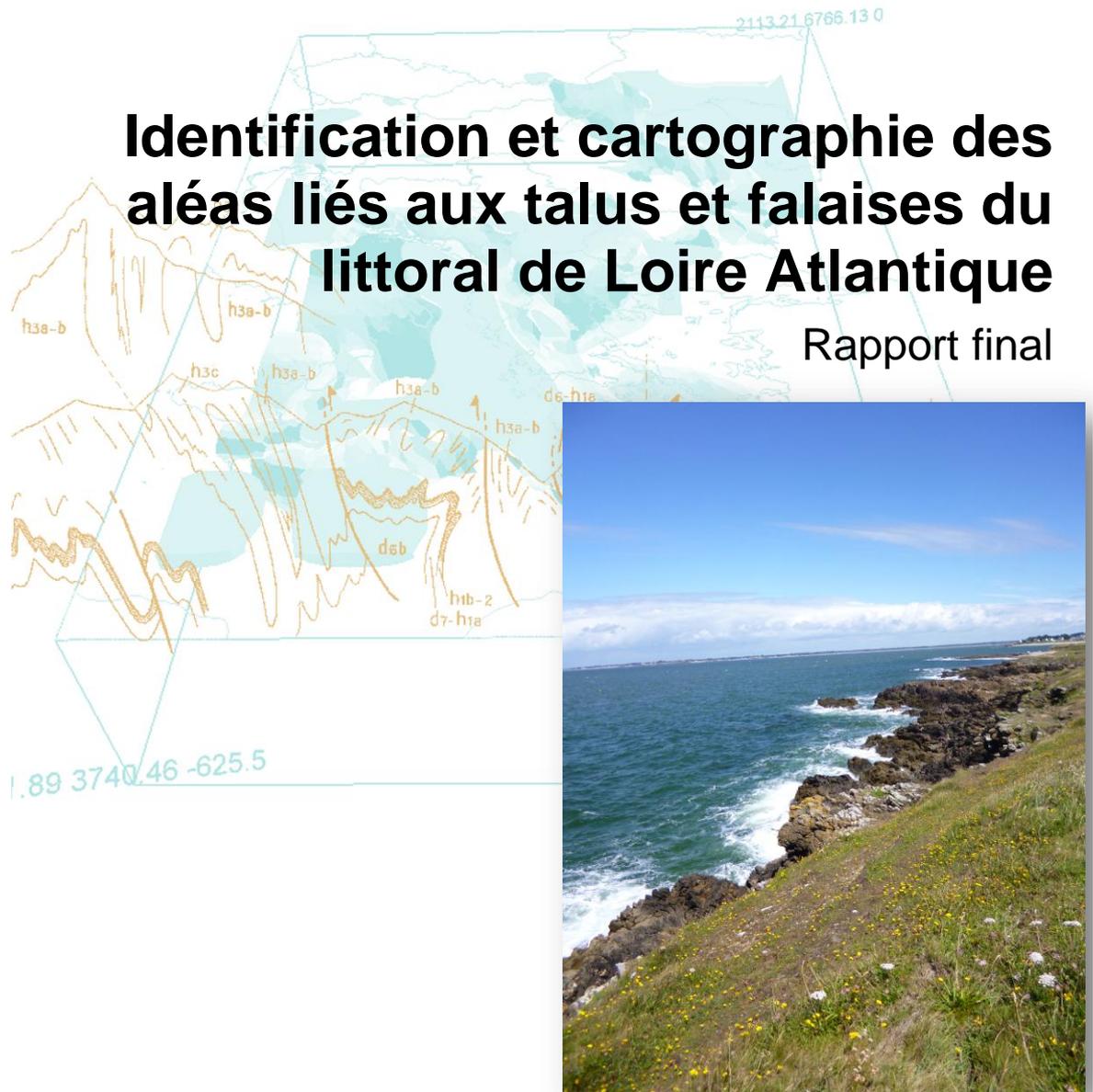




Identification et cartographie des aléas liés aux talus et falaises du littoral de Loire Atlantique

Rapport final



Identification et cartographie des aléas liés aux talus et falaises du littoral de Loire Atlantique

Rapport final
Septembre 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2010 RISF06

PLAT E.

Avec la collaboration de V. Baudoin, T. Decotte

Vérificateur :

Nom : MARCOT N.

Date :

Approbateur :

Nom : CONIL P.

Date :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Mots clés : Littoral, falaises, aléa, érosion, mouvement de terrain, Loire Atlantique

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

E. PLAT avec la collaboration de V. Baudoin, T. Decotte (2013) - Identification et cartographie des aléas liés aux talus et falaises du littoral de Loire Atlantique, rapport BRGM/RP- 62521-FR, 80 illustrations, 3 annexes

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le littoral de Loire Atlantique se développe sur environ 180 km. Il présente des talus et falaises sur près de la moitié de son linéaire. Leur érosion constitue un processus géologique normal se traduisant par des écroulements plus ou moins nombreux et volumineux selon le type de phénomène qui se produit. Ces écroulements ont pour conséquence un recul plus ou moins rapide de la falaise.

Dans le cadre de la gestion du risque lié au trait de côte et afin de mettre en place des plans de prévention de risques littoraux pour le littoral de Loire Atlantique, il est nécessaire de connaître les vitesses de recul des falaises et leur spatialisation, les volumes potentiellement mobilisables, ainsi que les mouvements de terrain pouvant affecter ces falaises.

La présente étude avait pour objectifs d'évaluer l'évolution des talus et falaises côtiers de Loire Atlantique et de caractériser les aléas correspondants.

Pour atteindre son objectif, l'étude s'est déclinée selon les tâches suivantes :

- Identification des zones de falaises ;
- Bilan des connaissances sur les falaises côtières en Pays de la Loire ;
- Détermination de la géométrie des versants à partir de l'exploitation de la litto3D (développement méthodologique pour le calcul des hauteurs de falaises) ;
- Analyse de l'évolution des côtes rocheuses sur des bases historiques (comparaison des orthophotographies de 2004 et 1950 principalement) ;
- Analyse géologique et expertise naturaliste du linéaire, découpage typologique ;
- Constitution d'une base de données comprenant notamment l'ensemble des photographies prises in situ (au nombre de 7 029) et des photographies d'archives (au nombre de 539) ;
- Définition des aléas par secteur typologique, synthèse de l'évolution des falaises et talus, et évaluation du recul à 100 ans ;
- Zonage d'aléa et restitution cartographique.

Les 81 km de côte à falaise de Loire Atlantique ont été découpées en 296 zones homogènes sur des critères essentiellement géomorphologiques et géologiques et en fonction de la nature et l'ampleur des phénomènes naturels observés et/ou attendus. Pour chacune d'entre elle, une fiche synthétique reprenant les observations collectées sur le terrain et les résultats des analyses numériques a été rédigée. Ces fiches reprennent également les aléas mouvements de terrain et recul de falaise. L'ensemble de ces fiches figurent en une annexe hors-texte sous format numérique uniquement (annexe 3). Les résultats concernant les zones homogènes sont présentés sous forme d'une ligne correspondant au nez de falaise qui a été réalisée par digitalisation des orthophotographies les plus récentes.

Cette étude a permis de réaliser un atlas numérique sous forme SIG destiné à servir de référence (topographie, photographies datées et géoréférencées, etc.) pour l'état des falaises de Loire Atlantique. Il est facile à actualiser, notamment par ajout de nouveaux clichés, etc.

En Loire Atlantique, sur un total de 81,7 km de littoral rocheux, la proportion du linéaire de falaises concernée par un aléa mouvement de terrain fort représente 4,7 % (3,9 km), 17,8 % (14,5 km) pour un aléa moyen, 34,2 % (27,9 km) pour un aléa faible et 43,3 % (35,4 km) pour un aléa très faible.

En moyenne, les falaises de Loire Atlantique reculent de 8 cm par an. La vitesse de recul mesurée sur plusieurs décennies peut localement atteindre 30 cm/an comme au niveau de la Pointe de Merquel ou de Saint Gildas. Le linéaire concerné par une érosion supérieure ou égale à 20 cm/an représente moins de 5 % de la côte rocheuse.

Les cartes d'aléa Mouvement de terrain et recul des falaises réalisées dans le cadre de l'étude sont présentées sous forme de planches communales intégrées à l'annexe 2 présentée hors-texte. Outre cette cartographie, la présente étude a permis de formuler quelques recommandations de suivi de l'évolution des falaises au niveau de cavités (Bellefontaine à Saint-Nazaire et Pierre Plate au Pouliguen) et d'une habitation située à proximité d'une zone de faille à Bellefontaine à Saint-Nazaire.

Sommaire

Introduction.....	13
1. Objectifs et méthodes.....	15
1.1. OBJECTIFS ET ZONE DE L'ETUDE.....	15
1.2. METHODOLOGIE GENERALE	17
2. Généralités sur les littoraux rocheux et leur évolution	19
2.1. DEFINITION GENERALE DES FALAISES EN CONTEXTE LITTORAL.....	19
2.2. PROCESSUS D'EVOLUTION DES LITTORAUX ROCHEUX	19
2.2.1. Littoraux rocheux à dénudation	19
2.2.2. Littoraux rocheux à falaises.....	20
2.2.3. Erosion différentielle marine	23
2.2.4. Exemple des processus de l'attaque des falaises sur le littoral continental de la baie de Bourgneuf	24
2.1. MOUVEMENTS DE TERRAIN AFFECTANT LES FALAISES COTIERES	25
2.1.1. Différents types de mouvements de terrain	25
2.1.2. Actions responsables de ces mouvements.....	27
2.2. VITESSE DE REcul DES FALAISES	28
3. Bilan des connaissances du littoral de Loire Atlantique.....	31
3.1. CADRE GEOLOGIQUE.....	31
3.1.1. Historique géologique simplifié.....	31
3.1.2. Les variations du niveau marin (eustatisme).....	31
3.1.3. Description des principales formations rencontrées.....	32
3.2. ALTERATION DES ROCHES	39
3.2.1. Profil d'altération	39
3.2.2. Données de l'atlas de Loire Atlantique	40
3.2.3. BSS.....	42
3.3. FRACTURATION ET STRUCTURE	42
3.4. MOUVEMENTS DE TERRAIN EN LOIRE ATLANTIQUE ET REcul DES FALAISES.....	45
3.4.1. Mouvements recensés	45

3.4.2. Etude des mouvements de terrain déjà réalisées sur le secteur d'étude (Préfailles, Pornic et La Bernerie-en-Retz)	47
3.4.3. Etude SOGREAH (2010)	48
3.5. EXPOSITION DE LA COTE	51
3.6. DONNEES HISTORIQUES	51
3.6.1. Photographies terrestre et aériennes	51
3.6.2. Questionnaire aux communes	53
3.6.3. Fiches tempêtes	54
4. Acquisition de données	55
4.1. IDENTIFICATION DES ZONES DE FALAISES	55
4.2. DETERMINATION DE LA GEOMETRIE DES VERSANTS A PARTIR DE L'EXPLOITATION DE LA LITTO3D	55
4.2.1. Pente des versants	56
4.2.2. Hauteur des versants	57
4.2.3. Autre utilisation de la Litto3D	58
4.3. TRAITEMENT DES ORTHOPHOTOGRAPHIES	58
4.3.1. Données utilisées	58
4.3.2. Calage de la méthodologie : réalisation de tests et limites	59
a) Choix et précision des orthophotographies	59
b) Echelle de travail et précision du lever	61
c) Choix des indicateurs de falaise	61
d) Autre donnée utile	65
e) Possibilité d'un traitement à l'aveugle pour la Loire Atlantique ?	65
4.3.3. Recul moyen obtenu par traitement automatique	69
a) Présentation de la méthode des tampons	69
b) Présentation des résultats et limites	70
4.3.4. Recul maximum par traitement manuel	72
4.3.5. Résultats retenus	73
4.4. INVESTIGATIONS DE TERRAIN	73
4.1. COMPARAISON DES PHOTOGRAPHIES	77
5. Interprétations	79
5.1. DECOUPAGE DU LINEAIRE COTIER EN TRONÇONS HOMOGENES SELON DES CRITERES PHYSIQUES	79

5.2. DETERMINATION DE GRANDS TYPES GEOMORPHOLOGIQUES	79
5.3. QUALIFICATION DES ALEAS	88
5.3.1. Aléa Recul des falaises	89
5.3.2. Aléa Mouvement de terrains.....	91
6. Présentation des résultats.....	95
6.1. PRESENTATION DE LA BASE DE DONNEES.....	95
6.2. LES FICHES DES TRONÇONS HOMOGENE	97
6.3. ALEA PAR SECTEUR ET COMMUNE ET PREMIERES RECOMMANDATIONS	99
6.3.1. Vue générale.....	99
6.3.2. Secteur 1.....	101
6.3.3. Secteur 2.....	103
6.3.4. Secteurs 3 et 4.....	110
6.4. COMPREHENSION DES MECANISMES ET PERSPECTIVES.....	113
Conclusion	115
7. Bibliographie	117

Liste des illustrations

Illustration 1 – Communes littorales de Loire Atlantique et falaises côtières	16
Illustration 2 – Méthodologie générale de l'étude	17
Illustration 3 - Recul par à-coup du pied de falaise sapé par les vagues armées de blocs.....	20
Illustration 4 – Exemple de falaise morte sur la commune d'Assérac (photos BRGM – F_008).....	22
Illustration 5 – Différents profils de falaises (A : Roche homogène, B :roche résistante sus-jacente, C : roche résistante sous-jacente) d'après Emery et Kuhn (1982)	23
Illustration 6 - Formation et recul d'une falaise ; développement corrélatif d'une plate-forme rocheuse basale d'après Paskoff (1994).....	23
Illustration 7 – Différents type de falaises (A : falaise vive, B : falaise stabilisée, C : falaise morte) d'après Paskoff (1994).....	23
Illustration 8 - Typologie des instabilités.....	25
Illustration 9 – Chutes de pierres et de blocs observées au niveau de Porcé à Saint-Nazaire (source BRGM)	26
Illustration 10 - Chutes de dièdres à Piriac-sur-Mer (source : BRGM).....	26
Illustration 11 - Exemple de glissement superficiel (péliculaire) observé à Mesquer au niveau du Port du Moulin (source BRGM – F_056b).....	27
Illustration 12 – Principales actions continentales et marines à l'origine du recul des falaises et côtes rocheuses (d'après Paskoff, 1993).....	28
Illustration 13 – Recul moyen des falaises en fonction des matériaux constituants (Woodroffe, 2002).....	29
Illustration 14 - Variations du niveau marin par rapport `a l'actuel depuis 450 000 ans, d'après Waelbroeck et al. (2002).....	32
Illustration 15 - Reconstruction des variations du niveau marin par rapport `a l'actuel au cours du dernier cycle glaciaire-interglaciaire (Riss/Würm), d'après Siddal et al. (2003).....	32
Illustration 16 – Photo d'une roche gneissique (source : BRGM)	34
Illustration 17 - Séquence conglomératique basale à matrice sablo-argileuse, d'origine vraisemblablement fluviatile à Mesquer (source : BRGM)	37
Illustration 18 - Site de la Patorie avec une falaise essentiellement constituée de métarhyolites bien foliées, coiffées en discordance angulaire par une couverture sédimentaire (notamment, sur le socle, présence de trainées ferrugineuses issues de la base de la couverture) (source : Bechennec et al., 2010).....	37
Illustration 19 – Carte géologique synthétique du département de la Loire Atlantique.....	38
Illustration 20 – Organisation des altérites et de l'aquifère d'après Wyns (1998)	40
Illustration 20 – Exemple de cartes « physique » de l'atlas de Loire Atlantique sur la commune de Piriac-sur-Mer	41
Illustration 21 - Exemple de données BSS disponibles au niveau de la Pointe du Castelli (source : www.infoterre.brgm.fr)	42

Illustration 22 – Digitalisation des linéaments et interprétation à partri des orthophotographies (exemple sur le secteur de la Pointe du Castelli, Piriac sur mer)	43
Illustration 23 – Localisation des mouvements de terrain recensés (source : BDMVT, traitement : BRGM)	46
Illustration 24 - Planche SIMECSOL (source : étude SIMECSOL).....	48
Illustration 25 – Exemple d'évaluation du recul du trait de cote réalisé par SOGREAH dans le secteur de Saint-Nazaire	49
Illustration 26 - Exemples de résultats présentés par SOGREAH (2010) pour la commune de Saint-Nazaire.....	50
Illustration 27 - Localisation des clichés géoréférencés et exemple de photo.....	52
Illustration 28 – Réponse des communes au questionnaire	54
Illustration 29 – Exemple de fiche tempête réalisée par le bureau d'étude Alp'Georisque présentant notamment un effondrement de falaise (source : AlpGeorisque)	54
Illustration 30 – Exemple de calcul de pente à partir de la Litto3D (traitement : BRGM)	56
Illustration 31 - Exemple de calcul de hauteur à partir de la Litto3D (traitement : BRGM).....	57
Illustration 32 - Comparaison des orthophotographies de 1950, 1999, 2004 et 2009 au niveau de Port Lin (commune du Croisic).....	60
Illustration 33 – Représentation schématique de différents indicateurs de trait de côte (d'après Boak and Turner, 2005)	62
Illustration 34 – Exemple de cotes constituées de successions de ressauts topographiques de faible hauteur	63
Illustration 35 – Avantages et inconvénients des différents indicateurs considérés dans le cadre de la présente étude	64
Illustration 36 – Disparition d'un bâtiment entre 1999 et 2004 au sud-est de la Baie de la Gouvelle	65
Illustration 37 – Recul « artificiel » des falaises au niveau de la Baie du Crucifix montré par comparaison des orthophotographies de 2004 et 2009	66
Illustration 38 – Mur et enrochement réalisé depuis 2004 au niveau de la Baie du Crucifix au Croisic (visite de terrain du 08/11/2012)	66
Illustration 39 – Exemple de comparaison des orthophotographies de 1950 et 2009 (trait bleu : 1950 ; trait rouge : 2009).....	67
Illustration 40 – Avancement du chemin cotier après comblement d'une indentation (visite de terrain du 31/10/2012)	67
Illustration 41 – Régression de la végétation puis progression depuis 2004 au niveau de la Baie du Crucifix, commune du Croisic (comparaison des orthophotographies de 1950, 2004 et 2009)	68
Illustration 42 - Schéma récapitulatif de la méthode des tampons	70
Illustration 43 – Valeurs obtenues pour le traitement automatique	71
Illustration 44 – Recul de 6,5 m du pied de falaise à Bellefontaine entre 1950 (à gauche) et 2004 (à droite).....	72
Illustration 45 – Recul observé à Saint-Nazaire à l'ouest de la pointe de Chemoulin	73

Illustration 46 – Altération des roches observées à la Pointe de la Croix à Mesquer (F_060)	74
Illustration 47 – Casemate suspendue et grillage de protection à l’est de la plage de Mr Hulot à Saint-Marc (commune de Saint-Nazaire).....	75
Illustration 48 – Exemple de fiche de terrain réalisée dans le cadre de l’étude (après mise au propre).....	76
Illustration 49 – Portion des falaises du littoral de Loire Atlantique objet de visites de terrain (en vert)	77
Illustration 50 – Importantes chutes de blocs de type dièdre au niveau de la falaise à l’entrée de la plage de la Boutinardièrre (partie est de l’indention)	78
Illustration 51 – Chutes de blocs (de type écailles) au niveau de la falaise à l’entrée de la plage de la Boutinardièrre (partie ouest de l’indention)	78
Illustration 52 – Répartition des longueurs des tronçons homogènes	79
Illustration 53 – Présence de personnes en pied de falaise dans une zone où des chutes de blocs sont susceptibles de se produire	89
Illustration 54 – Echelle d’intensité utilisée pour l’étude.....	92
Illustration 55 - Représentation schématique des informations contenues dans la base de données.....	96
Illustration 56 – Taux de recul et zone de recul des têtes de falaises au niveau de la Gouvelle à Batz-sur-Mer.....	96
Illustration 57 - Exemple de fiche réalisée dans le cadre de cette étude	98
Illustration 58 – Cartographie départementale de l’aléa mouvement de terrain du littoral.....	99
Illustration 59 - Cartographie départementale du taux de recul annuel	100
Illustration 60 – Cartographie des tronçons selon leur niveau d’aléa pour le secteur 1	101
Illustration 61 – Exemple d’aléa instabilité sur le secteur 1 (F_069)	102
Illustration 62 - Cartographie du taux de recul annuel pour le secteur 1	102
Illustration 63 - Cartographie des tronçons selon leur niveau d’aléa pour le secteur 2	103
Illustration 64 - Exemple de tronçon soumis à l’aléa instabilité sur le secteur 2 (F_087)	104
Illustration 65 - Exemple de tronçon soumis à l’aléa instabilité sur le secteur 2 (F_144)	104
Illustration 66 - Exemple de tronçon soumis à l’aléa instabilité sur le secteur 2 (F_131)	105
Illustration 67 - Exemple de tronçon soumis à l’aléa instabilité sur le secteur 2 (F_114)	105
Illustration 68 - Cartographie du taux de recul annuel pour le secteur 2.....	106
Illustration 69 - Exemple de tronçon soumis à l’aléa recul sur le secteur 2 (F_124a).....	106
Illustration 70 – Illustrations des cavités au niveau de Pierre Plate au Pouliguen	107
Illustration 71 - Illustrations des cavités au niveau de Bellefontaine à Saint-Nazaire	108
Illustration 72 – Recul au niveau d’une zone de faille affectant une habitation à Bellefontaine (Saint-Nazaire).....	109
Illustration 73 - Cartographie des tronçons selon leur niveau d’aléa pour les secteurs 3 et 4.....	110

Illustration 74 - Exemple de tronçon soumis à l'aléa instabilité sur le secteur 2 (F_186).....	111
Illustration 75 - Cartographie du taux de recul annuel pour les secteurs 3 et 4	112
Illustration 76 - Exemple de tronçon soumis à l'aléa recul sur le secteur 2 (F_171b)	112
Illustration 77 – Formation d'indentations au niveau des zones de failles (source BRGM)	113
Illustration 78 - Régularisation du littoral par détachement d'îlots au Pouliguen (source : BRGM)	113
Illustration 79 – Elargissement des indentations (source : BRGM)	114
Illustration 80 – Régularisation du littoral par détachement d'îlots (source BRGM)	114
Illustration 81 - Evolution de l'altitude du Massif Armoricaïn depuis le Crétacé. Corrélatiöns, à l'échelle régionale, avec son histoire tectono-sédimentaire et, à l'échelle européenne, avec l'histoire géodynamique de la plaque Ouest-européenne (Brault, 2002)	125

Liste des annexes

Annexe 1 Bref historiques et principales formations rencontrées	119
Annexe 2 - Atlas cartographique de la présente étude par commune (carte hors-texte)	
Annexe 3 - CD -ROM contenant l'ensemble des fiches par tronçon de la présente étude	

Introduction

Le littoral de Loire Atlantique se développe sur environ 180 km. Il présente des talus et falaises sur près de la moitié de son linéaire. Leur érosion constitue un processus géologique normal se traduisant par des écroulements plus ou moins nombreux et volumineux selon le type de phénomène qui se produit. Ces écroulements ont pour conséquence un recul plus ou moins rapide de la falaise.

Dans le cadre de la gestion des aléas liés au trait de côte et afin de mettre en place des plans de prévention de risques littoraux pour le littoral de Loire Atlantique, il est nécessaire de connaître les vitesses de recul des falaises, les volumes potentiellement mobilisables et leur spatialisation ainsi que les mouvements de terrain pouvant affecter ces falaises.

Après avoir présenté les objectifs de l'étude, la méthodologie générale mise en œuvre et quelques généralités sur les littoraux rocheux et leur évolution, le bilan des connaissances du littoral de Loire Atlantique est exposé. Ensuite, sont présentés successivement les données acquises dans le cadre de l'étude, les interprétations réalisées et les principaux résultats obtenus.

1. Objectifs et méthodes

1.1. OBJECTIFS ET ZONE DE L'ETUDE

Afin de contribuer à la mise en place de plan de prévention des risques littoraux, l'étude a pour objectifs d'évaluer l'évolution des talus et falaises côtiers de Loire Atlantique et de caractériser les aléas correspondants.

Ces derniers sont de deux sortes :

- l'aléa recul de la falaise : l'objectif pour cet aléa est d'identifier quelle est l'extension du territoire susceptible d'être affecté par le recul de la falaise à échéance de 100 ans ;
- l'aléa mouvement de terrain lié au recul : les mouvements qui accompagnent l'érosion des falaises peuvent générer des dommages aux personnes (chutes de blocs, etc.) ou aux biens et il s'agit de qualifier l'aléa correspondant à ces phénomènes.

La zone d'étude couvre les 20 communes littorales de Loire Atlantique, réparties en 4 secteurs géographiques. Quelques communes ne présentent pas de falaises côtières littorales (telles que définies dans le paragraphe 2.1) et ne sont donc pas concernées par la présente étude. Celles-ci figurent en gris clair dans la liste qui suit. A noter que Pornichet (secteur 2), Saint-Michel-chef-chef (secteur 3) et la Bernerie-en-Retz (secteur 4) présentent très peu de falaises (environ 2 km) .

Du Nord au Sud, les secteurs sont les suivants (Illustration 1) :

- **Secteur 1** (Baie de Pont-Mahé – Traict de Pen-Bé) : Asserac, Saint-Molf, Mesquer et Piriac-sur-Mer
- **Secteur 2** (Presqu'île Guérandaise-Saint-Nazaire) : La Turballe, Guerande, Le Croisic, Batz-sur-Mer, Le Pouliguen, La Baule-Escoublac, Pornichet et Saint-Nazaire
- **Secteur 3** (Côte de Jade) : Saint-Brévin-les-Pins, Saint-Michel-chef-chef, La Plaine-sur-Mer et Préfailles
- **Secteur 4** (Baie de Bourgneuf Nord) : Pornic, La Bernerie-en-Retz, Les Moutiers-en-Retz et Bourgneuf-en-Retz.

Les secteurs 2 et 4 ont été identifiés comme prioritaires dans la circulaire du 02 août 2011 relative à la mise en œuvre des plans de prévention des risques littoraux.

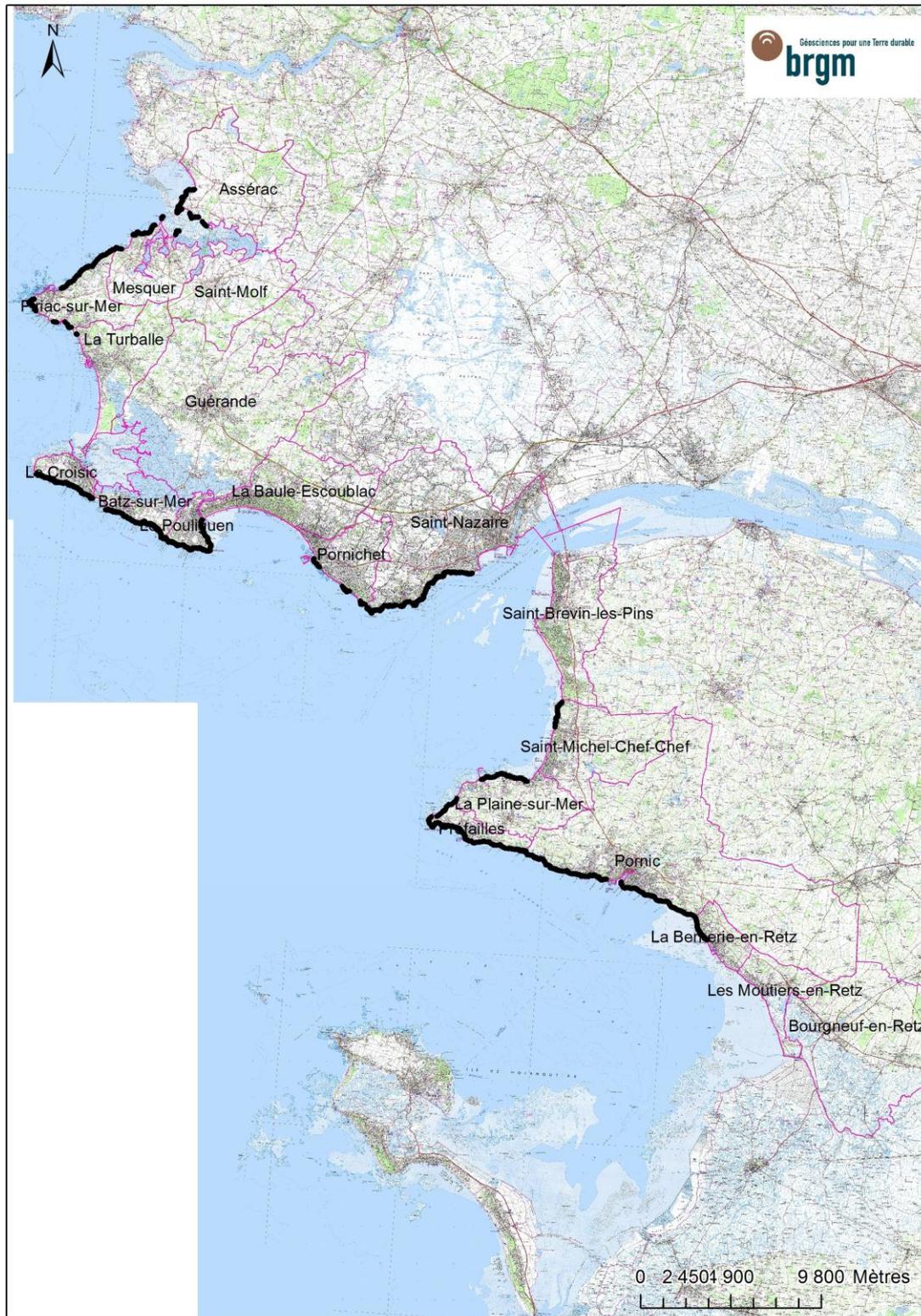


Illustration 1 – Communes littorales de Loire Atlantique et falaises côtières

1.2. METHODOLOGIE GENERALE

Pour atteindre son objectif, l'étude s'est déclinée selon les tâches suivantes (Illustration 2) :

- Identification des zones de falaises ;
- Bilan des connaissances sur les falaises côtières en Pays de la Loire ;
- Détermination de la géométrie des versants à partir de l'exploitation de la litto3D (développement méthodologique pour le calcul des hauteurs de falaises) ;
- Analyse de l'évolution des côtes rocheuses sur des bases historiques (comparaison des orthophotographies de 2004 et 1950 principalement) ;
- Analyse géologique et expertise naturaliste du linéaire, découpage typologique ;
- Constitution d'une base de données comprenant notamment l'ensemble des photographies prises in situ (au nombre de 7 029) et des photographies d'archives (au nombre de 539) ;
- Définition des aléas par secteur typologique, synthèse de l'évolution des falaises et talus, évaluation du recul à 100 ans ;
- Zonage d'aléa et restitution cartographique.

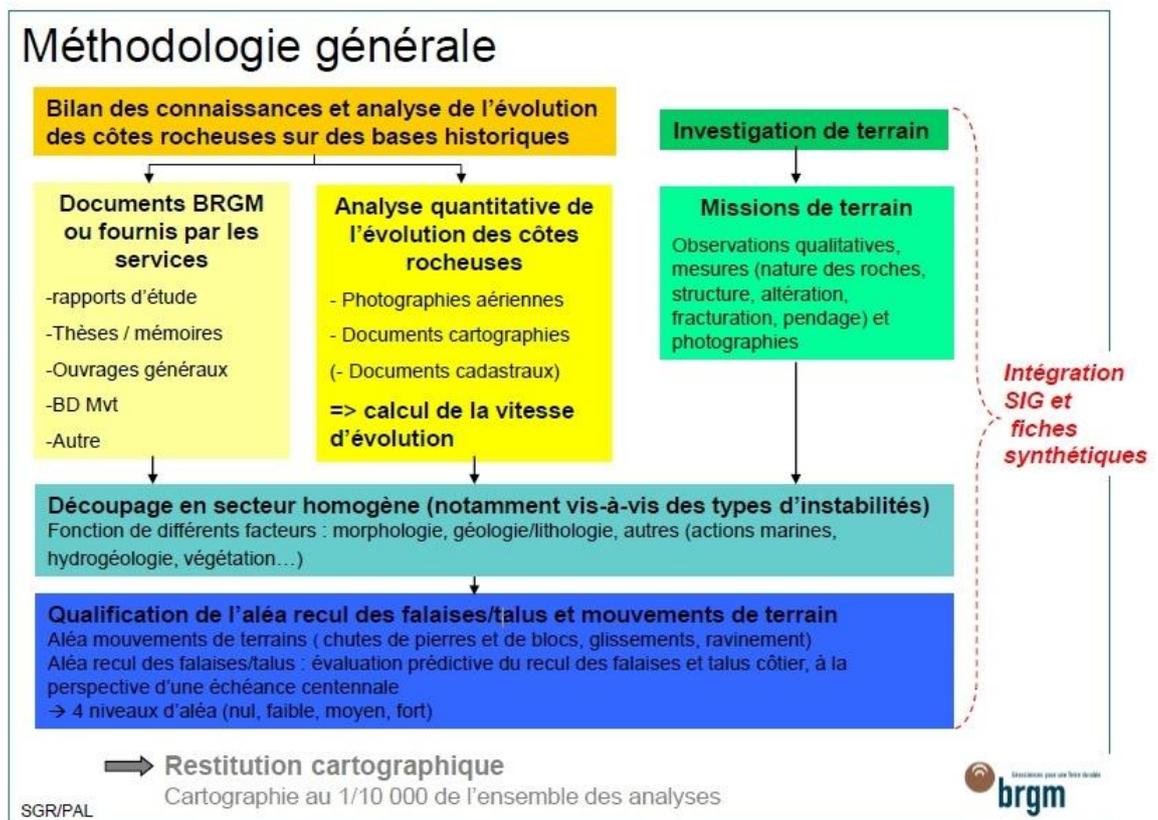


Illustration 2 – Méthodologie générale de l'étude

L'ensemble des analyses a été synthétisé sous la forme d'un zonage des aléas mouvements de terrain et recul de falaises/talus. Ces zonages sont restitués sous forme cartographique (à l'échelle du 1/10 000).

Cette étude a été réalisée sur un linéaire relativement long (environ 81 km). L'approche de l'aléa mouvements de terrain de type instabilités de falaise a dû s'adapter à ce contexte particulier. Malgré tout, afin de disposer d'une information la plus fiable possible, l'ensemble du littoral a été visité.

2. Généralités sur les littoraux rocheux et leur évolution

Les falaises se distinguent par leur morphologie, leur vitesse d'évolution ou encore la structure qui les compose. L'objectif de l'étude étant de déterminer les aléas recul des falaises et mouvements de terrain des falaises côtières littorales, le présent chapitre a pour but de rappeler :

- la définition même de falaise ;
- les différents types de falaises et ce qu'elles indiquent quant à leur mode de mise en place ;
- le mode de recul des falaises et les agents déterminants ce recul.

2.1. DEFINITION GENERALE DES FALAISES EN CONTEXTE LITTORAL

La définition des falaises communément admise dans la littérature et proposée par Guilcher (1954) décrit cette forme comme « un ressaut de végétation, en forte pente (entre 15 ° et le surplomb), de hauteur très variable, au contact de la mer et de la terre et qui est dû à l'action ou à la présence marine ».

2.2. PROCESSUS D'EVOLUTION DES LITTORAUX ROCHEUX

Les littoraux rocheux sont gouvernés par l'érosion. Le départ des altérites (ou d'une éventuelle couverture sédimentaire) met à nu le substrat rocheux. Bougis (2000) détermine deux niveaux d'évolution :

- les littoraux à dénudation sont les littoraux les moins évolués. La roche en place est simplement mise à nu sans attaque érosive forte ;
- les littoraux à falaises se forment quand la roche en place, attaquée par l'érosion, recule. Le dégagement des parties érodées conduit à la formation d'une plateforme d'abrasion marine au pied des parties restées debout qui forment la falaise.

2.2.1. Littoraux rocheux à dénudation

Le paysage littoral à dénudation se présente généralement comme une côte assez basse où les terres cultivées et bâties sont situées à faible altitude et séparés de la mer par des ressauts modestes, parfois informes.

Le monde terrestre, toujours émergé, et non affecté par le modèle littoral vient mourir doucement au bord de la mer. Souvent, seul un muret, une haie ou un talus le sépare du monde maritime. La végétation cède alors brusquement la place à une roche nue, parsemée de lichens ou voilée par des retombées de plantes terrestres incrustées

dans les diaclases. A ce niveau supérieur du littoral, l'influence ordinaire des embruns et celle, occasionnelle, des plus fortes lames de tempête, ont assuré le décapage de la roche sans détruire toutes les traces de la végétation terrestre. Plus bas, la végétation et les lichens disparaissent progressivement jusqu'au platier rocheux que la mer couvre à chaque marée.

En présence de roches particulièrement résistantes et longues à éroder qui n'ont donc quasiment pas évolué depuis la transgression holocène, le paysage à dénudation peut border des paysages terrestres plus abrupts. C'est en particulier le cas de roches dures qui s'étant trouvées à plusieurs reprises dans cette position littorale au fur et à mesure des variations de niveau de la mer du quaternaire, ont lentement évolué en versant raide. Ce type de littoral, raide mais stable, qui diffère fondamentalement d'une falaise dans son mode de fonctionnement, est appelé **fausse falaise**. Il est bordé par une zone complètement nettoyée de toutes ses formations superficielles.

Bien qu'il existe une logique de progression entre les côtes à dénudation et les côtes à falaises, les côtes à dénudation ne sont pas toutes destinées à devenir des côtes à falaises :

- Les conditions lithologiques et le degré d'énergie de la mer peuvent conduire, dans des secteurs protégés, à des côtes à dénudation avec des roches assez tendres pour former des falaises. Il ne s'agit alors que du premier stade d'une évolution qui engendrera, à terme, des **falaises**.
- Par contre, d'autres **côtes à dénudation sont figées dans leur état actuel**. Toutes les altérites ont disparu, mais la dureté du substrat rocheux ne laisse guère de chance à une transformation en falaise.

2.2.2. Littoraux rocheux à falaises

Une falaise est un versant littoral façonné dans des roches plus ou moins dures, qui évolue principalement en réaction à l'attaque de sa base par la mer. Cette dernière présente deux aspects fondamentaux (Illustration 3) :

- le sapement de la roche en place, qui provoque éventuellement le déséquilibre de la partie supérieure du versant et sa chute sur l'estran,
- le déblaiement des débris par la mer, qui les dissout ou les entraîne ailleurs.

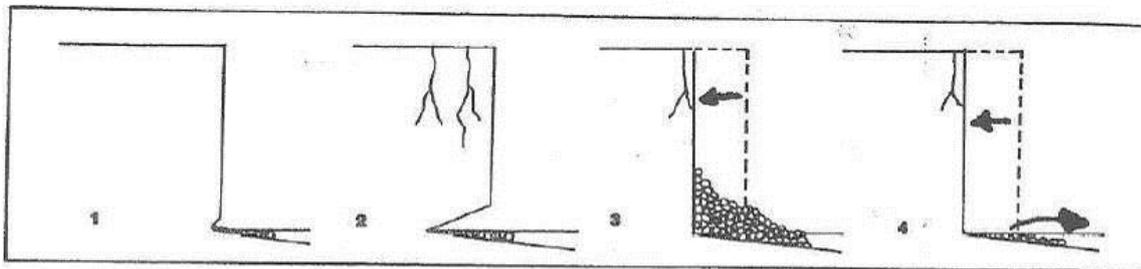


Illustration 3 - Recul par à-coup du pied de falaise sapé par les vagues armées de blocs

La falaise est la partie subaérienne d'un versant mixte qui se prolonge sous la mer. Elle évolue, comme tout versant subaérien, sous l'action des intempéries (pluies, gel, du ruissellement des eaux ...), de la surcharge pondérale due à la saturation en eau, de l'élargissement des diaclases, de la reptation des altérites ... Son originalité provient de ce que les matériaux entraînés vers sa base sont déblayés au fur et à mesure, ce qui interdit au versant de prendre son profil d'équilibre, et renouvelle sans cesse son attaque subaérienne. Le profil de falaise est différent selon la proportion des actions marines et continentales et selon la nature de la roche (Illustration 5).

Le versant est composé de la falaise subaérienne et de sa **plate-forme d'érosion** (ou encore **platier rocheux ou abrasion** dans le cas de roches dures) qui résulte du polissage de la roche saine, par les sédiments qui chargent et arment les lames déferlantes.

Une falaise ne cesse de reculer que si la mer cesse de déblayer sa base. Les éboulis engendrés par les attaques aériennes viennent alors protéger sa base jusqu'à la conduire à son profil d'équilibre. Il s'agit alors d'une falaise morte dont la morphologie est très différente de celles des falaises vives (Illustration 7).

- les **falaises vives** sont caractérisées par un escarpement généralement raide, car battues par les vagues.
- les **falaises mortes**, qui échappent à l'action marine, présentent un tablier de débris (pente de 20 à 30°) issus du démantèlement de l'abrupt. Celui-ci empâte le profil originel de la falaise qui peut être partiellement ou totalement masqué. L'absence de déblaiement des colluvions par la mer fait que l'abrupt évolue comme un versant continental. L'Illustration 4 présente un exemple de falaise morte (commune d'Assérac).



Illustration 4 – Exemple de falaise morte sur la commune d’Assérac (photos BRGM – F_008)

A noter que les falaises mortes, bien qu’elles évoluent sous l’action continentale, sont quand même vraisemblablement marquées par le milieu marin (nature de l’altération des roches, etc...).

Les illustrations 5 à 7 fournissent respectivement des représentations (1) des différents profils de falaise en fonction de la résistance de la roche et du type d’action connu par le littoral, (2) la formation et le recul des falaises et (3) différents types de falaises.

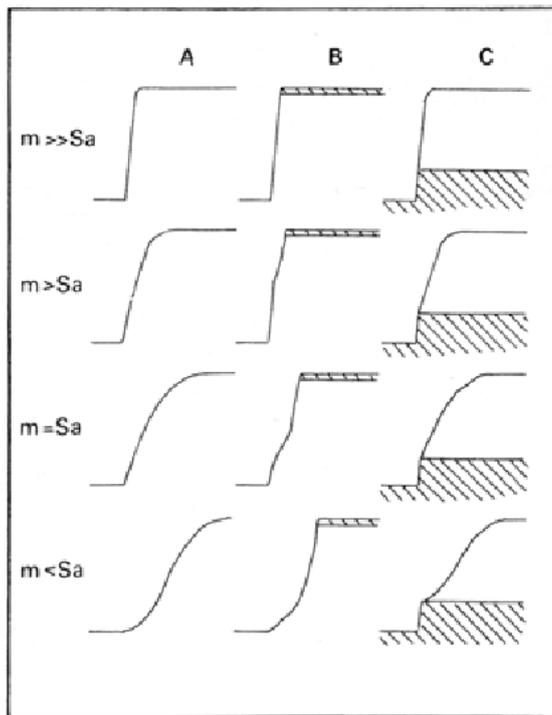


Illustration 5 – Différents profils de falaises (A : Roche homogène, B : roche résistante sus-jacente, C : roche résistante sous-jacente) d'après Emery et Kuhn (1982)

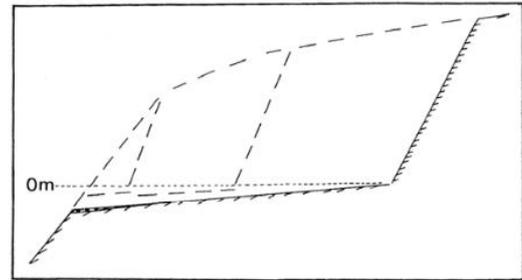


Illustration 6 - Formation et recul d'une falaise ; développement corrélatif d'une plate-forme rocheuse basale d'après Paskoff (1994)

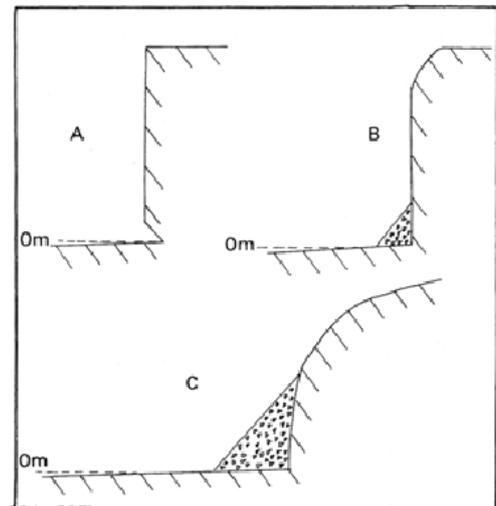


Illustration 7 – Différents type de falaises (A : falaise vive, B : falaise stabilisée, C : falaise morte) d'après Paskoff (1994)

2.2.3. Erosion différentielle marine

Cisèlement de détail (grottes, anfractuosités)

Dans les roches hétérogènes, les grottes, formées par l'action mécanique des vagues, soulignent toutes les lignes de faiblesse (bancs tendres, ligne de faille, plans de stratification...). Leur forme dépend naturellement du pendage des bancs ou de l'inclinaison des plans de faille. D'après Guicher (1954), les effondrements de plafonds y sont fréquents, donnant des puits ou des dépressions fermées.

Irrégularisation du littoral par érosion différentielle marine

D'après Guilcher (1954), l'idée universellement répandue est que la mer tend à régulariser les rivages. Sauf les cotes de grandes plaines non glaciaires, tous les types de côtes initiaux sont irréguliers (indentations nombreuses dans la ligne de rivage). L'œuvre de la mer serait donc de faire disparaître ces indentations, d'une part en sapant les saillants, d'autre part en comblant les rentrants. Une fois la régularisation acquise, il y a recul de l'ensemble parallèlement à lui-même, avec une orientation se modifiant progressivement pour faire front à la houle dominante. Ce recul s'accompagne du développement corrélatif de la plate-forme d'érosion. Toutefois, de nombreux auteurs s'accordent sur le fait que la mer peut irrégulariser le rivage au début de l'évolution (notamment la formation des indentations au niveau des zones de failles).

2.2.4. Exemple des processus de l'attaque des falaises sur le littoral continental de la baie de Bourgneuf

Les processus de l'attaque des falaises sur le littoral continental de la Baie de Bourgneuf sont abordés par Gautier (1971).

Résumé de l'article

*Sur le littoral continental de la Baie de Bourgneuf, la falaise, à l'époque actuelle, n'est plus guère attaquée à sa base, celle-ci étant protégée par des accumulations sableuses ou par des éboulements provenant des destructions du sommet. **C'est donc par leur sommet, essentiellement, que sont érodées aujourd'hui les falaises de la côte rocheuse de la pointe St-Gildas à la grande plage de La Bernerie ; il en va de même des basses falaises meubles de l'Éo-pliocène du littoral des Moutiers.** Le principal agent de cette attaque est constitué par l'infiltration d'eaux météoriques, abondantes lors des tempêtes saisonnières d'octobre-décembre et de mars-avril. Il se forme, dans le head et dans l'argile de décomposition des micaschistes de la côte rocheuse, ainsi que dans les formations friables de l'Éo-pliocène des Moutiers, des rigoles qui tendent à repousser leur tête vers l'amont, creusant peu à peu des ravines au sommet des falaises dont, bientôt, se détachent des éboulis assez considérables. Les diaclases constituent, par ailleurs, des points faibles. Parfois même, dans le secteur rocheux, le recul s'opère à la faveur de diaclases parallèles à la ligne de rivage. Les eaux de ruissellement engorgent les fissures, pourrissent la roche, et font pression sur les parois. La falaise s'éboule par pans entiers, d'ordinaire minces. C'est en raison de l'importance des destructions dues à l'attaque du littoral qu'il a fallu édifier un système de défense adapté à chacun des deux types de côtes à falaises. Les murs de pierres de la côte rocheuse, et les épis doublés de murs bas du littoral Éo-pliocène, présentent une certaine efficacité. Toutefois, ils ne semblent pas toujours parfaitement adaptés aux formes actuelles de l'attaque des falaises par leur sommet, sous l'influence des infiltrations d'eaux météoriques.*

L'auteur mentionne qu'à l'heure actuelle, la falaise, dans le secteur de la Baie de Bourgneuf n'est guère attaquée par sa base si ce n'est qu'exceptionnellement.

Au Normannien, il en fut visiblement autrement comme en témoigne les quelques grottes perchées de la côte rocheuse. Celles-ci sont visibles dans le secteur de la Boutinardière-la Patorie, au nord de la Bernerie sous forme d'une succession d'encoches d'environ 1 m dans le Briovérien et situées les unes à 4-5 m et les autres à une dizaine de mètres des hauts de plage.

2.1. MOUVEMENTS DE TERRAIN AFFECTANT LES FALAISES COTIERES

2.1.1. Différents types de mouvements de terrain

Les éboulements et chutes de blocs

Définition : les chutes de blocs et les éboulements sont des phénomènes rapides, mobilisant des masses rocheuses plus ou moins homogènes à partir d'une paroi verticale ou d'une forte pente. Ils consistent en la libération par gravité de blocs formés par fragmentation de ces masses rocheuses. La chute de blocs ne concerne qu'un volume réduit d'éléments ; pour les éboulements en masse, le volume mis en mouvement est beaucoup plus volumineux (Illustration 8).

Type d'évènement	Volume unitaire	Volume impliqué
Chute de pierre	Vol. unitaire inférieur à 1 dm ³	Volume global faible
Chute de bloc	Vol. unitaire inférieur à 1 m ³	Volume global variable
Chute de gros bloc	Vol. unitaire supérieur à 1 m ³	Vol. global supérieur à 1 m ³
Eboulement en masse	Variable	Vol. global supérieur à 10 m ³
Glissement meuble de talus		Volume global variable
Coulées		Vol. global supérieur à 1 m ³

Illustration 8 - Typologie des instabilités

Nature des terrains concernés : formations rocheuses

Facteurs de prédisposition : fracturation, pente, altération, sous-cavage, présence de vides, hauteur de paroi.

Facteurs déclenchant : pluie (infiltration et mise en pression dans les fissures), gel/degel, séismes, actions anthropiques (surcharge, travaux, vibration...).

Les illustrations 9 et 10 fournissent des exemples d'évènements observés sur le littoral de Loire Atlantique.



Illustration 9 – Chutes de pierres et de blocs observées au niveau de Porcé à Saint-Nazaire (source BRGM)



Illustration 10 - Chutes de dièdres à Piriac-sur-Mer (source : BRGM)

Les glissements de terrain et fluages

Définition : un glissement de terrain correspond à un déplacement généralement lent d'une masse de terrains meubles et/ou instables à partir d'une surface de rupture. Le fluage est un mouvement lent de matériaux plastiques sur faible pente qui résulte d'une déformation gravitaire continue d'une masse de terrain non limitée par une surface de rupture clairement identifiée ;

Nature des terrains concernés : formations meubles (sables et argiles).

Facteurs de prédisposition : pente, altération, hauteur de versant, nappe.

Facteurs déclenchant : pluie (remontée de nappe), actions anthropiques (déblais, remblais).

Facteurs aggravants : absence de végétation.

L'illustration 11 présente un exemple d'évènement de ce type à Mesquer.



Illustration 11 - Exemple de glissement superficiel (péliculaire) observé à Mesquer au niveau du Port du Moulin (source BRGM – F_056b)

Les ravinements – érosion des sols

Définition : Le terme de ravinement (érosion des sols) désigne un décapage superficiel des sols et du sous-sol. L'érosion est souvent considérée comme un phénomène long et progressif.

Nature des terrains concernés : formations meubles (sables et argiles).

Facteurs de prédisposition : pente, altération.

Facteurs déclenchant : pluie.

Facteurs aggravants : absence de végétation.

2.1.2. Actions responsables de ces mouvements

Plusieurs types d'actions sont responsables de l'évolution des falaises en milieux marins. Les actions marines qui résultent de combinaisons de processus divers à la fois mécanique (chocs dus aux vagues ou mitraillages de graviers ou autre provenant de démolitions antérieures), physico-chimique (altération des minéraux, dissolution,

etc.) et biologique (les micro-organismes, mais aussi les animaux plus gros, ont des actions multiples qui fragilisent la roche). Toutefois, les actions continentales sont parfois plus importantes que les actions marines. En effet, la falaise est fragilisée par les infiltrations/ruissellement qui induisent des phénomènes d'entraînement de matière, d'altération, voire de dissolution au sein de la roche, ou encore par le gel (Illustration 12).

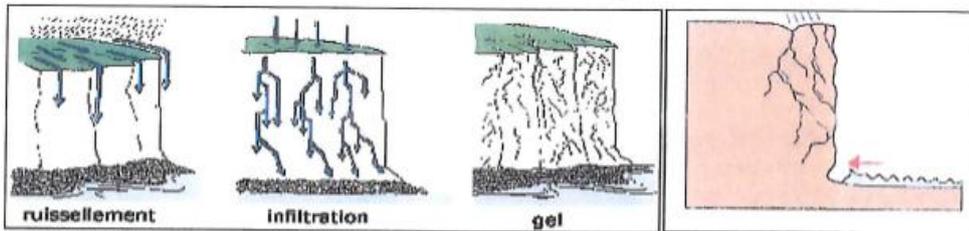


Illustration 12 – Principales actions continentales et marines à l'origine du recul des falaises et côtes rocheuses (d'après Paskoff, 1993)

A noter qu'il est difficile de considérer que les actions sont purement continentales même si la falaise n'est plus soumise directement à l'attaque des vagues. En effet, le milieu marin (embrun, etc.) peut entraîner notamment des modifications physico-chimiques des roches.

2.2. VITESSE DE REcul DES FALAISES

Comme mentionné dans le paragraphe précédent, le profil des falaises varie en fonction de la résistance et de la disposition des roches affleurantes mais également selon l'agressivité combinée des processus marins et/ou subaériens. En fonction de ces divers facteurs, les vitesses de recul des falaises seront contrastées (guide de gestion du trait de côte, 2010) :

- falaises à recul dit rapide : de l'ordre du **centimètre au décimètre par an** ;
- falaises à recul lent : **recul annuel inférieur au centimètre**.

Woodroffe (2002) propose un ordre de grandeur de recul des falaises en fonction de la nature de la roche (Illustration 13).

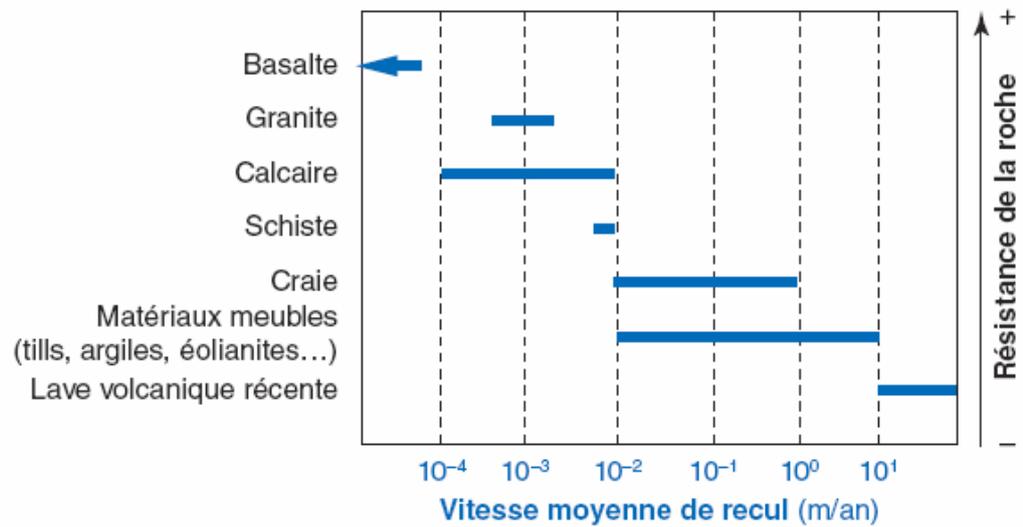


Illustration 13 – Recul moyen des falaises en fonction des matériaux constitutifs (Woodroffe, 2002)

Pour fournir quelques ordres de grandeur, d'après Aubié et al. (2005), la côte rocheuse aquitaine recule en moyenne de 20 cm par an. La vitesse de recul moyenne mesurée sur plusieurs décennies peut localement atteindre plus de 50 cm/an. Par ailleurs, Dewez et al. (2008) ont instrumenté une falaise de craie sur la côte normande. Celle-ci présente un recul moyen mesuré compris entre 0,13 et 0,94 m/an (en prenant en compte les chutes de très gros blocs très peu fréquentes).

3. Bilan des connaissances du littoral de Loire Atlantique

Une deuxième étape a consisté à synthétiser l'ensemble des données sur le littoral de Loire Atlantique permettant d'apporter des éléments pour :

- la compréhension des observations sur le terrain ;
- le découpage du linéaire de falaise en zones homogènes ;
- l'interprétation en termes d'évolution côtière.

L'ensemble des données collectées dans cette phase ont été intégrées au SIG de manière à être croisées avec les données acquises par ailleurs.

3.1. CADRE GEOLOGIQUE

D'un point de vue géologique, la zone d'étude étant située dans le massif armoricain, le substratum se compose majoritairement de roches métamorphiques de type gneiss, micaschistes, schistes mais aussi de roches plutoniques non métamorphisées, comme le granite et la rhyolite.

3.1.1. Historique géologique simplifié

L'annexe 2 présente un historique géologique simplifié du massif armoricain extrait de Hewitt (2010).

3.1.2. Les variations du niveau marin (eustatisme)

L'étude des variations du niveau marin permet de savoir si la zone a pu être confrontée par le passé à des niveaux marins supérieurs à ceux connus aujourd'hui (ce qui permet notamment d'expliquer la présence de grottes à des niveaux intermédiaires de falaises, etc.) et permet également d'appréhender l'effet de l'élévation du niveau marin sur les falaises côtières dans le cadre du changement climatique.

Les variations du volume d'eau océanique sont principalement contrôlées par la croissance ou la réduction des calottes glaciaires continentales (Pirazzoli, 1996; Miller et al., 2005). Dans ce cas-là, l'eustatisme qui en résulte est rapide (de l'ordre de la dizaine de milliers d'années) et de forte amplitude (supérieure à 200 mètres). Les illustrations présentent les évolutions du niveau marin et montrent qu'autour de 125 000 ans et 410 000 ans, le niveau marin a été au moins équivalent au niveau actuel.

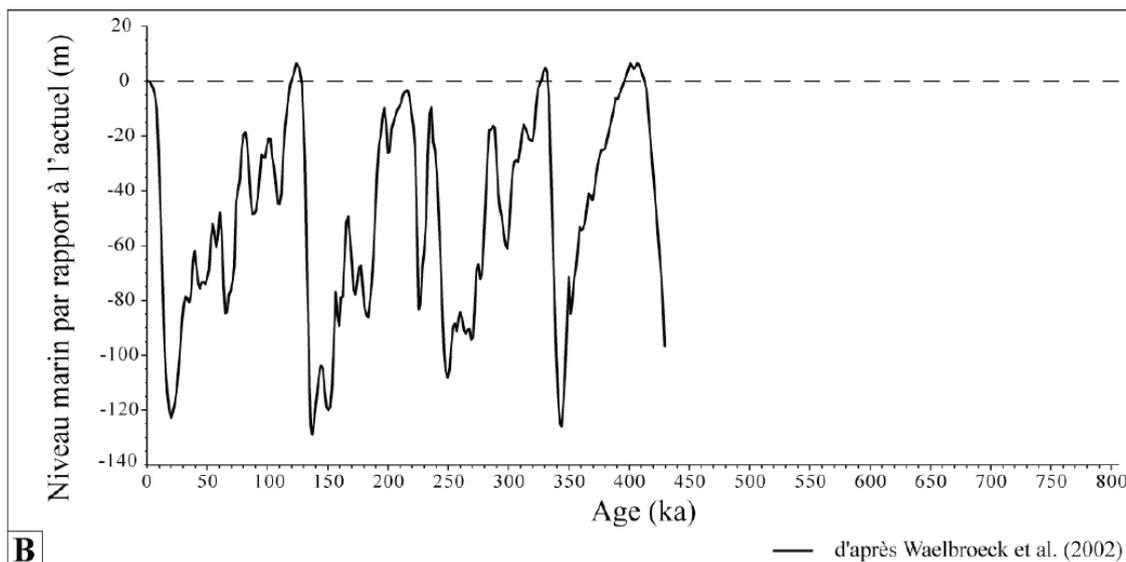


Illustration 14 - Variations du niveau marin par rapport à l'actuel depuis 450 000 ans, d'après Waelbroeck et al. (2002)

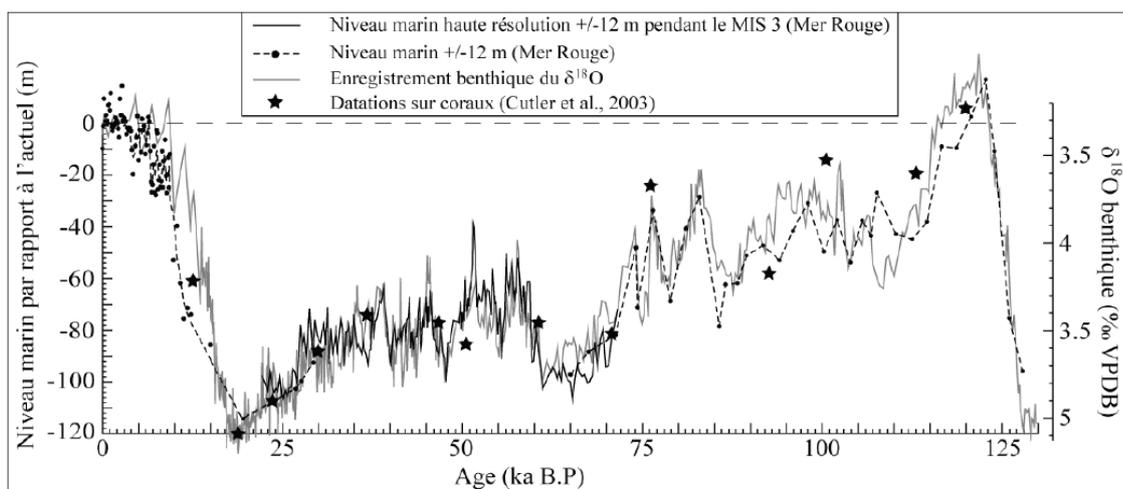


Illustration 15 - Reconstruction des variations du niveau marin par rapport à l'actuel au cours du dernier cycle glaciaire-interglaciaire (Riss/Würm), d'après Siddal et al. (2003)

3.1.3. Description des principales formations rencontrées

Cette description présente une synthèse géologique des notices des feuilles 449 (La Roche Bernard), 479 (Saint-Nazaire) et 507 (Machecoul).

Les formations du socle

• Micaschistes

Les micaschistes sont une roche métamorphique commune, à grains généralement moyen, à schistosité et foliation marquées, riche en lamelle de mica visibles à l'œil nu, d'où un débit facile en plaquettes à surface brillante. Lorsqu'elles sont altérées, elles deviennent des argiles de faible cohésion. Cela se rencontre typiquement au sommet des falaises, sous l'influence continentale, ce qui peut déclencher des glissements de terrain (par exemple au nord de la pointe du Castelli) et des éboulements plus fréquents (sud-est de Pornic). Les formations de micaschistes sont réparties principalement au nord et au sud de la zone d'étude (Assérac, Mesquer, Piriac, Pornic).

Faciès rencontrés :

Plusieurs faciès sont rencontrés sur le littoral 44 : Formation de la Vilaine, Formation de Pornic, Formation de Saint-Gilles. Ces deux derniers portent la marque de 3 phases successives de métamorphisme.

Caractéristiques des Micaschistes de la formation de la Vilaine (feuille 449)

- Hétérogénéité très forte : présence de lentilles et de filonnets de quartz constituant jusqu'à 20 % du volume de la roche ;
- Débit schisteux sub-horizontale dominant : roche à cohésion très faible.
- Fracturation verticale importante.
- Altération puissante réduisant parfois la roche à l'état d'argile sur 5 à 10 mètres d'épaisseur (falaise de la Mine d'Or et de Quimiac en recul constant).

• Granite

Un granite est une roche magmatique plutonique grenue, de teinte claire essentiellement constituée de quartz et de feldspaths. Il est en général massif et stable. Les roches granitiques sont moins présentes que les micaschistes : on observe les formations de granite de Guérande entre la pointe du Castelli et la pointe du Croisic, et plus au Sud de celle-ci (Massif de Saint-Père-en-Retz). Elles sont également présentes plus sporadiquement en bordure littorale (des pics délimitant des plages pochés), de forme massive ou associées avec le gneiss (migmatites).

Faciès rencontrés :

Leucogranite de Guérande – Le Croisic : Le granite de Guérande s'étend entre la pointe du Castelli et la Grande Brière. C'est un granite clair, à grain grossier ou moyen, à muscovite et biotite, la muscovite étant le minéral dominant. Il est constitué en partie égale de quartz globuleux, de feldspath microcline et d'albite (An < 10) en cristaux bien maclés. La muscovite est en grandes lames alors que la biotite est toujours altérée et forme de petites paillettes.

Ce granite se trouve sous sa forme mylonitisée au niveau de la pointe du Croisic.

Caractéristiques du Leucogranite de Guerande (feuille 449)

- Roches à homogénéité bonne ou moyenne suivant les secteurs (abondance plus ou moins grande des enclaves) ;
- Orientation plus ou moins accusée des minéraux (biotites) donnant une foliation ;
- Fracturation : système de lithoclasses perpendiculaires à la foliation ;
- Altération superficielle forte (arènes granitiques).

Le Granite d'anatexie de Saint Pierre en Retz forme un massif d'orientation générale W—E, entre Saint-Brévin et Vue. Les affleurements de granité franc ne sont pas continus, car il subsiste à l'intérieur du massif de très nombreuses enclaves des roches dans lesquelles il s'est mis en place.

• **Migmatite et gneiss**

Les migmatites sont constituées de deux types de roches différentes nettement reconnaissables, s'interpénétrant en conservant des limites franches. La roche hôte est une roche métamorphique gneissique, la roche pénétrante est une roche magmatique granitique.

Les gneiss sont des roches métamorphiques très communes, à grains moyens ou grossiers (du mm au cm), à foliation souvent nette caractérisée par des lits généralement de teinte sombre (riches en minéraux ferromagnésiens : biotites, amphiboles...) alternant avec des lits clairs de quartz et de feldspaths, ces derniers étant nombreux et visibles à l'œil nu (à la différence des micaschistes).



Illustration 16 – Photo d'une roche gneissique (source : BRGM)

Le front de falaise gneissique peut être relativement résistant à l'altération, quoiqu'une altération comparable aux falaises de micaschistes soit parfois à noter pour les falaises de Petit Gavy et de Bellefontaine (à l'ouest de Saint-Nazaire).

Faciès rencontrés :

Les *diatexites de Saint Pierre en Retz* : Par dissociation de la trame embréchitique et des exsudats anatectiques locaux en loupes ou filonnets d'épaisseur centimétrique à décimétrique, se développent des faciès hétérogènes caractérisés par un mélange de gneiss embréchitiques et d'un jus granitoïde ou pegmatoïde exsudé secondairement. Ces faciès sont particulièrement développés dans le secteur s'étendant de Saint-Marc au Petit Gavy.

Les *migmatites de Saint Nazaire* : Par recristallisation et homogénéisation progressive, cette évolution conduit à des roches granitoïdes dans lesquelles subsistent des fantômes ou traînées diffuses de la trame initiale (roche Chauvatte, baie des Marsouins). On aboutit ainsi à des amas granitiques plus ou moins bien homogénéisés, plus ou moins riches en biotite, parfois chargés de petites enclaves cristallophylliennes sur-biotitiques (fort de l'Eve près de Saint-Marc). Il s'agit alors d'une roche granitique à grain fin, aux feldspaths en grain de semoule sub-quadrangulaires, cloisonnés par la biotite et le quartz.

Gneiss métatectiques à biotite et sillimanite (embréchites). C'est le faciès moyen le plus courant des migmatites silico-alumineuses de la Basse-Loire. Ils se présentent sous la forme de roches plus ou moins finement rubanées avec une alternance (ségrégation) de lits quartzo-feldspathiques clairs (leucosome granitoïde) et de lits phylliteux sombres (mélanosome). Le leucosome est constitué de quartz, oligoclase, microcline, apatite. Le mélanosome est essentiellement biotitique mais peut présenter, dans certains faciès plus alumineux, un peu de sillimanite, grenat, cordiérite. De la muscovite tardive se manifeste en lames poecilites, dispersées.

Gneiss migmatitique à sillimanite (Formation du Morbihan). Au sein des embréchites s'observent localement des niveaux plus sombres, plus micacés, riches en disthène-sillimanite, cordiérite, grenat. Ce sont les morbihannites définies il y a près d'un siècle dans le golfe du Morbihan.

• La formation des porphyroïdes de Vendée

La formation dite des Porphyroïdes est un complexe volcano-sédimentaire, constitué par des nappes d'épanchements rhyolitiques, alternant avec les produits de leur érosion, plus ou moins remaniés : arkoses grossières, arkoses fines schisteuses, grès blancs micacés, schistes et quartzites noirs, d'épaisseur métrique. Cet ensemble métamorphique a cristallisé dans un faciès de schistes à muscovite. Cette formation regroupe différents faciès (porphyroïdes massive, porphyroïde schisteuse, tufs à faciès ampéliteux, arkoses granuleuses, arkoses schisteuses, schistes à grains de quartz, grès blancs à muscovite, microquartzites graphiteux, filons de quartz) et présente comme principale caractéristique la présence de cristaux de grande taille dispersés au sein de minéraux de taille plus petite.

Les formations des porphyroïdes de Vendée touchent la côte sud de l'embouchure de la Loire, à partir de Comberge (le plus souvent accompagnées de formations dunaires) jusqu'à la pointe de Saint-Gildas (littoral rocheux à falaises vives) ainsi qu'à hauteur de la Bernerie-en-Retz.

Faciès rencontrés

La quasi-totalité de la presqu'île de Saint-Gildas est constituée par une formation complexe, d'aspect gneissique, stratoïde et très peu inclinée, où alternent, à l'échelle métrique à décamétrique, des coulées rhyolitiques, des tufs, des arkoses et des schistes recristallisés dans des conditions épizonales, lors de l'orogénèse éodévonienne.

A Roche-Marie, on peut observer une rhyolite métamorphique, grise, à gros phénocristaux de microcline et de quartz bleu, très fortement étirés, ainsi qu'un faciès ampéliteux et oeillé, à microcline noir.

Entre Roche-Marie et Crève-Coeur, existent de très nombreux accidents : failles avec miroirs, écaillés de schistes chloriteux, de grès feuilletés et de porphyroïde, chevauchements.

A la Patorie, des schistes et des grès feuilletés ampéliteux, à lentilles de microquartzites noirs, sont intercalés dans la porphyroïde; les ampélites ont été entraînées au Quaternaire dans une injection périglaciaire qui les a soulevées de plusieurs mètres, en falaise. Au-dessous, affleure une rhyolite riche en phénocristaux de quartz bleu et de feldspath noirâtre (1,5 cm), faisant saillie à la surface des bancs. Ce niveau, épais, repose sur des bancs de grès feldspathiques, finement rythmés.

A 25 m au Nord-Ouest du gisement de ces ampélites, les faciès détritiques des porphyroïdes sont très variés : chacun d'eux a une puissance de quelques décimètres quelques mètres seulement. On observe, en superposition : des schistes micacés, des schistes à rythmes fins siliceux, des schistes arkosiques à lits de petits feldspaths, des schistes micacés, des grès blancs, des schistes, des arkoses grossières, des ampélites, des grès feuilletés, des arkoses fines, etc.

Sur le très vaste estran situé au large de la Boutinardièrre, de la Bernerie et des Moutiers, tous les faciès décrits ci-dessus sont représentés. Des bancs de grès blanc à muscovite y sont associés aux microquartzites graphiteux (la Sennetière).

Les formations superficielles

La côte de Loire Atlantique présente localement des formations superficielles. Certaines sont très remarquables comme à Mesquer ou la Bernerie-en-Retz et ont été retenues dans le cadre du Patrimoine géologique de Loire Atlantique. Ainsi, sur la commune de Mesquer, une séquence conglomératique basale à matrice sablo-argileuse, d'origine vraisemblablement fluviale (Bechennec et al., 2010) a été rencontrée (cf. Illustration 17).

De même, à la Bernerie en Retz, la couverture sédimentaire repose en discordance angulaire sur le socle dont les altérites ont été entièrement décapées avant dépôt de la couverture sédimentaire (Bechennec et al., 2010). Cette dernière débute par une "stoneline" de 0,30 à 0,50 m de puissance constituée par de nombreux galets ou clastes sub-arrondis, essentiellement de quartz laiteux, plus rarement de micaschistes,

de 0,5 à 6 cm de diamètre. Ces galets, non granoclassés, dont la facture indique une origine fluviale, sont emballés dans une matrice fine silto-argileuse, peu abondante. De plus, ces galets montrent fréquemment une patine rouille qui, lessivée, induit la formation de "trainées ferrugineuses" sur les porphyroïdes du socle sous-jacent ; cette ferruginisation des galets traduit, probablement, une phase de continentalisation, avant la sédimentation des argiles silteuses beiges qui surmontent la stoneline basale (fig. 4). L'âge de ces dépôts est inconnu mais il est probable, au vu des données régionales, qu'ils datent de la fin du Tertiaire ou du début du Quaternaire.



Illustration 17 - Séquence conglomératique basale à matrice sablo-argileuse, d'origine vraisemblablement fluviale à Mesquer (source : BRGM)



Illustration 18 - Site de la Patorie avec une falaise essentiellement constituée de métarhyolites bien foliées, coiffées en discordance angulaire par une couverture sédimentaire (notamment, sur le socle, présence de trainées ferrugineuses issues de la base de la couverture) (source : Bechennec et al., 2010)

L'illustration 19 présente une carte géologique synthétique des formations géologiques rencontrées sur les communes du littoral de Loire Atlantique.

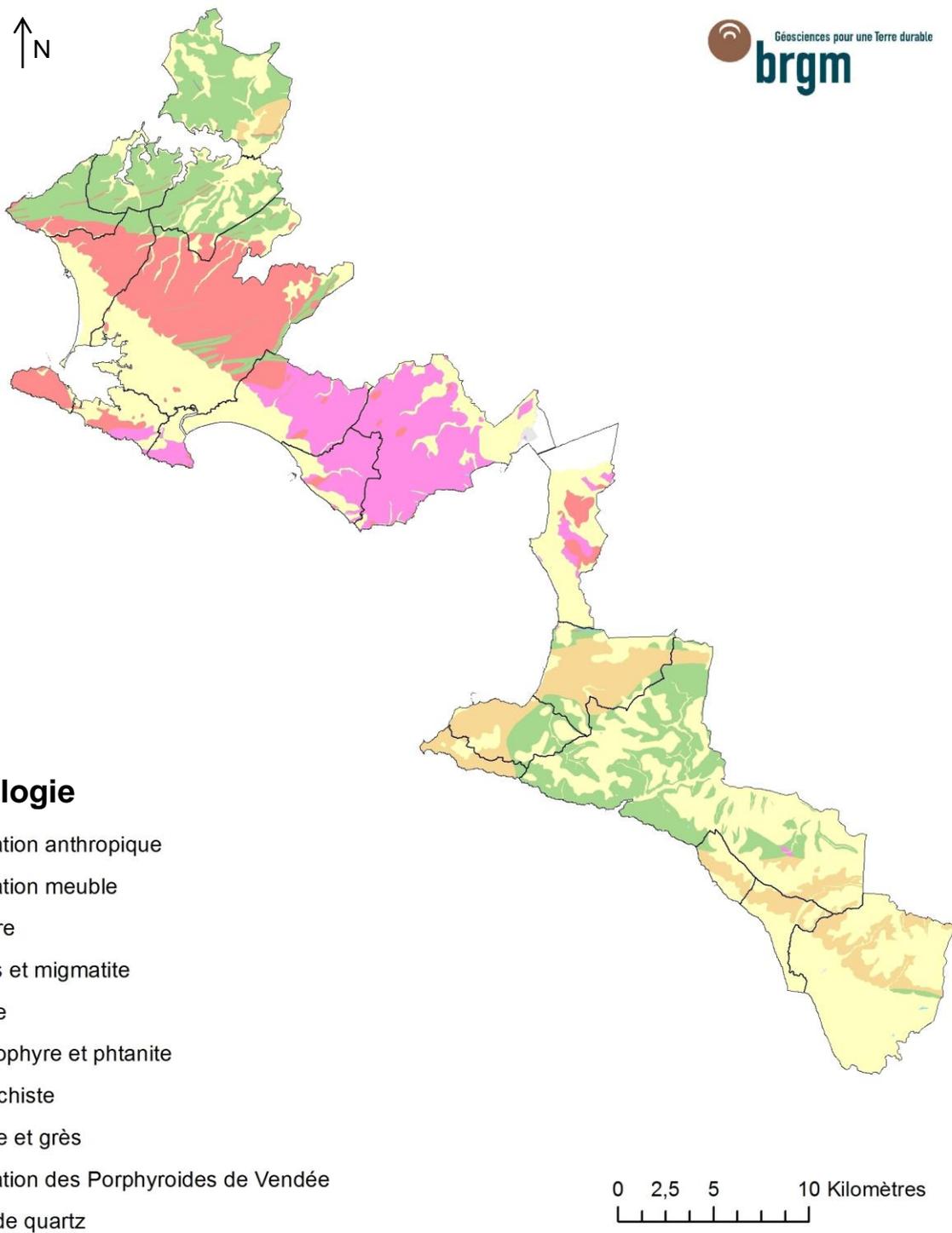


Illustration 19 – Carte géologique synthétique du département de la Loire Atlantique

3.2. ALTERATION DES ROCHES

3.2.1. Profil d'altération

De la base au sommet, le profil d'altération est le suivant (Illustration 20):

- La Zone fissurée ou le domaine fissuré, en continuité avec la roche-mère sous-jacente et d'une épaisseur variable (60 à 70 m) est caractérisée par une fracturation importante qui décroît en profondeur et qui provient de l'éclatement de la roche sous l'effet des contraintes produites par les changements de phases des minéraux (hydratation des ferro-magnésiens – biotite - avec augmentation de volume, oxydation des sulfures) et de l'histoire tectonique la roche-mère. La fracturation liée à l'altération entraîne une augmentation de la porosité de la roche-mère.
- Les Isaltérites sont des roches meubles où la texture originelle de la roche et les relations spatiales entre les minéraux sont préservées. Le volume de la roche n'est, dans le détail, pas conservé totalement, en raison de l'apparition de nouveaux minéraux qui « gonflent » ou se « contractent » en fonction du degré d'hydratation du profil.
- Les isaltérites passent progressivement aux Allotérites, terme utilisé pour décrire les horizons altérés où les structures de la roche-mère (stratification, schistosité ou foliation) ne sont plus visibles. Les minéraux sensibles à l'eau, sont alors remplacés par des minéraux argileux, des oxydes et hydroxydes. Ces transformations s'accompagnent d'une disparition progressive de la structure de la roche originelle et d'une perte de volume.
- Parallèlement au développement du profil d'altération, des formations siliceuses (silcrètes), correspondant à une mobilisation lente de la silice de la roche-mère, se mettent en place en base de profil dans un contexte tectonique relativement stable.
- Enfin, le sommet du profil est coiffé, d'une partie rarement conservée en Bretagne qu'est la cuirasse ferrugineuse ou ferricrètes.

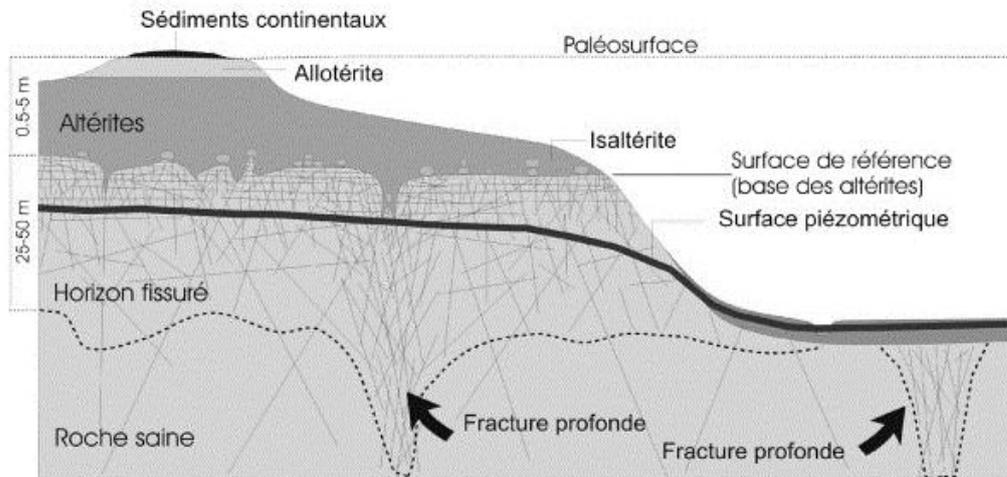


Illustration 20 – Organisation des altérites et de l'aquifère d'après Wyns (1998)

3.2.2. Données de l'atlas de Loire Atlantique

Une première idée de l'altération des roches est fournie par l'atlas de Loire Atlantique. Cet atlas, réalisé par le BRGM en 1991 en partenariat avec le conseil général et l'Igarun synthétise l'information disponible sur le littoral du département et fournit les principales caractéristiques du trait de côte du département.

Les formations côtières ont été classées en trois types d'état :

- falaises saines ou quasi-saines : la roche résiste aux coups de marteau ou ne livre que quelques blocs ;
- falaises semi-altérées : la roche livre des blocs de tailles diverses, le son produit par le marteau est sourd, les filons de quartz peuvent s'enlever à la main (ce type de roche peut être sain dans sa partie inférieure et altéré dans sa partie supérieure) ;
- falaises altérées : la falaise est argilisée ou altérée au point d'y enfoncer aisément la lame de couteau.

L'information est restituée sur l'ensemble du littoral de Loire Atlantique sous forme de 12 cartes à l'échelle 1/25 000 (Illustration 21).

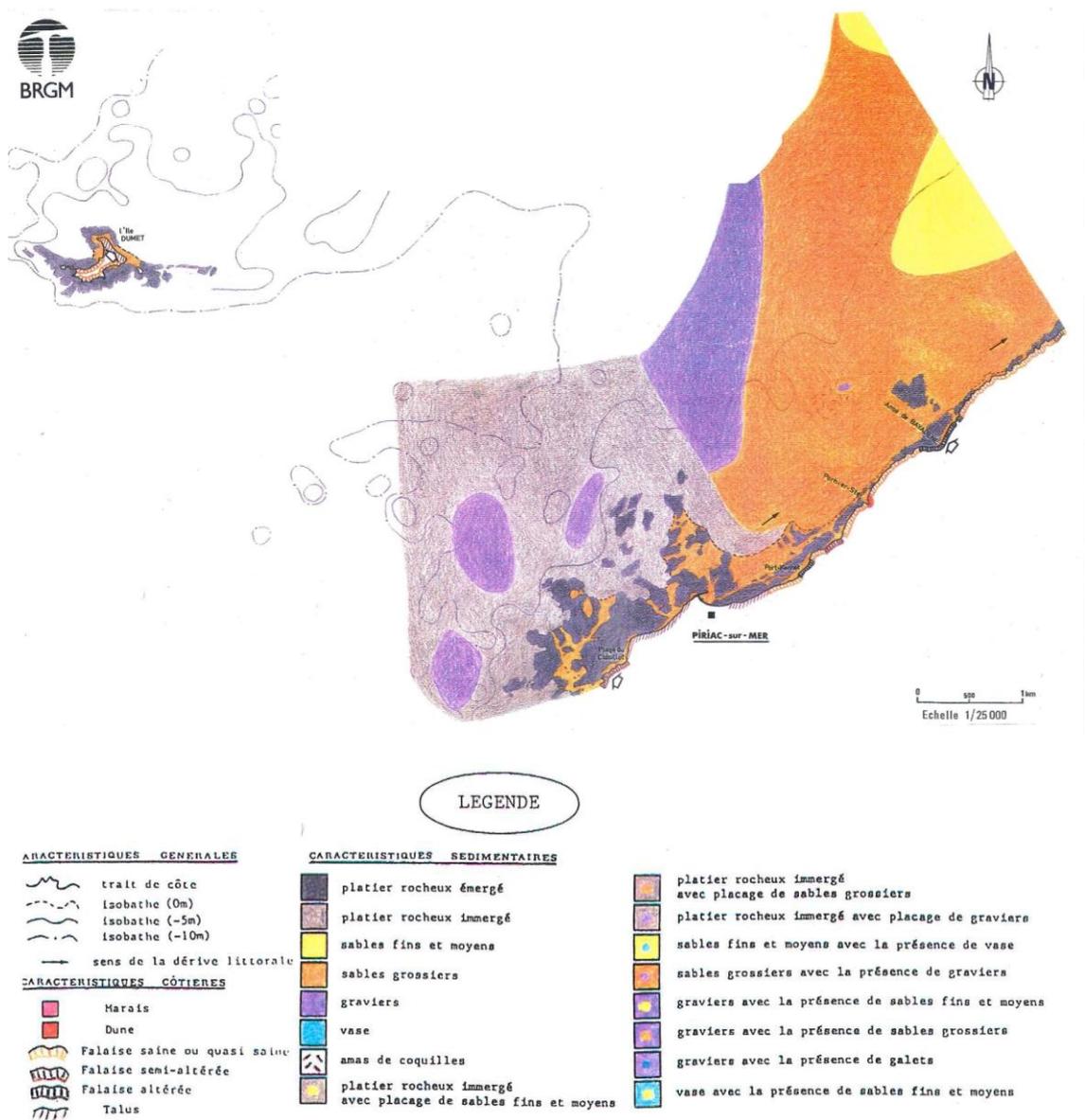
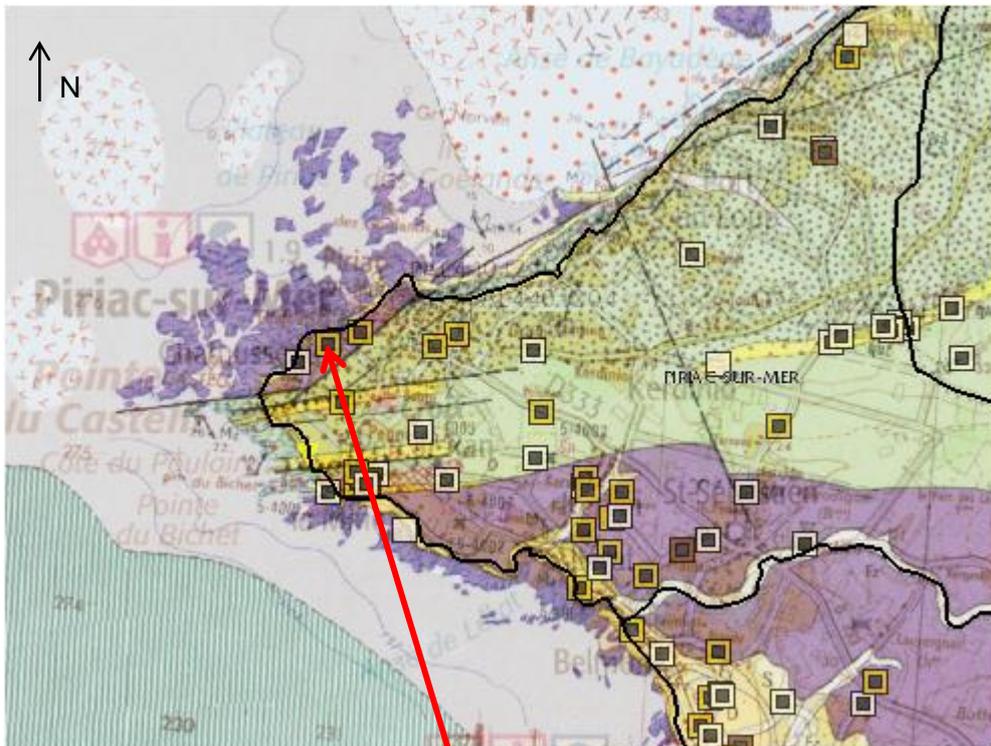


Illustration 21 – Exemple de cartes « physique » de l'atlas de Loire Atlantique sur la commune de Piriac-sur-Mer

L'ensemble de ces cartes a été géoréférencées et l'information concernant l'altération a été intégrée au SIG puis confrontée aux observations de terrains.

3.2.3. BSS

Par ailleurs, la Banque de données du sous-sol¹ a été consultée ponctuellement afin de conforter les épaisseurs d'altération observées in situ.



Profondeur	Lithologie	Stratigraphie
De 0 à 4 m	TERRE VEGETALE ET ARGILE	ACTUEL
De 4 à 90 m	GRANITES TENDRES DE COULEUR ROSE ET BLEU	PRIMAIRE

Illustration 22 - Exemple de données BSS disponibles au niveau de la Pointe du Castelli (source : www.infoterre.brgm.fr)

3.3. FRACTURATION ET STRUCTURE

Comme il a été vu au paragraphe 2, la fracturation et la structure de la roche peuvent jouer un rôle important dans l'évolution des falaises littorales (ouvertures de grottes, formation des indentations, etc.).

¹ La banque des données du sous-sol (BSS) est la base de données nationale des ouvrages souterrains déclarés sur le territoire français (code minier, code de l'environnement). Elle regroupe les informations techniques acquises lors des forages et collectées auprès des foreurs et des maîtres d'ouvrages. Elle est notamment consultable sur www.infoterre.brgm.fr

Le littoral de Loire Atlantique est fortement faillé et marqué par plusieurs familles de failles directement reliées à la tectonique. Il est important, sur le terrain, afin d'améliorer la compréhension de la fracturation, de connaître les orientations principales de fracturation.

Les feuilles géologiques détiennent des informations linéaires relatives à la structure géologique. L'ensemble de ces informations a été intégré à la présente étude. Par ailleurs, une digitalisation des linéaments a été réalisée au BRGM à partir des orthophotographies dans le cadre d'une étude de Cartographie géologique harmonisée du littoral des Pays de Loire. Les linéaments observés ont ensuite été interprétés en terme de structure (failles, foliation, filon, etc.). L'illustration 23 présente un exemple sur la commune de Piriac (regroupement des données des feuilles géologiques et de la digitalisation des linéaments).

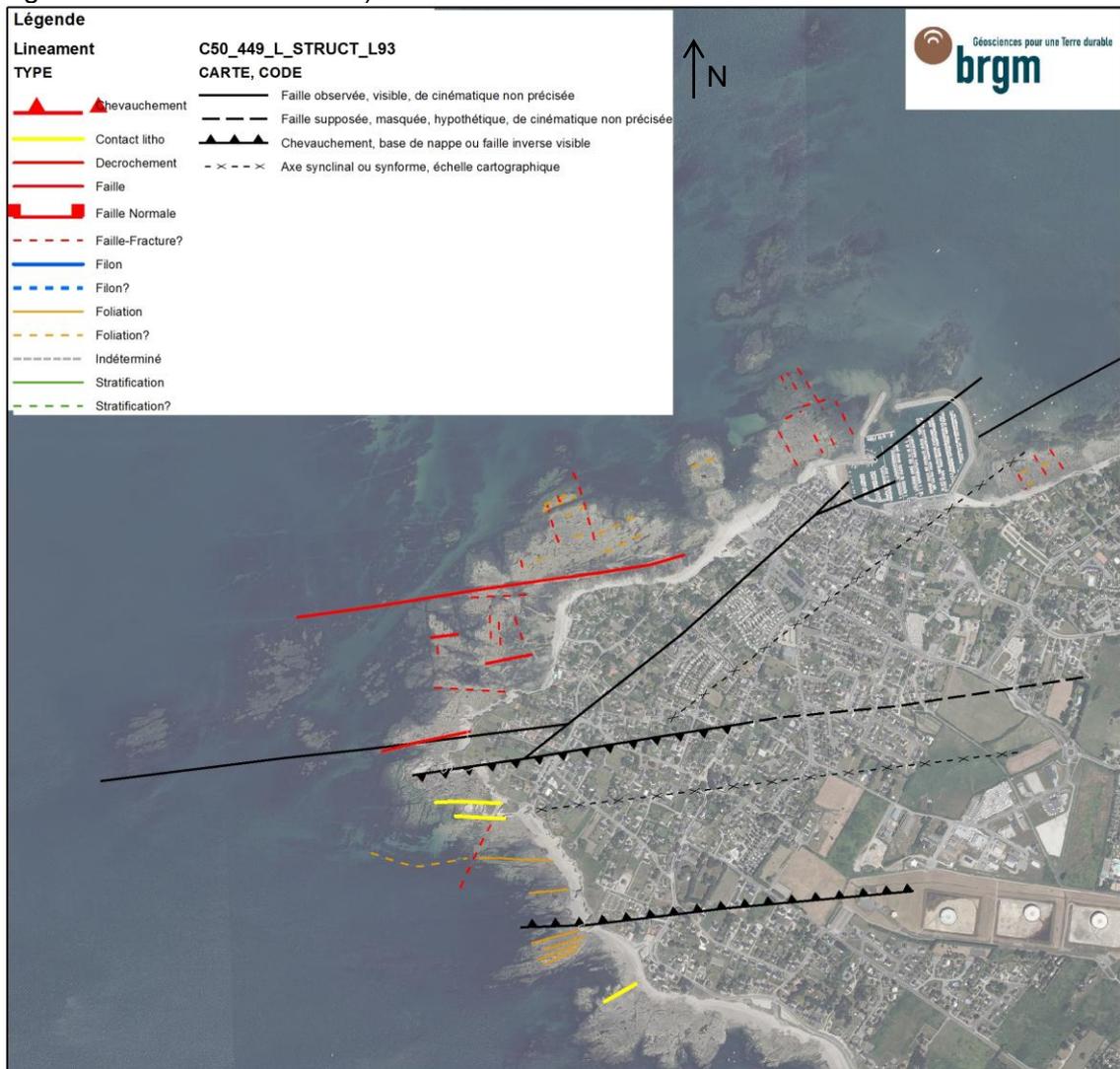


Illustration 23 – Digitalisation des linéaments et interprétation à partir des orthophotographies (exemple sur le secteur de la Pointe du Castelli, Piriac sur mer)

Plusieurs types de discontinuités ont été rencontrés sur le littoral de Loire Atlantique :

- les plans de stratification qui différencient chaque banc dans les horizons géologiques.
- les diaclases : il s'agit de fractures sans mouvement apparent des compartiments ;
- les fractures d'appel au vide : ce sont de grandes fractures de traction, subparallèles aux parois rocheuses, qui se développent dans les versants très redressés. Elles se développent par décompression naturelle des versants et provoquent l'apparition de grandes écailles subverticales dans les massifs ;
- les failles : elles sont le produit de la tectonique cassante. Elles sont marquées par un net décrochement entre les compartiments. Sellier (1985) a réalisé, dans le cadre d'une thèse, une étude géomorphologique des versants du Pays nantais. D'après cet auteur, il existe plusieurs orientations de failles :
 - Orientation principale de la fracturation :
 - N120 à N130 – 55 à 80°Nord-Est (orientation des cristaux de granites laminés, correspondant aux directions « armoricaines »)
 - N105° à N110 ° - 50 à 85°Nord Nord Est
 - N50 à 55° - pendage variable (55° NE à 50 ° SE)
 - Orientation secondaire de la fracturation :
 - N15° verticales ou 50 à 80°W
 - N30 à 35 ° verticales
 - N160-165 ° verticales ou 65°W
- les chevauchements : il s'agit d'un recouvrement résultant d'un mouvement tectonique conduisant un ensemble de terrains à en recouvrir un autre par l'intermédiaire d'un contact anormal peu incliné (surface de chevauchement).

L'orientation, la densité et la persistance (distance de pénétration dans le massif) de ces discontinuités influent directement sur la stabilité des versants.

Cas de la Baie de Bourgneuf d'après Gautier (1971)

Dans la **Baie de Bourgneuf, sur le secteur constitué en roche dure (gneiss et micaschistes briovériens) situé entre la Pointe Saint Gildas au nord de la grande plage de la Bernerie**, les directions hercyniennes NW-SE et SW-NE l'emportent. Elles représentent 60 % des cas, dont 32 % pour la seule direction sud-armoricaine. Par ailleurs, de très longues diaclases, orientées elles-mêmes selon les directions hercyniennes, se développent localement sur les estrans, parallèlement à la ligne de rivage.

Les diaclases sont à l'origine du guillochage intense de la roche et de nombreuses grottes ou « roches percées » (nom local des tunnels créés par la jonction de deux grottes orientées par un même système de diaclases), parfois d'une arche.

A l'échelle de la roche, plusieurs structures ont pu également être observées :

- la schistosité : feuilletage plus ou moins serré présenté par certaines roches, acquis sous l'influence de contraintes tectoniques, distinct de la stratification, et selon lequel elles peuvent se débiter en lames plus ou moins épaisses ;

- la foliation : il s'agit d'une structure de roche dont les minéraux sont arrangés ou aplatis selon des plans parallèles. Ce terme est notamment employé pour des roches métamorphiques pour lesquelles s'est produite une différenciation pétrographique entre des lits formant ainsi des feuillets d'où, en section, un aspect rubané.

3.4. MOUVEMENTS DE TERRAIN EN LOIRE ATLANTIQUE ET REcul DES FALAISES

Ce paragraphe reprend les principaux mouvements de terrain survenus sur le département et recensés dans la base de données mouvement de terrain, ainsi que les études relatives aux mouvements terrain ou du recul des falaises prises en compte dans le cadre de la présente étude.

3.4.1. Mouvements recensés

La base de données BDMVT (www.mouvementsdeterrain.fr) recense à l'échelle nationale l'ensemble des informations disponibles en France, sur des situations récentes et sur des événements passés concernant les mouvements de terrain de tous types, à savoir glissements de terrain, chutes de blocs, éboulements, effondrements, coulées de boue ou érosion de berge. Pour les communes du littoral de Loire Atlantique, cette base de données contient 42 événements localisés². Par ailleurs, d'autres événements ont été recensés dans la littérature (Gaultier, 1971 ; atlas des cotes de Loire Atlantique). Un événement complémentaire a été collecté dans les fiches tempêtes réalisées par le bureau d'étude Alp'Georisque. Des éboulements figurent également sur la cartographie réalisée par SIMECSOL en 1999 pour les trois communes de La Bernerie, Pornic, et Préfailles. Ces événements ont bien été pris en compte dans la présente étude mais n'ont pas été intégrés à cette analyse par soucis d'homogénéité. Par ailleurs les bases de données constituées suite à la tempête Xynthia ont été consultées mais les événements recensés concernent les côtes basses meubles.

Au total, 45 événements ont été recensés sur le territoire départemental, à savoir :

- 31 éboulements ;
- 8 glissements ;
- 5 érosions de berge ;
- 1 fluage.

² A noter que 3 des 20 communes littorales (Saint Michel Chef Chef, Saint Nazaire et Batz sur Mer) n'avaient pas répondu à l'enquête ce qui peut expliquer l'absence d'événements sur leur secteur même si cette enquête n'est pas la seule source de données (Rouxel et al., 2007)

Ces mouvements sont principalement localisés dans le sud du département sur les communes de La Plaine sur Mer, Préfailles, Pornic et La Bernerie. 26 des 44 évènements sont localisés sur la formation des Porphyroïdes de Vendée et 6 sur la formation des Micaschistes. A noter que 18 mouvements (soit 41% des mouvements recensés) sont situés sur des falaises mentionnées comme très altérées dans l'atlas des côtes de Loire Atlantique alors que celles-ci ne représentent que 11 % des falaises.

L'illustration 24 présente la localisation de ces mouvements.

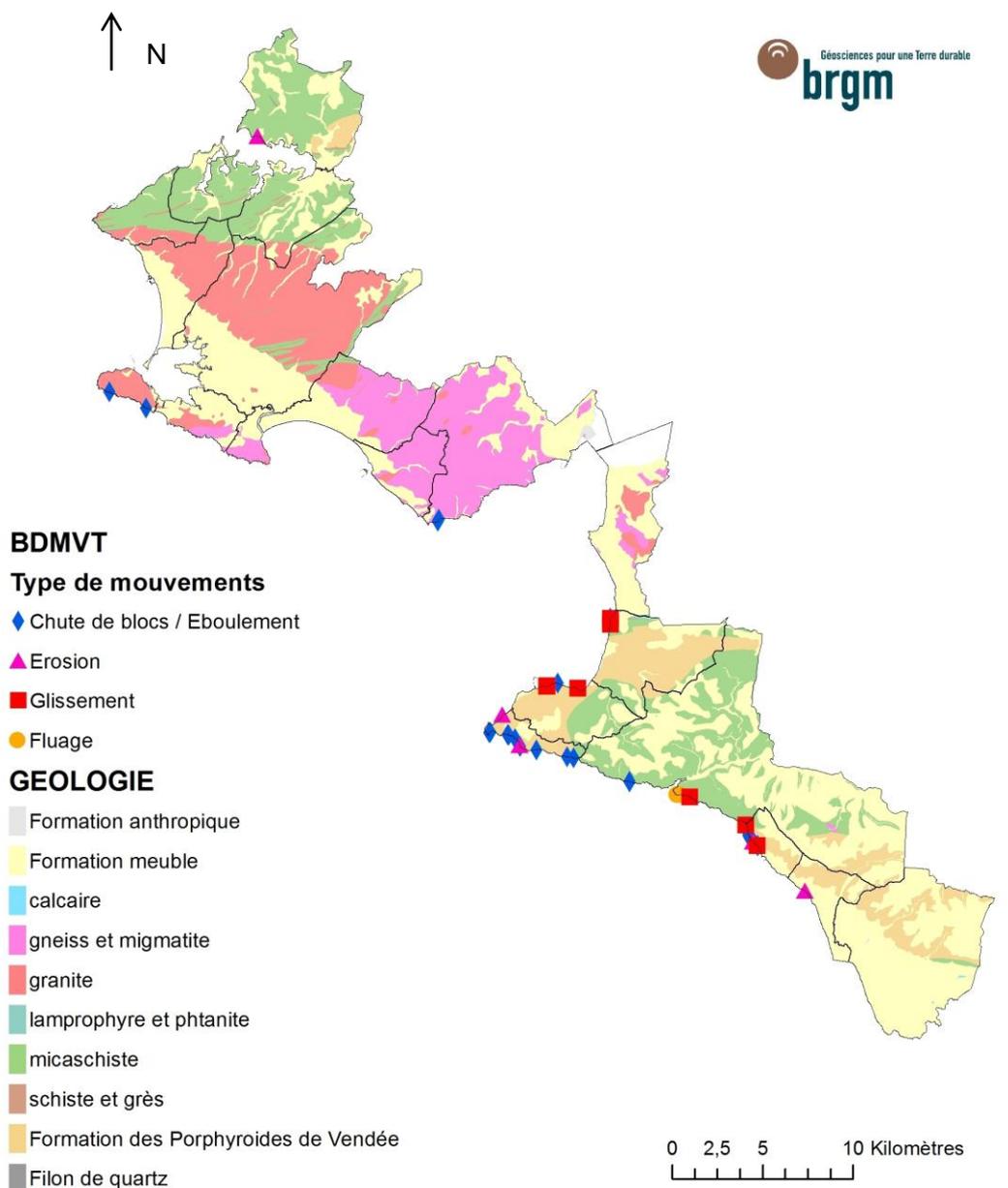


Illustration 24 – Localisation des mouvements de terrain recensés (source : BDMVT, traitement : BRGM)

3.4.2. Etude des mouvements de terrain déjà réalisées sur le secteur d'étude (Préfailles, Pornic et La Bernerie-en-Retz)

L'étude SIMECSOL a été réalisée en 2000 sur le littoral de 3 communes de Loire Atlantique (Préfailles, Pornic et La Bernerie-en-Retz) dans le but de dresser un état des lieux des falaises du littoral en décrivant leurs états et leurs comportements, l'objectif final étant de définir les risques littoraux encourus afin de pouvoir déterminer la nécessité et le type de travaux de confortement à mettre en place.

Cette étude comprend, sur les trois communes concernées, un important travail de terrain synthétisé sous forme de planches cartographiques. Ces planches, dont l'une d'entre elles figure sur l'illustration 25, représentent des observations faites le long des côtes telles que la présence de dièdres isolés, de traces d'éboulement, d'aménagement de renfort (mur de soutènement), de sous-cavage, de failles...

A cette étude sont associées des photos de falaises. Afin de pouvoir disposer de cette donnée, planches et photographies ont été géoréférencées sous ArcGIS (Illustration 25).

Par ailleurs, pour les communes de la Bernerie, Pornic et Préfailles, SIMECSOL a réalisé une synthèse de l'évolution du trait de côte en s'inspirant de Mounès (1960) et Lacroix (1942). Ces derniers ont reconstitués le trait de côte à différents siècles (VIIIème, Xème, XVème et XIXème et éventuellement XVIIème).

Sur une période plus courte de 50 à 60 ans, SIMECSOL constate les phénomènes suivants d'après les photographies aériennes :

- Plage de la Boutinardière : érosion générale des falaises ;
- Plage de la Patorie : peu d'évolution marquée, les rochers et les falaises observées sont similaires aux photographies anciennes ;
- Rochers du Roi : cette zone particulière et remarquable par le découpage de la roche n'a pas été retrouvée par SIMECSOL in situ. Cette zone aurait été détruite et érodée par la mer.

Le recul sur la commune de Pornic est évalué à 50 m depuis 1200 ans dans le secteur Ouest et à plus de 200 m dans le secteur à l'Est - Sud-Est de la commune. Sur une période plus courte de 50 à 60 ans, SIMECSOL indique qu'il n'y a pas eu de recul des falaises de la commune ou sur de faibles largeurs.

Sur la commune de Préfailles, le recul est évalué à moins de 50 m depuis 1200 ans. Sur une période plus courte de 50 à 60 ans, SIMECSOL indique qu'il n'y a pas eu de recul des falaises de la commune ou sur de faibles largeurs.

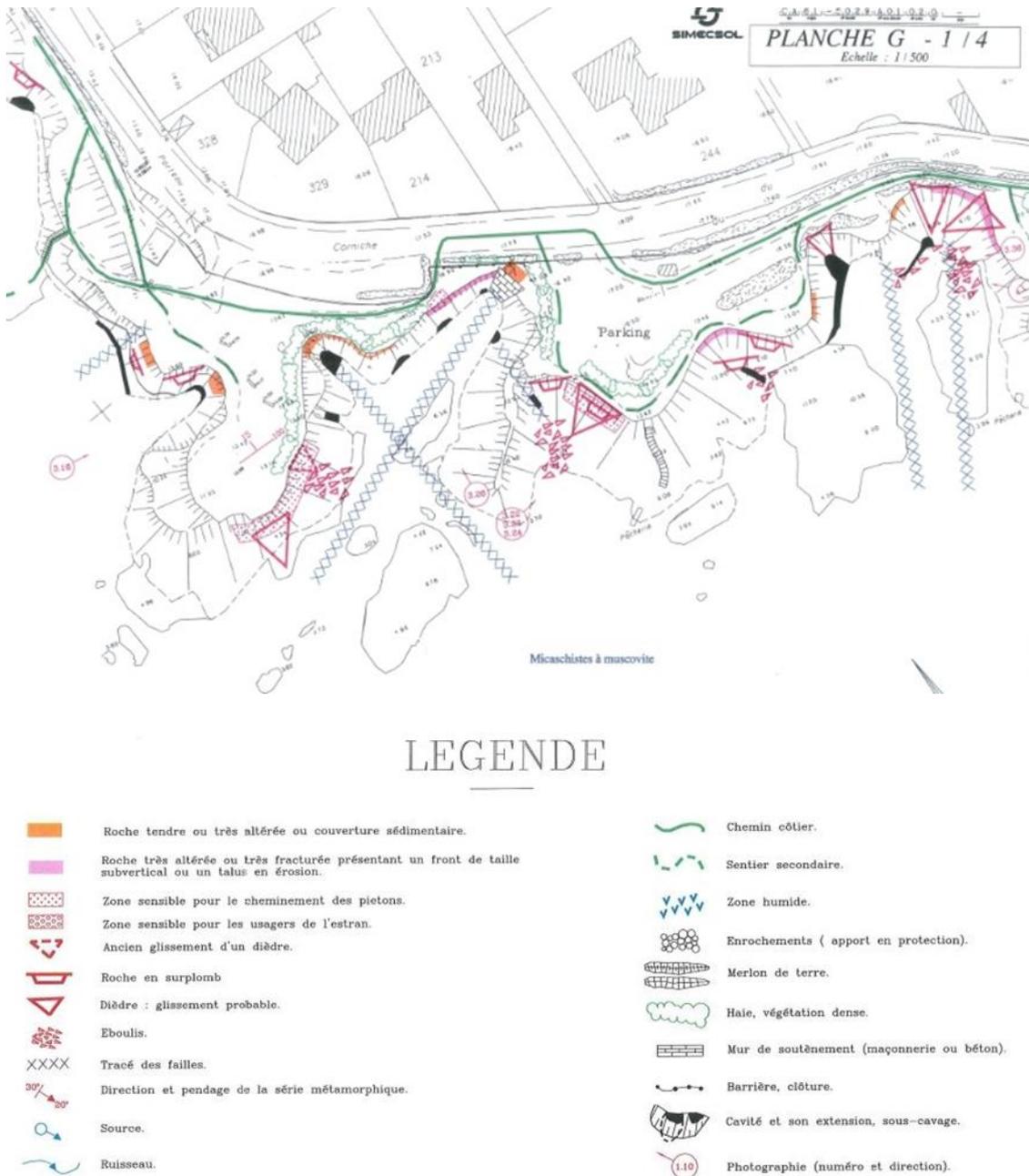


Illustration 25 - Planche SIMECSOL (source : étude SIMECSOL)

3.4.3. Etude SOGREAH (2010)

L'étude de SOGREAH, datant de mars 2010, a été réalisée dans le but de « surveiller la côte de Loire Atlantique » ainsi qu'une partie de celle de Vendée. Le littoral en question a été sectionné en cinq unités sédimentaires (US) : USI : de la baie de Pont-Mahé à la pointe du Castelli, USII : de la pointe du Castelli à la pointe de Chémoulin,

USIII : de la pointe de Chémoulin au pont de Saint-Nazaire, USIV : de la pointe de Mindin à la pointe de Saint Gildas, USV : de la pointe de Saint Gildas à la baie de Bourgneuf.

Chaque unité sédimentaire est généralement décrite puis divisée en sous-secteurs homogènes en fonction des spécificités morphologiques du littoral.

Cette étude identifie les zones à falaises côtières, à noter que les falaises ne sont pas seulement des édifices de dizaines de mètres, mais que sont également prises en compte les « microfalaises » de taille décimétriques.

De plus, un travail de comparaison d'orthophotographie et d'évaluation du recul du trait de côte (y compris les falaises) a été réalisé (Illustration 27). Cependant, l'échelle de réalisation est plus grossière que celle attendue pour la présente étude. Par ailleurs, l'érosion est fournie pour le trait de côte et ne s'intéresse pas spécifiquement à l'objet falaise (Illustration 26).



Illustration 26 – Exemple d'évaluation du recul du trait de cote réalisé par SOGREAH dans le secteur de Saint-Nazaire

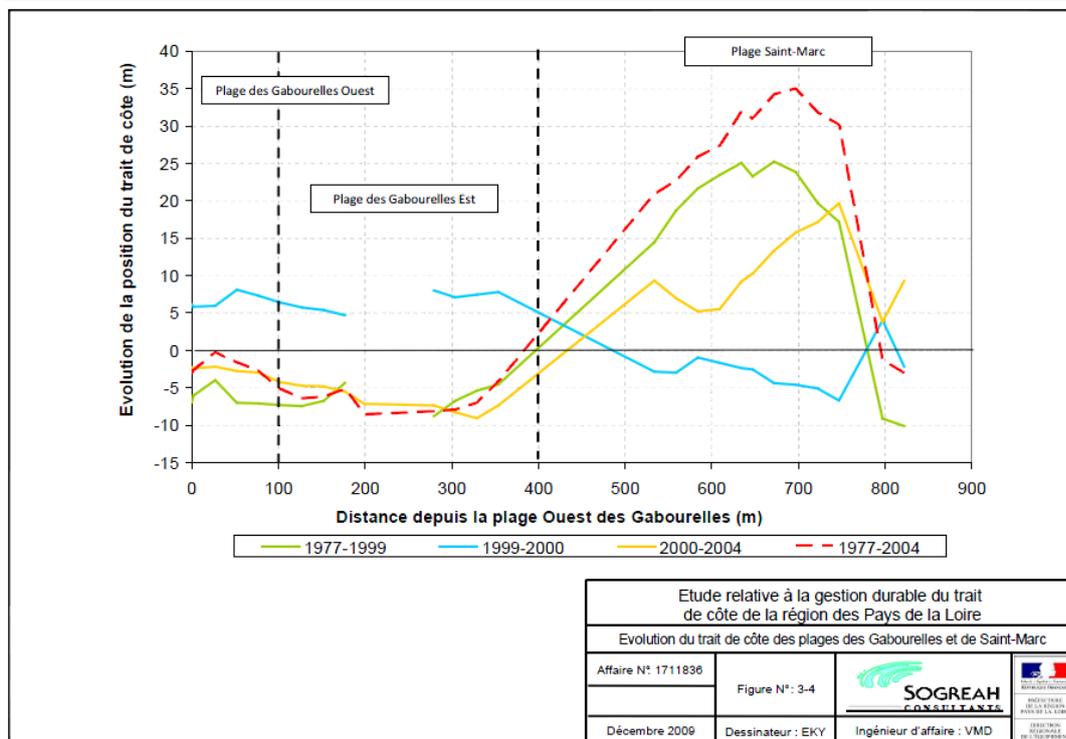
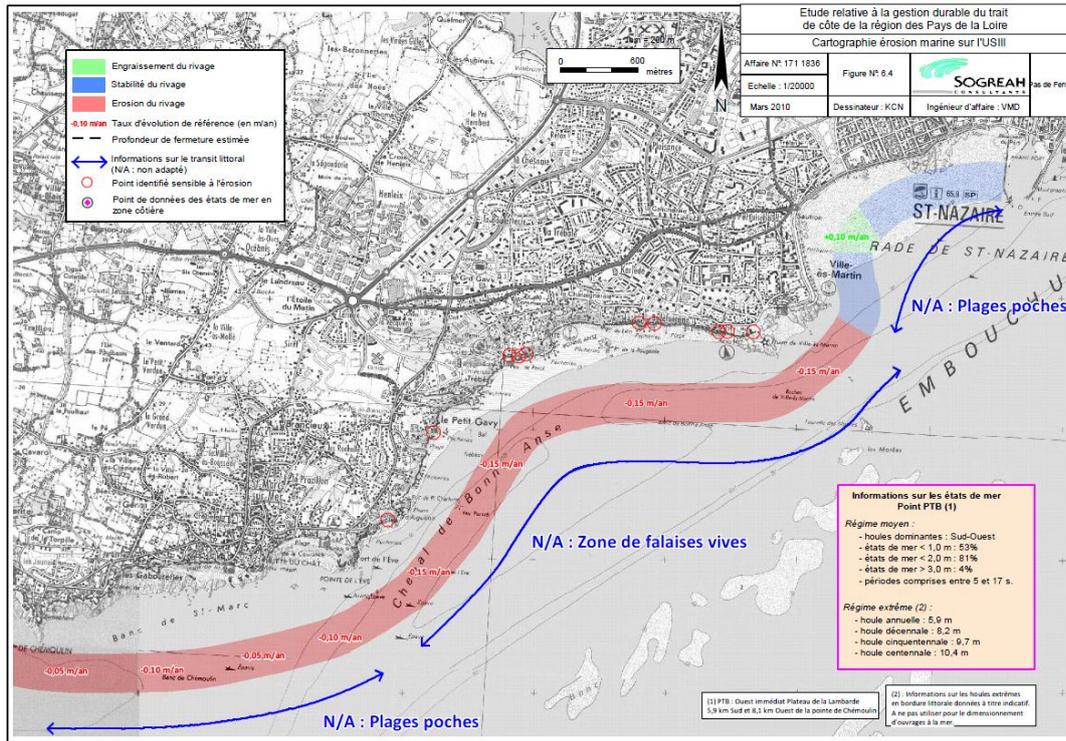


Illustration 27 - Exemples de résultats présentés par SOGREAH (2010) pour la commune de Saint-Nazaire

3.5. EXPOSITION DE LA COTE

L'exposition de la cote à la houle a été considérée à partir des données de SOGREAH.

3.6. DONNEES HISTORIQUES

3.6.1. Photographies terrestre et aériennes

Afin d'aider à une analyse qualitative du recul des falaises côtières (et pour permettre la comparaison avec les photographies actuelles), les photographies plus ou moins anciennes prises sur le secteur et concernant les falaises ont été numérisées et géoréférencées.

Au total, 695 photos ont été collectées sur les zones de falaises dont 539 ont pu être géoréférencées (les autres n'ont pu être géoréférencées faute d'indication suffisamment précise sur la localisation). Ces photos sont issues de sources diverses (rapports d'étude réalisée sur la zone, soit de la BDMVT ou encore des archives départementales de Loire Atlantique).

Ces photos comprennent :

- des photographies des années 1950-1960 ;
- des cartes postales de 1900-1930 ;
- des photographies de détail plus récentes datant des années 1990-2000.

L'illustration suivante présente la localisation des clichés géoréférencés.

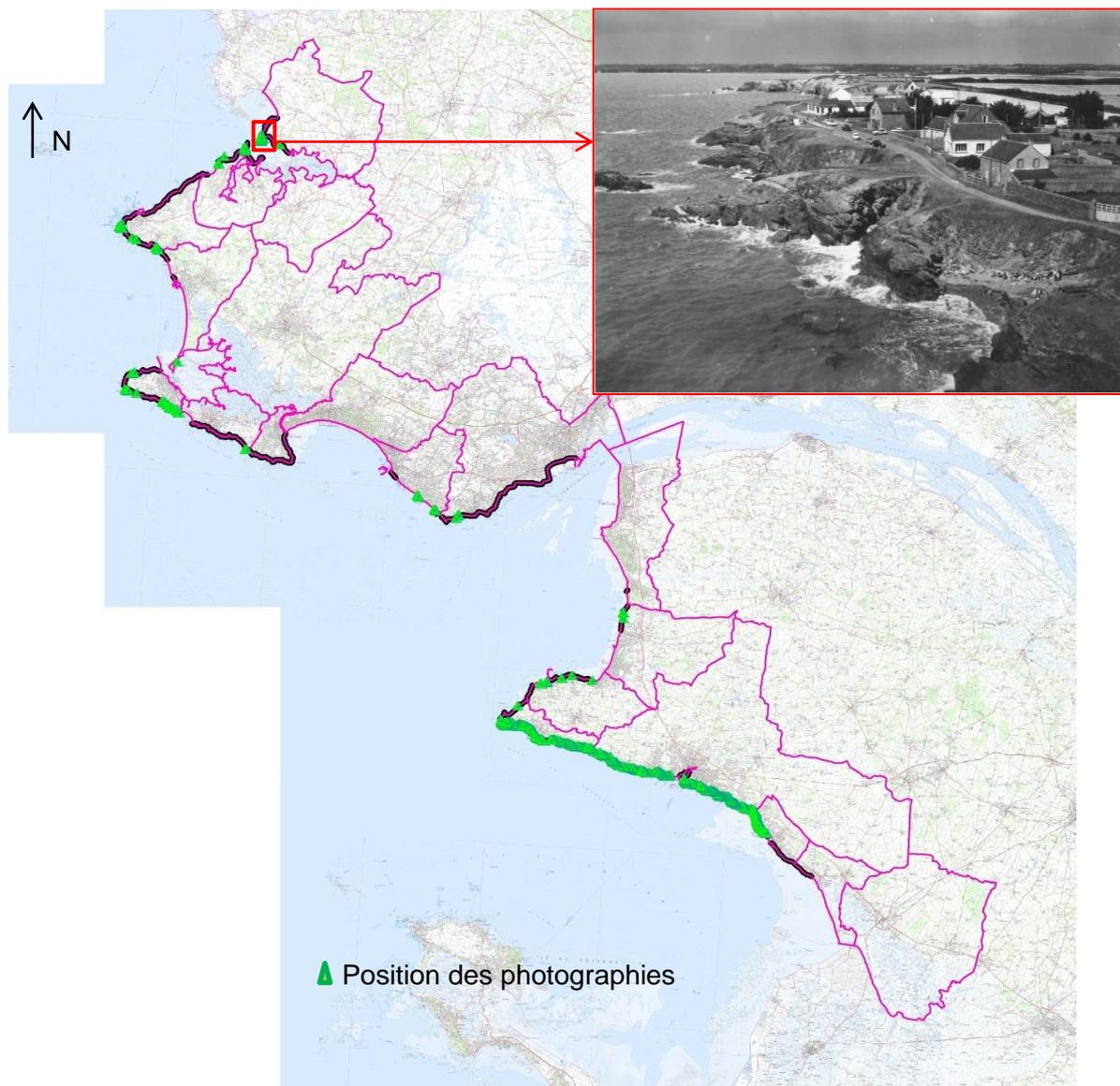


Illustration 28 - Localisation des clichés géoréférencés et exemple de photo

A noter que certains secteurs ne sont pas couverts par de telles photos ce qui s'explique par le fait que les communes ne sont pas concernées par des mouvements de terrain inscrits à la BDMVT, qu'elles n'ont pas fait l'objet d'étude spécifique (telle que SIMECSOL) et/ou qu'elles n'ont pas versées leurs photographies aux archives départementales de Loire Atlantique (cas de Saint Nazaire par exemple). Faute de temps, dans ce dernier cas, les photographies n'ont pas pu être récupérées.

3.6.2. Questionnaire aux communes

Un questionnaire conjoint Alp'Georisque/BRGM a été envoyé à l'ensemble des communes littorales de Loire Atlantique afin de compléter les données. Sur les 15 communes concernées par des côtes à falaise, 11 ont répondu.

Sur les 11 communes ayant répondu pour la partie côte à falaise, 9 d'entre elles mentionnent un recul du trait de côte soit occasionnel (7), soit récurrent (Saint-Nazaire et Le Pouliguen). Par ailleurs, 8 communes sont concernées par des réparations au niveau du sentier côtier. Le tableau ci-dessous recense l'ensemble des réponses retournées par les communes.

COMMUNE	REPONSE QUESTIONNAIRE	RECU DU TRAIT DE COTE	TYPE D'EROSION	REPARATION SENTIER COTIER
Asserac	OUI	OUI : de temps en temps (toute la bande du littoral de Kermalinge à l'étier de Pont Mahé. Du Bas Village à la Pointe Noire suite à tempête)	Naturelle	NON
Mesquer	NON			
Piriac-sur-Mer	OUI	OUI : de temps en temps, lors de tempête	Erosion accélérée par l'homme (chemins côtiers)	OUI
Le Croisic	OUI	OUI : « 1 fois tous les 5 ans »	Naturelle	OUI en 2004 → cf. mairie
Batz-sur-Mer	NON			
Le Pouliguen	OUI	OUI : chaque année	Naturelle	OUI → cf. mairie
Pornichet	NON			
Saint-Nazaire	OUI	OUI : chaque année	Naturelle	OUI → cf. CARENE
Saint-Brévin-les-Pins	OUI	NON (uniquement érosion des berges de Loire)	SO	OUI (réparation par tranche annuelle depuis 2008) → cf. mairie
Saint-Michel-chef-chef	OUI	OUI : de temps en temps	Naturelle	NON
La Plaine-sur-Mer	OUI	OUI : de temps en temps (dégradations ponctuelles sur un secteur précis entre Ménigou et la Tara et Cormier)	Naturelle	OUI → dossier de marché de travaux 2011-2012
Préfailles	OUI	OUI : de temps en temps	Naturelle	OUI
Pornic	OUI	NON	SO	NON

COMMUNE	REPONSE QUESTIONNAIRE	RECU DU TRAIT DE COTE	TYPE D'EROSION	REPARATION SENTIER COTIER
La Bernerie-en-Retz	NON			
Les Moutiers-en-Retz	OUI	OUI : de temps en temps		OUI : Réparation chemin pédestre sur la digue après les tempêtes importantes :1999, 2000, 2008

Illustration 29 – Réponse des communes au questionnaire

D'après l'enquête réalisée auprès des communes, plusieurs d'entre elles ont effectué des réparations sur le sentier côtier : Piriac, Le Croisic, Le Pouliguen, Saint-Nazaire, Saint-Brévin, La Plaine-sur-mer, Préfailles et les Moutiers. Pour la plupart d'entre elles, les réponses nous ayant été communiquées trop tardivement, les documents disponibles en mairie n'ont pas pu être consultés. Par ailleurs, des travaux d'aménagement et de valorisation du sentier piéton littoral sont réalisés sur la commune de Saint-Nazaire et Pornichet par la Carene. Une première phase de travaux a été réalisée entre 2007 et 2009 et une deuxième vague d'opérations entre mars 2012 et mars 2013. Les travaux ont été découverts lors de nos visites de terrain et les études préalables à ces travaux n'ont malheureusement pas pu être prises en compte.

3.6.3. Fiches tempêtes

Par ailleurs, les fiches tempête réalisées par le Bureau d'étude Alp'Georisque (Illustration 30) ont pu être consultées. Elles ont notamment permis de compléter la base de données mouvement de terrain (cf. paragraphe 3.4.1).

13 janvier 1990	Le Croisic	SECTEUR n°1
Type de phénomène	Mode de submersion marine	FICHE n°53
Tempête et submersion marine	Franchissement par paquets de mer	
Données météomarine	Source : PAC du Croisic	
- vents maximums enregistrés en rafales à 140 km/h au sémaphore de Piriac-sur-Mer.		
Dégâts occasionnés :		
- destruction de l'encorbellement de Port-Lin ; - effondrement d'un pan de falaise à la hauteur de Vigie-la-Romaine.		
Source : Porté à Connaissance de la commune du Croisic.		

Illustration 30 – Exemple de fiche tempête réalisée par le bureau d'étude Alp'Georisque présentant notamment un effondrement de falaise (source : AlpGeorisque)

4. Acquisition de données

4.1. IDENTIFICATION DES ZONES DE FALAISES

Considérant la définition présentée au paragraphe 2.1, l'étude s'intéresse à l'ensemble des zones identifiées par SOGREAH complétées par quelques secteurs qui avaient été relevés dans l'atlas de Loire Atlantique de 1991. Cette première sélection a été affinée grâce aux observations *in situ* (paragraphe 4.4) ainsi qu'au traitement de la Litto3D (paragraphe 4.2).

Cette étude concerne principalement les littoraux rocheux, mais également quelques pentes littorales constituées de matériaux plus meubles (autrement dit talus), qui peuvent être affectées par des phénomènes de type glissements de terrain ou ravinements.

4.2. DETERMINATION DE LA GEOMETRIE DES VERSANTS A PARTIR DE L'EXPLOITATION DE LA LITTO3D

Comme mentionné plus haut (paragraphe 2), la hauteur et la pente de falaise font partie de paramètres qui permettent de comprendre le mode de recul des falaises et de savoir, notamment, et au vu de la compétence des matériaux, si les agents dominant l'érosion sont plutôt marins ou continentaux. Ces paramètres sont par ailleurs déterminants pour l'évaluation des aléas glissements de terrains. Enfin, l'aléa chutes de blocs n'est pas identique lorsque le bloc est situé à 1 ou 2 m ou à 10 m du sol (propagation, etc.).

La géométrie d'un versant présente plusieurs composantes :

- sa (ou ses) pente(s) ;
- sa hauteur ;
- éventuellement la présence de surplomb.

Compte tenu du linéaire de côte examiné (plus de 80 km de côte), hormis la présence d'éventuels surplombs estimés d'après les investigations de terrain, la géométrie des versants ne pouvait pas être appréhendée de manière systématique par des investigations de terrain (notamment au moyen d'un GPS différentiel). Par ailleurs, sur le terrain, il n'est pas toujours possible de visualiser la tête de falaise depuis le pied et vice-et-versa ce qui ne facilite pas la mesure de la hauteur des falaises (via distancemètre laser par exemple).

Litto3D® est un modèle numérique altimétrique précis continu terre-mer réalisé en commun par le SHOM et l'IGN. Le pas (résolution) de ce modèle numérique est de 1 m et les hauteurs sont fournies au cm près. Le traitement de cette donnée a permis d'accéder à la morphologie des falaises (pentes, hauteurs, profils, etc.) et de disposer d'une analyse systématique de tout le linéaire côtier. Il a notamment aidé à la définition des zones de falaises (cf. paragraphe 2.1), à découper les côtes à falaises en secteur

homogène, à conforter les observations de terrain mais également à cibler les zones de falaises pour le traitement des orthophotographies.

Cette partie présente les deux principaux traitements réalisés à partir de Litto3D.

4.2.1. Pente des versants

Une première analyse relativement aisée (outil Arcgis existant) a permis de calculer les pentes des falaises (Illustration 31). Le calcul est réalisé à un pas équivalent au modèle numérique de litto3D. Ainsi, une valeur de pente est fournie pour chaque pixel de un mètre de côté.



Illustration 31 – Exemple de calcul de pente à partir de la Litto3D (traitement : BRGM)

A noter toutefois que ce calcul, lorsque la pente est assez verticale, a tendance à **sous-estimer la valeur de la pente réelle**. Pour exemple, nous avons fait la comparaison sur différents secteurs et notamment sur un secteur test au niveau de Préfailles (F_001). Sur ce secteur, la falaise est subverticale et présente même des zones de surplomb. D'après le traitement de la Litto 3D, la pente maximale calculée est de 68°. Cela tient à la résolution de la Litto 3D.

4.2.2. Hauteur des versants

Par ailleurs, après une consultation des collègues du BRGM qui travaillent sur les versants (glissements de terrain) ou en SIG, il est apparu qu'il n'existait pas de méthode simple adaptée à nos besoins pour l'évaluation des hauteurs des falaises à partir des données de modèles numériques.

Ainsi, une méthodologie de calcul des hauteurs de falaise a été développée pour le besoin de cette étude. Ce calcul s'appuie sur la ligne de hauteur 4,5 m de la Litto3D, l'enveloppe des pentes supérieures à 20° obtenue à partir de LITTO3D et les valeurs du modèle numérique.

Le pas retenu pour le calcul de ces hauteurs est de 5 m (une valeur de hauteur pour 5 m de linéaire côtier).



Illustration 32 - Exemple de calcul de hauteur à partir de la Litto3D (traitement : BRGM)

La comparaison entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées in situ sur quelques sites tests montre que le calcul est fiable. Pour reprendre l'exemple de la fiche F_001 sur la commune de Préfailles, la mesure de la hauteur sur le terrain était comprise entre 5,5 m et 6 m. Le traitement de Litto3D fournit une hauteur comprise entre 5 m et 6,4 m.

4.2.3. Autre utilisation de la Litto3D

Par ailleurs, Litto3D a également été utilisée pour :

- extraire la ligne de 4,5 m qui correspond assez bien à la base des falaises (hors zones de plages pochées ou plages adossées à la falaise) ;
- définir à quelle distance se trouvait la falaise (définie à partir des zones de pentes) du niveau marin moyen.

4.3. TRAITEMENT DES ORTHOPHOTOGRAPHIES

La comparaison des orthophotographies et documents historiques doit permettre de quantifier le recul des falaises. Les vitesses annuelles sont déterminées par comparaison des positions du trait de côte à des dates différentes.

La dynamique régressive revêt un caractère discontinu dans l'espace et ponctuel dans le temps. Ainsi, les états connus doivent être séparés d'un pas de temps le plus large possible afin de disposer d'une réelle représentativité temporelle. Cette approche sur le temps long est fondamentale car elle permet de s'assurer que les vitesses calculées ne sont pas exacerbées par un évènement ponctuel important, ou au contraire, minimisées, en raison de la prise en compte d'une période correspondant à un temps où l'érosion est faible.

4.3.1. Données utilisées

A l'exception des données les plus récentes (satellites, photogrammétrie, LIDAR, etc.) qui fournissent des données numériques et géoréférencées d'une grande précision mais ne sont disponibles que depuis peu de temps, aucune source de donnée historique ne se révèle optimale. Les documents anciens (carte de Cassini par exemple) ainsi que les photographies aériennes obliques ou cartes postales sont souvent riches d'information mais ne fournissent que des informations qualitatives ; les ortho-photographies (photographies aériennes verticales redressées), très souvent utilisées pour l'analyse de la dynamique du trait de côte, sont intéressantes à condition de pouvoir bien repérer les objets que l'on souhaite comparer (ici : la falaise).

La comparaison du cadastre (notamment cadastre napoléonien), peut être utilisée lorsque le recul des falaises est tel qu'il affecte l'extension de parcelles, à condition que celles-ci soient identifiables (ce qui n'est pas toujours le cas en zone de falaise). Toutefois, comme le cadastre est un document fiscal avant d'être un document topographique, cette utilisation peut difficilement être généralisée. Les tentatives réalisées en Loire Atlantique pour les falaises ont été peu concluantes. Ainsi, le cadastre n'a pas été utilisé dans le cadre de la présente étude.

Pour établir l'évolution des falaises littorales, ce sont principalement les photographies aériennes verticales orthorectifiées qui ont été utilisées.

Les orthophotographies disponibles et exploitées sur la zone d'étude sont les suivantes :

- Photographie aérienne 44 - 1934 au niveau de l'Estuaire de la Loire (partie N et partie S), disponible sur Geopal ;
- BDORTHO des Pays de la Loire de 1950, disponible sur SIGLOIRE ;
- Orthophotographies 1977 de la Loire Atlantique, disponible sur SIGLOIRE ;
- BD-ORTHO_44_1999, disponible au BRGM ;
- BD-ORTHO_44_2004, disponible au BRGM ;
- Photographie aérienne – 44 – 2009, disponible sur Geopal.

Ces données ont une large couverture temporelle puisqu'elle s'échelonne entre 1934 et 2009. A noter que la photographie aérienne de 1934 couvre une petite portion du territoire au niveau de l'Estuaire de la Loire.

4.3.2. Calage de la méthodologie : réalisation de tests et limites

Le guide des Premiers éléments méthodologiques pour l'élaboration des PPRL précise que « les positions observées doivent faire l'objet d'une analyse attentive », qu' « il convient de prêter la plus grande attention aux moyens d'investigation qui n'ont pas tous la même précision (manque de repère, systèmes de référence différents, échelles de temps et spatiale diverses, etc.) » et que « ce travail de quantification devra mentionner avec précision les marges d'erreur induites par la détermination de la position du trait de côte, la qualité des documents utilisés, la méthode et les techniques d'analyse retenues ». Si la comparaison des orthophotographies commence à se répandre, peu d'étude précise clairement ces éléments.

Afin de connaître les limites méthodologiques, de nombreux tests ont été réalisés pour l'évaluation du recul des falaises concernant la précision des orthophotographies, l'échelle de travail et la précision du lever, ainsi que les choix d'indicateurs du recul des falaises.

a) Choix et précision des orthophotographies

Plusieurs tests ont été réalisés avec les différents jeux d'orthophotographies disponibles pour estimer les décalages et donc l'incertitude dans le positionnement de la falaise. Ces tests ont porté sur différents secteurs géographiques considérant que le décalage n'est pas identique partout.

L'illustration 32 présente un exemple de comparaison des orthophotographies.



Illustration 33 - Comparaison des orthophotographies de 1950, 1999, 2004 et 2009 au niveau de Port Lin (commune du Croisic)

Ces tests ont mis en évidence :

- qu'il existe des décalages non négligeables entre différentes orthophotographies ;
- que, pour deux orthophotographies données, ce décalage n'est pas homogène partout et qu'il est en partie dû à l'angle de prise de vue des photographies même si elles ont été préalablement orthorectifiées ;
- qu'en fonction de la portion de côte considérée, ce n'est pas toujours les mêmes orthophotographies qui sont les mieux calées entre elles.

Au final, compte tenu des décalages constatés dans certains secteurs, il a été décidé :

- d'utiliser les orthophotographies de 2004 ou de 2009 comme image de référence ;
- de repérer, au fur et à mesure de l'avancement de la digitalisation des falaises, des points de calage sur les références afin d'identifier les jeux d'orthophotographies les mieux calés entre eux.

Dans les faits, la comparaison s'est souvent appuyée sur les orthophotographies de 1950, 2004 et 2009. En effet, l'orthophotographie 1950 est la plus ancienne disponible

sur l'ensemble du secteur, et présente souvent des décalages faibles avec celles de 2004 et 2009.

Les orthophotographies de 1977 et 1999 ont été utilisées pour affiner l'analyse dans certains secteurs mais n'ont pas été traitées de manière systématique. Enfin, celle de 1934, la plus ancienne numérisée disponible sur une partie du secteur autour de l'estuaire de la Loire a été considérée de manière qualitative car elle présente localement un décalage important avec les autres orthophotographies et une visibilité réduite.

Pour les jeux de données comparés, l'incertitude estimée du fait du décalage et de la pixellisation est comprise entre 0 m (le point étudié a vraisemblablement été utilisé pour l'orthorectification) et 4 m (pour les objets nettement identifiés sur les différentes orthophotographies comparées) dans certains secteurs qui étaient et restent peu urbanisés comme Assérac. L'incertitude estimée du fait du décalage et de la pixellisation est de 4 m.

b) Echelle de travail et précision du lever

Ensuite, différents tests ont été réalisés concernant l'échelle à laquelle doit être réalisée le lever des falaises. En effet, il a été considéré que cette échelle devait peu varier sur l'ensemble du linéaire afin de disposer d'une analyse homogène. Les critères de sélection de cette échelle ont été la visibilité sur orthophotographie (un zoom trop important engendrant une pixellisation et une perte de sens de l'image) et la précision des falaises (une échelle trop faible engendrant la perte des détails de la falaise).

L'échelle retenue pour le lever des falaises varie entre le 1/1 000 et le 1/1 500 qui, après différents tests, nous a paru présenter le meilleur rapport entre visibilité et précision. A noter que nous considérons que, bien que ce lever ait été réalisé au 1/1 500 au maximum, il ne devrait pas être agrandi à une échelle supérieure au 1/5 000, compatible avec l'échelle de restitution de la présente étude.

La précision du lever manuel a été estimée à 1 m (distance maximale obtenue lors de la répétition du lever manuel d'un unique point).

c) Choix des indicateurs de falaise

Dans le cadre de la présente étude, l'objectif est de connaître l'évolution des falaises côtières qui peut être réellement différente de l'évolution du trait de côte. En effet, le trait de côte se définit comme la ligne portée sur la carte séparant la terre de la mer. Il s'agit le plus souvent d'une laisse de haute mer. L'évolution de la position de ce trait de côte permet de rendre compte de la dynamique côtière qui peut être représentée par un recul ou une avancée de la ligne du rivage au cours d'un intervalle de temps donné. Ainsi, dans le cadre d'une plage adossée à une falaise, la plage peut être en accrétion tandis que la falaise recule du fait d'agents continentaux. La littérature est riche d'indicateurs de la position du trait de côte et/ou falaise. Boak et Turner (2005) ont ainsi répertorié 45 indicateurs utilisés à travers le monde à des fins d'étude d'évolution

du littoral, définis depuis les années 1950 dans la littérature scientifique. L'illustration 36 fournit une représentation schématique de ces différents indicateurs de trait de côte.

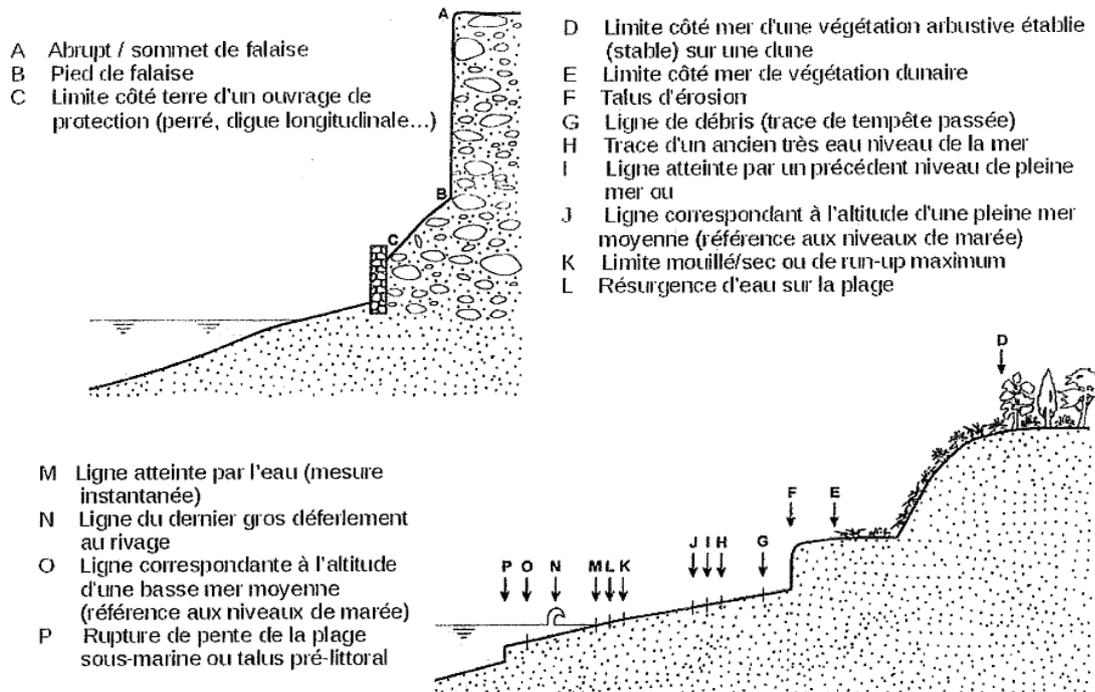


Illustration 34 – Représentation schématique de différents indicateurs de trait de côte (d'après Boak and Turner, 2005)

Par ailleurs, considérant uniquement l'objet falaise (indicateurs A, B, C, D et F de l'illustration 34), il convient de s'appuyer sur une définition dont les changements dans le temps représentent au mieux l'évolution du comportement des falaises. En effet, comme vu au paragraphe 2.2, les falaises soumises à l'action marine commencent par être sapées à la base (évolution du pied de la falaise), ce qui engendre des surplombs et entraîne le plus souvent une déstabilisation des matériaux en surplomb (évolution de la tête de falaise). Lorsqu'elle n'est plus soumise qu'à des agents continentaux, c'est la tête de falaise qui est la principale concernée par ces phénomènes jusqu'à ce que la falaise atteigne un profil d'équilibre. Ainsi, selon les actions prépondérantes affectant la falaise, l'indicateur à retenir ne devrait pas être identique.

De plus, les indicateurs de position doivent permettre une localisation reproductible. La définition retenue « doit ainsi prendre en compte les moyens dont dispose l'observateur pour localiser l'objet à suivre » (guide PPRL). Lorsque l'analyse se fait d'après les orthophotographies, l'observateur doit être en mesure de repérer sur les différents clichés l'objet qui répond à la définition. Cela peut conduire à adapter la définition retenue aux données disponibles. Dans le cas des falaises par exemple, il est courant que le pied de falaise (lorsque celles-ci sont abruptes comme c'est le cas dans le cas d'action marine prédominante) ne soit pas visible sur les orthophotographies. Par ailleurs, les indicateurs sont parfois difficilement

positionnables car soit masqué par l'ombre soit par la végétation arbustive (par exemple dans le secteur de Saint Nazaire).

Enfin, dans le cas de falaise peu redressée, il est parfois difficile de choisir une seule position pour un indicateur (par exemple dans le cas de cote constituée par une succession de ressauts topographiques, cf. Illustration 35).

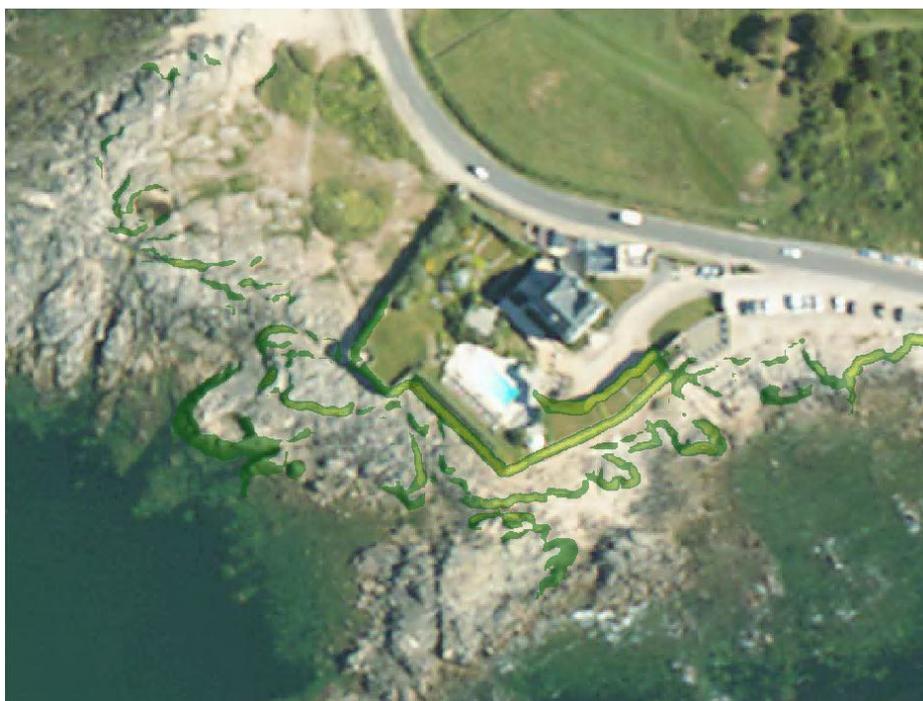


Illustration 35 – Exemple de cotes constituées de successions de ressauts topographiques de faible hauteur

Le tableau suivant présente les différents indicateurs considérés dans le cadre de la présente étude ainsi que leurs principaux avantages et inconvénients.

Indicateur	Avantage	Inconvénient
Pied de falaise (limite sable/rocher par exemple)	Recul du fait d'agents marins	<ul style="list-style-type: none"> - pas toujours visible (indentations, zones de surplomb ou ombre) - position parfois difficile à choisir par exemple dans le cas des falaises à dénudations - Non prise en compte des secteurs du littoral qui reculent à cause d'agents continentaux
Abrupt/sommet de falaise	Recul du fait des agents continentaux mais aussi des agents marins	<ul style="list-style-type: none"> - souvent masqué par la végétation et notamment la présence d'arbres en tête de falaise - localisation précise parfois délicate
Limite de végétation	Le recul de la végétation est souvent un bon indicateur du décapage de la tête de falaise du fait d'agents continentaux. Ce décapage initie souvent l'érosion progressive de la roche.	végétation avance et recul au gré des opérations de végétalisation et peuvent induire des erreurs d'interprétation
Sentier côtier	<ul style="list-style-type: none"> - Nettement identifiable sur les différentes photographies aériennes - recul stratégique (pour cause de dangerosité pour les piétons). - Mise en évidence des travaux de comblement réalisés au niveau des indentations. 	surestime vraisemblablement le recul car lors de son déplacement, il est souvent positionné en net retrait par rapport à la falaise

Illustration 36 – Avantages et inconvénients des différents indicateurs considérés dans le cadre de la présente étude

Toutefois, le choix d'indicateurs différents peut engendrer des difficultés dans l'interprétation et la transcription, par exemple, en zonage réglementaire dans le cadre de la mise en œuvre de PPR.

Finalement, en fonction du contexte et de la visibilité sur ortho photographie, c'est le sommet de falaise qui a été retenu chaque fois que cela était possible, ou le pied, lorsque le sommet n'était pas nettement identifiable. Parfois, le sommet était

identifiable uniquement via la limite de végétation, c'est alors cette limite qui a été considérée.

d) Autre donnée utile

La comparaison des photographies aériennes permet également de mettre en évidence d'autres indices comme la disparition de bâtiment (cf. comparaison des orthophotos de 1999 et 2004 au niveau de F_0147).



Illustration 37 – Disparition d'un bâtiment entre 1999 et 2004 au sud-est de la Baie de la Gouelle

e) Possibilité d'un traitement à l'aveugle pour la Loire Atlantique ?

Par ailleurs, nous avons réalisé quelques tests à l'aveugle, c'est-à-dire d'interprétation sans connaître la zone (sans avoir réalisé la phase de terrain). Ensuite, ces interprétations ont été confrontées aux observations de terrain.

Les illustrations suivantes fournissent quelques exemples d'observations qui peuvent fausser l'analyse.

Exemple de recul « artificiel » des falaises

A en croire l'illustration 38, le recul a été conséquent entre 2004 et 2009. Or, entre ces deux dates, des murs et enrochements ont été réalisés. Ainsi, le recul observé sur photographie aérienne est surestimé même si les travaux ont dû être réalisés en réponse au recul.



Illustration 38 – Recul « artificiel » des falaises au niveau de la Baie du Crucifix montré par comparaison des orthophotographies de 2004 et 2009



Illustration 39 – Mur et enrochement réalisé depuis 2004 au niveau de la Baie du Crucifix au Croisic (visite de terrain du 08/11/2012)

Avancement du chemin côtier

D'après l'illustration 40, le chemin côtier semble avoir avancé entre 1950 (trait bleu) et 2009 (trait rouge) alors que les falaises, hors travaux, ne peuvent que reculer.



Illustration 40 – Exemple de comparaison des orthophotographies de 1950 et 2009 (trait bleu : 1950 ; trait rouge : 2009)

La confrontation avec les observations de terrain montre que cet « avancement » est lié au comblement d'une indentation dans ce secteur (Illustration 41). Ainsi, dans le cadre d'un traitement automatique du trait de côte, sans confrontation aux données de terrain, la prise en compte de ce secteur pourrait induire des erreurs.



Illustration 41 – Avancement du chemin cotier après comblement d'une indentation (visite de terrain du 31/10/2012)

Opération de revégétalisation

L'évolution de la végétation doit être considérée avec beaucoup de prudence notamment du fait des opérations de revégétalisation qui ont eu lieu ces dernières années, notamment dans le secteur du Croisic. Comme le montre l'illustration 42, l'indicateur végétation ne peut être considéré dans ce secteur ; il induirait des valeurs de recul tout à fait différente entre 1950 et 2004 ou entre 1950 et 2009.



Illustration 42 – Régression de la végétation puis progression depuis 2004 au niveau de la Baie du Crucifix, commune du Croisic (comparaison des orthophotographies de 1950, 2004 et 2009)

Recul souterrain

Parfois, le recul se fait en souterrain au niveau de zones de failles. Dans ces cas-là, il ne peut pas être identifié sur les orthophotographies. Ce recul ne doit pas pour autant être négligé puisqu'il peut conduire à la formation de grottes dont le toit est, à terme, susceptible de s'effondrer.

Ainsi, il est apparu indispensable de confronter les données numériques issues de la digitalisation aux observations de terrain pour avoir accès à une interprétation fiable.

4.3.3. Recul moyen obtenu par traitement automatique

Malgré les limites exprimées dans le paragraphe précédent (4.3.2.d) et afin de disposer d'un calcul automatique, il a été décidé de réaliser ce calcul en essayant d'estimer au mieux les incertitudes qui y sont associées et en accordant une grande prudence aux résultats obtenus.

Plusieurs outils permettent d'analyser les positions du trait de côte ou des falaises identifiées, par exemple DSAS (intégré dans ArcGis)³. Ils permettent d'automatiser le calcul de l'évolution, de proche en proche, tout au long d'une ligne de référence et d'exprimer les résultats en taux d'évolution annuel.

Compte tenu de sa facilité de mise en œuvre et des limites méthodologiques exprimées plus haut, il a été décidé de mettre en œuvre la méthode des tampons (empruntée à l'observatoire de la cote aquitaine).

a) Présentation de la méthode des tampons

Dans cette méthode, des zones tampons sont créées de part et d'autre de la ligne correspondant à la position de la falaise la plus ancienne et croisée avec la ligne correspondant à la position la plus récente (Illustration 43).

³ A noter que DSAS a été testé au BRGM Provence Alpes Côtes d'Azur sur les falaises côtières et a semblé peu adapté à ce milieu

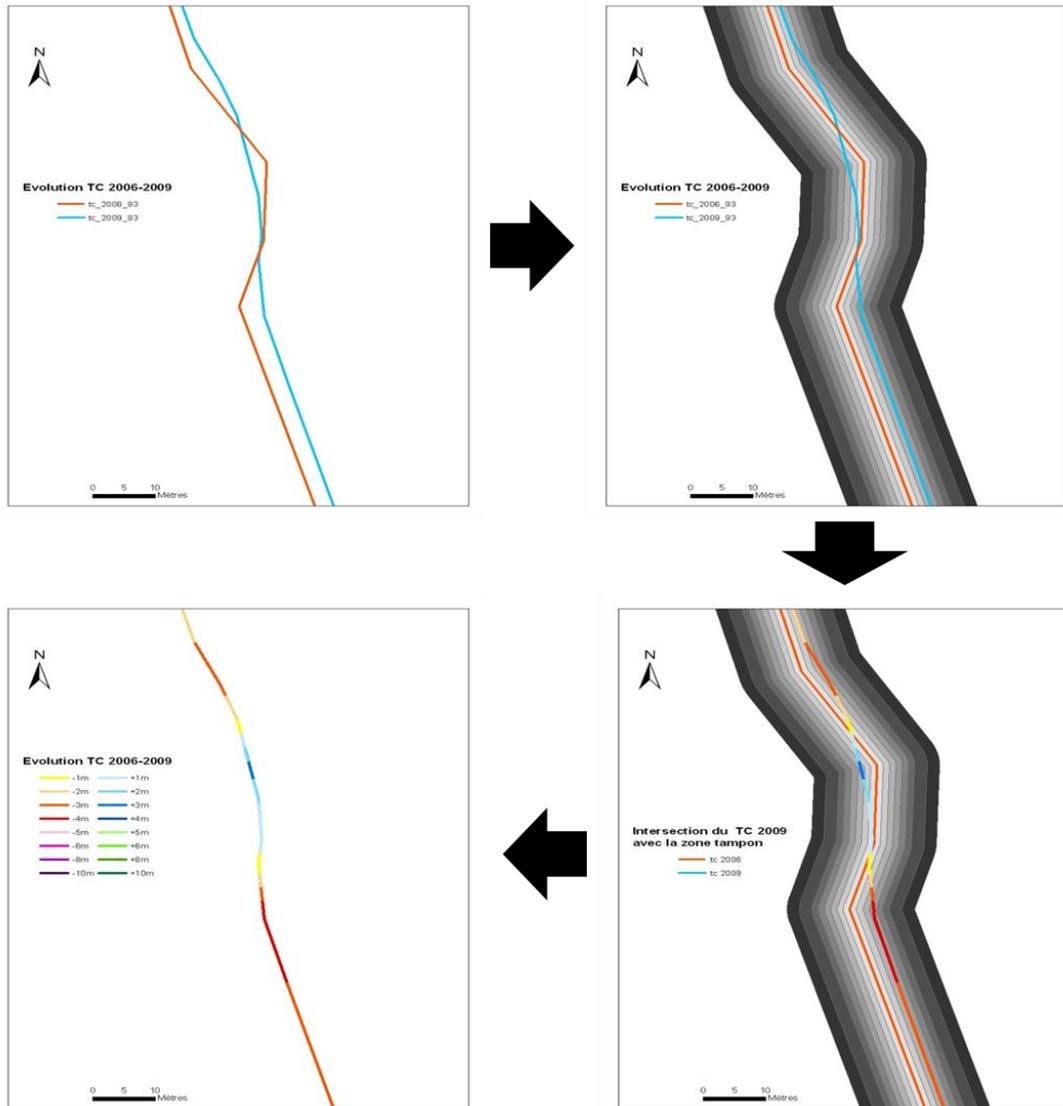


Illustration 43 - Schéma récapitulatif de la méthode des tampons

Ensuite, les résultats sont récupérés sur les tronçons homogènes.

b) Présentation des résultats et limites

Comme mentionné plus haut (paragraphe 4.3.2.d), ce calcul doit être, compte tenu des incertitudes liés aux données de base utilisées et à la précision du lever, considéré avec la plus grande prudence. Les quelques résultats présentés dans le présent paragraphe illustre encore ces incertitudes.

Le calcul par la méthode des tampons a pu être réalisé sur 75 % des cotes à falaises environ. Pour l'ensemble du linéaire traité, la moyenne pondérée par la longueur vaut

- 0,0082 m/an \pm 0,092 m/an. A noter que 52 % du linéaire traité présente des valeurs comprises entre -0,037 et +0,037 m/an et 85 % entre -0,0926 et 0,0926 m/an (Illustration 44).

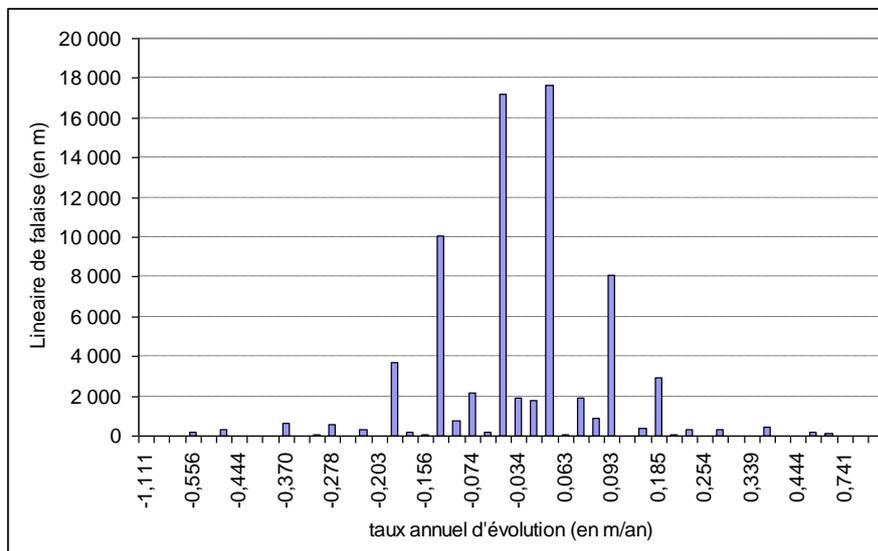


Illustration 44 – Valeurs obtenues pour le traitement automatique

La symétrie des résultats autour du 0 est frappante. En effet, dans le cas des falaises, la seule évolution possible, hors travaux de comblement ou confortement, est le recul. Or, d'après cette illustration, les évolutions obtenues sont aussi bien en recul qu'en avancé. Cela prouve que, dans le cas de la Loire Atlantique, avec des cinétiques d'évolution relativement faible, la méthodologie du traitement automatique des falaises ne semble pas conduire à des résultats concluants. Le recul actuel est inférieur aux incertitudes de la méthode mise en œuvre. Pour mémoire, les seuils de 0,037 m/an et 0,0926 m/an mentionnés ci-dessus correspondent à des distances entre position de falaises comparées respectives de 2 m et de 5 m à rapprocher des incertitudes méthodologiques.

Compte tenu des résultats obtenus, il a été décidé de ne pas prendre en compte ces résultats et de mettre en œuvre une démarche plus naturaliste. A noter que ces résultats n'auraient pas pu être améliorés en travaillant à une échelle plus fine.

Toutefois, cette analyse n'est pas dénuée d'intérêt et fait ressortir certains secteurs qui reculent fortement comme à Bellefontaine (commune de Saint-Nazaire).

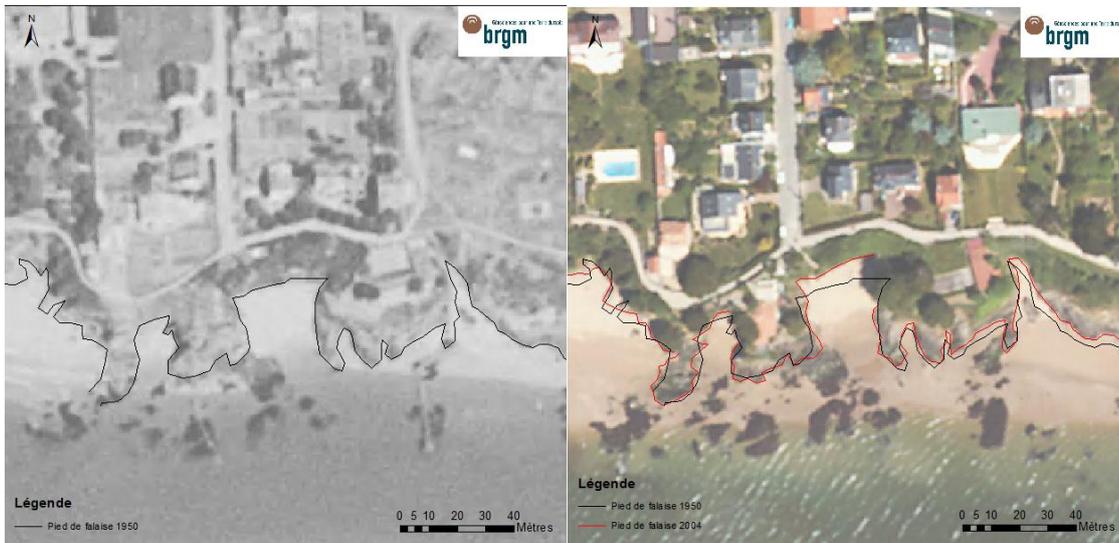


Illustration 45 – Recul de 6,5 m du pied de falaise à Bellefontaine entre 1950 (à gauche) et 2004 (à droite)

4.3.4. Recul maximum par traitement manuel

Compte tenu de l'ensemble des éléments exposés dans le paragraphe précédent, il a été décidé de ne pas considérer le traitement systématique des différentes positions réalisées sur orthophotographie.

Pour chaque tronçon homogène (cf. paragraphe 5.1), le recul a été évalué manuellement en :

- confrontant systématiquement les interprétations réalisées aux données de terrain ;
- considérant les orthophotographies présentant le plus grand écart temporel avec un décalage inférieur ou égal à 2 m ;
- prenant en compte le recul maximum observé sur le tronçon en considérant que les événements qui affectent les falaises bien qu'ils soient ponctuels, peuvent subvenir dans n'importe quel secteur du tronçon dit homogène.



Illustration 46 – Recul observé à Saint-Nazaire à l'ouest de la pointe de Chemoulin

4.3.5. Résultats retenus

Les résultats obtenus ont été fournis en m/an et associé à une valeur d'incertitude résultant du calage des orthophotographies considérées, de l'imprécision liée au tracé et de la confrontation des résultats avec les valeurs obtenues par traitement automatique et par le bureau d'étude GIPEA. A noter que, compte tenu de la confrontation aux données terrain, les incertitudes méthodologiques ont pu être réduite ; elles ont été évaluées à 0,045 m/an en moyenne.

Les résultats de l'évaluation du recul des falaises sont fournis dans le SIG (sous la forme de polygone qui se basent sur le traitement des orthophotographies) et dans les différentes fiches qui forment les annexes 2 et 3. Les valeurs de recul maximum estimées sont comprises entre 0,01 m/an et 0,3 m/an avec une valeur moyenne de 0,088 m/an.

4.4. INVESTIGATIONS DE TERRAIN

Outre les apports présentés dans le paragraphe 4.3, les investigations de terrain avaient pour objectif de fournir :

- la hauteur et la géométrie de la falaise et/ou talus ainsi que des terrains meubles qui peuvent la surmonter (en lien avec le paragraphe 4.2) ;
- une description succincte des formations constituant cette falaise (ou talus) et de leurs caractéristiques géo-mécaniques ainsi que de leurs éventuelles propensions à subir des mouvements de terrain ou de l'érosion localisée ;
- les événements encore détectables au moment de la visite ;

- la présence de renforcements, d'ouvrages assurant la stabilité ou une protection contre l'érosion ;
- l'orientation de la falaise, caractère abrité / semi-exposé / exposé.

Ces observations de terrain ont notamment pu permettre de déterminer le degré et les profils d'altération des roches (Illustration 47). En effet, concernant l'altération des roches par exemple, la seule utilisation des données de l'atlas du littoral ne nous a pas parue suffisante.



Illustration 47 – Altération des roches observées à la Pointe de la Croix à Mesquer (F_060)

Par ailleurs, ces investigations ont notamment permis de conforter les données acquises via les données numériques. Par exemple, à l'ouest de la plage de Saint-Marc à Saint-Nazaire se trouve une casemate suspendue qui donne une idée du recul minimum survenu sur le secteur (Illustration 48).

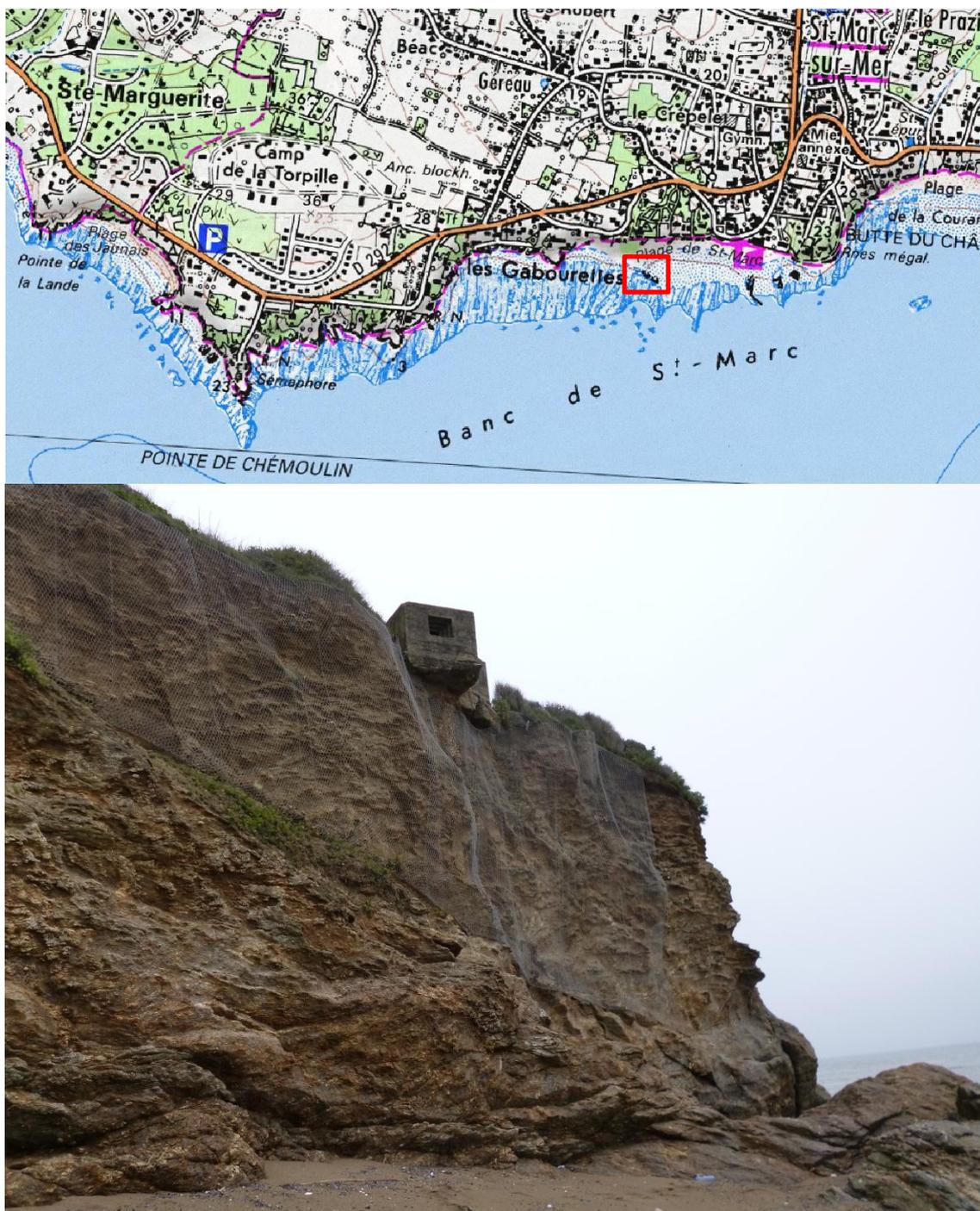


Illustration 48 – Casemate suspendue et grillage de protection à l’est de la plage de Mr Hulot à Saint-Marc (commune de Saint-Nazaire)

L'ensemble des données ont été reportées sur des fiches de terrain dont la structure a été validée en comité de pilotage. L'illustration 49 présente un exemple de fiche de terrain.

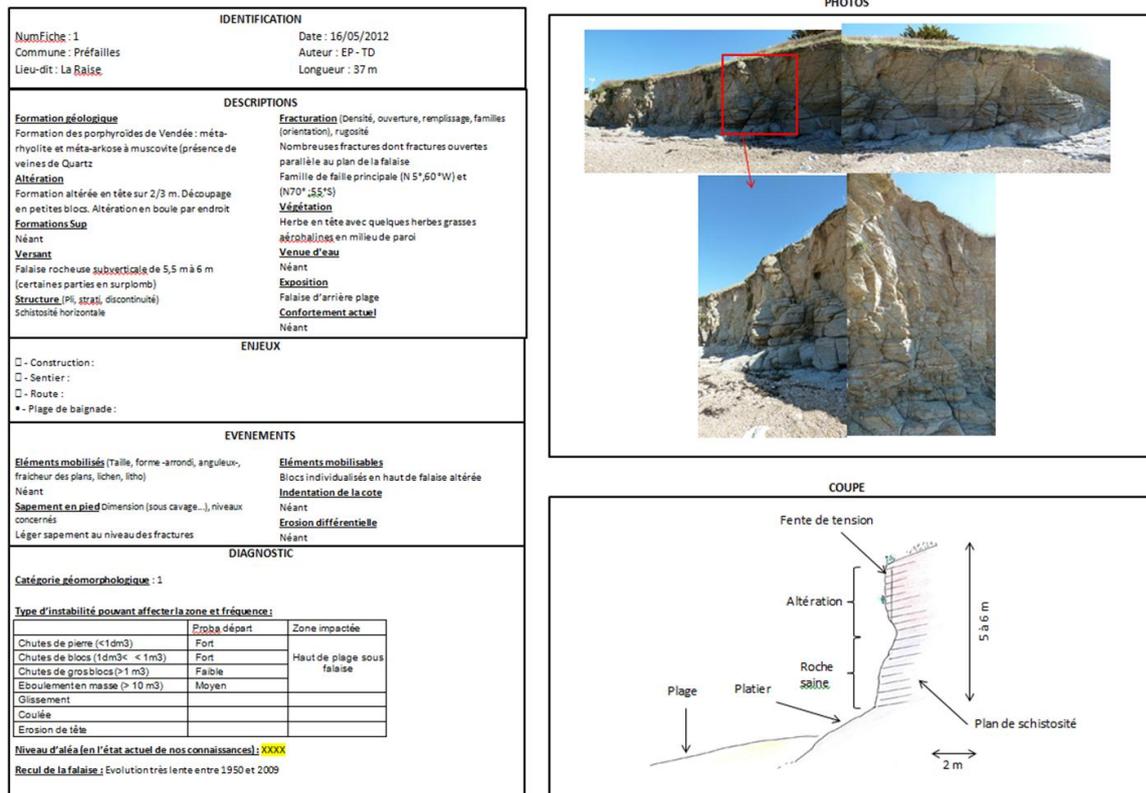


Illustration 49 – Exemple de fiche de terrain réalisée dans le cadre de l'étude (après mise au propre)

Au total, 23 jours de terrains ont été réalisés et la quasi-totalité du littoral a été investiguée sauf 2 communes (Illustration 50) : Préfaiilles (côte sud) et Pornic. En effet, toutes deux ont fait l'objet, en 2000, d'une étude réalisée par SIMECSOL. La commune de la Bernerie, également objet de cette étude a tout de même été visitée étant donné l'aléa identifié par SIMECSOL.

Par ailleurs, la commune de Pornic fait l'objet d'un important suivi des falaises côtières et a, dans ce cadre, une réelle connaissance de l'aléa qui leur est associé. Ainsi, les efforts ne se sont pas portés en priorité sur ce secteur.

Dans les zones non investiguées, les données de l'étude SIMECSOL ont été directement reprises.

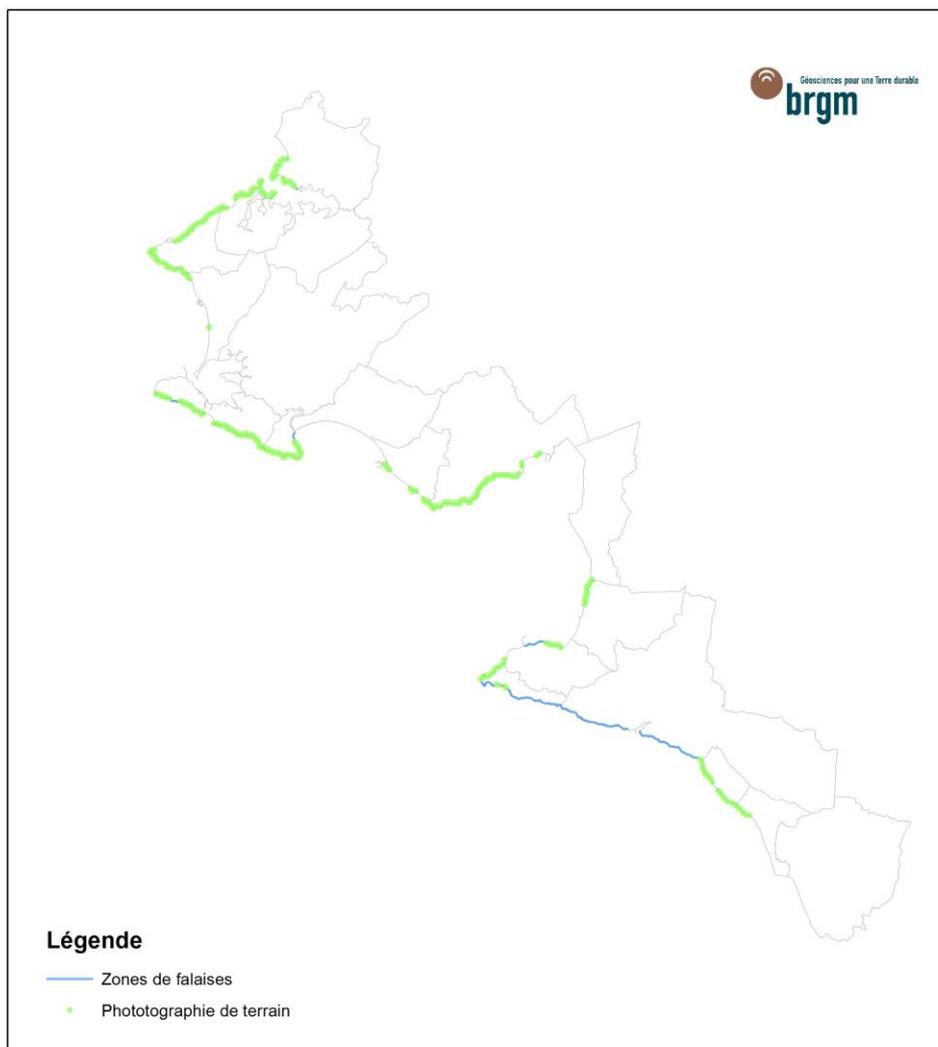


Illustration 50 – Portion des falaises du littoral de Loire Atlantique objet de visites de terrain (en vert)

Ces visites de terrain ont permis la rédaction de 248 fiches comme celle présentée Illustration 49 et la prise de 7029 photographies qui ont été par la suite géoréférencées. Pour cela, une méthodologie de croisement des photographies et des données de traces des GPS de terrain a été mise en oeuvre. L'ensemble des informations collectées a été intégré au SIG.

4.1. COMPARAISON DES PHOTOGRAPHIES

Lorsque la donnée était disponible et que cela a été jugé nécessaire, des comparaisons entre photographies plus ou moins anciennes et les photographies réalisées sur le terrain ont été réalisées. Cela permet d'affiner notamment la définition des types de mouvements en présence (volume, mode de chute, propagation, etc.).

Pour exemple, sur la commune de la Bernerie en Retz (plage de la Boutinardière), des évènements se sont produits entre 2000 (date de l'étude de SIMECSOL) et 2013 (date des visites de terrain). Sur ce secteur, à l'entrée de la plage, au niveau d'une indentation, plusieurs chutes de blocs se sont produites : des chutes de dièdres en partie est et des chutes de plusieurs écaïlles en partie ouest.

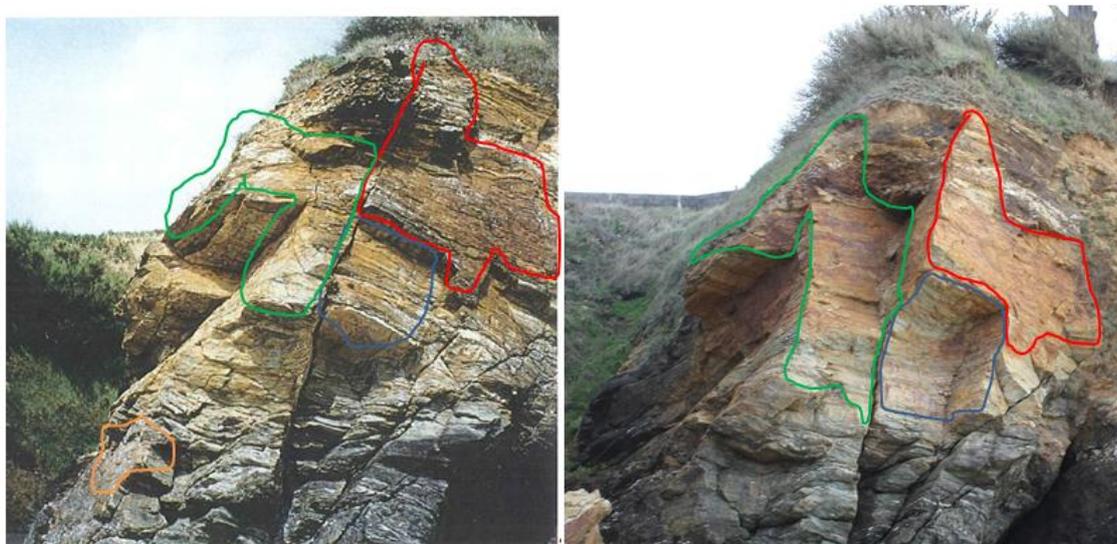


Illustration 51 – Importantes chutes de blocs de type dièdre au niveau de la falaise à l'entrée de la plage de la Boutinardière (partie est de l'indention)



Illustration 52 – Chutes de blocs (de type écaïlles) au niveau de la falaise à l'entrée de la plage de la Boutinardière (partie ouest de l'indention)

5. Interprétations

5.1. DECOUPAGE DU LINEAIRE COTIER EN TRONÇONS HOMOGENES SELON DES CRITERES PHYSIQUES

Le littoral de Loire Atlantique a été découpé en tronçons homogènes définis selon des critères physiques précédemment décrits tel que :

- la géomorphologie ;
- la géologie
- l'hydrogéologie ;
- la dynamique marine ;
- la nature et l'ampleur des phénomènes naturels observés.

Au total, 296 zones homogènes ont été identifiées et décrites. La longueur moyenne des tronçons est de 252 m. Comme le montre l'illustration 53 ci-dessous, ceux-ci sont de tailles variables. Le plus petit tronçon mesure 3 m et le plus long, un peu plus de 2 km.

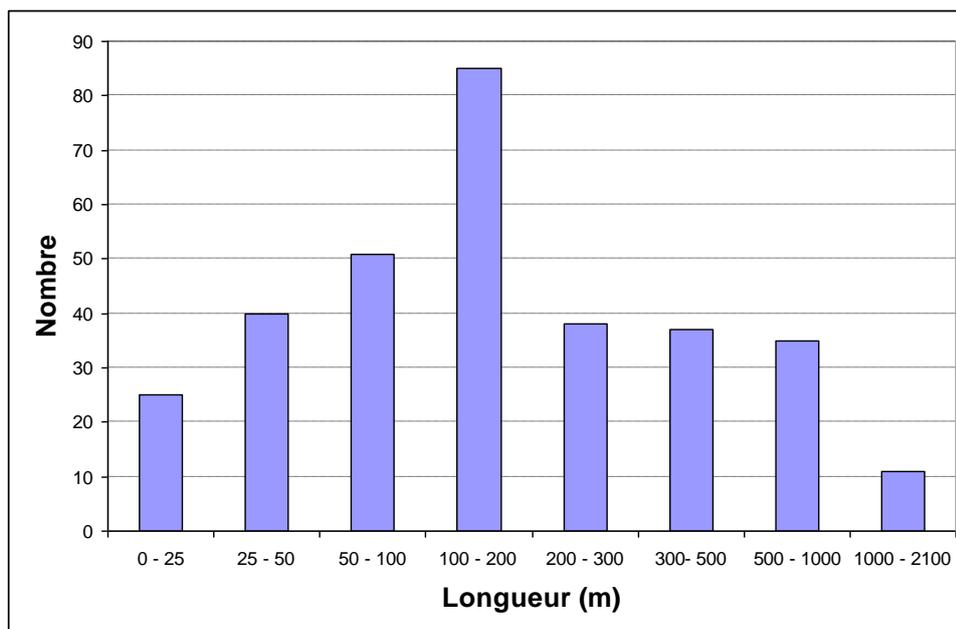


Illustration 53 – Répartition des longueurs des tronçons homogènes

5.2. DETERMINATION DE GRANDS TYPES GEOMORPHOLOGIQUES

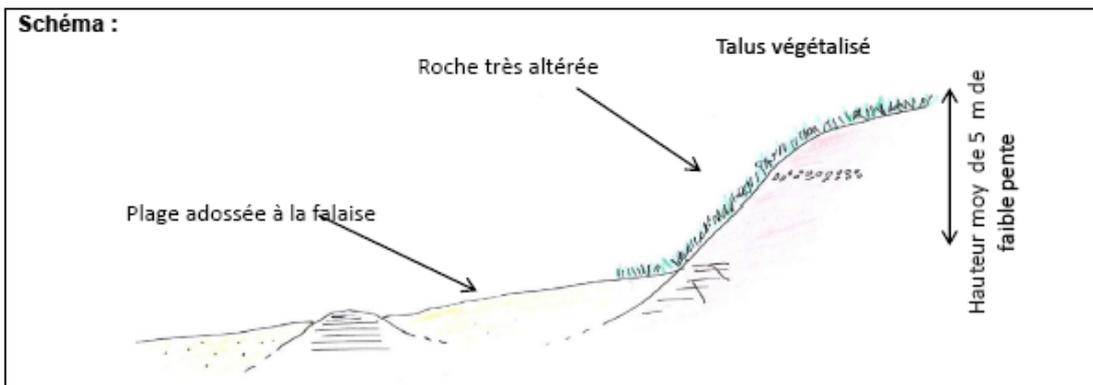
L'ensemble des données constituées par le bilan des connaissances (paragraphe 3) et les nouvelles données acquises ont été croisées (paragraphe 4) grâce au SIG et ont permis d'identifier 9 grands types géomorphologiques.

T_01

Description géomorphologique : Talus végétalisé généralement de faible pente, d'une hauteur moyenne de 5 m (mais pouvant atteindre 13 m), situé en arrière plage et correspondant à une roche très altérée.

Type de roche concernée : La roche est souvent masquée par la végétation. Il s'agit toutefois essentiellement de roches gneissiques (Formation de Muzillac) et micaschisteuses (Formation de la Vilaine) voire de formations superficielles (d'origine fluviales ou marines).

Altération : Très forte altération



Instabilités : La quasi-totalité de ces secteurs est exempte d'éboulements rocheux et de glissements. Quelques secteurs ont déjà été et pourraient être à l'origine de chutes de pierres et glissements de terrain d'ampleur limités. L'aléa associé aux instabilités est très faible.

Recul : Le taux de recul est très faible (0,01) à moyen (0,1). Un secteur où le recul vaut 0,16 m/an.

Type d'érosion : Erosion continentale

Secteurs concernés : Assérac, Mesquer, Piriac et dans une moindre mesure Saint-Nazaire et Préfailles (N)

Longueur totale : 1 945 m

Exemple :

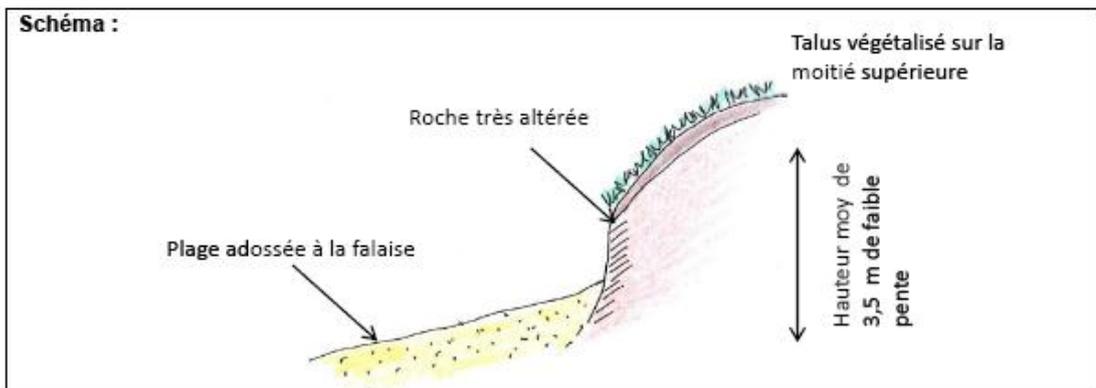


T_02

Description géomorphologique : Talus souvent végétalisé sur la moitié supérieure, généralement de faible pente d'une hauteur moyenne de 3,5 m (mais pouvant atteindre 13 m), situé en arrière plage et correspondant à une roche très altérée.

Type de roche concernée : Tous les types de roches sont concernés fournissant des profils morphologiques sensiblement différents.

Altération : Forte altération (isaltérites à altérites)



Instabilités : Quelques secteurs pourraient être à l'origine de chutes de pierres voire de blocs et glissements de terrain d'ampleurs limitées. L'aléa associé aux instabilités est très faible.

Recul : recul moyen de 0,09 m/an toujours inférieur à 0,2 m/an

Type d'érosion : Erosion continentale

Secteurs concernés : Essentiellement Assérac, Mesquer, Piriac, Batz-sur-mer et Préfailles

Exemple :

Longueur totale : 6 967 m

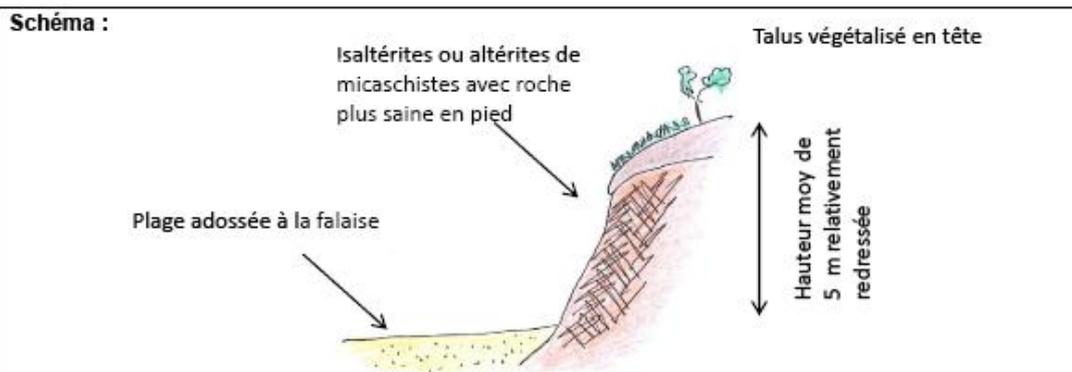


T_02bis

Description géomorphologique : Talus végétalisé en tête relativement redressé (de 60° à la verticale), de 5 m de hauteur en moyenne (pouvant atteindre une quinzaine de mètres), situé en arrière plage et correspondant à des isaltérites ou altérites de micaschistes. Certains secteurs présentent en pied une roche plus saine et fracturée.

Type de roche concernée : Micaschistes

Altération : Forte altération (isaltérites à altérites)



Instabilités : Ces zones peuvent être à l'origine essentiellement de chutes de pierres ou de blocs et plus rarement de chutes de gros blocs voire éboulement en masse. Généralement, la terre végétale et la végétation se retrouve en surplomb en tête de falaise. L'aléa associé demeure très faible ou faible.

Recul : recul moyen de 0,09 m/an toujours inférieur à 0,2 m/an (un secteur où le recul vaut 0,2 m/an)

Type d'érosion : Erosion continentale

Secteurs concernés : Assérac, Mesquer, Piriac, Saint-Michel Chef Chef et Préfailles (N)

Exemple :

Longueur totale : 4 716 m



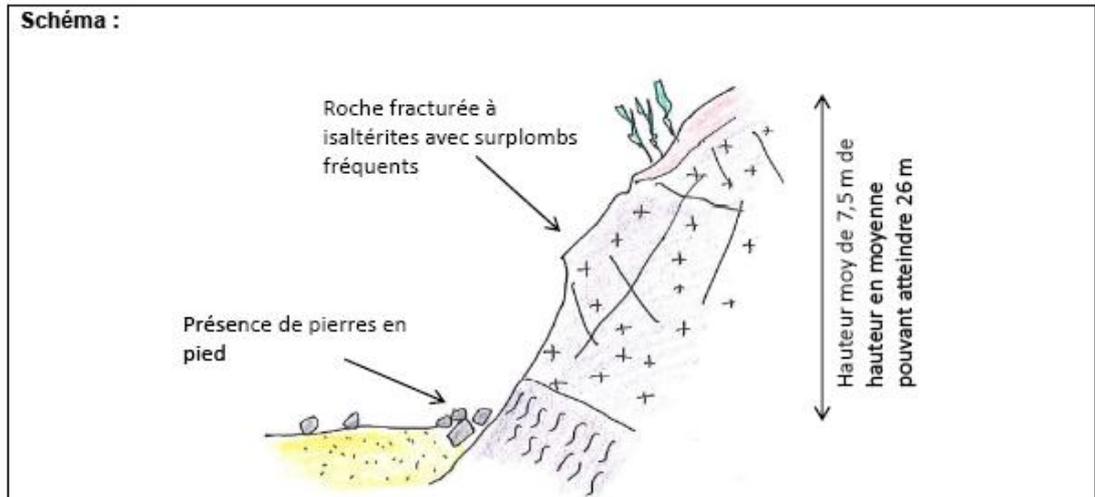
T_03

Description géomorphologique : Falaise de 7,5 m de hauteur moyenne pouvant atteindre 26 m de pente variable (comprise entre 60° et la verticale) pouvant présenter des surplombs, présentant, le plus souvent des pierres en pieds

Type de roche concernée : Tous les types de roche

Altération : Roche fracturée à isaltérite

Schéma :



Instabilités : Ces zones sont essentiellement à l'origine de chutes de pierres et de blocs correspondant à un aléa faible à moyen (rarement fort) et rarement à l'origine de chutes de gros blocs ou d'éboulement en masse.

Recul : Le taux de recul moyen est d'environ 0,096 (il est compris entre 0,01 et 0,3 mais la comparaison entre orthophotographie était parfois difficile en raison de la végétation).

Type d'érosion : Erosion marine et continentale

Secteurs concernés : Tous secteurs

Exemple :

Longueur totale : 26 490 m



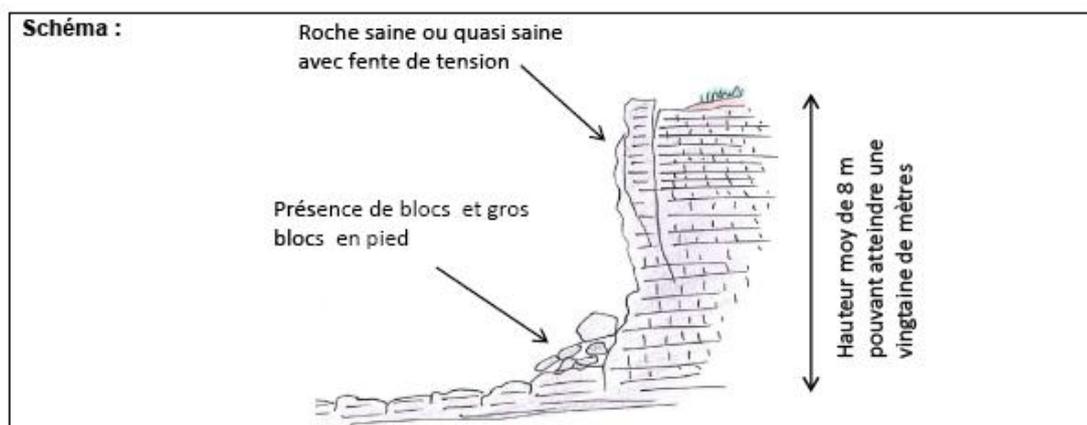
T_04

Description géomorphologique : Falaise en roche saine ou quasi saine (horizon fracturé), souvent très redressée, de 8 m de hauteur moyenne (mais pouvant atteindre une vingtaine de mètres) se poursuivant par un platier rocheux. La roche présente de nombreuses fractures parallèles au plan de la falaise individualisant des blocs et des gros blocs que l'on retrouve généralement en pied.

NB : Des falaises micaschisteuses plus altérées ont été associées à ces falaises lorsqu'elles présentent des morphologies similaires.

Type de roche concernée : Tous types de roche

Altération : Roche saine ou quasi saine dans la masse (horizon fracturé, à l'exception des micaschistes plus altérés)



Instabilités : Ces zones peuvent être à l'origine de chutes de pierres, de blocs, de gros blocs et plus rarement d'éboulements en masse et de glissements de terrain. L'aléa associé est faible à moyen.

Recul : Le taux de recul moyen est d'environ 0,083 (il est compris entre 0,03 et 0,16).

Type d'érosion : Erosion marine et continentale

Secteurs concernés : La grande côte, Pomic et Préfailles (orientation S-SO)

Longueur totale : 17 705 m

Exemples :



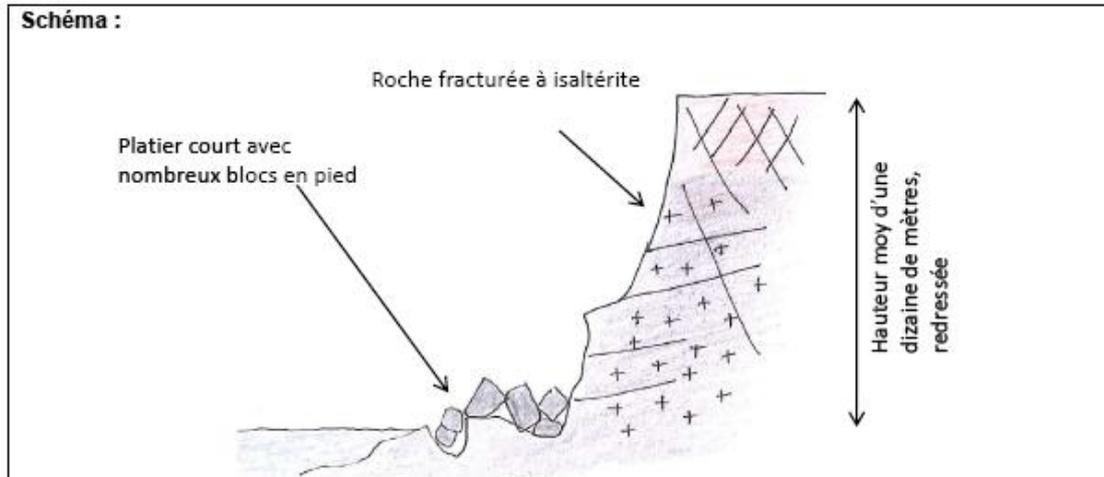
T_05

Description géomorphologique : Falaises de plus d'une dizaine de mètres de hauteur (et pouvant atteindre 24 m), relativement redressées, présentant un platier court et de nombreux blocs en pied.

Type de roche concernée : Tous les types de roche

Altération : Roche fracturée à isaltérite

Schéma :



Instabilités : Ces zones peuvent être à l'origine de chutes de pierres, de blocs, de gros blocs voire d'éboulements en masse. L'aléa associé est faible à moyen.

Recul : Le taux de recul moyen y est le plus important et vaut 0,13 m/an. Près de la moitié de ces zones a un recul supérieur ou égal à 0,16 m/an.

Type d'érosion : Erosion marine et continentale

Secteurs concernés : Essentiellement au niveau de Asserac, Piriac-sur-mer, Saint-Nazaire et Préfailles

Longueur totale : 6 992 m

Exemples :

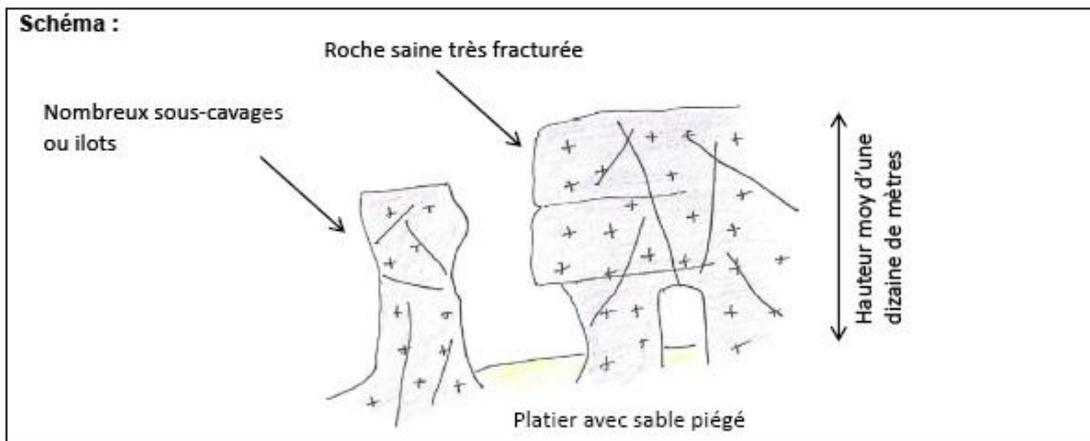


T_06

Description géomorphologique : Falaises d'une dizaine de mètres de hauteur en moyenne, redressées, relativement saines mais largement fracturées présentant de nombreux sous-cavages voire des ilots en cours de formation. Ces falaises se poursuivent, le plus souvent, sur un large platier rocheux avec du sable piégé.

Type de roche concernée : Gneiss, micaschiste et rhyolite

Altération : Roche saine ou quasi-saine (horizon fracturé)



Instabilités : Ces secteurs sont essentiellement à l'origine de chutes de blocs et gros blocs conduisant à un aléa très faible à moyen.

Recul : Le taux de recul moyen est d'environ 0,086 (il est compris entre 0,01 et 0,16).

Type d'érosion : Actions marines dominantes

Secteurs concernés : Essentiellement au niveau de Saint-Nazaire, Saint-Michel-Chef-Chef et Préfailles

Longueur totale : 3 579 m

Exemples :



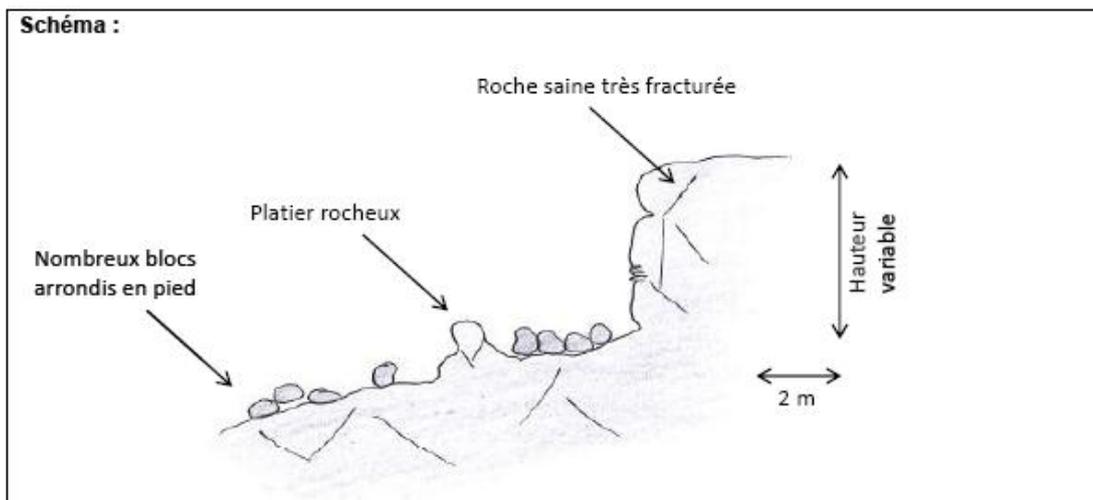
T_07

Description géomorphologique : Falaise relativement basse, de hauteur moyenne 4,5 m, se poursuivant sur un large platier rocheux, de pente souvent relativement faible. Les faciès altérés ont le plus souvent été décapés. On peut parler, pour certains secteurs, de cote à dénudation.

Type de roche concernée : Gneiss, granite et rhyolite

Altération : Roche saine ou quasi saine, fracturée

Schéma :



Instabilités : Ces secteurs fournissent relativement peu de pierres, de blocs et de gros blocs et compte tenu de leur faible hauteur génèrent des aléas très faibles à faibles.

Recul : Le taux de recul moyen est d'environ 0,06. Un secteur présente un taux de recul de l'ordre de 0,3 m/an.

Type d'érosion : Marine

Secteurs concernés : Ils sont bien représentés sur la grande côte et à Préfailles mais ils sont présents un peu partout.

Longueur totale : 9 021,2 m

Exemples :



T_08

Description géomorphologique : Cote artificialisée dont le fonctionnement est complètement modifié sans possibilité de rattachement à un type particulier.

Type de roche concernée : Tous types de roche

Altération : Divers

Schéma : sans objet

Instabilités : La quasi-totalité de ces secteurs est exempte d'éboulements rocheux et de glissements. L'aléa associé aux instabilités est très faible.

Recul : Les ouvrages de protection en pied de falaises peuvent limiter dans une certaine mesure le recul du trait de côte. Etant donné la méconnaissance de l'évolution de ces zones en absence de confortement, dans la majorité des cas concerné, une valeur moyenne du recul leur a été donné (soit 0,1 m/an).

Type d'érosion : Marine et/ou continentale

Secteurs concernés : Tous secteurs

Exemples :

Longueur totale : 3 250,3 m



5.3. QUALIFICATION DES ALEAS

On définit par **aléa**, la probabilité de survenance sur une zone donnée, d'un évènement donné, d'une intensité donnée, sur une période donnée. Pour un type d'évènements donné, on peut associer une évaluation de son intensité probable, caractérisée par une grandeur physique qui généralement est en relation directe avec les dégâts que le phénomène peut occasionner. Par exemple, dans le cas des chutes de pierres ou de blocs, on associe généralement la taille maximale des éléments unitaires, le volume total de matériaux déplacés mais aussi la hauteur de chute, pour évaluer l'intensité de l'évènement. Dans le cas de la présente étude, c'est principalement la dimension des éléments (pierre, blocs ou gros blocs) qui constitue la mesure de l'intensité des phénomènes pour les mouvements de terrain (cf. paragraphe 5.3.2).

Dans la présente étude, deux aléas ont été définis :

- l'aléa Recul des falaises ;
- l'aléa Mouvement de terrain.

Les **enjeux** constituent l'ensemble des personnes et des biens qui peuvent être soumis aux événements considérés, et donc mis en danger par ces derniers. Les enjeux sont généralement exprimés en unité monétaire pour les biens et en nombre de victimes pour les personnes. Pour les personnes, on introduit aussi le **concept d'exposition**, qui tient compte de la présence variable au cours du temps de personnes dans des lieux potentiellement soumis à des aléas.

Vis-à-vis de l'aléa Recul des falaises, les constructions en tête de falaise (route, habitations) et le chemin côtier constituent les principaux enjeux. Concernant l'aléa Mouvement de terrain, les enjeux sont les personnes qui peuvent se trouver en pied de falaise (Illustration 54).

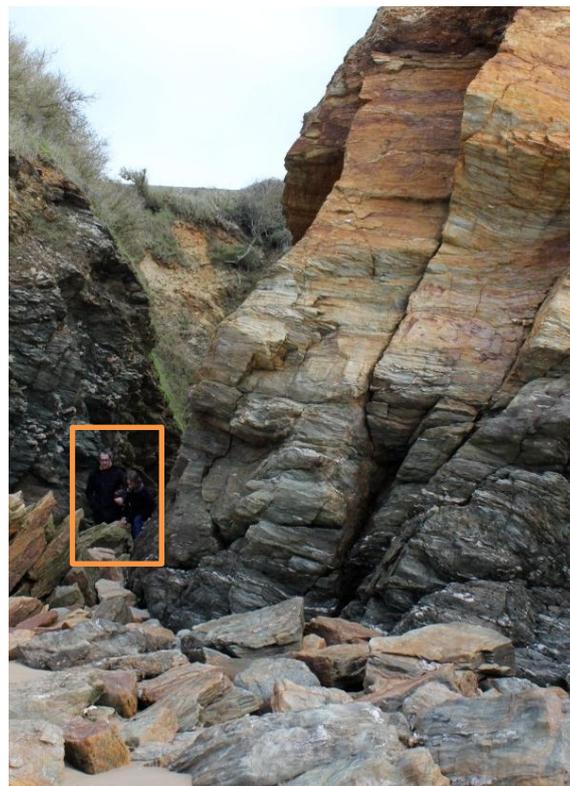


Illustration 54 – Présence de personnes en pied de falaise dans une zone où des chutes de blocs sont susceptibles de se produire

5.3.1. Aléa Recul des falaises

La caractérisation de l'aléa recul des falaises repose sur la synthèse de l'évolution des falaises (position des falaises, mouvements de terrain, caractéristiques géologiques, type géomorphologique).

Qualification de l'aléa

Pour cet aléa, il existe un seul niveau d'aléa, **aléa fort**. En effet, la nature de l'aléa implique la disparition du terrain concerné qui ne pourrait se voir appliquer des prescriptions réglementaires.

Cartographie de l'aléa

La zone d'aléa Recul des falaises correspond à la zone de mobilité de la falaise sous l'effet de l'érosion à échéance 100 ans. La détermination de la position de la falaise à échéance 100 ans s'appuie normalement sur la définition d'un taux moyen annuel

d'érosion ou de recul Tx exprimé en m/an, calculé sur la période de connaissance historique disponible.

Le guide PPRL précise que « la zone susceptible d'être érodée lors d'un événement ponctuel majeur peut être supérieure à la zone érodable à échéance 100 ans. C'est le cas pour les côtes à falaises où le recul moyen de la position du trait de côte sur 100 ans peut être inférieur à un recul ponctuel, en particulier si les événements sont de grande ampleur et rares. »

Concernant le recul des côtes à falaise de Loire Atlantique, ce phénomène a été largement observé. En effet, **l'évolution moyenne sur la période d'observation est inférieure à la précision de la méthodologie** (calage des orthophotographies, précision de digitalisation). Au contraire, très ponctuellement (au niveau des zones de failles, des indentations, ou sur un tout petit linéaire de tronçon homogène), le recul peut être important et atteindre au maximum 0,3 m/an.

Comme expliqué dans la partie 4.3, c'est ce recul ponctuel et maximal qui a été quantifié manuellement sur l'ensemble du linéaire de Loire Atlantique, ainsi que l'incertitude associée à ce taux.

Prise en compte du changement climatique

Pour cette étude, comme pour la côte aquitaine (Aubie et al, 2011), aucune hypothèse spécifique de modification des agents dynamiques (houle, vent, tempête, élévation du niveau marin, hydrologie...) n'a été considérée afin d'estimer les conséquences du réchauffement climatique, compte-tenu des incertitudes des modèles globaux et régionaux et de l'absence de doctrine nationale sur cette thématique. Cependant, le fait d'utiliser l'évolution des différents traits de côte sur plusieurs décennies, permet de manière intrinsèque de prendre en compte les éventuelles variations de ces agents.

Prise en compte des ouvrages de protection

D'après le rapport élaboré sous l'égide du Ministère en charge de l'écologie et intitulé « Premiers éléments méthodologiques pour l'élaboration des PPRL – Analyse et cartographie des aléas littoraux », concernant l'aléa recul du trait de côte au niveau des côtes à falaises, des précisions importantes sont fournies sur la présence d'ouvrages de protection en pied de falaises : « Les ouvrages de protection en pied de falaises peuvent limiter dans une certaine mesure le recul du trait de côte. Cependant, étant donné les origines le plus souvent à la fois maritime et continentale du recul, il est recommandé de ne pas prendre en **compte l'impact de tels ouvrages**. »

La prise en compte de cette mesure nous a paru, dans la plupart des cas, difficile étant donné la méconnaissance de l'évolution de la zone en absence de mur. Ainsi, dans la majorité des cas concernés, une valeur moyenne du recul a été donnée à ces secteurs (soit 0,1 m/an).

5.3.2. Aléa Mouvement de terrains

La caractérisation de l'aléa mouvement de terrain repose sur la synthèse des mouvements de terrain, sur les investigations de terrain et sur la comparaison des photographies.

Mouvements de terrain retenus

Les mouvements de terrain identifiés et susceptibles de se produire sur le littoral de Loire Atlantique sont les suivants (se référer à l'illustration 8) :

- chutes de pierres ;
- chutes de blocs ;
- chutes de gros blocs ;
- éboulement en masse ;
- glissement/ravinement.

Niveaux d'aléa retenus

Comme mentionné plus haut, l'aléa est classiquement défini comme la probabilité d'occurrence d'un phénomène d'intensité donné sur un territoire donné, dans une période de référence donnée. Cette définition comporte donc les éléments suivants :

- la référence à un phénomène, en principe défini assez précisément (cf. paragraphe précédent) ;
- la référence à une intensité de phénomène ;
- une composante spatiale ;
- une composante temporelle : c'est la probabilité plus ou moins grande d'occurrence temporelle du phénomène.

L'estimation de la probabilité d'occurrence dans le cas des falaises rocheuses instables de type falaises côtières, pose le problème de l'analyse probabiliste de phénomènes de rupture, dépendant à la fois de paramètres géotechniques et hydrauliques intrinsèques au massif et de facteurs externes aléatoires. La connaissance de l'ensemble de ces facteurs est pratiquement toujours insuffisante pour évaluer une probabilité de rupture. Les mouvements de terrain sont très souvent des phénomènes discrets pouvant évoluer imperceptiblement sur de longues périodes avant de subir une accélération soudaine dont la prédiction est particulièrement délicate. Toutefois, cette probabilité a été approchée, pour les différents mouvements retenus, de manière qualitative dans le cadre de la présente étude :

- Probabilité nulle : zone non concernée par le phénomène ;
- Probabilité très faible : zone où l'on ne peut pas exclure complètement la survenance du phénomène ;
- Probabilité faible : zone où le phénomène pourrait se produire à long terme (> 10 ans) ;
- Probabilité moyenne : zone où le phénomène pourrait se produire à moyen terme (dans les 10 ans) ;

- Probabilité forte : zone où le phénomène pourrait se produire à court terme (dans les 2 ans).

Par ailleurs, le Guide de réalisation des PPR Mouvements de terrain propose des exemples d'échelle conventionnelle d'intensité. Dans le cadre de cette étude, la grille d'évaluation du guide PPR a été légèrement modifiée pour tenir compte du contexte (pas d'intensité majeure compte tenu de la faible hauteur des falaises). L'échelle des intensités utilisée dans le cadre de la présente étude est présentée sur l'illustration 55.

Intensité /Aléa	Définition	Exemple de mesures de prévention
Très faible	Falaise rocheuse de faible hauteur pouvant présenter des instabilités de type chutes de pierres par exemple, mais dont le volume de matériaux reste très limité	Pas de mesure de prévention nécessaire
Faible	Falaise montrant par endroit des traces de petites chutes de pierres, blocs ou de ravinements peu important	Purges de blocs instables en falaise, confortement légers
Moyen	Falaises ou pentes littorales instables, avec des volumes de matériaux déplacés modérés (blocs de quelques m3)	Drainage d'une zone instable, confortement important
Fort	Mouvements de terrain suffisamment important pour engendrer le déplacement de gros blocs (>1 m3) ou de masses instables de plusieurs milliers de m3	Stabilisation d'un glissement de terrain important, confortement d'un plan de falaise instable

Illustration 55 – Echelle d'intensité utilisée pour l'étude

Pour approcher l'aléa Mouvement de terrain, intensité et probabilité d'occurrence ont été croisées en considérant l'ensemble des phénomènes à même de se produire sur un secteur donné. Sachant que la période étudiée est le siècle, les niveaux d'intensité retenus ont directement été traduits en termes d'aléa.

Cartographie de l'aléa

Ensuite, l'aléa a été simplement reporté sur la ligne de cote utilisée comme support de l'information.

Prise en compte du changement climatique

Pour les mêmes raisons que celles évoquées concernant le recul des falaises, le changement climatique n'a pas été pris en compte dans le cadre de la présente étude.

Prise en compte des ouvrages de protection

Les ouvrages de protection ont été pris en compte en fonction de leur emplacement (pied de falaise, haut de falaise) et de leur état. A noter qu'un ouvrage en pied ne permet par exemple pas d'empêcher des blocs de se détacher depuis le haut de falaise mais peut, en fonction de sa position, contribuer à limiter sa propagation.

6. Présentation des résultats

6.1. PRESENTATION DE LA BASE DE DONNEES

La base de donnée réalisée dans le cadre de la présente étude est composée de :

- une table de points comprenant un lien vers l'ensemble des photographies de terrain géoréférencées prises dans le cadre de la présente étude (comprenant 7029 photographies) ;
- les 7029 photographies ;
- une table de point comprenant un lien vers les photographies d'archives (plus ou moins anciennes) ;
- les 539 photographies d'archives ;
- une table de polygones présentant le numéro du tronçon homogène (l'ordre a été réalisé par ordre chronologique du terrain et n'est donc pas continu) et comprenant l'ensemble des informations relatives au tronçon : données de terrain (lithologie, altération, végétation, etc.), données issues du traitement de Litto3D (hauteur minimum, maximum et moyenne, pente minimum, maximum et moyenne), un certain nombre de photographies représentatives du secteur, la probabilité d'occurrence des différents mouvements identifiés et les aléas ;
- une table de polygones présentant le nez de falaise en 2004/2009 et une table de polygones montrant la zone affectée par le recul d'ici à 2109 sur la base des connaissances actuelle (Illustration 56).

A noter que les tables de polygones reprennent la ligne obtenue par digitalisation du nez de falaise sur les orthophotographies les plus récentes (2004 et 2009). La table de polygone s'appuie, quant à elle, sur cette ligne et présente une extension fonction de la vitesse de recul.

Les fiches ont été réalisées directement à partir de cette base de données (cf. paragraphe suivant).

L'illustration ci-dessous présente brièvement la manière dont est constituée cette base de données.

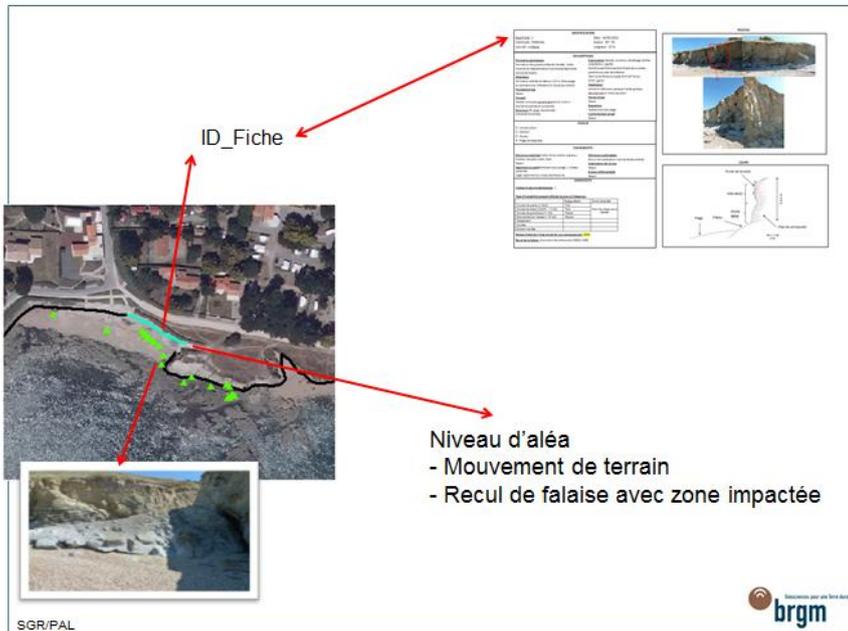


Illustration 56 - Représentation schématique des informations contenues dans la base de données.



Illustration 57 – Taux de recul et zone de recul des têtes de falaises au niveau de la Govelle à Batz-sur-Mer

6.2. LES FICHES DES TRONÇONS HOMOGENE

Pour chaque tronçon homogène, une fiche de présentation a été réalisée à partir d'Arcgis de manière automatique (Pages dynamique). Ces fiches récapitulent les points suivants :

- Identification : position et longueur du tronçon ;
- Généralités : brève description ;
- Coupe schématique et photographies récentes et anciennes (lorsque disponibles) ;
- Descriptif détaillé : géologie, discontinuités, hydrogéologie, géométrie du versant, végétation, constructions, instabilités constatées ;
- Travaux et ouvrages existants ;
- Diagnostic de stabilité et catégorie géomorphologique.

Etant donné leur mode de conception, ces fiches peuvent être reproduites facilement en adaptant la mise en page au besoin. L'illustration ci-dessous présente un exemple de fiches. Les autres fiches sont fournies en annexe 3 présentée hors texte uniquement au format numérique.

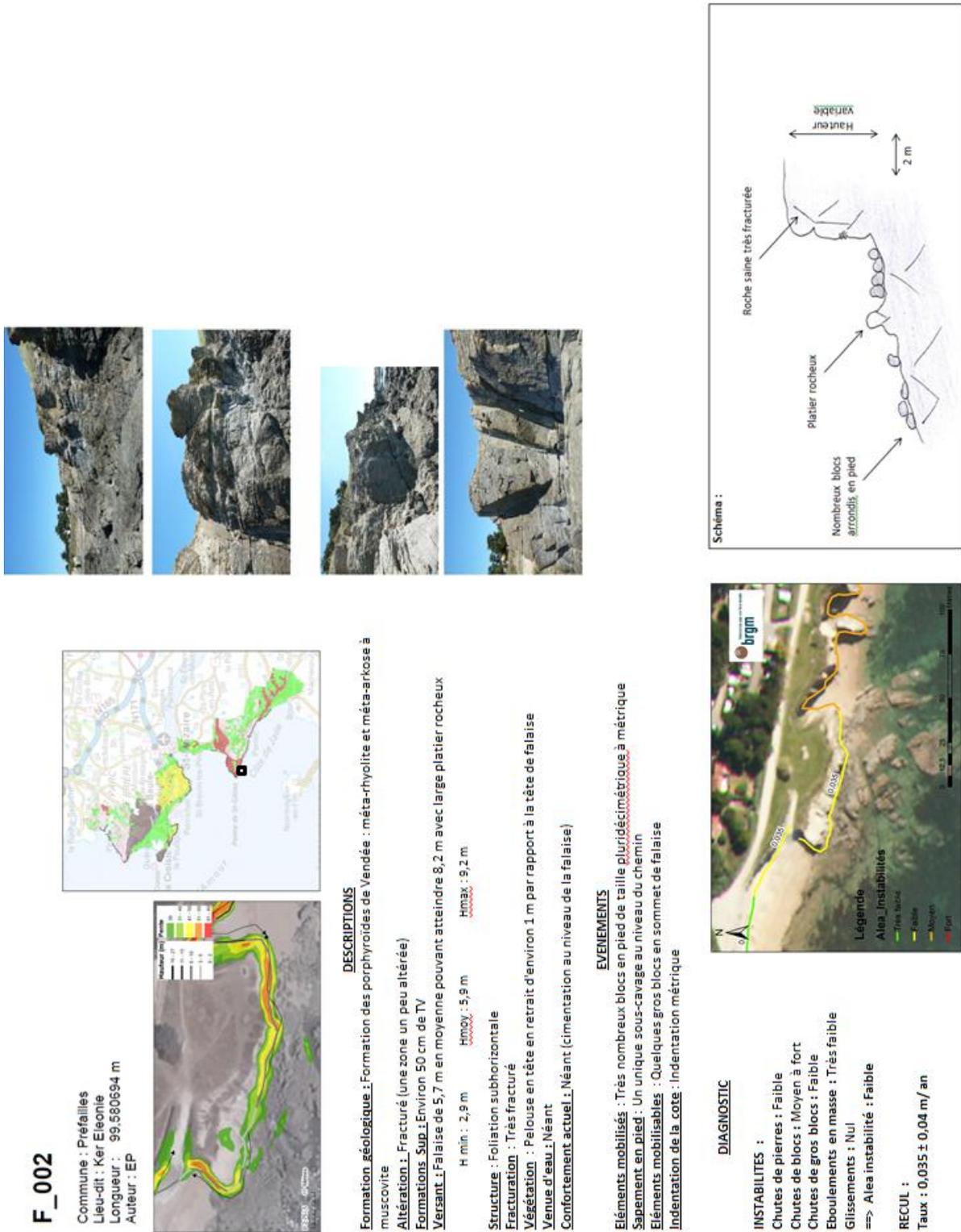


Illustration 58 - Exemple de fiche réalisée dans le cadre de cette étude

6.3. ALEA PAR SECTEUR ET COMMUNE ET PREMIERES RECOMMANDATIONS

6.3.1. Vue générale

En Loire Atlantique, la proportion linéaire de falaises concernée par un aléa mouvement de terrain fort représente 4,7 % (3,9 km sur un total de 81,7 km étudiés), 17,8 % (14,5 km) pour un aléa moyen, 34,2 % (27,9 km) pour l'aléa faible et 43,3 % (35,4 km) pour un aléa très faible (Illustration 59).

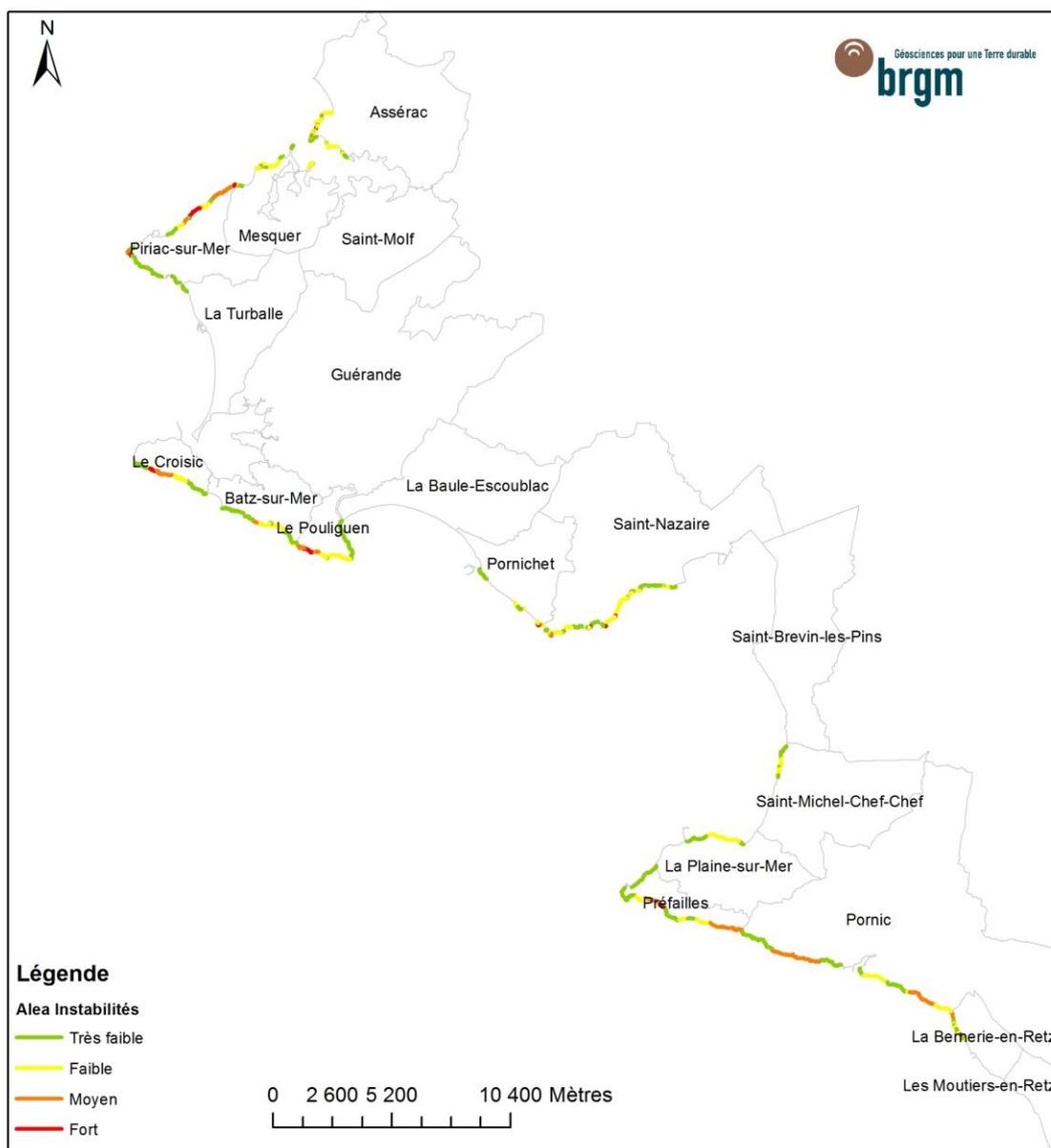


Illustration 59 – Cartographie départementale de l'aléa mouvement de terrain du littoral

En moyenne, les falaises de Loire Atlantique reculent de 8 cm par an (contre 20 cm/an sur la côte aquitaine). La vitesse de recul mesurée sur plusieurs décennies peut localement atteindre 30 cm/an comme au niveau de la Pointe de Merquel ou de Saint Gildas. Le linéaire concerné par une érosion supérieure ou égale à 20 cm/an représente moins de 5 % de la côte rocheuse (Illustration 60).

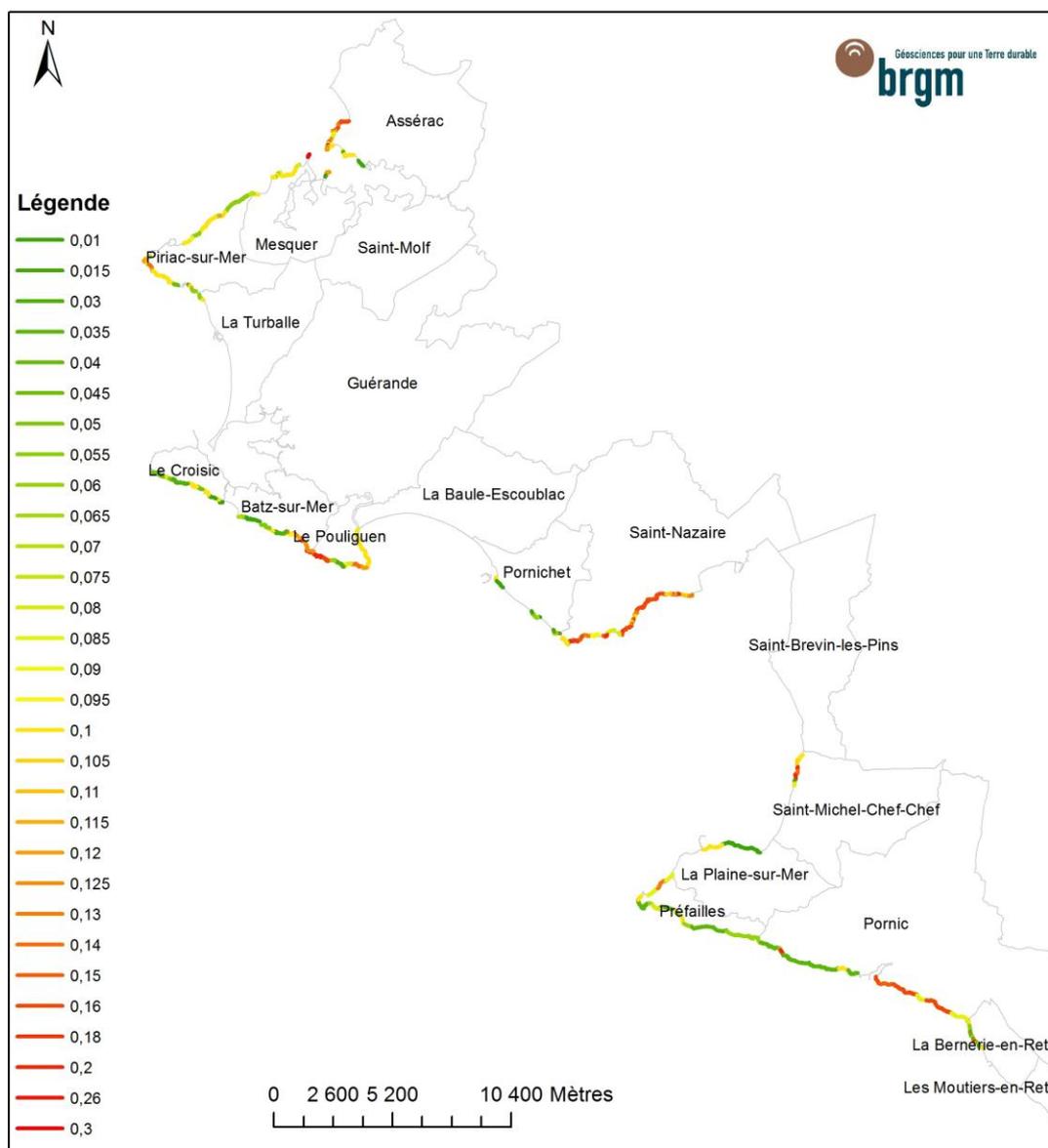


Illustration 60 - Cartographie départementale du taux de recul annuel

6.3.2. Secteur 1

Le secteur 1 comprend 17,5 km de côte à falaise. Sur ce secteur, le linéaire de falaises concerné par un aléa mouvement de terrain fort représente 7,6 %, 17,7 % pour un aléa moyen, 35,4 % pour l'aléa faible et 39,3 % pour un aléa très faible (Illustration 61).

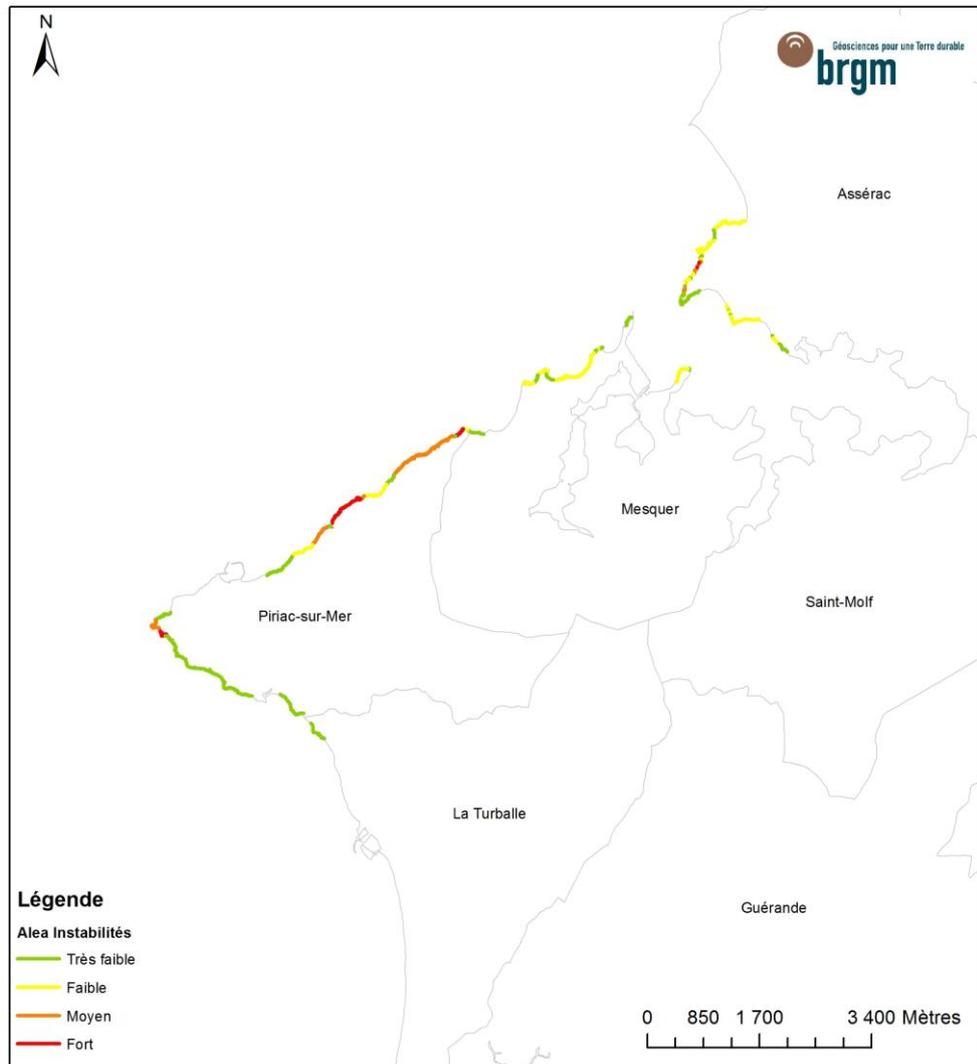


Illustration 61 – Cartographie des tronçons selon leur niveau d'aléa pour le secteur 1

En guise d'illustration, la portion de côte notée F_069 (Illustration 62) a été classée en aléa fort. Il s'agit d'une falaise d'environ 9 m de hauteur constituée de micaschistes plus ou moins altérés. Sur cette zone, un éboulement en masse d'un chaos de pierres, blocs et gros blocs s'est produit assez récemment et nombreux éléments (pierres, blocs, gros blocs) de plus ou moins gros volumes sont encore mobilisables.

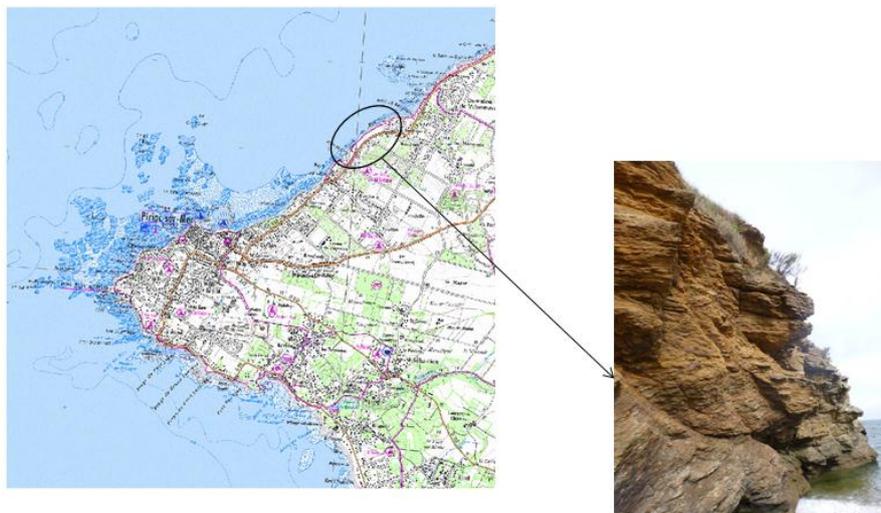


Illustration 62 – Exemple d'aléa instabilité sur le secteur 1 (F_069)

Sur ce secteur, les taux de recul sont inférieurs à 20 cm/an pour 98 % du linéaire. Le taux de recul le plus important est obtenu au niveau de la pointe de Merquel (Illustration 63).

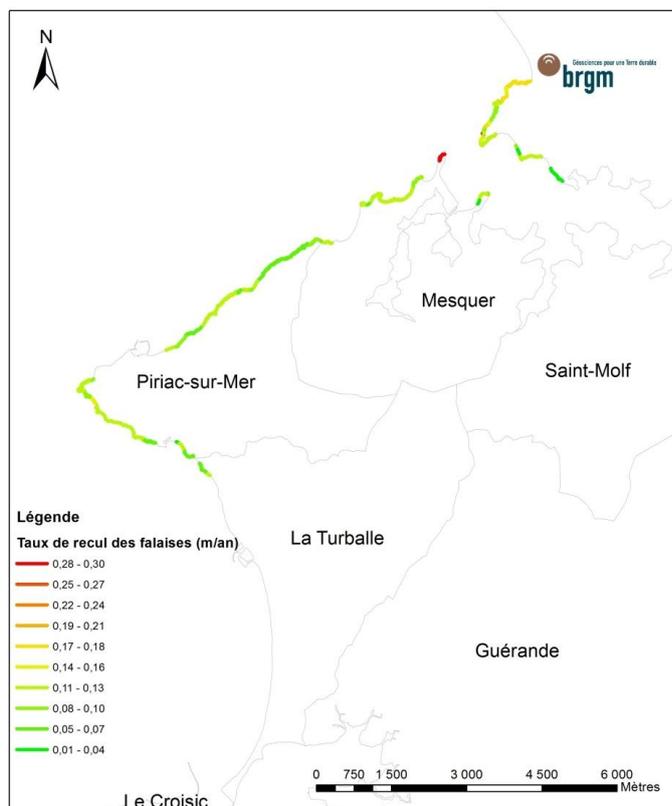


Illustration 63 - Cartographie du taux de recul annuel pour le secteur 1

6.3.3. Secteur 2

Le secteur 2 comprend 31,7 km de côte à falaises. Sur ce secteur, la proportion du linéaire de falaises concernée par un aléa mouvement de terrain fort représente 6,6 %, 11 % pour un aléa moyen, 39,9 % pour un aléa faible et 42,5 % pour un aléa très faible (Illustration 64).



Illustration 64 - Cartographie des tronçons selon leur niveau d'aléa pour le secteur 2

Les illustrations 65 à 68 présentent quelques exemples des secteurs les plus exposés à l'aléa instabilité.

Par ailleurs, sur le secteur 2, le taux de recul moyen est de 0,1 m/an. 7% du linéaire a un taux de recul supérieur ou égal à 0,2 m/an mais celui-ci ne dépasse jamais 0,26 m/an (Illustration 69).

L'illustration 70 présente un exemple de tronçon soumis à l'aléa recul sur le secteur 2.

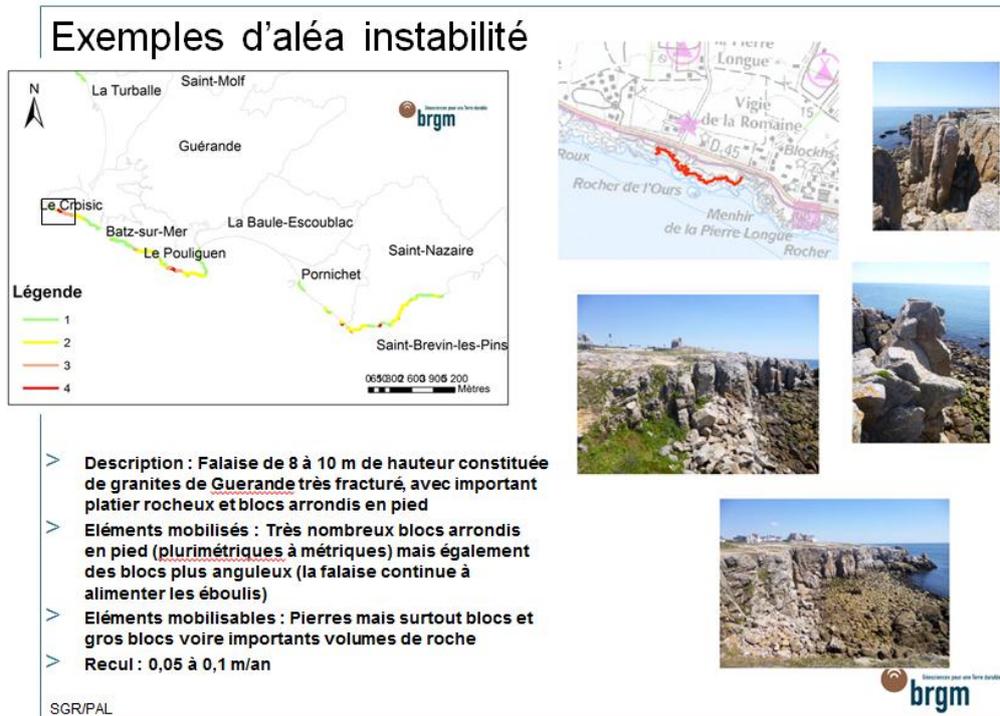


Illustration 65 - Exemple de tronçon soumis à l'aléa instabilité sur le secteur 2 (F_087)



Illustration 66 - Exemple de tronçon soumis à l'aléa instabilité sur le secteur 2 (F_144)



Illustration 67 - Exemple de tronçon soumis à l'aléa instabilité sur le secteur 2 (F_131)



Illustration 68 - Exemple de tronçon soumis à l'aléa instabilité sur le secteur 2 (F_114)

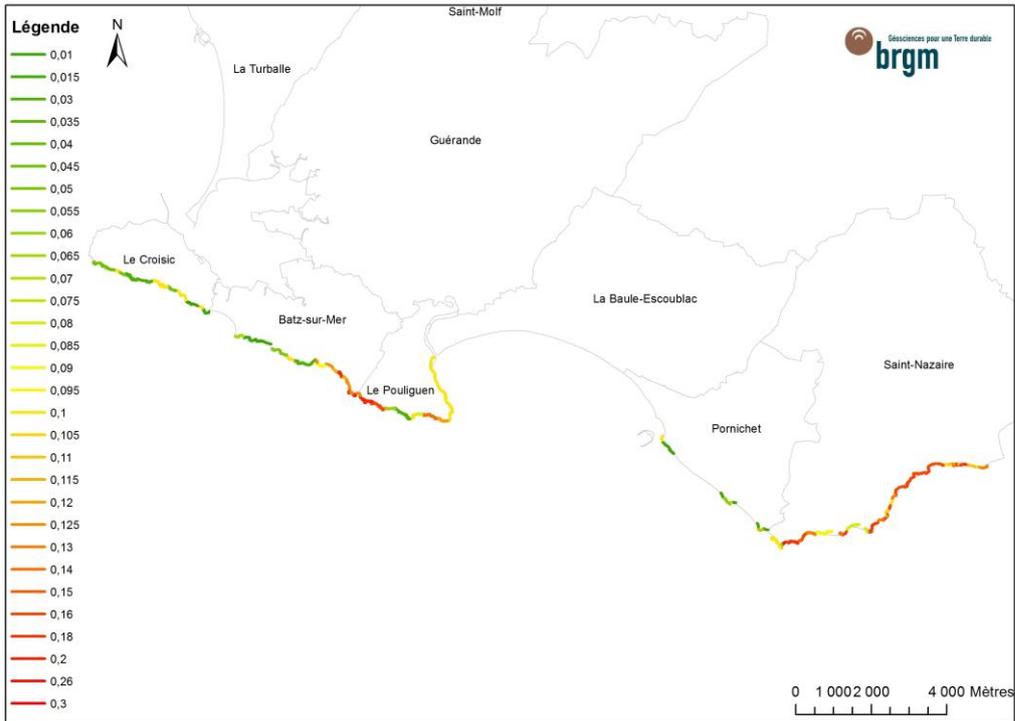


Illustration 69 - Cartographie du taux de recul annuel pour le secteur 2

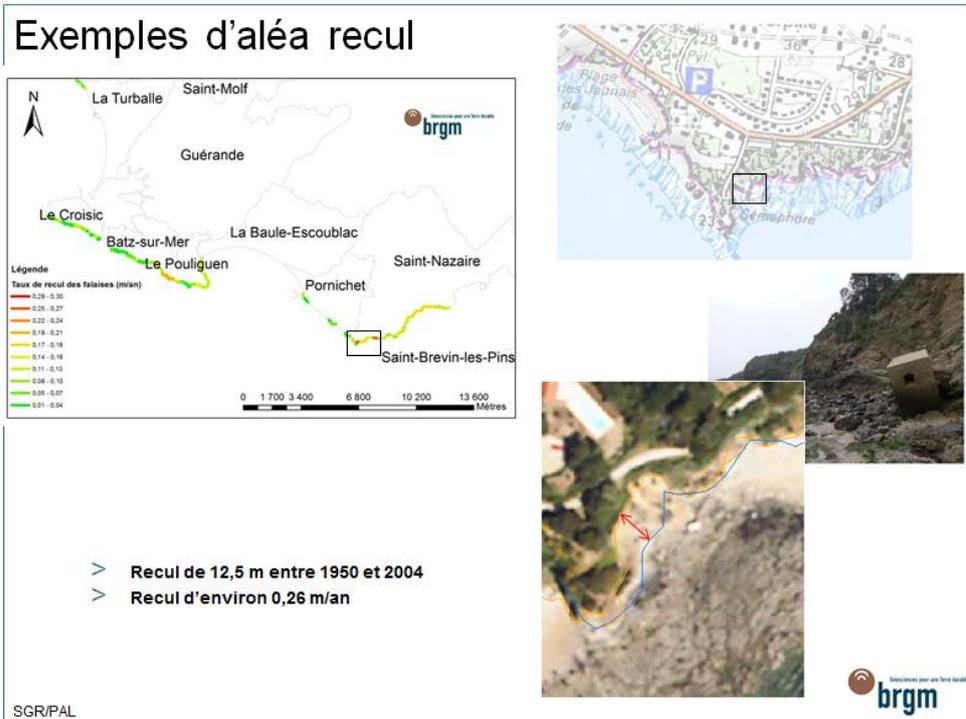


Illustration 70 - Exemple de tronçon soumis à l'aléa recul sur le secteur 2 (F_124a)

Quelques recommandations pour le secteur 2

Sur le secteur 2, les observations réalisées sur le terrain conduisent à formuler quelques recommandations.

Lever et suivi des cavités au Pouliguen (pointe de Penchâteau, pierre plate)

Au niveau de la pointe de Penchâteau (pierre plate) au Pouliguen, quelques cavités de plusieurs dizaines de mètres de longueur ont été relevées (Illustration 71). Certaines habitations se trouvent dans le prolongement probable de ces cavités. Il conviendrait de suivre l'évolution de ces cavités afin de s'assurer qu'elles ne mettent pas, à l'avenir, en cause la stabilité des habitations du secteur.

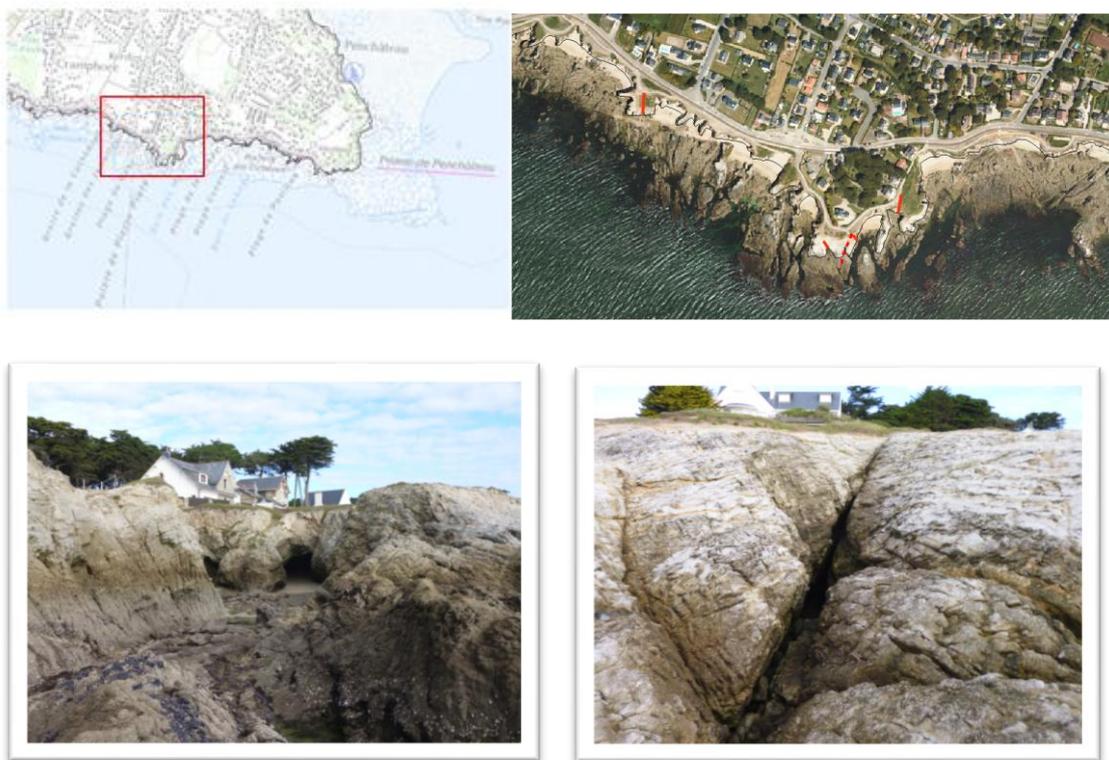


Illustration 71 – Illustrations des cavités au niveau de Pierre Plate au Pouliguen

Lever et suivi des cavités à Saint Nazaire (Bellefontaine)

De même, au niveau de Bellefontaine à Saint-Nazaire, une cavité passe sous le chemin côtier et devrait être, si ce n'est pas déjà le cas, l'objet d'un suivi afin de voir si celle-ci est sujette à évolution et si elle ne peut pas, à terme, générer des effondrements (Illustration 72).

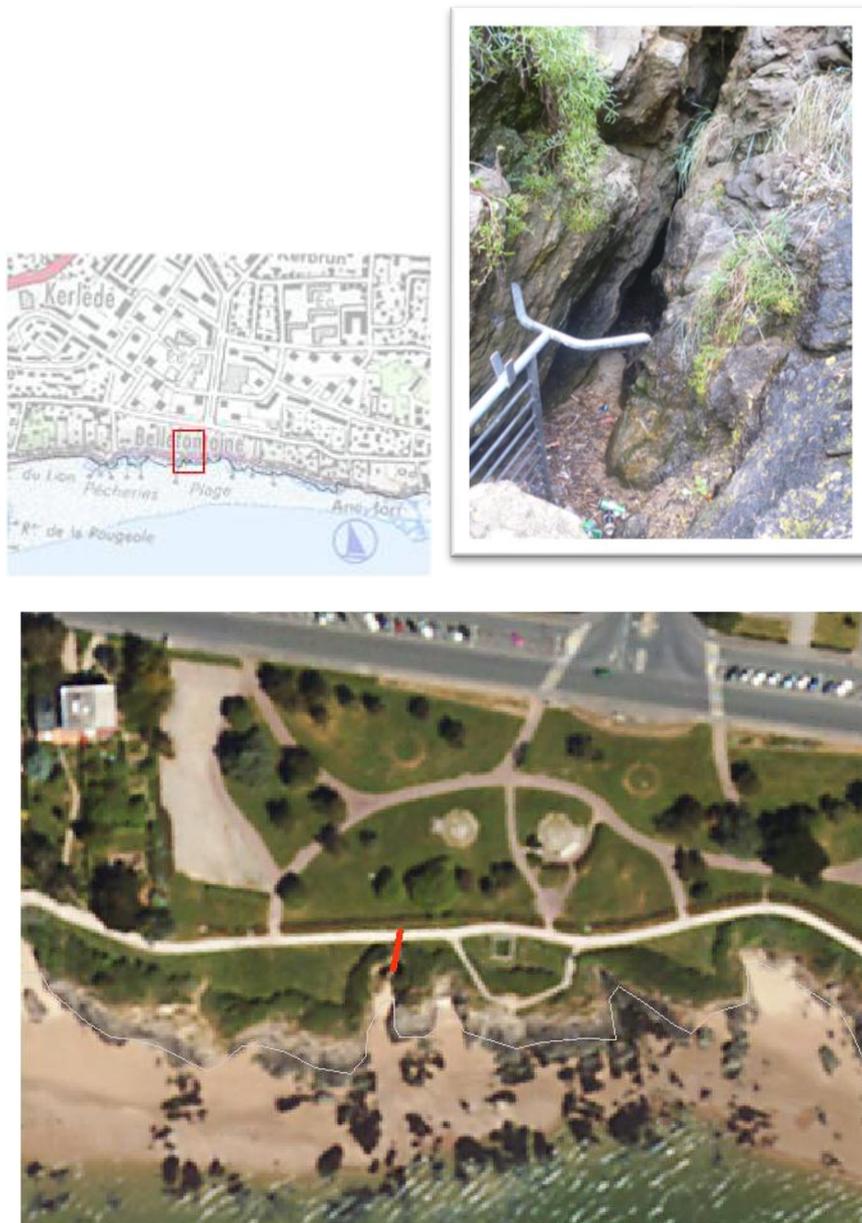


Illustration 72 - Illustrations des cavités au niveau de Bellefontaine à Saint-Nazaire

Surveillance du recul au niveau d'une zone de faille affectant une habitation à Saint-Nazaire (Bellefontaine)

Enfin, toujours à Bellefontaine, une habitation est construite dans une zone de faille fortement argilisée et sujette à un recul non négligeable. Des parties du terrain ont déjà été cédées à l'érosion. Dans cette zone où la tête de falaise est à faible distance de l'habitation, il conviendrait d'assurer un suivi régulier du recul et de l'état de la falaise (Illustration 73).



Illustration 73 – Recul au niveau d'une zone de faille affectant une habitation à Bellefontaine (Saint-Nazaire)

6.3.4. Secteurs 3 et 4

Le secteur 3 comprend 16,3 km de côte à falaises. Sur ce secteur, la proportion du linéaire de falaises concernée par un aléa mouvement de terrain fort représente 2,7 %, 16,7 % pour un aléa moyen, 34,5 % pour un aléa faible et 46,1 % pour un aléa très faible.

Le secteur 4 quant à lui comprend 16,1 km de côte à falaises. Sur ce secteur, la proportion du linéaire de falaises concernée par un aléa mouvement de terrain fort représente moins de 1 %, 32,2 % pour un aléa moyen, 21,2 % pour un aléa faible et 46,5 % pour un aléa très faible.

L'illustration 74 présente la cartographie des tronçons selon leur niveau d'aléa instabilité pour les secteurs 3 et 4.

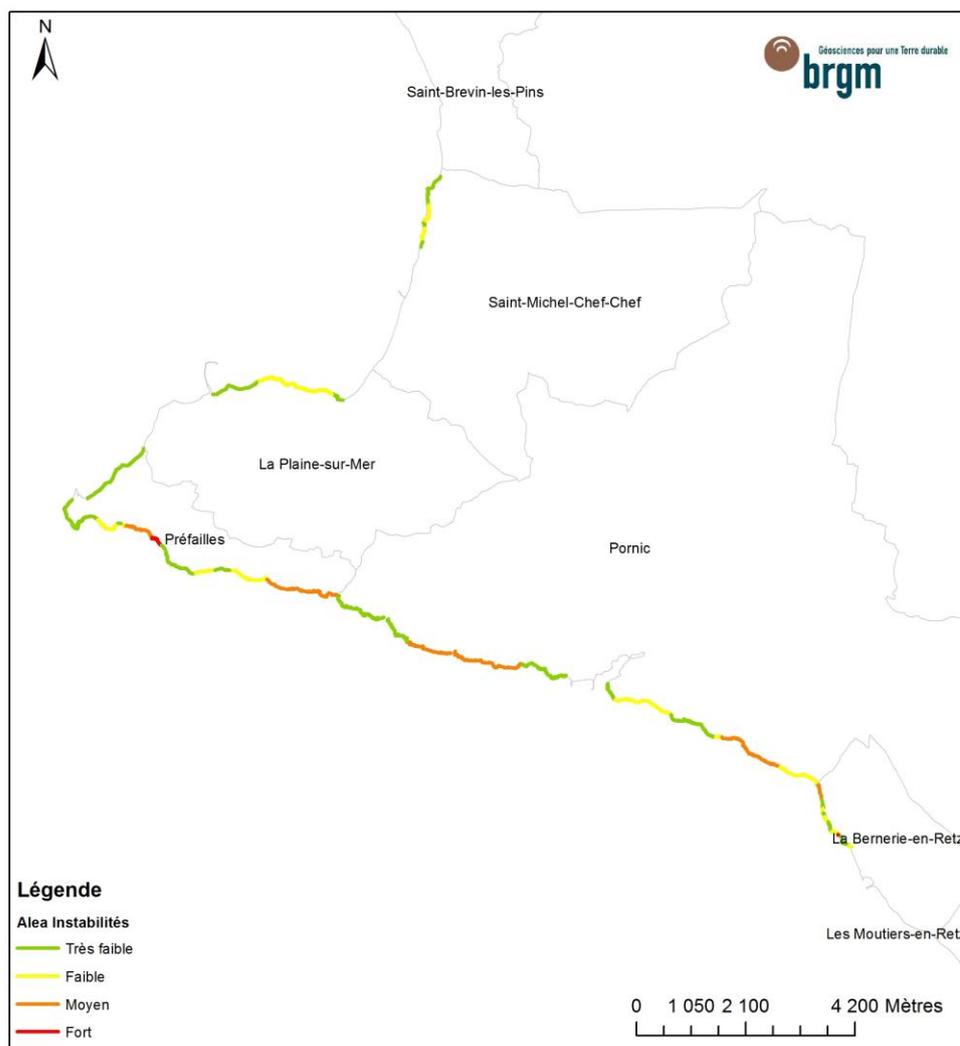


Illustration 74 - Cartographie des tronçons selon leur niveau d'aléa pour les secteurs 3 et 4

L'illustration 75 présente un exemple de tronçon exposé à un aléa instabilité moyen.

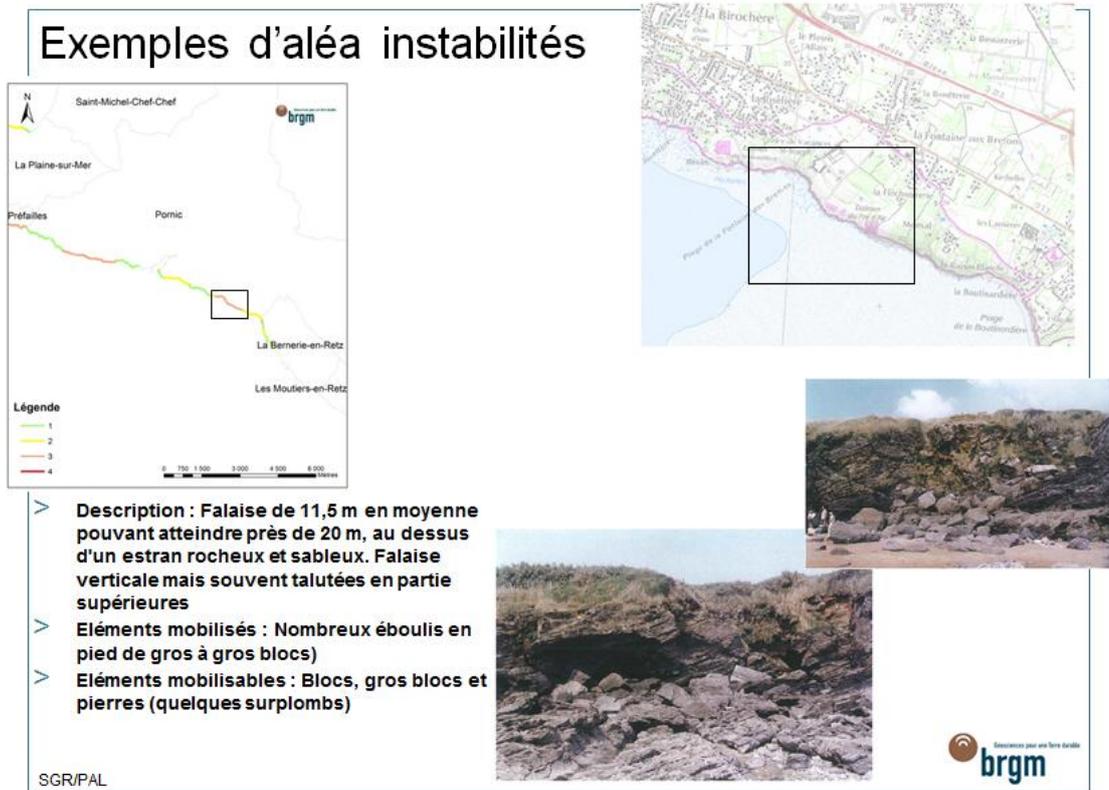


Illustration 75 - Exemple de tronçon soumis à l'aléa instabilité sur le secteur 2 (F_186)

Par ailleurs, sur le secteur 3, le taux de recul moyen est de 0,07 m/an. 4,4% du linéaire a un taux de recul supérieur ou égal à 0,2 m/an et 60 % du linéaire un taux de recul inférieur ou égal à 0,06 m/an. Le secteur 4, quant à lui, présente un taux de recul moyen de 0,09 m/an. 3% du linéaire a un taux de recul égal à 0,2 m/an (recul maximal obtenu sur ce secteur) et 40 % du linéaire un taux de recul inférieur ou égal à 0,035 m/an.

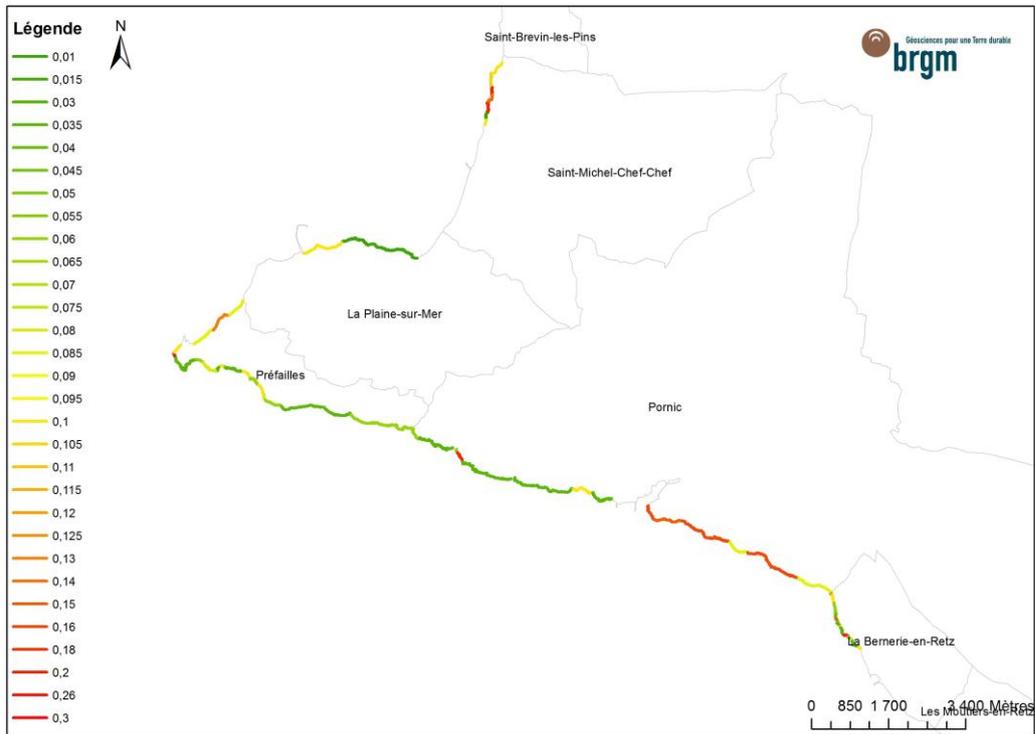


Illustration 76 - Cartographie du taux de recul annuel pour les secteurs 3 et 4

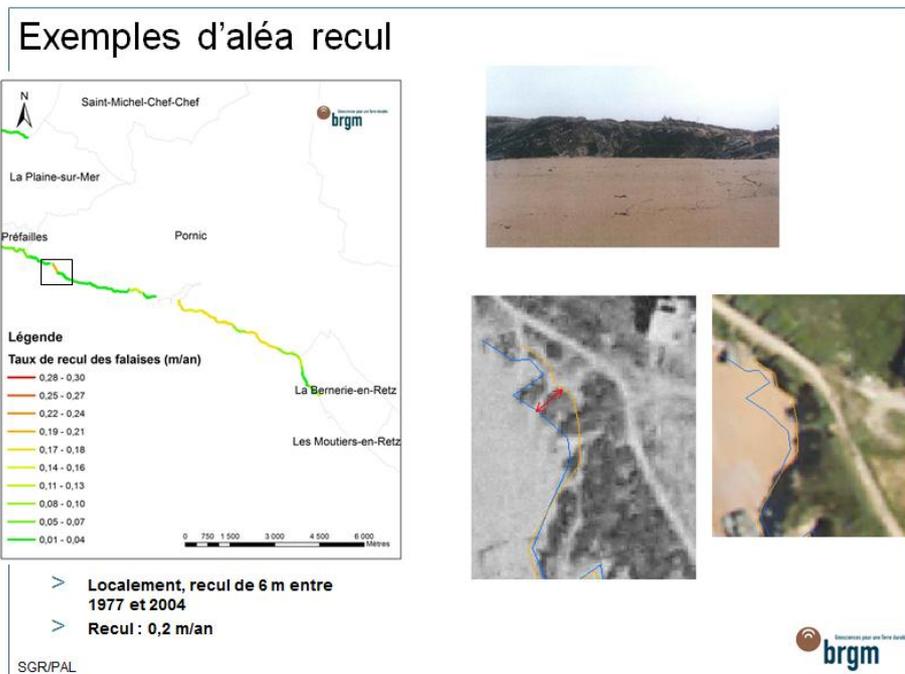


Illustration 77 - Exemple de tronçon soumis à l'aléa recul sur le secteur 2 (F_171b)

6.4. COMPREHENSION DES MECANISMES ET PERSPECTIVES

Par ailleurs, afin de mieux appréhender le recul des falaises nous avons tenté de mieux comprendre et de mettre en évidence sur le terrain le mécanisme de recul des falaises dans un contexte de socle en Loire Atlantique.

D'après les observations réalisées sur le terrain, l'érosion différentielle peut conduire à la formation de grottes au niveau de zones de plus faible compétence que sont par exemple les zones de failles. La chute du toit de ces cavités conduit à l'élaboration des indentations qui peuvent être très profondes (Illustration 78). Ainsi, l'érosion semble bien (cf. paragraphe 2.2), au début de l'évolution dans le contexte de terrains compétents dont le pied est affecté par la marée, conduire à une irrégularisation du littoral. A noter qu'en Loire Atlantique, une grande proportion du littoral a une orientation N120-N130°, selon l'orientation principale de la fracturation (cisaillement sud armoricain). Les indentations se font souvent au niveau d'orientations secondaires (N50-55, N15° ou N30-35°). Une fois les indentations formées, celles-ci s'élargissent (Illustration 80). Différents degrés d'évolution ont pu être observés sur le terrain. Ensuite, une nouvelle phase d'érosion a lieu perpendiculairement aux indentations souvent dans le sens de la fracturation principale (N120-130°) et les massifs de roches isolés au niveau des indentations sont désolidarisés du reste de la cote ce qui créé des îlots (Illustration 81 ou Illustration 79).



Illustration 78 – Formation d'indentations au niveau des zones de failles (source BRGM)



Illustration 79 - Régularisation du littoral par détachement d'îlots au Pouliguen (source : BRGM)



Illustration 80 – Elargissement des indentations (source : BRGM)



Illustration 81 – Régularisation du littoral par détachement d'îlots (source BRGM)

Afin de poursuivre la compréhension des mécanismes en jeu et notamment au niveau des zones de failles qui représentent les zones de faiblesses du littoral, il pourrait être intéressant de poursuivre ce travail, notamment par des investigations de type géophysique ou par levés LIDAR.

Conclusion

Dans le cadre d'un partenariat entre la DDTM44 et le BRGM, ce dernier est intervenu pour réaliser, sur le littoral de Loire Atlantique, une cartographie des aléas mouvements de terrain et recul des falaises. Cette étude s'est appuyée sur :

- l'identification des zones de falaises ;
- le bilan des connaissances sur les falaises côtières en Pays de la Loire ;
- la détermination de la géométrie des versants à partir de l'exploitation de la litto3D (développement méthodologique pour le calcul des hauteurs de falaises) ;
- l'analyse de l'évolution des côtes rocheuses sur des bases historiques (comparaison des orthophotographies de 2004 et 1950 principalement) ;
- l'analyse géologique et expertise naturaliste du linéaire, découpage typologique ;
- la constitution d'une base de données comprenant notamment l'ensemble des photographies prises in situ (au nombre de 7 029) et des photographies d'archives (au nombre de 539) ;
- la définition d'aléa par secteur typologique, synthèse de l'évolution des falaises / talus et évaluation du recul à 100 ans ;
- le zonage d'aléa et restitution cartographique.

Les 81 km de côte à falaises de Loire Atlantique ont été découpés en 296 zones homogènes sur des critères essentiellement géomorphologiques et géologiques et en fonction de la nature et l'ampleur des phénomènes naturels observés. Pour chacune d'entre elle, une fiche synthétique reprenant les observations collectées sur le terrain et les résultats des analyses numériques a été rédigée. Ces fiches reprennent également les aléas mouvements de terrain et recul de falaise. L'ensemble de ces fiches figure sous la forme d'une annexe hors-texte sous format numérique uniquement (annexe 3). Les résultats concernant les zones homogènes sont présentés sous forme d'une ligne correspondant au nez de falaise qui a été réalisée par digitalisation des orthophotographies les plus récentes.

Cette étude a permis de réaliser un atlas numérique sous forme SIG destiné à servir de référence (topographie, photographie datée et géoréférencées, etc.) pour l'état des falaises de Loire Atlantique. Il est facile à actualiser, notamment par ajout de nouveaux clichés, etc.

En Loire Atlantique, la proportion du linéaire de falaises concernée par un aléa mouvement de terrain fort représente 4,7 % (3,9 km sur un total de 81,7 km étudié), 17,8 % (14,5 km) pour un aléa moyen, 34,2 % (27,9 km) pour un aléa faible et 43,3 % (35,4 km) pour un aléa très faible.

Par ailleurs, en moyenne, les falaises de Loire Atlantique reculent de 8 cm par an. La vitesse de recul mesurée sur plusieurs décennies peut localement atteindre 30 cm/an comme au niveau de la Pointe de Merquel ou de Saint Gildas. Le linéaire concerné par une érosion supérieure ou égale à 20 cm/an représente moins de 5 % de la côte

rocheuse. Les cartes d'aléa Mouvement de terrain et recul des falaises réalisées dans le cadre de l'étude sont présentées sous forme de planches communales intégrées à l'annexe 2 présentée hors-texte.

Outre cette cartographie, la présente étude a permis de formuler plusieurs recommandations de suivi de l'évolution des falaises au niveau de cavités (Bellefontaine à Saint-Nazaire et Pierre Plate au Pouliguen) et d'une habitation située à proximité d'une zone de faille à Bellefontaine à Saint-Nazaire.

Enfin, afin de mieux appréhender le recul des falaises nous avons tenté de mieux comprendre et de mettre en évidence sur le terrain le mécanisme de recul des falaises dans un contexte de socle en Loire Atlantique. Afin de poursuivre la compréhension des mécanismes en jeu et notamment au niveau des zones de failles qui représentent les zones de faiblesses du littoral, il pourrait être intéressant de poursuivre ce travail.

7. Bibliographie

Aubié S., Genna A., Petitjean J., avec la collaboration de Mallet C. et Capdeville J.P. (2005) : Evolution historique du littoral basque français. Rapport BRGM/RP-53454-FR. 32 illustrations, 1 ann., 59 p.

Aubié S., Mallet C., Favennec J. avec la collaboration de Hoareau A. (2011) – Caractérisation de l'aléa érosion de la Côte Aquitaine dans le cadre de l'étude stratégique de gestion du trait de côte. Observatoire de la Côte Aquitaine. Rapport BRGM/RP-59095-FR. 59 ill, 2 annexes, 97 p.

Boak E.H. et Turner I.L. (2005) – Shoreline Definition and Detection : A Review. Journal of coastal Research, 21 (4), 688-703. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208

Brault N. (2002) - Ressources du sous-sol et environnement en Bretagne genèse, géométrie et propriété des différents types d'aquifères. Thèse, Université de Rennes

Courtay N., 2010, La gestion du trait de côte, Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, 290p.

Demarty (1991) – Atlas des côtes de Loire Atlantique. Rapport BRGM R 32157 PAL 4S/91

Dewez, T., Chamblas, G., Lasseur, E., Vandromme, R., (2008). Five seasons of coastal erosion at Mesnil Val, Upper Normandy (France): phenomenology of chalk cliff collapse surveyed with a terrestrial laser scanner. Geomorphology.

Garry G., Graszak E., Toulemont M., Levoy F., Novembre 1997, Plan de prévention des risques littoraux (PPR), Guide méthodologique, 51p.

Gautier F. (1971) - Les processus de l'attaque des falaises sur le littoral continental de la baie de Bourgneuf. In: Norois. N°70, 1971. pp. 221-236

Guilcher (1954) – Morphologie littorale et sous-marine. Paris, PUF, collection « Orbis », 216p.

Hewitt T. (2010) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de la Mayenne. Rapport de stage de fin d'étude. Université Joseph Fourier à Grenoble

Levillain J.P., Juin 2000, Etude générale de comportement et de protection des falaises littorales. Classification des sites sensibles avant-projet de confortement estimatif des travaux.

Mugica J. et Mallet C. avec la collaboration de Hennequin V. (2008), Observatoire de la côte aquitaine. *Etude de l'évolution géomorphologique récente de la côte sableuse aquitaine*, BRGM/RP-56874-FR, 29 ill, 9 ann, 165p.

Nédellec J.L., Zornette N., Mathon C., Mars 2005, Evaluation et cartographie de l'aléa mouvement de terrain sur la côte Basque, 39p.

Pallut V., Mazeiraud V., Ledoux.S, Mars 2010, Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire, Synthèse sur l'érosion et la submersion marine du littoral de Loire Atlantique, 62p.

Paskoff (1994) - Les littoraux. Impact des aménagements sur leur évolution. Paris, Masson, 2e édition, 256 p. (ISBN 2-225-84324-4)

Pirazolli (1996) – Sea level changes : the last 20 000 years. Chichester, John Wiley and Sons, 211p.

Plan de prévention des risques littoraux des falaises du Boulonnais, Note de présentation, Avril 2002, 19p.

Rouxel E., Vandromme R., Pouillet A., Coulon A. (2007) – Inventaire départemental des mouvements de terrain Loire Atlantique et Mayenne. Rapport final. BRGM/RP-55799-FR. 101 p., 6 ann., 52 illustr.

Salomon J-N (2008) – Géomorphologie sous-marine et littorale. Presses universitaires de Bordeaux

Siddal, M., Rohling, E.J., Almogi-Labin, A., Hemleben, Ch., Meischner, D., Schmelzer, I., Smeed, D.A., 2003. Sea level fluctuations during the last glacial cycle. *Nature* 423, 853–858.

Sellier D. (1985). – Les Versants du Pays Nantais. Etude géomorphologique. Thèse 3^{ème} cycle, Nantes, 506 p.

Waelbroeck C., Labeyrie, E. Michela, J.C. Duplessy, J.F. McManus, K. Lambeck, E. Balbona, M. Labracherie (2002) - Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. *Quaternary Science Reviews* 21 (2002) 295–305

Wyns (1998) – PRD324. Hydrogéologie des aquifères discontinus. Ressources en eau Margeride Ouest. Modélisation de la géométrie (altitude, épaisseur) des arènes granitiques du bassin versant lozérien de la Truyère (Lozère, Massif central), rapport BRGM RP40191, 18p., 9 fig., 4 planches.

Annexe 1

Bref historiques et principales formations rencontrées

Bref historiques et principales formations (Hewitt, 2010)

Le Massif Armoricaïn est un tronçon affleurant de la chaîne hercynienne érigée au cours du Paléozoïque, entre 450 et 300 Ma environ (Chanteraine et *al.*, 2005). Il est constitué d'une croûte continentale d'âge protérozoïque à paléozoïque principalement constituée de granites, de gneiss, de schistes, dont la structure résulte, essentiellement, de la tectonique, du métamorphisme et de la granitisation associés à l'orogénèse hercynienne.

Les formations du Protérozoïque sont typiquement briovériennes (Protérozoïque supérieur). Il s'agit de schistes, grès et conglomérats provenant du démantèlement de la chaîne de montagnes résultant de l'orogénèse cadomienne (de 650 à 550 MA) située au nord, mais aussi d'une autre chaîne située au sud, pour laquelle aucune information n'est disponible. Ces séries briovériennes couvrent une vaste partie du Massif Armoricaïn.

A la fin de l'orogénèse cadomienne, des granitoïdes se mettent en place dans ces formations provoquant un métamorphisme de contact et les transformant alors en cornéennes, en schistes tachetés, en gneiss ou en quartzites.

Au cours du Paléozoïque, des sédiments sont déposés en discordance sur le Briovérien dans un contexte a priori d'extension crustale (Ordovicien). Puis vient une transgression importante permettant le dépôt du Grès Armoricaïn (toujours à l'Ordovicien). La suite des dépôts se fait en fonction des conditions locales de subsidence, de communication plus ou moins régulière avec le domaine marin et des premiers contrecoups de la tectonique hercynienne. Ces sédiments paléozoïques sont généralement des grès, des siltites, et des argilites.

Ces derniers vont ensuite être, accompagnés par le Briovérien, plissés et schistosés durant l'orogénèse hercynienne.

Au Carbonifère, le fonctionnement des grandes structures permet l'ouverture de bassins marins ou lacustres (bassins de Chateaulin à l'ouest, de Laval à l'est, d'Ancenis au sud) à subsidence très rapide où se déposent les sédiments issus de l'érosion des reliefs voisins. Les lithologies de ces sédiments sont les mêmes que précédemment (grès, siltites et argilites) avec en plus quelques calcaires. La création de ces petits bassins s'accompagne localement d'émissions volcaniques. Le fonctionnement de ces grands cisaillements est associé à une production magmatique majeure et à la mise en place de grands batholites granitiques.

L'histoire mésozoïque du Massif Armoricaïn est très méconnue car il n'existe pas de formations du Permien ou du Trias, et celles du Jurassique et du Crétacé sont très rares. On suppose juste que le massif devait être émergé (hypothèse à considérer avec beaucoup de réserves (Thomas, 2005)).

L'histoire Cénozoïque est un peu mieux connue. Le massif est émergé et connaît des épisodes d'érosion et d'altération qui sont précisés dans le paragraphe suivant.

Evolution climatique et topographique du Massif Armoricaïn (Hewitt, 2010)

Comme le climat et la topographie sont les principaux facteurs régissant l'altération, il est intéressant d'essayer de retracer leur évolution au cours des temps géologiques afin d'appréhender leur action sur le socle du Massif Armoricaïn. Ce travail a été réalisé par Brault (2002), qui en a retracé l'évolution géodynamique depuis le début du Tertiaire en synthétisant les connaissances disponibles. Les reconstitutions paléoaltimétriques, proposées pour chaque période-clé ont été réalisées en comparant la répartition des sédiments à la surface du Massif Armoricaïn et l'état d'altération des roches à l'affleurement avec les niveaux marins successifs du Tertiaire déterminés sur la charte eustatique de Hardenbol *et al.* (1998). Brault a aussi utilisé des données plus locales (forages, reconstitutions de bassins, géologie locale, etc.). Ici sera présenté un bref résumé des résultats de son travail.

Paléocène :

- Peu de dépôts présents dans le Massif Armoricaïn
- Massif armoricaïn en position haute, ce qui est dû à la mise en compression des plaques Afrique/Europe entraînant un anticlinal lithosphérique et donc l'émersion du Massif Armoricaïn (altitude minimale du centre du Massif Armoricaïn : 340 m)
- Climat tropical à subtropical induisant une altération importante des roches affleurantes de types latéritique (90 m)
- Vaste surface d'aplanissement

Yprésien :

- Dépôts de faciès de plaine côtière
- Argiles riches en MO alternent avec sables et grès déposés dans un milieu type mangrove ou lagune
- Sédimentation terrigène dans un environnement deltaïque, estuarien ou fluvial.
- Matériaux probablement issus du démantèlement des profils latéritiques provoqué par une première période d'intense érosion due à une raréfaction du couvert végétal.
- Climat tropical humide puis aride à l'Yprésien terminal
- Déformations syn-sédimentaires éventuelles, dues à la compression pyrénéenne
- Activité tectonique faible
- Epaisseur d'altération : 90 m
- Altitude minimal : 340 m environ (Massif Armoricaïn toujours en position haute)

Lutétien :

- Lutétien inférieur peu représenté contrairement au Lutétien sup
- Dépôts généralement constitué de carbonates de plateforme marine avec grès et sable puis dolomie
- La compression pyrénéenne/alpine peut-être à l'origine de failles
- Faible érosion car développement d'une importante forêt ombrophile (forêt tropicale humide)
- Environnement toujours chaud mais moins humide

- Massif Armoricaïn toujours en position haute au lutétien inférieur, puis une partie est envahi par la mer alors que le niveau marin baisse, le Massif Armoricaïn subit donc une subsidence rapide

Bartonien :

- Silicification pédologique formant silcrête, grès ladère, etc.
- La silicification se fait dans un environnement chaud et humide à saisons contrastées, avec sécheresse marquée pendant les périodes chaudes
- Déformation syn-sédimentaire en relation avec les prémices de l'extension E-W affectant la plaque ouest-européenne
- Effondrement du bâti armoricaïn
- Individualisation des zones subsidentes (bassin, etc.)
- Le soulèvement généralisé, envisagé depuis la fin du Crétacé, s'annule et la tendance s'inverse
- Mangroves remplacées par milieu marin confiné où a lieu la néoformation de smectite, d'attapulgite et de gypse
- Milieu de plus en plus aride → généralisation du confinement
- Effondrement du Massif Armoricaïn toutefois suffisamment haut pour ne pas être totalement inondé
- paléoaltitude : 230 m

Priabonien :

- Dépôts essentiellement constitués d'argile
- Poursuite de l'affaissement du Massif Armoricaïn dû à l'extension E-W reconnu en Europe de l'Ouest ; Massif Armoricaïn toutefois toujours au-dessus du niveau marin
- Importance croissante de la kaolinite du fait de l'érosion de la couverture latéritique provoquée par la disparition de la forêt ombrophile induite par un assèchement de l'environnement
- Milieu toujours chaud, avec cependant quelques indices de refroidissement

Rupélien

- Sédimentation d'argiles et de marnes
- Ennoyage du Massif Armoricaïn
- Sédimentation en régime saumâtre continu
- Remontée du niveau marin
- Drainage des produits d'érosion provenant du démantèlement de la couverture latéritique
- Installation d'un régime marin côtier sur les bordures du Massif armoricaïn ; ennoyage du bassin de Rennes.
- Retrait de la mer à la fin du Rupélien, un nouveau régime lacustre s'installe

Chattien :

- Sables calcaires déposés en bordure littorale
- Activité tectonique calme

Miocène inférieur et moyen :

- Pas de lacune avec les sédiments précédents donc absence d'érosion

- Dépôts de faluns
- A terre : quelques subsidences localisées
- En mer : basculement du plateau continental sud armoricain vers le sud
- Erosion de la majeure partie des dépôts et des altérations antérieurs (entre l'Oligocène et l'Helvétien)
- Miocène moyen : inondation de la partie est du Massif Armoricain
- Environnement chaud et semi-aride
- Retrait de la mer à la fin du Miocène
- Massif Armoricain avec altitude supérieur à l'actuelle

Moi-Pliocène

- Dépôts de sables, graviers, argiles ("sables rouges") d'origine fluviatile
- Envahissement probable du Massif Armoricain par la mer depuis le sud
- Climat d'abord subtropical humide, puis rafraîchissement progressif jusqu'au début du quaternaire
- Altitude moyen du Massif Armoricain : 60 m

Pléistocène

- Massif Armoricain sous contrôle périglaciaire
- Recouvrement du Massif Armoricain par le Pergélisol durant la dernière glaciation
- Pléistocène moyen : mise en place du système fluviatile actuel
- Basculement du Massif Armoricain guidé par le rejeu d'accidents hercyniens, serait provoqué par un flambage lithosphérique en réponse à une compression orientée N160 (compression alpine induit une surrection du bâti armoricain)
- Direction de raccourcissement globalement NNW-SSE
- Après l'inondation fini-pliocène, remontée du Massif Armoricain pour atteindre son altitude actuelle

Conclusion de Braut

- **de la fin du Crétacé au Lutétien**, le Massif armoricain est sous l'influence d'un antiforme lithosphérique de grande longueur d'onde. La surrection du Massif armoricain provoquée par cet antiforme se poursuit jusqu'au Lutétien supérieur où il semble que la tendance s'inverse. Pendant toute cette période, les parties émergées du Massif armoricain sont soumises à des environnements chauds et humides. D'importants profils d'altération latéritiques se développent sur les surfaces émergées aux reliefs peu prononcés ;

- **du Bartonien au Rupélien**, le Massif armoricain subsiste. Le début de l'inversion de tendance surrection/subsidence est marqué par le développement de silicifications dans les secteurs restés émergés. Au Rupélien, le Massif Armoricain est, en partie, ennoyé par la mer ;

- **du Chattien au Mio-Pliocène**, des transgressions marines successives ennoient les parties les plus basses du Massif armoricain avec dépôt des faluns au Miocène moyen. Au Pliocène, le Massif Armoricain atteint son altitude la plus basse de tout le Tertiaire.

Des systèmes fluviaux parcourent les terrains émergés avant d'être en partie envahis par la mer pendant deux périodes d'inondation maximale ;

- **au Pléistocène**, le Massif armoricain remonte. Des réseaux fluviaux, indépendants des réseaux mio-pliocènes, font leur apparition : les rivières actuelles prennent naissance sous des climats périglaciaires.

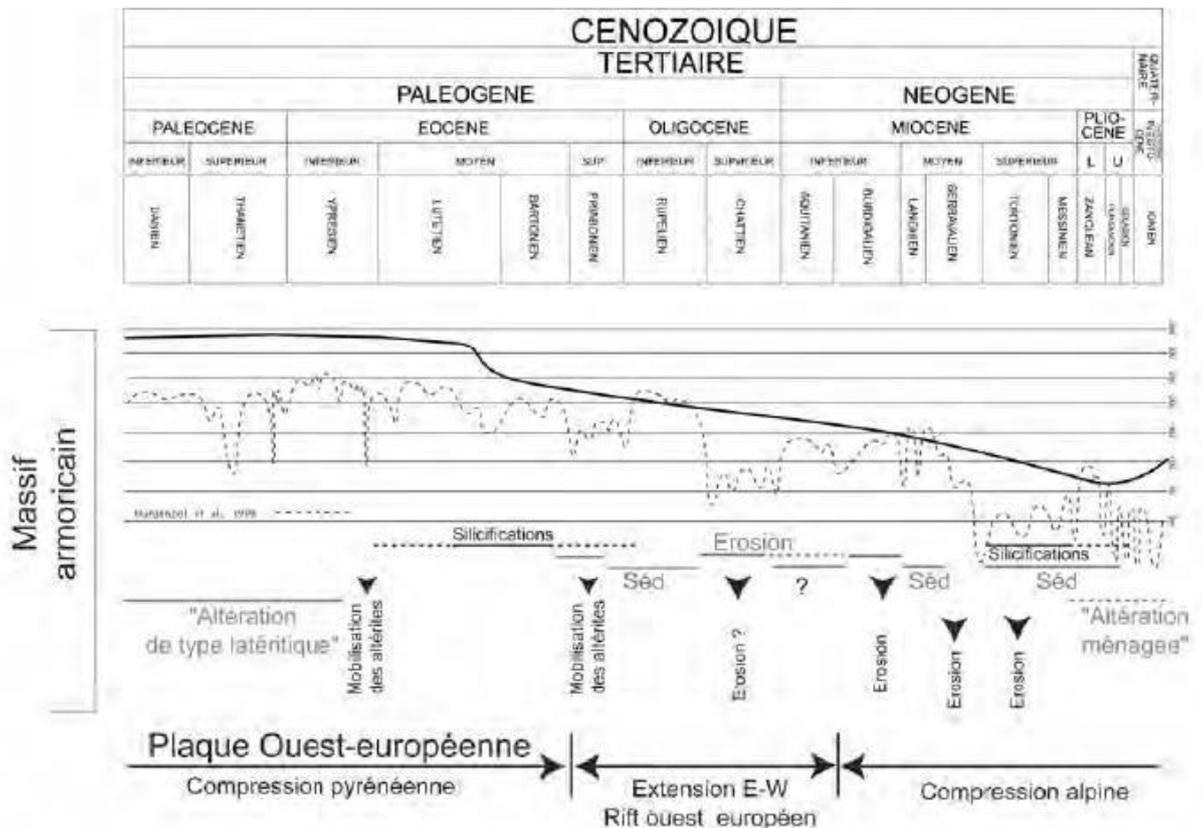


Illustration 82 - Evolution de l'altitude du Massif Armoricain depuis le Crétacé. Corrélation, à l'échelle régionale, avec son histoire tectono-sédimentaire et, à l'échelle européenne, avec l'histoire géodynamique de la plaque Ouest-européenne (Brault, 2002)



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

Service géologique régional “des Pays de la Loire
1, rue des Saumonières
BP 92342
44323 - Nantes Cedex3 - France
Tél. : 02 51 86 01 51