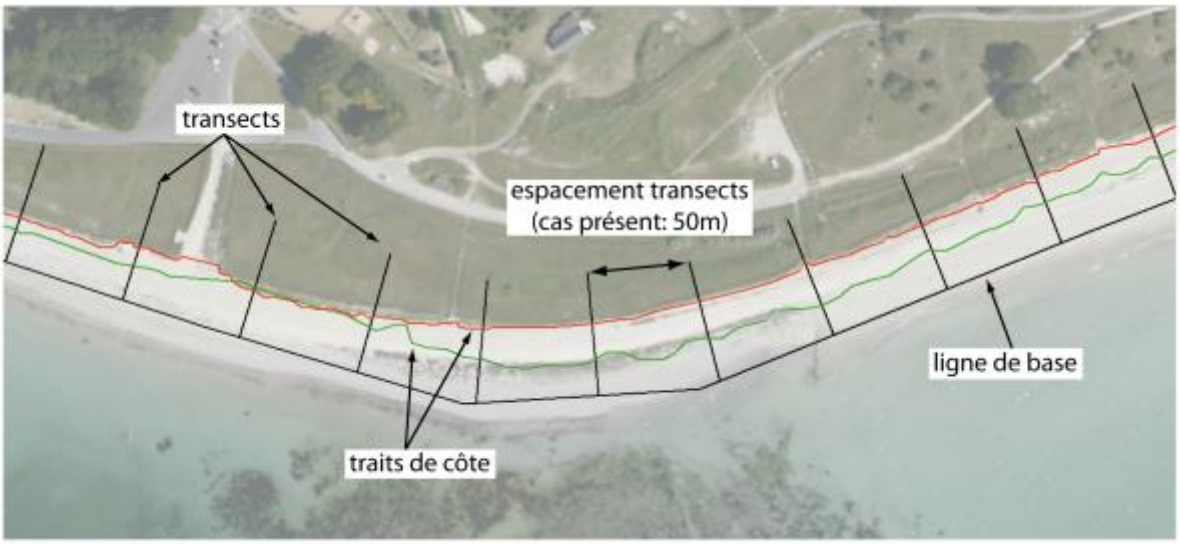


Illustration 85 : Principe du Digital Shoreline Analysis System.

Nombre de plages par compartiments

La typologie présentée ci-dessus, a permis d'inventorier les plages pour chaque compartiment mais aussi de les classer entre elles. Il est possible d'établir pour chaque compartiment, le bilan ci-dessous (Illustration 86).

Le compartiment C1 : baie du Mont-Saint-Michel possède 6 plages sur sa façade maritime, dont la raison principale est la présence d'une structure anthropique qui « artificialise » le trait de côte à près de 99% des côtes d'accumulation ou meubles.

compartiment	nombre de plages par compartiment	linéaire côtier total, par compartiment (m)	linéaire côtier renseigné, par compartiment (m)	% du linéaire renseigné par rapport au linéaire total
C1	6 plages	39094	63003	62.05%
C2	61 plages	35199	369960	9.51%
C3	62 plages	45779	287151	15.94%
C4	110 plages	56160	505905	11.10%
C5	45 plages	20876	95833	21.78%
C6	134 plages	89662	346084	25.91%
C7	40 plages	296689	563828	52.62%
C8	16 plages	30475	101226	30.11%
C9	60 plages	49529	386674	12.81%
TOTAL	**534**	**663463**	**2719664**	

Illustration 86 : Synthèse du linéaire côtier de la zone d'étude.

4.3.3. CINEMATIQUE DU TRAIT DE COTE DU COMPARTIMENT C2

La cinématique du trait de côte a été réalisée par convention d'est en ouest en partant du compartiment C1 le plus à l'est vers le compartiment C9.

Les graphiques ci-dessous illustrent cette cinématique du trait de côte, où les nombres en abscisse correspondent à la position de chaque transect (espacés de 50 m) perpendiculaires à la plage et les chiffres en ordonnées au recul ou avancé du trait de côte (en m).

Le trait de couleur « bleu » correspond au trait historique (de 1949) alors que celui rouge correspond au trait subactuel (ici de 2007).

Le linéaire pris en compte dans l'étude est d'environ 35 km sur un linéaire total de 45 km pour cette zone. Ce compartiment comporte essentiellement des plages de fond de baies (60 %) ainsi que de plages ouvertes (23 %). Ces plages se composent majoritairement de matériaux sableux (90 %) et prennent en général la forme de cordons dunaires (57 %), et dans une moindre mesure de plages de sables adossées (41 %) (Illustration 87).

Illustration 87 : Évolution et caractérisation des côtes meubles du compartiement C2.

La dynamique du trait de côte

Les résultats montrent qu'une part importante du linéaire est artificialisée (50 %). La présence de stations balnéaires importantes sur cette partie du littoral peut expliquer l'anthropisation du trait de côte.

Malgré ce constat, 26 % du littoral du compartiment 2 est en érosion ; principalement les plages sableuses (27 %) (Illustration 88).

Dans le détail, on note une artificialisation plus importante pour les plages ouvertes et les plages de fond de baie.

Bien évidemment, ces dernières sont également les types de plage majoritairement concernés par l'érosion (plages ouvertes : 29 % ; plages de fond de baie : 20 %).

En outre, on observe que 29 % des cordons dunaires et 18% des plages adossées sont en érosion, ce qui suit la tendance générale pour ce compartiment.

Les graphiques d'évolution de chaque plage du compartiment C2 sont donnés en annexe.

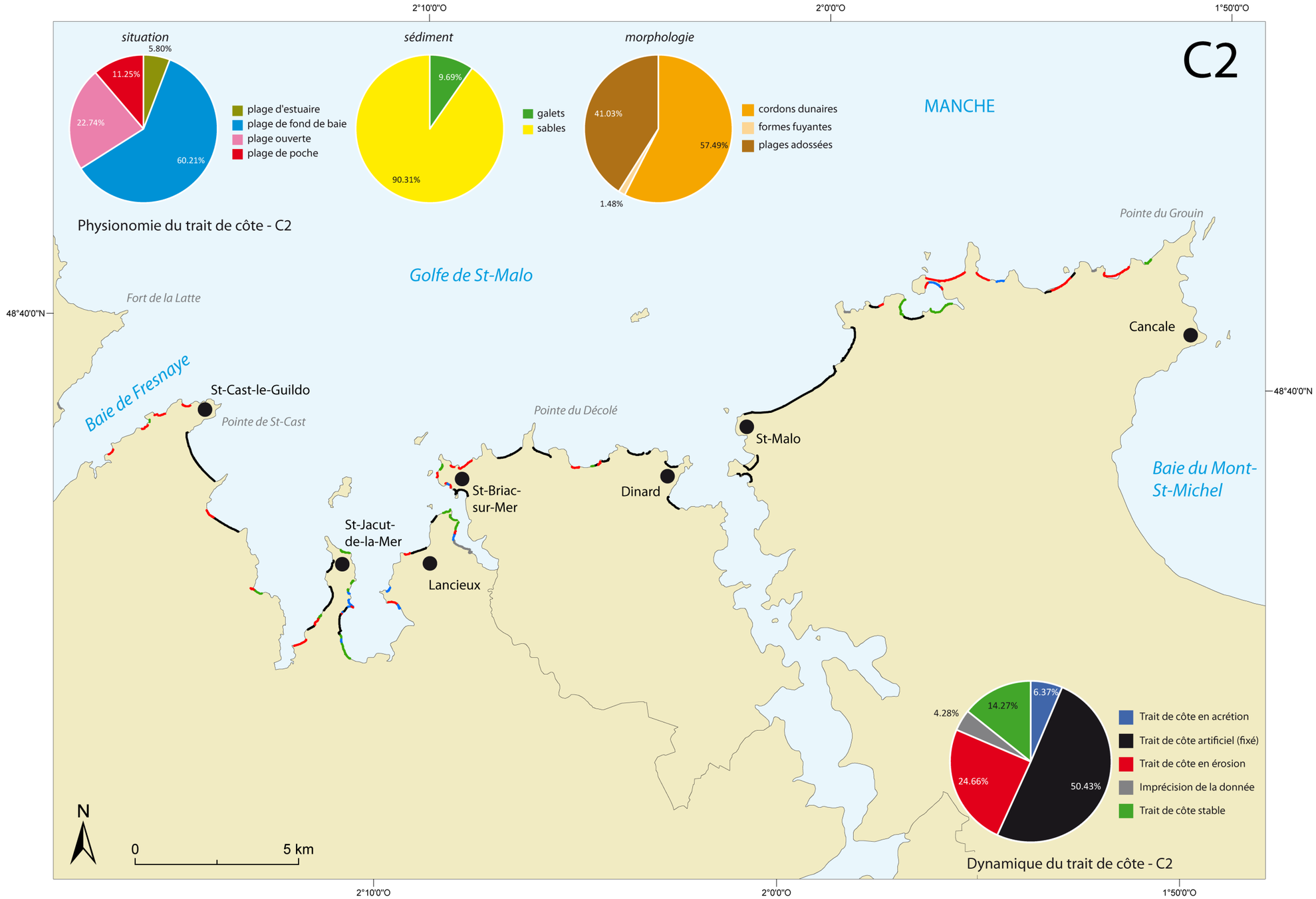


Illustration 88 : Synthèse de la géomorphologie des côtes meubles du trait de côte du compartiment C2.

5. Évènements tempétueux dommageables

5.1. INTRODUCTION

L'une des étapes dans la réalisation de cet atlas consistait en la création et la synthèse l'utilisation d'une base de données des événements tempétueux dommageables.

Trois sources principales ont alimentées cette base de données : la base de données du BRGM, créée dans le cadre de ce projet (BD BRGM), la base de données de l'UBO (BD UBO) et une base de données réalisée dans le cadre de l'établissement des Plans de Prévention des Risques Littoraux de Bretagne (Marais de Dol de Bretagne, Baie de Saint-Brieuc et de la commune de Saint-Malo).

Quatre étapes distinctes, ont été nécessaires :

1. la première étape de révision de la Base de données de l'UBO, par un travail (1) d'uniformisation avec la BD BRGM, (2) de correction des erreurs (fautes d'orthographes, doublons éventuels, etc.) et (3) de géoréférencement d'évènements complémentaires (500 environ) ;
2. la seconde étape a été : à partir de l'inventaire des évènements de tempêtes réalisés dans le cadre des PPRL, de (1) créer une base de données, structurée sur celle du BRGM, et (2) de géoréférencer les points extraits (380 points environ) ;
3. la troisième partie, a été de compiler ces trois sources de données et enfin d'en faire l'analyse statistique et de faire ressortir des éléments pouvant être exploités dans la construction de l'atlas des aléas littoraux ;
4. enfin, la quatrième étape, a été de réaliser des fiches synthétiques, des principaux évènements tempétueux.

5.2. METHODOLOGIE

5.2.1. La Base de Donnée de l'UBO (Université Bretagne Occidentale)

La base de données fournie au BRGM en provenance de l'UBO, n'avait pas de coordonnées géographiques. Cependant, il a été possible de récupérer une version antérieure à cette base de données, géoréférencée (fournie par la DDTM 29), et le première tâche a été de faire le lien entre les deux bases de différentes versions et d'en extraire les évènements qui n'avait toujours pas de coordonnés géographiques, afin de leur attribuer une localisation.

Pointage des événements sans coordonnées.

Le géoréférencement s'est fait sous SIG, à partir des cartes IGN au 1/25 000 (BD Scan25-IGN) et en s'appuyant sur des sites internet libre d'imagerie spatiale (Google Earth, Bing, Géoportail etc.). 492 points ont été ainsi localisés sur les 1994 de départ.

5.2.2. Les évènements recensés lors de PPRL

Le PPRL de Saint-Malo, contenait plus 70 tempêtes et 109 événements enregistrés, celui du Marais de Dol de Bretagne, 90 événements de tempêtes s'étant déroulés entre le 25 décembre 1081 et le 25 avril 1951, et enfin celui de la baie de Saint-Brieuc 106 événements entre le 18 août 1773 au 28 février 2010.

Chaque événement a été localisé et intégré dans la base de données selon un format prédéfini.

5.2.3. Création d'un format pour une base de données commune

Lors de différents comités techniques, il a été décidé d'attribuer différents champs attributaires (champs d'information) aux évènements recensés. En fonction des différents partenaires, le BRGM a créé les champs listés ci-dessous (Illustration 90).

Ces champs sont regroupés en fonction de différentes thématiques, telles que : Etat de la mer (coefficient de marée, niveau théorique de la mer au moment de l'évènement, surcote), Météo (vitesses des vents, direction, pression atmosphérique etc.), Aléa et facteur (description de l'évènement : érosion, submersion, forte houle etc.), ou encore Localisation (Département, commune, compartiment etc.).

Certains champs peuvent paraitre redondants mais ils ont été maintenus car ils correspondent à des champs des bases de données originelles. Deux champs synthétiques ont été créés celui :

- ***Aléa_interpété*** sur lequel il est facile de faire une analyse thématique et contenant la typologie de l'Aléa : Erosion, submersion marine, crue et submersion, naufrages en mer, à quai etc. ;
- et celui ***Localisation_description*** qui contient une description très précise de la localisation de l'impact avec une description précise des dégâts.

Identifiant	**Incrément :** *Numéro de ligne de l'événement en question*
Tri par localisation	**XL2E V78Paris et YL2E V78Paris** : *Coordonnées Lambert 2 Etendu (Base BRGM)*
	XL93Euro et YL93Euro : *Coordonnées Lambert 93 (Base BRGM)*
	Prec Taille Obj en m : *Taille de l'objet ayant subi des dégâts (Base BRGM)*
	Obj Prec : *Objet ayant subi des dégâts (Base BRGM)*
	Insee : *Numéro INSEE*
	Comm : *Nom de la commune*
	Depart : *Département*
	Compart : *Numéro du compartiment (Base BRGM)*
Localisation précise et Dégats	**Localisation_description** : *Localisation précise de l'événement sur la commune (Base BRGM)*
Qualité de la donnée	**Qualité** : *Qualité des informations au sujet de l'événement (numéro entre 1 et 4, 1 bonne qualité et 4 moins bonne qualité) (Base BRGM)*
Aléa et facteur	**Aléa interprété** : *Type de l'aléa selon une nomenclature établie par le BRGM (Aménagements, Crues, Éolien/Crues, Érosion, Érosion/Naufrage au mouillage, Naufrage, Naufrage au mouillage, Naufrage en mer, Submersion, Submersion/Crues, Tempête)(Base BRGM)*
	Facteur Origine : *Facteur à l'origine de l'événement (Base UBO)*
	Type Facteur : *Marin ou météorologique, ou les deux (Base UBO)*
	Facteur : *Caractérise l'événement (Base UBO)*
	Description_dégâts : *Description des dégâts occasionnés par l'événement (Base UBO)*
	Type dégâts : *Selon une certaine dénomination (Dégâts côtiers, Submersion etc.)(Base UBO)*
	Infra_mise_en_danger : *Infrastructure ayant subi des dégâts ou étant menacé à la suite de l'événement (Base UBO)*
Date	**Jour, mois, année** : *Date, plus ou moins précise de l'événement (Base BRGM)*
Météo	**Durée_tempête_en_jour** : *Durée de l'événement si elle dépasse un jour.*
	Direction_vent :
	Vitesse_vent_km_h : *Vitesse ou force du vent si la vitesse n'est pas clairement énoncé.*
	Vitesse_vent_m_s :
	Baromètre_hPa : *Pression de l'air en hPa.*
Etat de la mer	**Coefficients_marée** : *Coefficient le plus haut sur la durée de la tempête.*
	Hauteur_mer : *Hauteur de mer théorique la plus importante sur la durée de la tempête.*
	Surcôte_m : *Hauteur de la surcôte du niveau de la mer.*
	Houle_vague :
Dégats, coûts et victimes	**Dégâts** (?) :
	Coûts : *Coûts des dégâts dans la monnaie de l'époque.*
	Nb_victimes :
Traçabilité	**Contexte_étude** : *ATLAS BRGM*
	Auteur : *Nom et Prénom de la ligne*
	Travail_harmo : *Personne(s) ayant également travaillé sur les données.*
	o_ou_n : *Fiche oui ou non*
Sources des données	**Sources** : *De 1 à 10 sources pour les informations de la ligne.*

Illustration 89 : Champs créés pour chaque évènement tempétuaux dommageable : à gauche : leur thématique, à droite : le nom de chaque champ.

5.2.4. Établissement de fiches récapitulatives

Pour synthétiser les données, les évènements tempétueux dommageables sur lesquels il y avait le plus de données récoltées ou qui avaient l'impact le plus important, ont été rassemblés sous forme de fiche, regroupant le plus d'information possible de l'évènement.

Une fiche contient :

1. une partie purement informative sur la date, les communes impactées avec une carte, l'auteur de la fiche et la date de réalisation ;
2. une deuxième partie sur les conditions de la tempêtes quand elles étaient disponibles : Température, direction et vitesse du vent, pression, et enfin le coefficient de marée ;
3. une troisième partie sur les dégâts de la tempête : détails des dégâts par communes, coût et victimes éventuelles ;

4. et une dernière partie sur les sources : regroupement de toutes les sources (journaux, rapports, ouvrages, photos) parlant de la tempête.

En prenant les tempêtes avec le plus grand nombres d'événements et des sources convenables (quantitativement), on a ainsi pu établir 27 fiches donc 27 tempêtes pour la Bretagne mais où à chaque tempête correspond plusieurs évènements et sur plusieurs communes.

5.3. ANALYSE DES RESULTATS

La base de données ainsi constituée permet de faire une analyse des données en exploitant l'ensemble des champs attributaires créés. La base de données sous Système Géographique d'Information (SIG), peut être exportée sous Excel, pour un analyse statistique plus souple.et de dégager des tendances sur les tempêtes.

Analyse temporelle des évènements de tempêtes :

L'analyse temporelle à l'échelle historique est difficilement décryptable (illustration 80 en haut). Plus le temps passe, et plus les moyens technologiques évoluent et plus certainement, il existe de l'information sur les évènements de tempêtes. Le pic de la période 2000-2009 est dû à la tempête Johanna du 10 mars 2008 qui a été extrêmement bien répertoriée, mais aussi à la prise de conscience des populations sur les changements climatiques grandement médiatisés. Si on regarde la répartition de plus près ; on remarque qu'il existe des périodes entières dépourvues de tempêtes. Elles peuvent correspondre à une documentation inexistante ou perdue, à une période de guerre où l'homme avait d'autres préoccupations comme la Révolution Française, les Première et Deuxième Guerres Mondiales. En effet, le nombre de tempêtes diminue pendant les deux grandes et augmente entre chacune d'entre-elles.

Si l'analyse temporelle se fait à l'échelle de l'année, on remarque cette fois que les tempêtes surviennent surtout en Automne et Hiver, que les périodes printanières et estivales sont globalement épargnées. Les précipitations étant plus importantes en automne et hiver ; montre que c'est la période où la Bretagne est soumise aux agents météo-marins en provenance de l'Atlantique. Ainsi la mer doit aussi être plus impétueuse, et les pressions plus susceptibles de baisser durant ces saisons. On remarque que la fin de l'hiver comporte le plus de tempêtes, ce qui correspond aux périodes de l'année enregistrant les plus fortes variations climatiques Une analyse peut être faite aussi en relation avec des niveaux marins élevés soit due à la marée soit due à une dépression atmosphérique ou à la conjoncture des deux (Illustration 91).

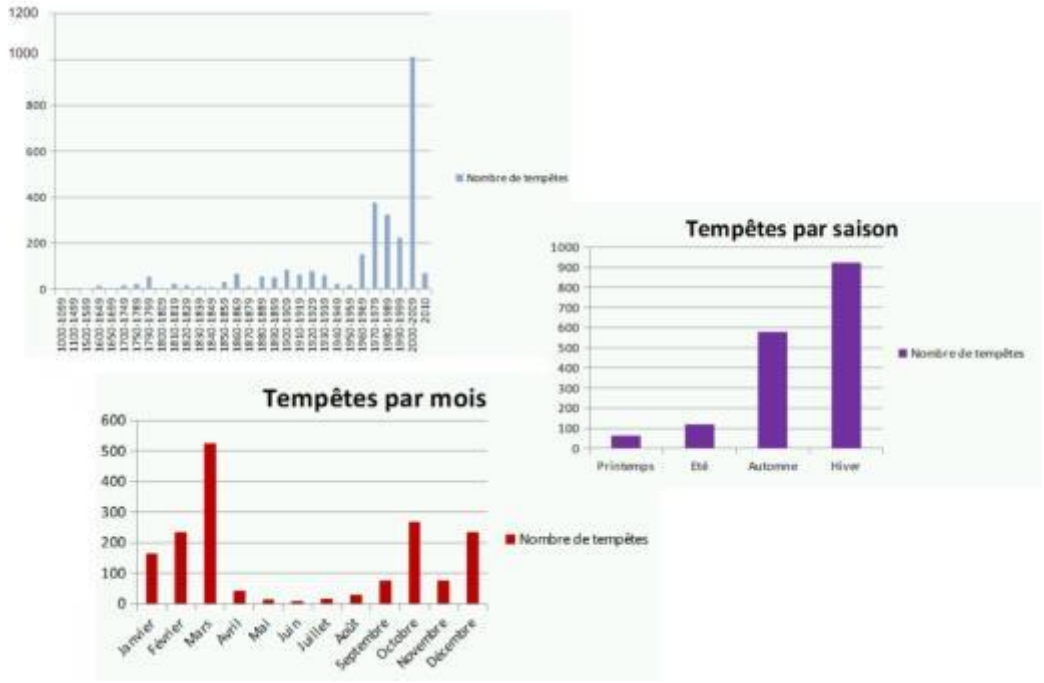


Illustration 90 : En haut : nombres de tempêtes par décennie ; à droite : Nombre de tempêtes par saison, enfin en bas : Nombre de tempêtes par mois de d'année par compartiments.

Analyse spatiale des évènements de tempêtes :

L'analyse spatiale montre que le nombre de tempête est plus important dans le Finistère que dans les autres départements. Mais une analyse plus poussée serait de faire des rapports nombre d'évènements et longueur de côtes (d'exposition). De plus, il est possible que la sensibilité aux agents météo-marins dans le Finistère, par ses habitants, soit plus importante d'ailleurs. On peut cependant dire que les compartiments 1 et 3 semblent peu touchés par rapport à leur taille. Ces deux compartiments n'ont pas d'exposition directe sur l'océan Atlantique. Les compartiments les plus exposés semblent être ceux du Finistère Nord et Sud (Illustration 91).

Illustration 91 : En haut : nombre de tempêtes par département, en bas : Nombre de tempête.

Enfin, pour l'analyse en fonction des types d'aléas (Illustration 92), l'aléa érosion prédomine nettement sur celui de l'aléa submersion. En effet, l'aléa submersion est certainement plus possible pendant une période où il existe un haut niveau marin de marée c'est-à-dire environ 4 fois dans l'année, il est donc intéressant et possible d'ajouter un facteur temporel à cette analyse.

On remarque alors que la plupart des érosions et submersions enregistrées se sont produites après 1950.

L'évolution de la société vers une société des loisirs avec l'arrivée des congés payés, à entrainer une évolution de l'urbanisation. L'urbanisation et l'augmentation de la population ont fait que les populations se sont installées plus près des côtes, dans les zones parfois inondables ou exposées à des tempêtes. Ainsi certainement avant les 50, les hommes prenaient la mer pour gagner leur vie et les aléas ont été plus des naufrages en mer, naufrages au mouillage et autres naufrages que des dégâts côtiers. L'activité côtière de la Bretagne était principalement la pêche, ce qui impliquait de plus nombreux bateaux, et plus souvent en mer, donc plus de risque de naufrages. Et après 1950, l'activité de l'industrie de la pêche a commencé à baisser et les bateaux sont devenus de plus en plus sûrs.

Ainsi après les années 50, les enjeux sont venus s'installer à proximité des aléas, créant des zones à risques.

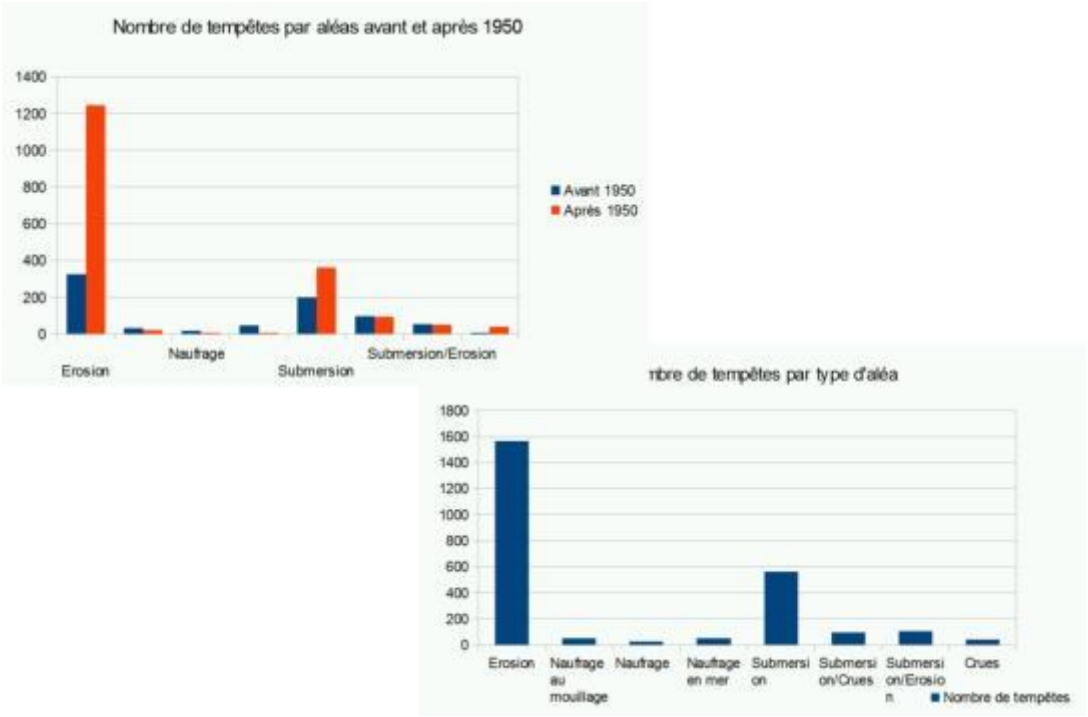


Illustration 92 : En haut : tpe d'aléa avant et après 1950 - En bas : type d'aléa par tempêtes.

Chaque événement, inventorié et géoréferencé est une occurrence d'un évènement lié à un évènement climatique ou météo-marin en un lieu précis. Il demeure important de rester prudent sur les résultats, car ils dépendent surtout de la qualité avec laquelle elle a été décrite. Par exemple, la tempête du 10 mars 2008 comporte plusieurs centaines d'occurrences, alors que d'autres évènements ne sont relevés qu'en quelques endroits.

5.4. REPARTITION DES ÉVÈNEMENTS SUR LE COMPARTIMENT C2

Les évènements tempétueux dommageables à la côte ne sont pas pour autant la conséquence des plus fortes tempêtes que la Bretagne ait connue. La conjoncture entre niveau de mer élevé (coefficient important) et coup de vent ou train de houles de l'Atlantique, sont des facteurs déterminants dans la genèse d'évènements dommageables à la côte.

Les évènements qui touchent le compartiment C2 sont des évènements recensés pour la réalisation du PPRL de Saint-Malo, recoupés avec la BD de F. Bouttes (CETMEF) et celle du BRGM.

284 évènements sont recensés sur le compartiment C2. Pour l'essentiel, ces évènements se situent sur l'agglomération de Saint-Malo pour deux raisons principales.

La première est le fait que Saint-Malo est la principale agglomération et à ainsi le linéaire de côte urbanisée le plus exposé, et la seconde raison est une façade maritime exposée aux agents météo-marins.

En effet, les côtes du compartiment les plus exposées sont celles orientées Est-Ouest depuis Saint-Jacut-de-la-Mer jusqu'à la pointe du Grouin.

Les sources proviennent principalement du PPR SM de Saint-Malo (109), de la Bibliothèque Nationale de France (BNF Gallica) (43), et d'une étude SOCCOTEC-Laboratoire de géomorphologie de Dinard (46) et des Archives Départementale d'Ille-et-Vilaine et des Côtes-d'Armor (27).

Ce sont principalement des ouvrages documentaires, des correspondances de dignitaires de l'État, des rapports d'ingénierie, ou encore des articles de journaux. Les données de coefficient de marée proviennent du SHOM.

L'ensemble des évènements est localisé sur les digues du Sillon et de Paramé, et sur la digue de Saint-Jacut-de-la-Mer.

Les évènements s'étalent dans le temps pour le plus ancien est autour de 1060 et le plus récent date de 2010.

112 sont des submersions ou submersion/Erosion c'est-à-dire brèche puis inondation par la mer, 129 phénomènes d'érosion. Les autres évènements peuvent correspondre à des naufrages ou autres etc. (Illustration 93).

L'un des évènements les plus impressionnants est la rupture de la digue de Paramé du 29 octobre 1905. L'article de « Le Salut », intitulé « *La digue de Paramé »,* décrivait ainsi l'évènement :

« Dégâts énormes. C'est cinquante mètres de digue effondrée. Vingt clôtures détruites. Les causes du sinistre : lames de fond ou affaissement du sol. […]

… les énormes dégâts occasionnés par la marée de lundi matin à la partie de la digue de Paramé comprise entre les Chalets Indiens, propriété de M. Périvier, ancien directeur du Figaro, et la plage de Rochebonne …

… Sur une longueur de plus de cent mètres, en effet, la superbe digue en maçonnerie qui continue, jusqu'à Rochebonne, le Sillon de Saint-Malo, et constitue la plus belle promenade de notre pays, est entièrement détruite. La mer, à qui rien ne résiste, est venue à bout, en quelques heures, de cette chaussée superbe, d'apparence solide, semblait délier les chocs les plus violents, les assauts les plus terribles. Sous la poussée des flots, toute cette masse s'est effondrée comme un château de cartes ; d'énorme bloc de pierre, qui nécessiteront, pour les relever, l'emploi de palans puissants, ont été soulevés comme des plumes par les lames et entrainées les unes dans la grève, les autres à l'autre extrémité de la digue, large pourtant de plus de quinze mètres à cet endroit.

En face de la villa Ker-Jeannette, la chaussée s'est affaissée, laissant la marne à nu et formant une large et profonde tranchée. Toutes les villas riveraines ont été plus ou moins endommagées ; les murs de clôture se sont écroulés ; les grilles ont été arrachées ; les urnes destinées à recevoir des fleurs enlevées et brisées ; les réverbères tordus, les plaques indicatrices des maisons fendues, les jardins balayés par les vagues, les caves inondées.

Le sable, arraché de la grève, a été projeté dans les propriétés voisines et les chemins qui relient le boulevard Chateaubriand à la digue. Le niveau de la grève s'est abaissé de plus d'un mètre, laissant à nu la base des escaliers pratiqués dans la digue. De grosses pierres ont été poussées dans ces routes ; telle était la puissance des lames, qu'elles sont venues, au plus fort de la marée, mourir près de l'aubette du Casino et remplir l'immonde ruisseau qui borde la route en cet endroit.

… Qu'eût-ce été si, au lieu de souffler du Sud-Est, le vent avait soufflé en tempête du Nord ou du Nord-Ouest ? La digue entière, dont la solidité est, hélas ! Douteuse, y passait, et c'est par millions que l'on compterait les dégâts. Tels qu'ils sont, les travaux de déblayage, de réfection et de consolidation, ne nous coûterons pas moins de deux à trois cent mille francs, sans compter les dépenses qui incomberont aux propriétaires riverains. Les villas sont rares, en effet, du Grand-Hotel à l'extrémité de la plage de Rochebonne, qui n'ont pas eu à souffrir du désastre, et les pertes privées sont très importantes.

Au Grand-Hôtel, une partie de la balustrade a été enlevée ; la pyramide des bains a été transportée, comme un fétu de paille, jusqu'à la barrière de la route qui sépare cet établissement du Casino. Au Casino, la porte de la terrasse donnant sur la digue a seule été arrachée. Entre les villas Pomponnette et Vacances l'eau inondait la route, jusqu'à l'hôtel Notre-Dame-des-grèves. Tous les jardins en bordure de la digue étaient envahis par la mer ; les tamaris et les fusains sont détruits ; les rares fleurs qui poussaient, brûlées.

À partir des Chalets Indiens, le spectacle est positivement navrant. Rien n'a résisté à la fureur des flots. Les murs de clôture du chalet de M. Périvier, des villas Ker-Jeannette, la Brise, etc., se sont écroulés ; les grilles gisent lamentablement sur le sol, parmi des débris de toutes sortes. A Sans-Souci, la plaque de marbre portant le nom de la villa a été brisée en deux ; des vases en font, scellés dans les piliers, ont été arrachés et projetés cinquante mètres plus loin. A la villa Saint-James, propriété de M. Cadot, où M. Etienne, ministre de l'Intérieur, est venu passer la saison dernière, toute la clôture en maçonnerie a disparu. Détail curieux : des paravents en planches qui protégeaient les arbres du jardin contre le vent, n'ont pas bougé.

L'hôtel de l'Océan, situé à l'extrémité de la digue, a été très éprouvé. La terrasse vitrée, qui servait de café et de restaurant, a été défoncée par les lames ; la toiture s'est effondrée, les cloisons ont été arrachées, et l'immeuble envahi par le sable. A côté, la balustrade en ciment de la villa Les Mouettes, et la barrière en bois de la villa Belle-Plage, placées pourtant à 4 mètres de hauteur au-dessus de la digue, et à six du niveau de la plage, ont été totalement brisées. La mer s'est engouffré au rez-de-chaussée de l'hôtel de la Paix, qu'il a fallu étayer, et a complètement inondé l'ancienne salle à manger de l'hôtel de la Plage, située au sous-sol. Un billard et des meubles qui se trouvaient dans cette pièce surnageaient encore mardi matin.

À l'extrémité de la digue, enfin, phénomène qui, d'ailleurs, se produit plus ou moins à chaque forte marée, le niveau de la grève s'est abaissé de plus d'un mètre.

On peut juger, d'après ce tableau, bien imparfait cependant, de l'étendue du désastre. Quelle en est la cause ? Voilà ce qu'il est difficile, sinon impossible, de déterminer, du moins d'une façon exacte. Faut-il, comme on l'a cru d'abord, l'attribuer à un raz-de-marée ? …

Il faut reconnaitre, cependant que la catastrophe s'est produite lundi, presque subitement. Il n'y avait, pour ainsi dire, pas de vent ; la mer ne paraissait pas agitée, et les vagues qui frappaient la digue n'étaient pas inquiétantes. Soudain, une vague énorme, une lame sourde sans doute, s'abima sur la digue, en faisant un bruit effroyable, qui secoua toutes les villas, dont les habitants eurent la sensation qu'un tremblement de terre venait de se produire. Ce fut le signal du désastre : aussitôt, la digue fléchit, et, sous l'assaut des vagues qui se succédaient, s'écroula avec un fracas sinistre, entrainant après elle les murs des villas voisines. La mer, ne trouvant plus d'obstacle, acheva l'œuvre commencée, et, en moins d'une demi-heure, toute cette partie de la digue n'était plus qu'un champ de ruines.

Le soir et à la marée du lendemain matin, la situation ne fit que s'aggraver : la digue, minée par les infiltrations, déchaussée à sa base, secouée par les vagues de plus en plus furieuses, continua à glisser dans la grève, si bien qu'hier jeudi, quand l'état de la mer permit de vérifier l'importance des dégâts, on constata que plus de cent mètres de digue étaient entièrement effondrés, et qui faudrait, pour conjurer la répétition du sinistre, consolider au moins cent autres mètres de chaussée qui menacent de s'en aller au premier assaut de la mer.

On prétend, d'autre part, que ce qui s'est produit devait fatalement arriver, et était même prévu depuis longtemps. La digue qui date de vingt à vingt-cinq ans à peine, avait été construite, sur des dunes de sable péniblement conquises sur la mer. Mal assise, sans

doute, sur un fond de sable et de marne, mal ou même pas du tout protégée contre les lames, mal construite aussi, peut-être, laissant s'infiltrer l'eau par mille interstices, minée surtout par l'eau qu'emmagasinait le banc de sable qu'on a laissé à grand tort subsister le long de la digue de granit, dégarnie à chaque marée d'un peu de sa cuirasse de sable, dont le niveau s'abaissait sans cesse, la digue, épuisée, n'en pouvant plus, a fini par céder. La mer, aidée dans son oeuvre de destruction par l'insouciance de l'administration, a eu facilement raison de l'obstacle qu'on lui avait opposé.

Depuis longtemps, cependant, les Ponts-et-Chaussées savaient à quoi s'en tenir. A différentes reprises, le Conseil Municipal de Paramé, qui pressentait le désastre, avait averti l'administration, et tout récemment encore M. Rouxin, l'honorable maire de Paramé, faisait part des craintes à l'ingénieur. Aujourd'hui, il est trop tard : pour n'avoir pas su prévenir le mal, il va falloir le réparer, et ce ne sera ni un petit travail ni une minime dépense.

Hier jeudi, des ouvriers, sous la direction d'un conducteur des Ponts-et-Chaussées, ont commencé à déblayer la digue. Les travaux continueront tant que les ressources de l'administration le permettront. Quand il n'y aura plus d'argent, on demandera des crédits nouveaux, et, si on en obtient, on poursuivra les réparations ; sinon, on attendra !

Espérons qu'en haut lieu on comprendra que le devoir des pouvoirs publics est d'intervenir d'urgence, et que de nouvelles négligences ne s'amèneront pas un nouveau malheur. »

Illustration 93 : Cartes postales de l'évènement du 29 octobre 1905 (source : archives départementales 35).

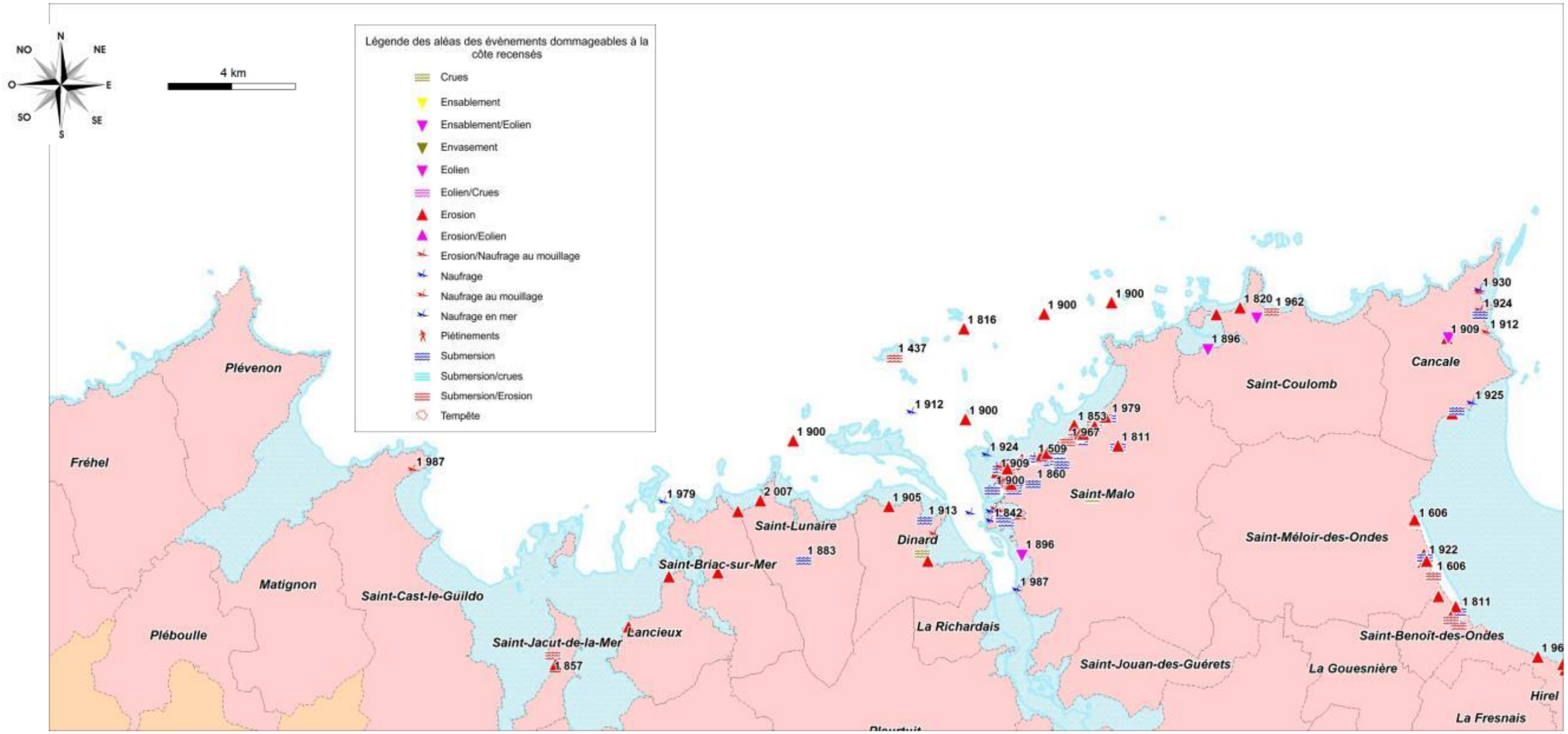


Illustration 94 : Carte synthétique des évènements dommageables pour le compartiment C2.

6. Synthèse & conclusions

Que ce soit l'analyse ***bibliographique*** des aléas littoraux « érosion et submersion marine », ou l'analyse des ***tempêtes***, les secteurs où les impacts sont les plus fréquents sont les secteurs de Saint-Malo, Dinard et de Saint-Jacut-de-la-Mer.

Pour le secteur de Saint-Malo comme pour Saint-Jacut-de-la-Mer, deux structures les digues du Sillon et du Paramé et la digue blanche, protègent des enjeux matériel et humain, situés plus bas que le niveau de la mer.

En cas de rupture de ces structures, une inondation marine est possible mais il est important de prendre en compte le fait que l'étal de pleine-mer pour cette partie du littoral ne dure que deux heures (une heure de parts et d'autres de son paroxysme), ne pouvant alimenter la lame d'eau d'inondation marine que pendant ce laps de temps.

Ainsi pour préciser l'impact d'une submersion marine sur ces secteurs, il sera préférable de prendre en compte ces paramètres et de réaliser une modélisation plutôt dynamique.

L'analyse de la côte à ***falaises*** montre une prédisposition à l'érosion très faible conséquence de falaises de faibles altitudes et présentant une géomorphologie assez stable avec des pentes autours des 45°.

Cependant, faisant le lien entre les côtes d'accumulation et les falaises rocheuses, les dépôts de pente ou « heads » montrent une prédisposition à l'érosion forte tout comme les nombreux filons de dolérites (roches formant des boules de couleur noire). La prédisposition à l'érosion des premières est due à la qualité mécanique intrinsèque de la formation géologique pouvant créer des falaises mais relativement meubles alors que la seconde, induit des phénomènes locaux d'érosion différentielle.

L'analyse des côtes à ***accumulation*** montre que les plages exposées aux agents météo-marins ont en général une tendance à l'érosion et ces observations et mesures sont d'autant plus vrais que lorsque celles-ci n'ont pas une orientation vers la pleine-mer, montrent une tendance à la stabilité.

7. Bibliographie & webographie

Allen H., 1982, *Mesures de houle en différents sites du littoral français*, EDF/LNH. Edition n° 5, 18 p.

Bellessort B., Migniot C. (L.C.H.F), 1987, *Catalogue sédimentologique des côtes françaises, Côtes de la Manche et de l'Atlantique, de la baie du Mont-Saint-Michel à la frontière espagnole,* n° 65, Édition Eyrolles, coll. de la Direction des Études et Recherches d'Electricité de France, 559 p.

Bonnefille R. et Germain P, 1971, *Renforcement de la digue de Paramé*, Rapport ROO8, EDFILNH 1 Syndicat de la digue de Paramé, 21 p.

Bonnot-Courtois C., 1992, *La digue de Paramé et la plage de Saint-Malo : Sédimentologie et analyse des risques,* Revue de l'Union Française des Géologues, n° 97, 17-22 pp.

Bonnot-Courtois C., 2008, *Résultats de la surveillance du Benthos. Contribution à la réalisation de la phase opérationnelle du Rebent Bretagne 2007,* CNRS, IFREMER, Laboratoire de Géomorphologie et Environnement Littoral, 30 p.

Bonnot-Courtois C. et Lafond L.R., 1990, *Les dommages subis par la digue de Paramé et leurs conséquences sur le site de Saint-Malo*, 1er Symposium Intern. EUROCOAST. LITTORAL 1990. Marseille, pp. 308-311.

Bonnot-Courtois C. et Lafond L.R., 1994, *Défense contre la mer à Saint-Malo par réhabilitation de la plage*, art. 36, IIIè Journées Nationales Génie Civil Génie Côtier, Sète, thème V, pp.255-260

Bousquet B., 1967, *Contribution à l'étude du Golfe normand-breton. Morphologie littorale de trois baie : la Fresnaye, l'Arguenon, la Beaussais,* Thèse de 3° cycle, Université de Rennes, 456 p.

Bozec H., 2010, *Diagnostic de risque d'instabilité et estimation du recul de la falaise à la plage de la Mare sur la commune de St-Cast-Le-Guildo,* Dossier n°18118, CETE de l'Ouest, Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc, 20 p.

Cariolet J.M., 2011, *Inondation des côtes basses et risques associés en Bretagne – Vers une redéfinition des processus hydrodynamiques liés aux conditions météo-océaniques et des paramètres morpho-sédimentaires*, UBO, thèse, 348 p.

Chauliaguet C., 2011, *Dossier 18667 Plévenon, Port St Géran-Instabilité de talus. Diagnostic géotechnique*, CTE de l'Ouest, Laboratoire Régional de Saint-Brieuc, p.15

Dagorne A., 1966, *Contribution à l'étude géomorphologique et sédimentologique du littoral et du prélittoral de la région de Dinard, Saint-Briac (Ille-et-Vilaine)*, Thèse Université de Rennes, EPHE, 373 p.

Dagorne A., 1968, *Le sud du golfe normand-breton : carte sédimentologique des fonds détritiques du prélittoral et répartition du calcaire organogène total*, Doc. Lab. Géomorphologie Dinard, 2 cartes, échelle 1/67 500.

Fournier J., 1992, *Dynamique d'une côte à falaise : De la pointe du Meinga à la pointe du Grouin*, Mémoire de DEA de Géographie, Université de Rennes II Haute-Bretagne, 86 p.

Garreau P., 1993, *Hydrodynamics on the North Brittany coast: a synoptic study*, *Oceanologica Acta*, vol. 16, n° 5-6, pp. 469-477.

Garreau P., 1993, *Conditions hydrodynamiques sur la côte Nord Bretagne*, Rapport Ifremer. DEL 93.02, 31 p.

Jouas M., 2011, *PPR Submersion Marine de Saint-Malo, Recueil de données,* CETE de l'Ouest, L.R.P.C. de Saint-Brieuc, Unité Risques Naturels et Géophysiques, 52 p.

Larsonneur C., 1980*, Carte géologique de la France au 1/50 000 – Saint-Cast*, Notice n°206, Orléans : BRGM, 42 p.

LCHF, 1984, *Golfe normano-breton. Étude du régime de l'agitation : approche des agitations du large*, Rapport CNEXO, 60 p.

Le Bris D., 2000, *Faisabilité d'utilisation de paramètres géomorphologiques et bio-sédimentaires comme critères de délimitation du domaine public maritime*, D.E.A géomorphologie, Univ. Paris VII, 140 p.

Le Goff E. et al., 2009, *Carte géologique de la France au 1/50 000 – Saint-Malo*, Notice explicative n°207, Orléans : BRGM, 199 p.

Le Maître A.-M., 2005, *Servitude de Passage des Piétons sur le Littoral sur la commune de Saint-Jacut de la mer (plage des haas), Diagnostic de stabilité du versant à proximité du sentier littoral,* Dossier n° 14 333, CETE de l'Ouest, Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc, 19 p.

Le Maître A.-M., 2006, *Ville de Saint-Malo, sites de la Goéletterie et du Marégraphe, Diagnostic de risque géologique et proposition pour une réduction du risque,* Dossier n° 15 023, CETE de l'Ouest, Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc, 18 p.

Le Maître A.-M. et Jouas M., 2008, *St Cast–Le-Guildo Diagnostic de risque d'instabilité des versants, Propositions de mesures de réduction des risques,* Dossier n°16 704, CETE de l'Ouest, Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc, 16 p.

Lelièvre O., 2000, *Dynamique morpho-sédimentaire des accumulations sableuses littorales entre Saint-Malo et Cancale (Ille-et-Vilaine),* DEA de Géomorphologie et Aménagement des Littoraux, Université de Bretagne Occidentale, 148 p.

Ministères de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, de l'Equipement, des Transports et du Logement, 1997, *Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisibles (PPR), Guide général*, Paris, La Documentation française, 76 p.

SOGREAH, 2001, *Ville de Saint-Malo. Etude des conséquences d'une rupture de digue avec la modélisation bidimensionnelle*, DDTM35, 33 p.

Service Technique de la Navigation Maritime et des Transmissions de l'Equipement, 1995, *Catalogue de fiches synthétiques de mesures de houle*, Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Equipement et des Transports. 171 p.

Suanez S., 2009, *La question du bilan sédimentaire des côtes d'accumulation – Rôle des forçages naturels et anthropiques dans les processus morphodynamiques analysés à partir de quelques exemples pris en Méditerranée et en Bretagne*, Mémoire vol.1, 212 p.

Tabeaud M *et al*., 2009, Le risque « coup de vent » en France depuis le XVIe siècle, Annales de Géographie, n° 667, 318-331.

Vaucourt C. et Bonnot-Courtois C., 1992, *Dynamique sédimentaire dans les baies de Lancieux et de l'Arguenon (Côtes-d'Armor),* Norois, Poitiers, t. 39, n°153, pp. 29-44.

Webographie

Site internet du Projet ANR ***COCORISCO*** : Connaissance, compréhension et gestion des risques côtiers : http://www.cocorisco.fr

Site internet ***GEOPORTAIL*** : Le portail des territoires et des citoyens : http://www.geoportail.gouv.fr/, portail de l'information géographique de référence : cartes, photographies aériennes, bases de données géographiques, etc.

Site internet : ***INFOTERRE***, le visualiseur des données géoscientifiques du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières : http://infoterre.brgm.fr/, cartes géologiques du 1/1 000 000 au 1/50 000, dossiers de la Banque de données du Sous-Sol et logs, etc.

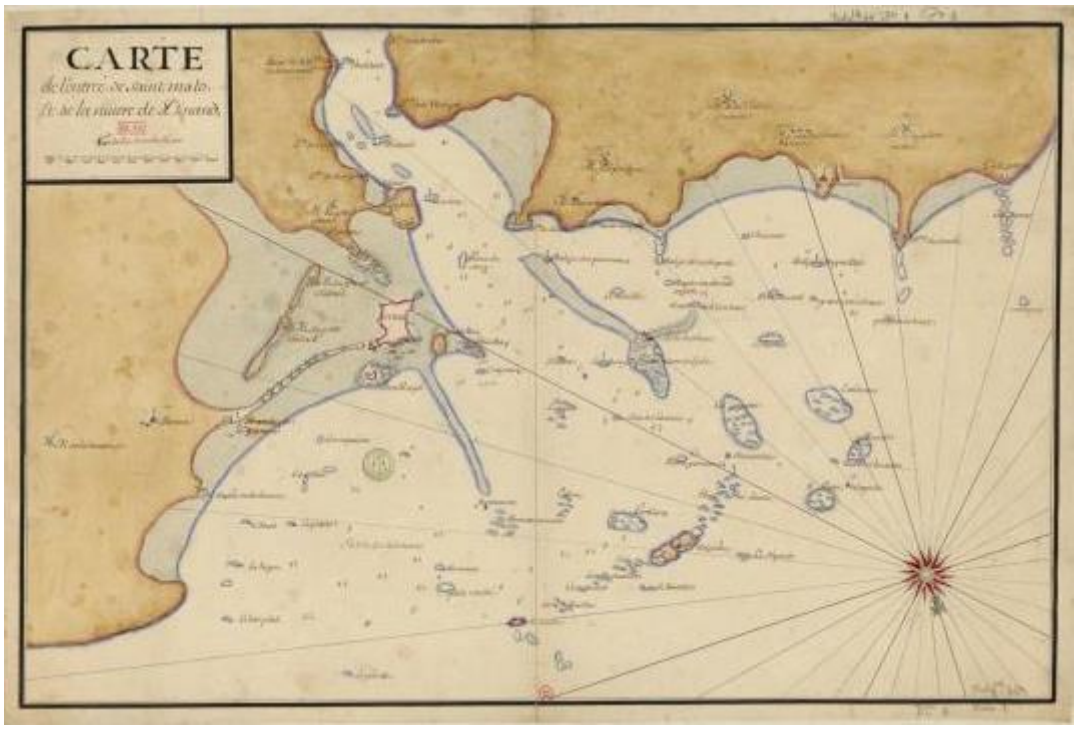
Site internet de l'***INSEE*** : Institut National de la statistique et des études économiques : http://www.insee.fr, statistiques nationales etc.

Site internet institutionnel du ***SHOM*** : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine: http://www.shom.fr/, cartes marines, cartes bathymétriques etc.

Site internet du ***MEDDE*** : http://www.prim.net/, qui favorise la mise à disposition, le partage et l'actualisation d'informations relatives aux risques naturels et technologiques pour renforcer notre résilience individuelle et collective.

8. Annexe 1 : Recensement des évènements dommageables

9. Annexe 2 : Vielles cartes historiques

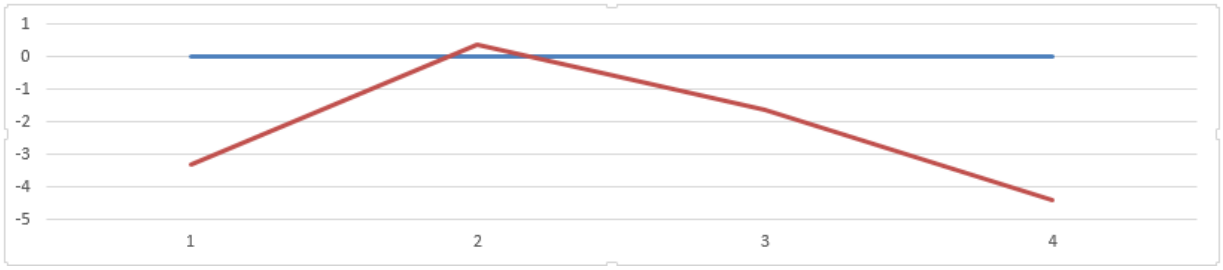


Carte de l'estuaire de la Rance et du havre de Saint-Malo : Remarquer (1) les moulins installés sur le sillon, (2) la queue de comète en direction de Cézembre et celles à l'estuaire de la Rance et (3) l'île des Talards au cœur du marais *(Source :gallica.bnf.fr)*

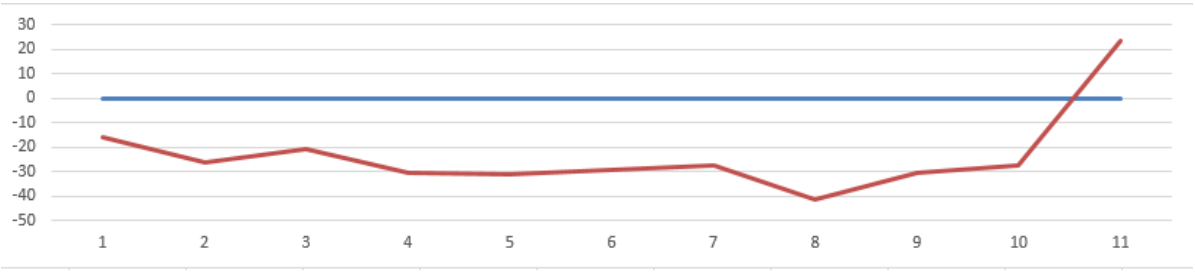
Carte du havre de Saint-Malo et de l'anse de Lupin : Remarquer (1) les moulins installés au début du sillon et (2) le village de Saint-Servan *(Source :gallica.bnf.fr)*

10. Annexe 3 : Graphiques d'évolution des plages

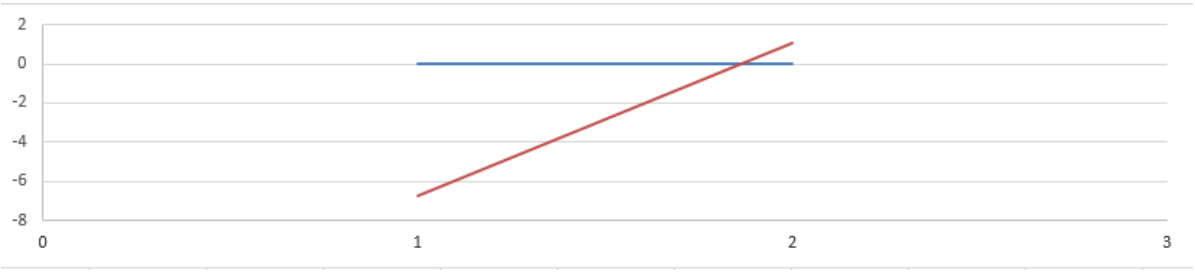
C2 - P1 - Plage du Groin



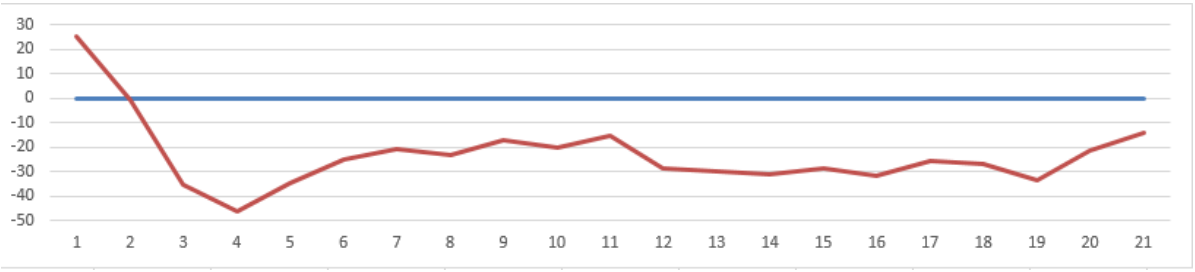
C2 - P2 - Plage du Verger



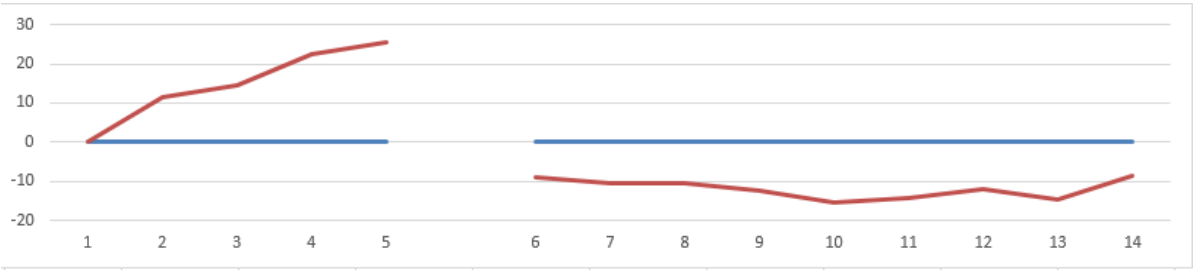
C2 - P3 – Les Daules



C2 - P4 - Anse du Guesclin

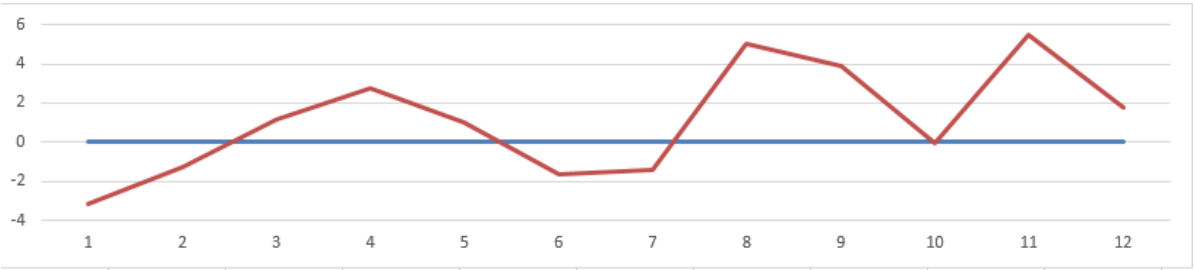


C2 - P5 – Anse de la Touesse

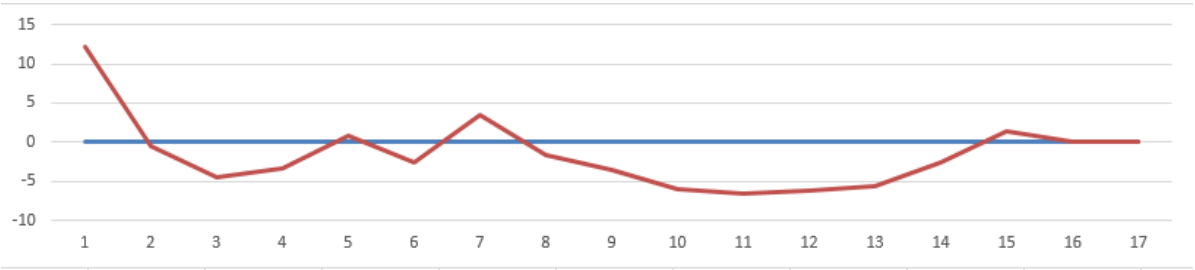


C2 – P6 - Les Courtillons nord

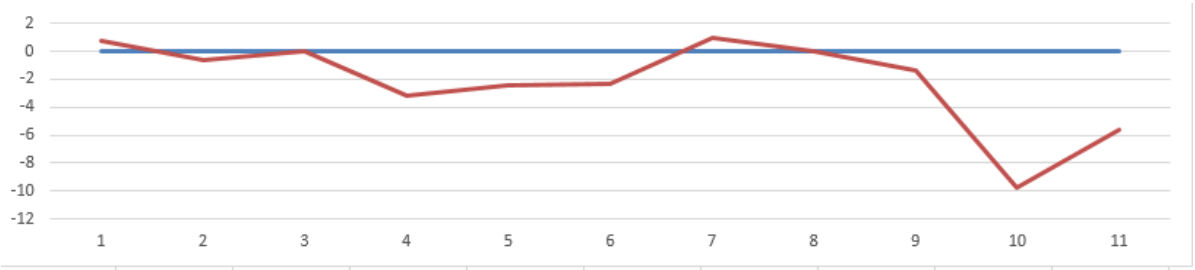
C2 – P7 - Les Courtillons



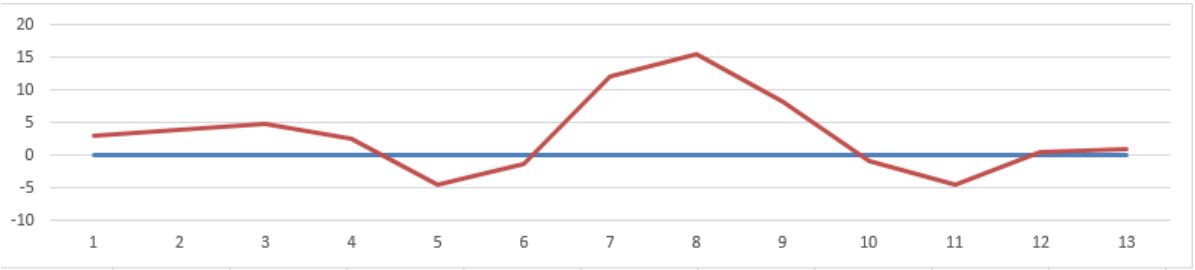
C2 – P8 - Havre du Lupin



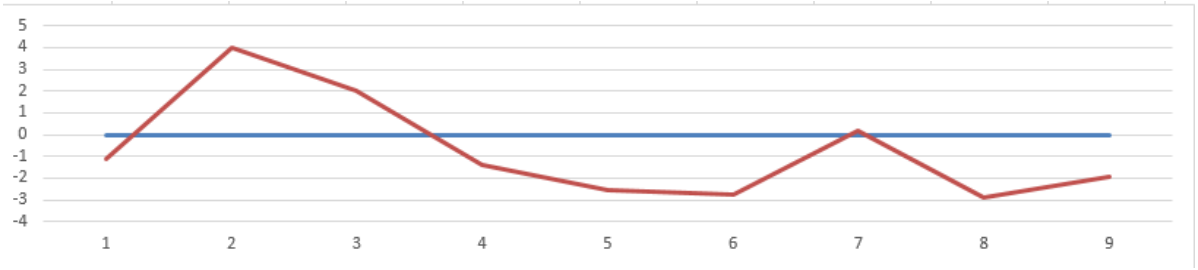
C2 – P9 - La Sablière - 2



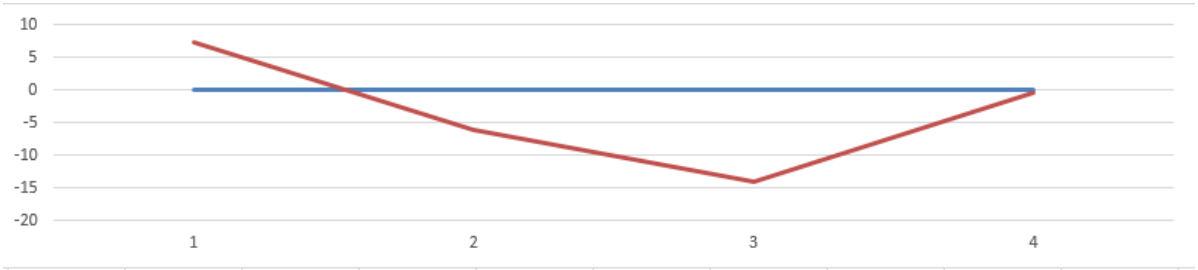
C2 - P10 – La Sablière



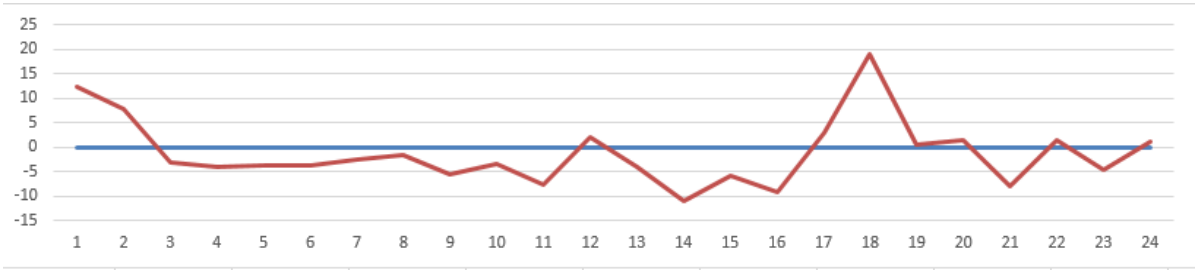
C2 - P11 – Plage du Val



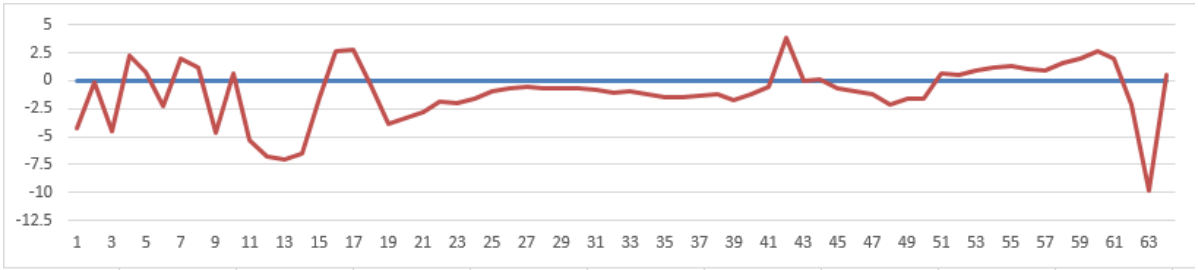
C2 - P12 – Pointe de la Varde



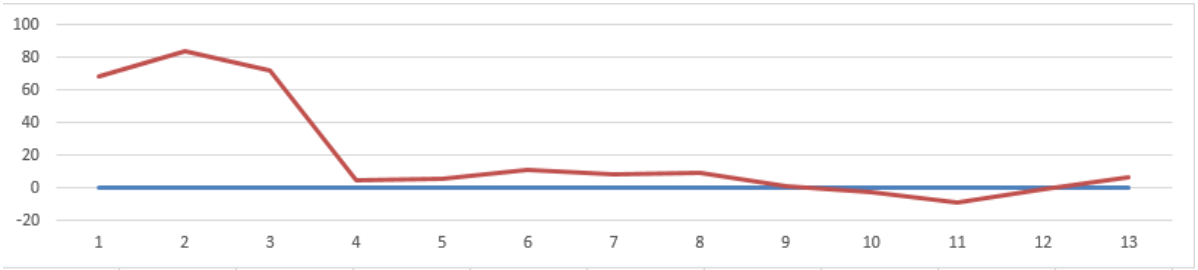
C2 - P13 – Plage du Mihinic



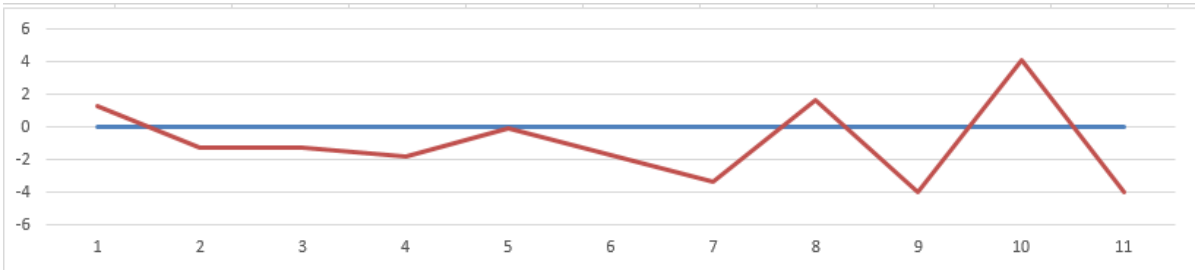
C2 - P14 – Grande Plage



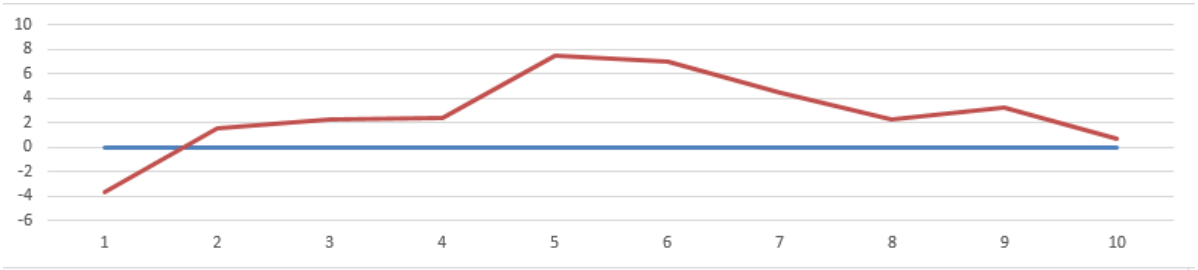
C2 - P15 - Les Bas Sablons



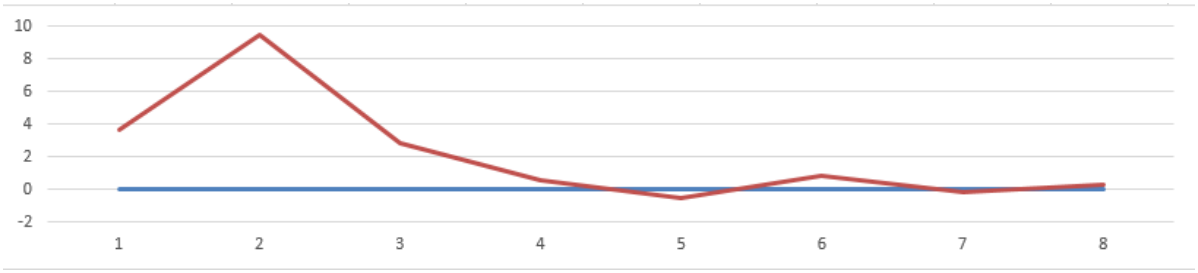
C2 - P16 – Port St-Père



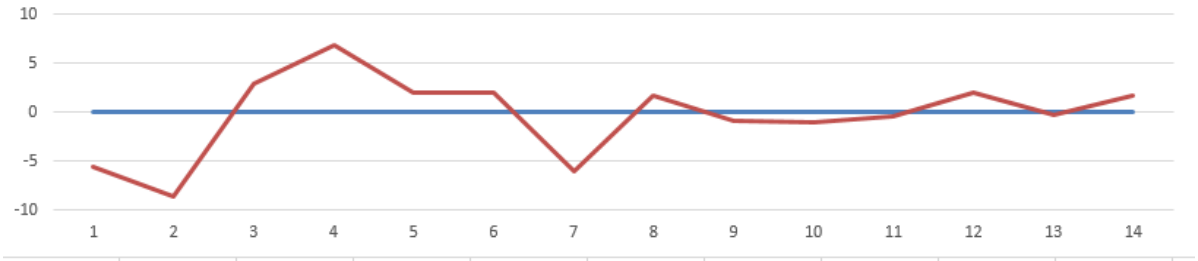
C2 - P17 – Le Prieuré



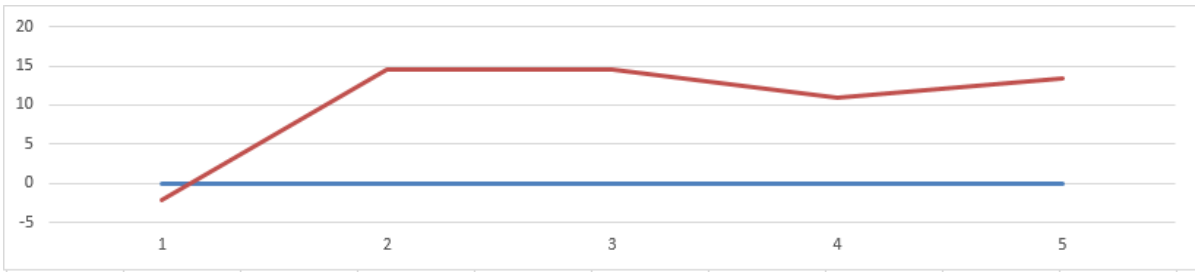
C2 - P18 – Plage de l'Ecluse



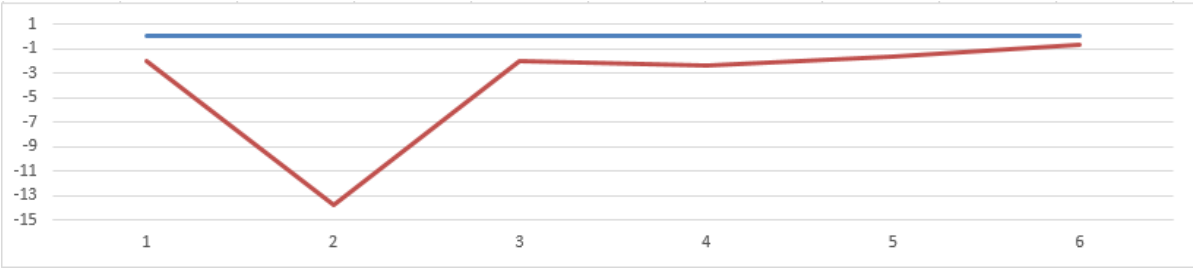
C2 – P19 – Plage de St-Enogat



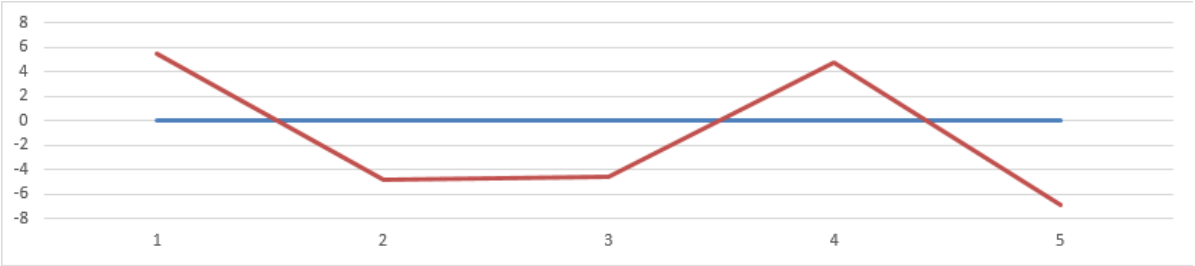
C2 - P20 – Port Blanc



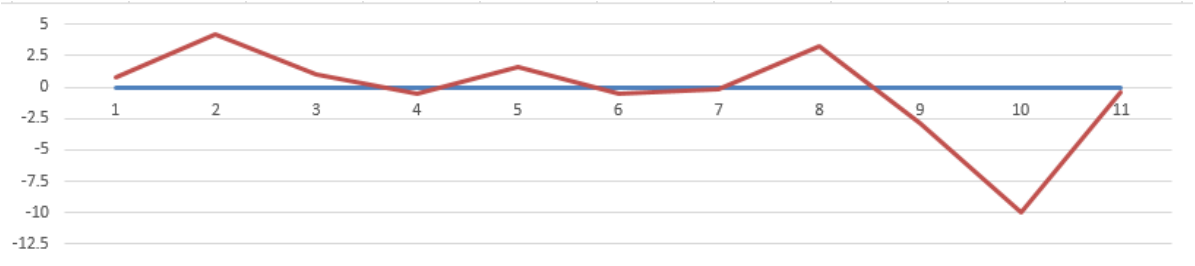
C2 - P21 – Plage de la Fourberie - 2



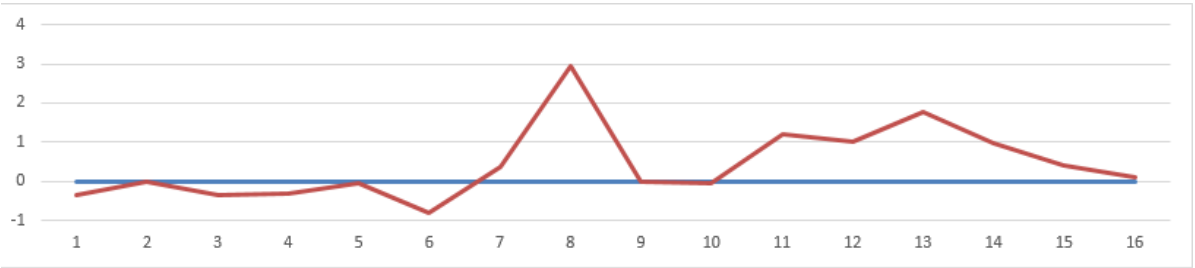
C2 - P22 – Plage de la Fourberie - 1



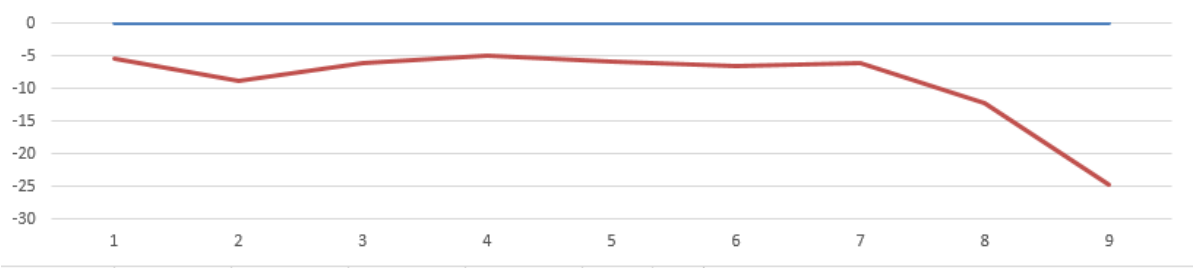
C2 - P23 - La Grande Plage



C2 - P24 – Plage de Longchamp

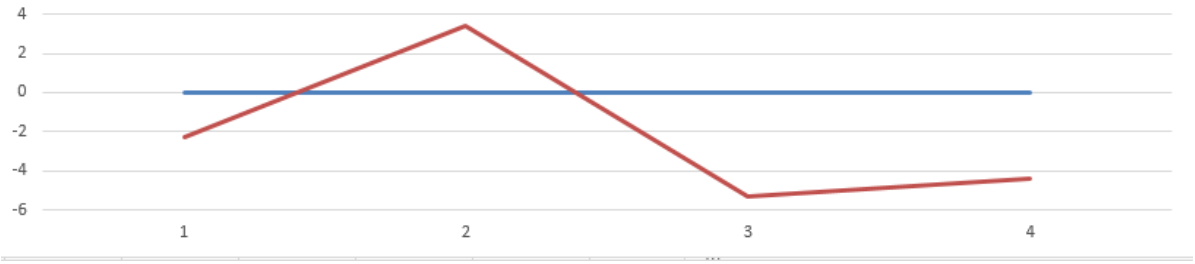


C2 - P25 – Le Port Hue

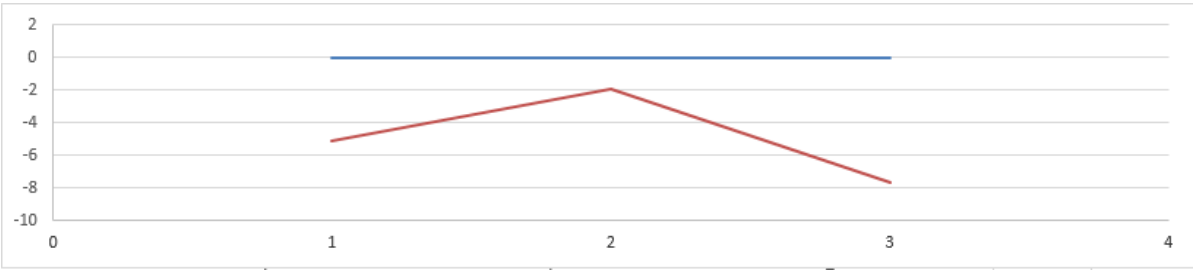


C2 - P26 – Pointe de la Haye (est)

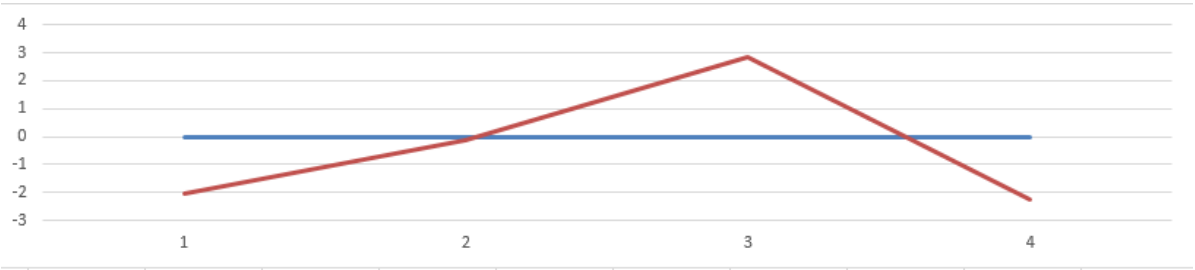
C2 - P27 - Pointe de la Haye (ouest)



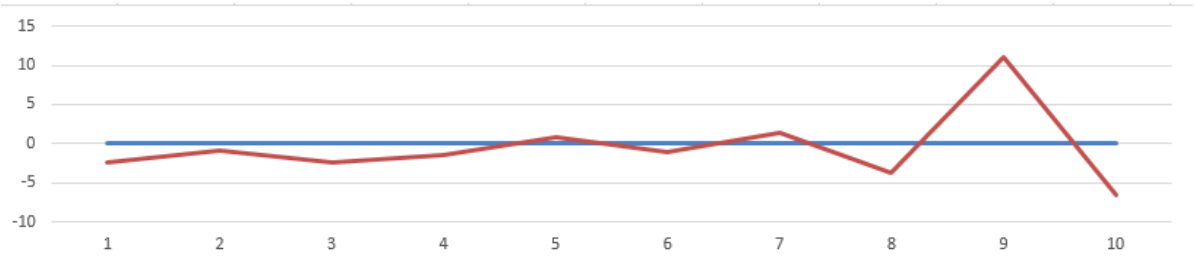
C2 - P28 – Les Essarts



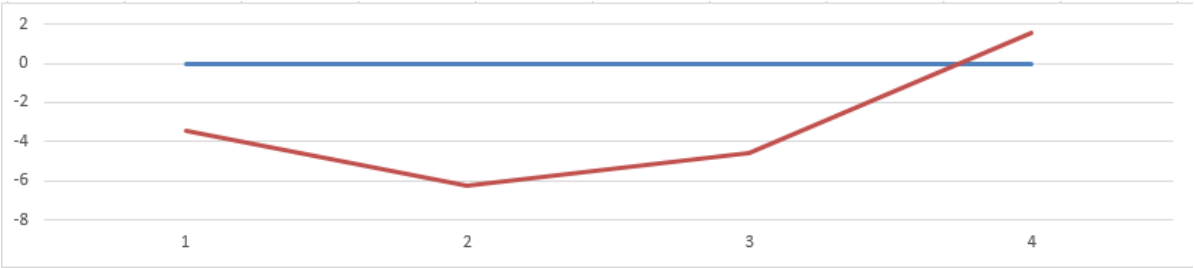
C2 – P29 Les Essarts - port



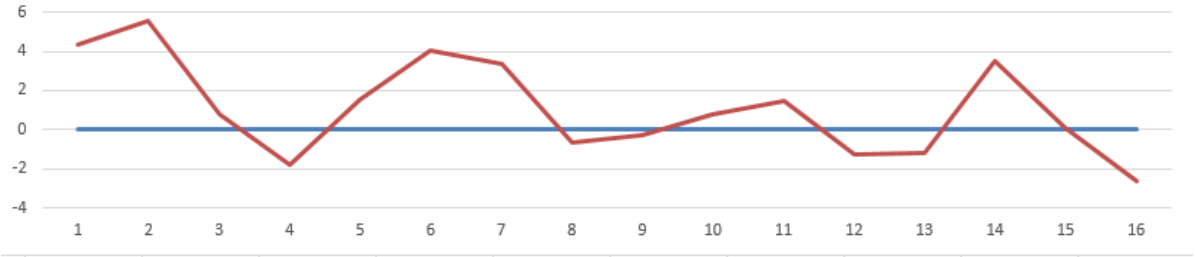
C2 - P30 - St-Briac-sur-Mer – port (nord)



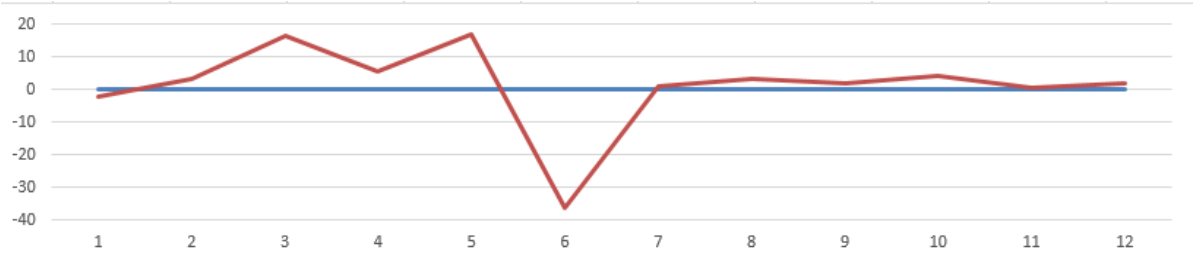
C2 - P31 - Le Nezay



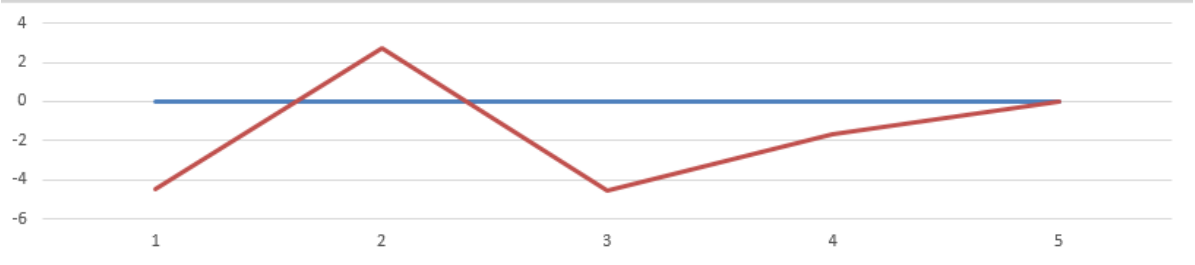
C2 - P32 – La Touche



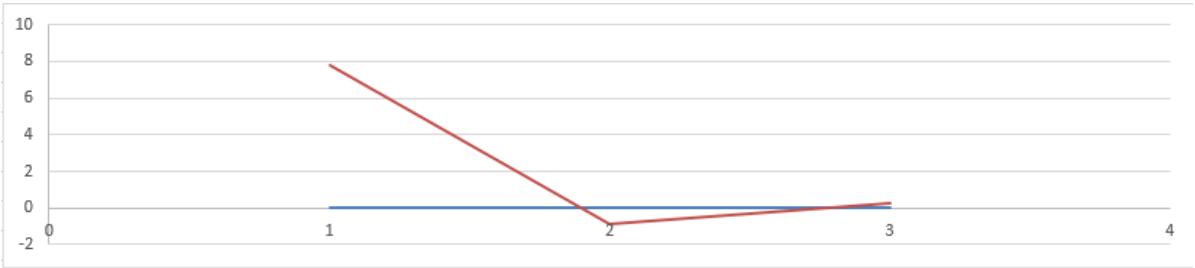
C2 - P33 – Le Rieul



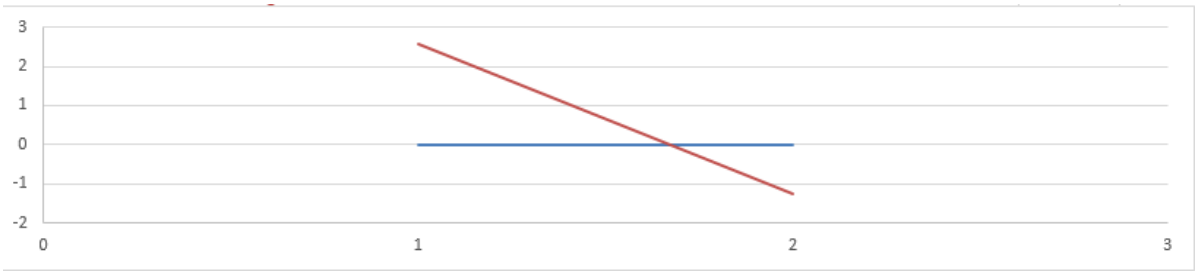
C2 - P34 – Lancieux – nord (4)



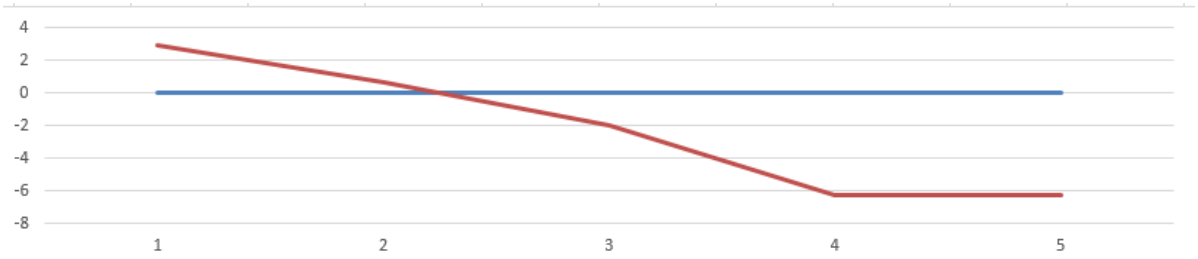
C2 - P35 – Lancieux – nord (3)



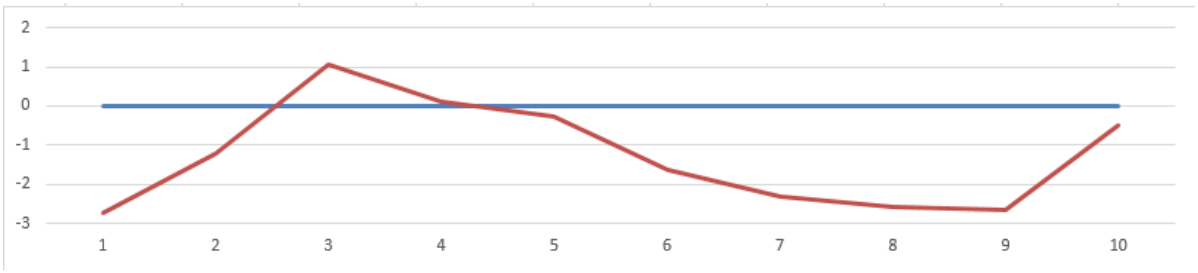
C2 - P36 – Lancieux – nord (2)



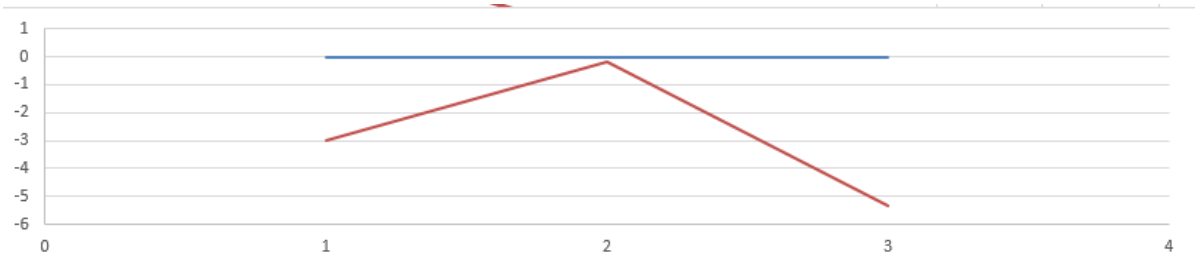
C2 - P37 – Lancieux – nord (1)



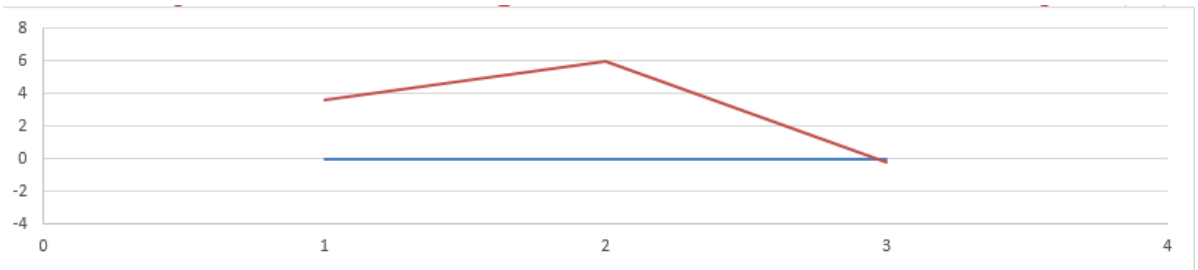
C2 - P38 – Plage St-Cieux



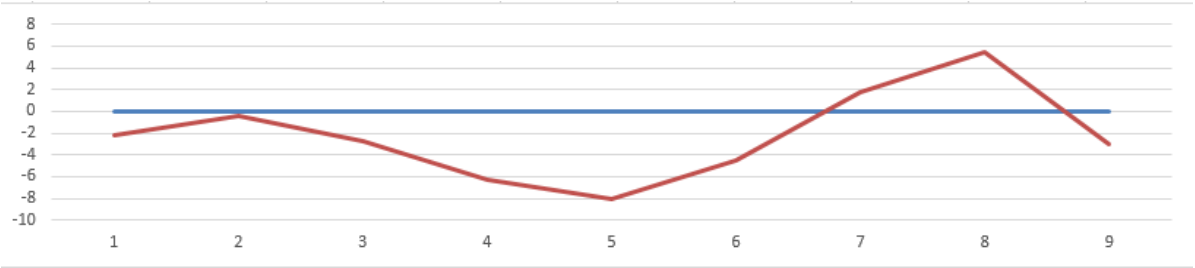
C2 – P39 – Plage St-Cieux (ouest)



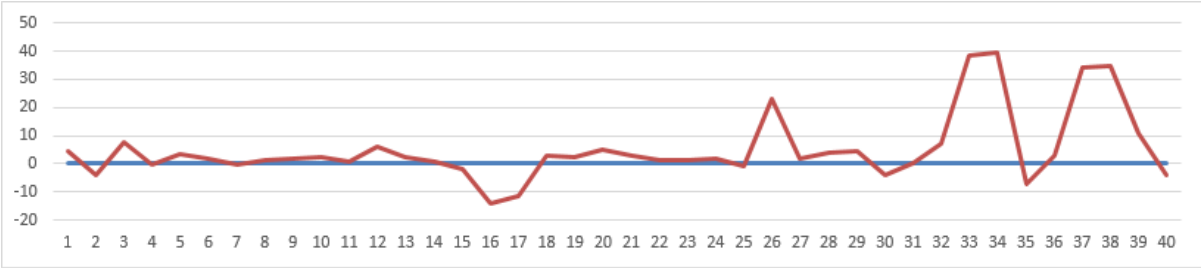
C2 – P40 – Plage des Briantais



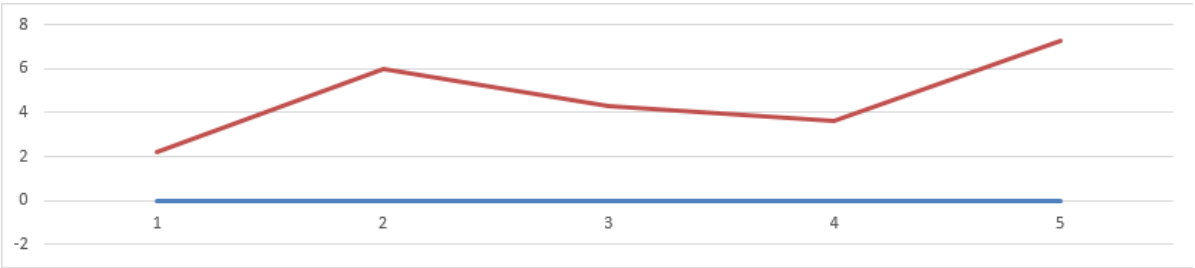
C2 - P41 – Baie de Lancieux (est)



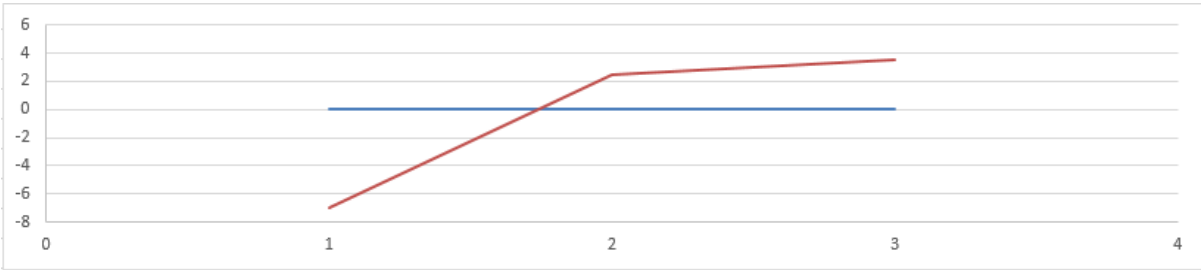
C2 - P42 Baie de Lancieux (ouest)



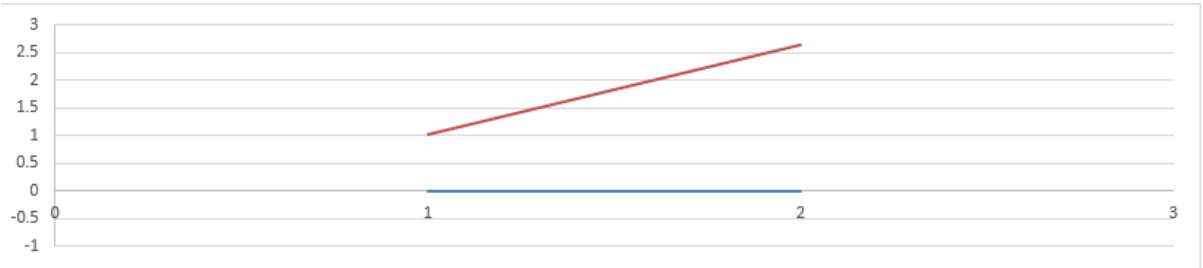
C2 - P43 – Plage de la Manchette



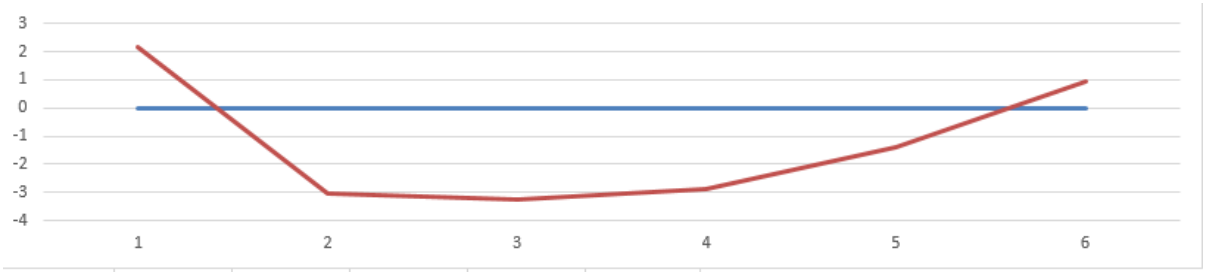
C2 - P44 – Plage de la Pissotte (St-Jacut-de-la-Mer)



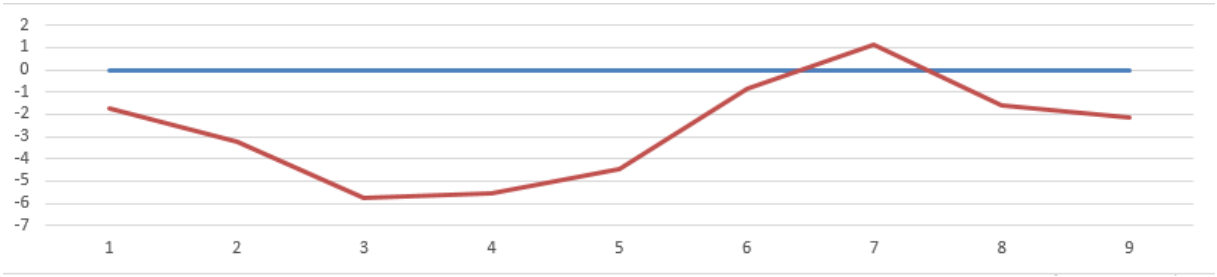
C2 - P45 – Plage Chatelet



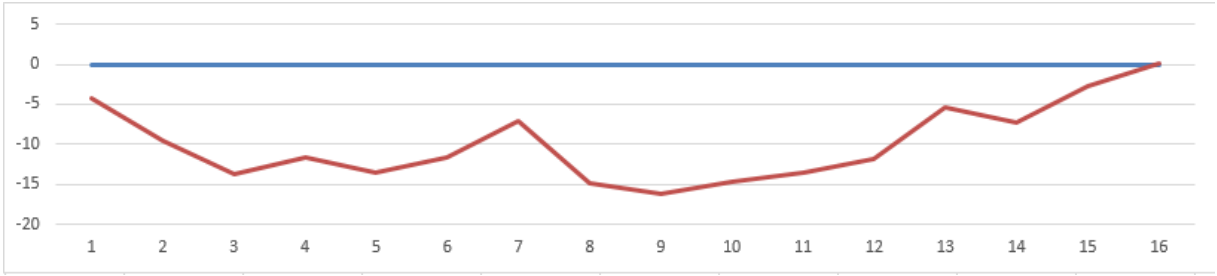
C2 - P46 – Plage du Rougeret



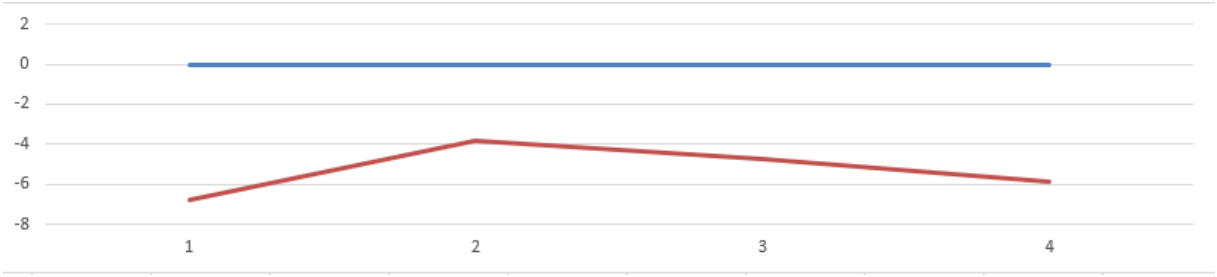
C2 - P47 – Plage des Haas



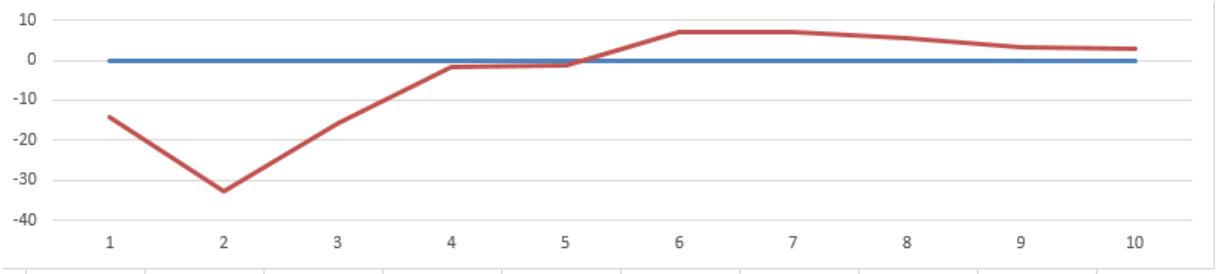
C2 - P48 – La Blanche



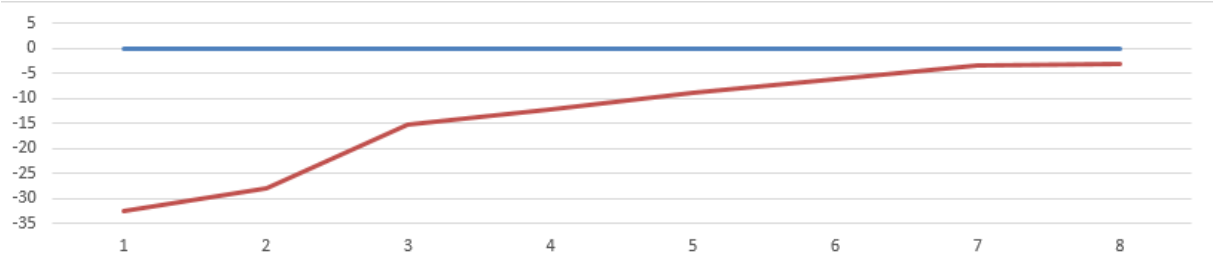
C2 – P49 – Plage du Rocher Plat



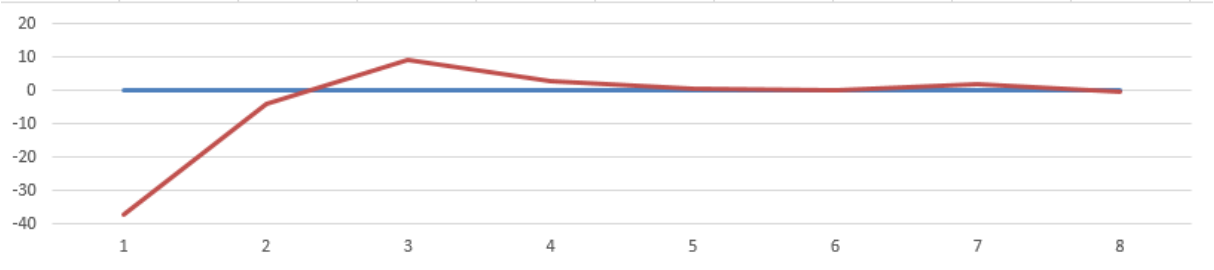
C2 – P50 – Plage du Ruet



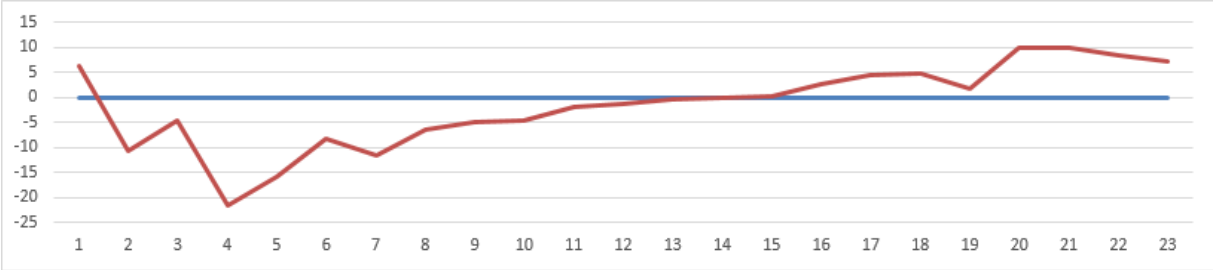
C2 - P51 – Plage de Vauver



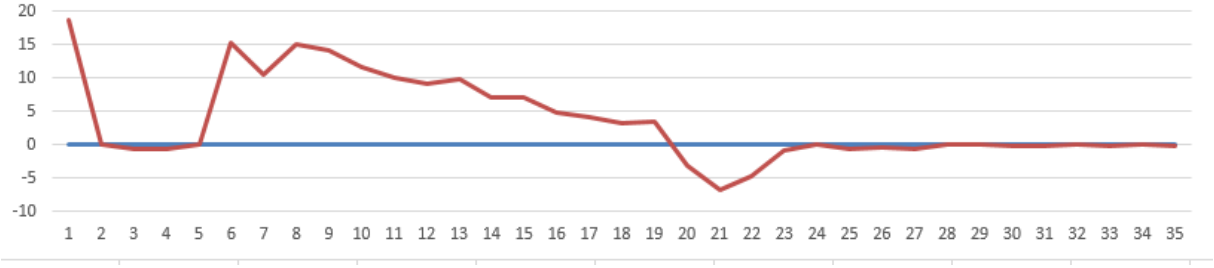
C2 - P52 – Plage de Quatre Vaux



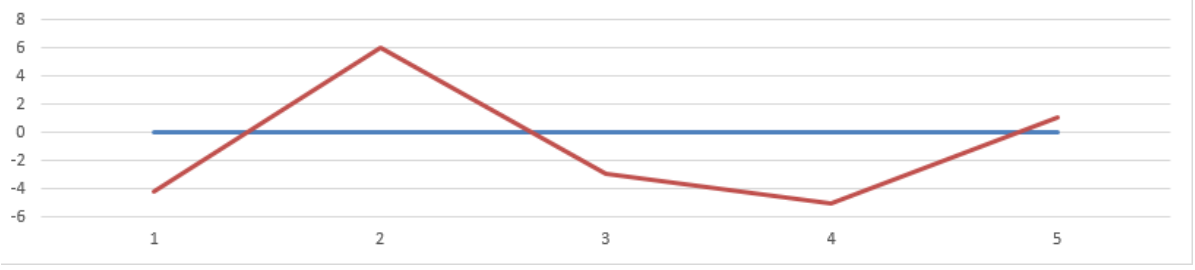
C2 - P53 – Plage de Pen Guen



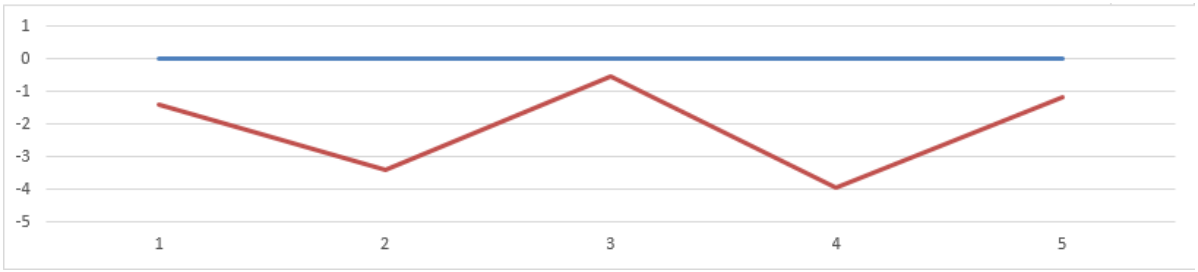
C2 - P54 – St Cast le Guildo



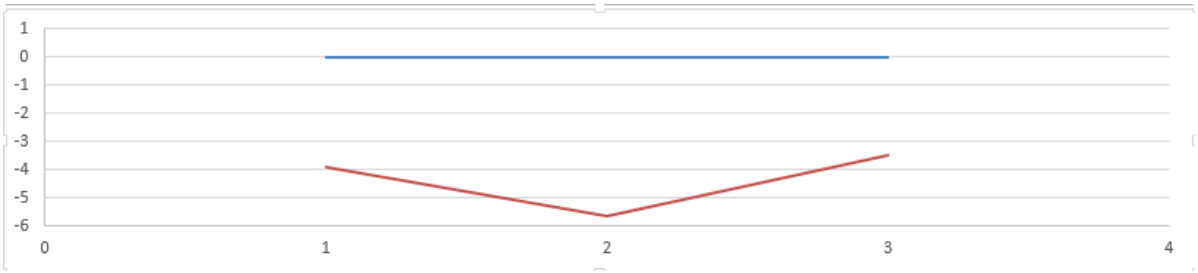
C2 - P55 – Plage de la Mare



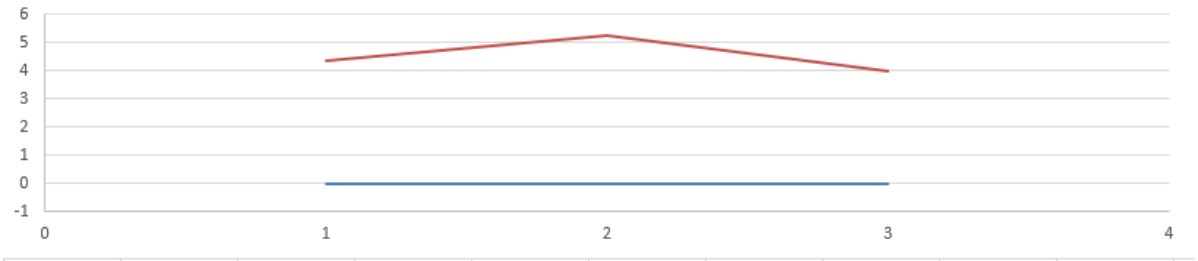
C2 - P56 – Plage de la Pissotte (St-Cast-le-Guildo) – 1



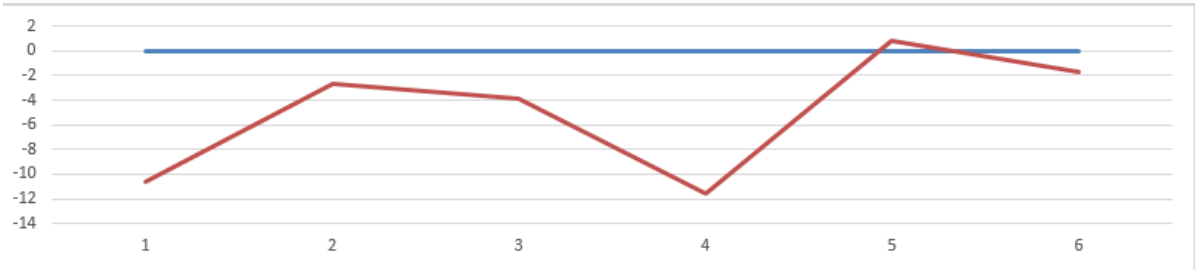
C2 - P57 – Plage de la Pissotte (St-Cast-le-Guildo) – 2



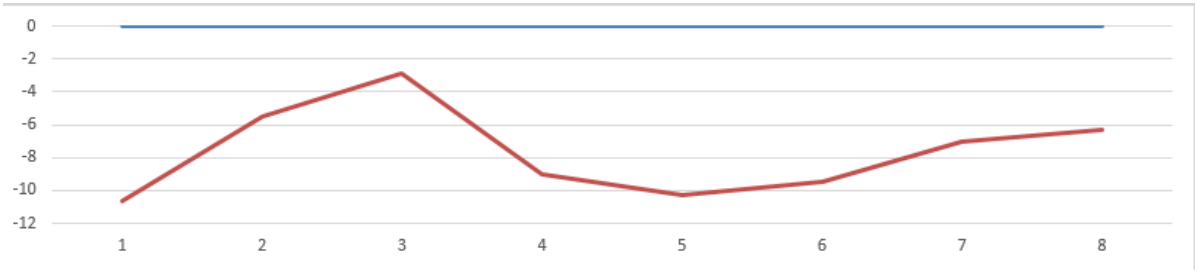
C2 - P58 – Plage de la Fresnaye (est)



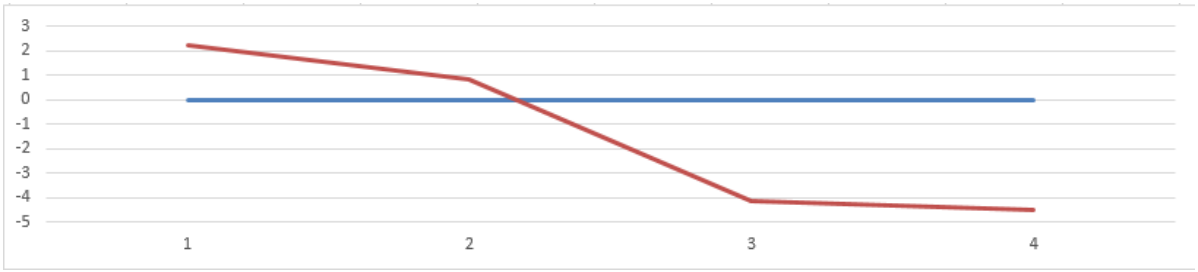
C2 - P59 – Plage de la Fresnaye



C2 – P60 – Plage de la Fosse



C2 – P61 – Plage de Château Serein



Géosciences pour une Terre durable
brgm

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
Atalante Beaulieu – 2, rue de Jouanet
35700 – Rennes – France
Tél. : 02 99 84 26 70 – Fax : 02 99 84 26 79