



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

Rapport final

BRGM/RP-64271-FR

Avril 2015



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

Rapport final
BRGM/RP-64271-FR
Avril 2015

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2013 RIS 2077

BAUDOUIN V.

Avec la collaboration de Plat E., Bouchez M., Sauvaget B., Loquet M.

Vérificateur :

Nom : GARNIER C.

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, Litto3D, falaises, aléa, érosion, instabilité, mouvement de terrain, Vendée

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Baudouin V. avec la collaboration de Plat É., Bouchez M., Sauvaget B., Loquet M. (2015) -
Identification et cartographie des aléas liés aux talus et falaises du littoral de Vendée, rapport
BRGM/RP- 64271-FR, 151 p, 92 illustrations, 2 annexes

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

Synthèse

Le secteur d'étude des trois Pays littoraux de Vendée (de Notre-Dame-de-Monts à Saint-Vincent-sur-Jard) se développe sur environ 80 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 instabilités plus ou moins nombreuses et volumineuses selon le type de phénomène qui se produit (chutes de blocs, éboulement, glissements de terrain notamment). Ces instabilités 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 Vendée, 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 Vendée 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 1920, 1950, 2000 et 2011) ;
- Reprojection en Lambert 93 des jeux historiques 1920 et 2000 ;
- 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 3473) et des photographies d'archives (au nombre de 464) ;
- 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 38 km de côte à falaise des 3 Pays de Vendée étudiés (Pays de Monts, Pays d'Olonne, Pays Talmondaï) ont été découpées en 67 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 figure en annexe hors-texte sous format numérique uniquement (annexe 2). Les résultats concernant les zones homogènes sont présentés sous forme d'une ligne

correspondant au pied de falaise déterminé à partir du MNT haute résolution, Litto3D de 2010.

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 Vendée. Il est facile à actualiser, notamment par ajout de nouveaux clichés, etc.

En Vendée, aucun aléa fort d'instabilités n'a été attribué à un secteur homogène. Sur les 38,4 km étudiés, les secteurs concernés par un aléa mouvement de terrain moyen représente 33 % (12,7 km) du linéaire de falaises, 31,4 % (12 km) pour un aléa faible, 23,2 % (8,9 km) pour un aléa très faible et 12,4 % (4,7 km) pour un aléa nul.

En moyenne, les falaises de Vendée reculent de 12 cm par an. La vitesse de recul mesurée sur plusieurs décennies peut localement dépasser 20 cm/an, comme au niveau de Sauveterre à Olonne-sur-Mer avec près de 80 cm/an. Ces résultats sont à mettre en perspective avec l'incertitude associée aux orthophotographies entre elles sur la période 1920/2012, incertitude qui rapportée au siècle, est de l'ordre de 7 m (soit 7 cm/an). De même, la démarche ne prend pas en compte les effets du changement climatique.

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.

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.....	22
2.3. MOUVEMENTS DE TERRAIN AFFECTANT LES FALAISES COTIERES.....	24
2.3.1. Différents types de mouvements de terrain.....	24
2.3.2. Actions responsables de ces mouvements.....	30
2.4. VITESSE DE RECUL DES FALAISES.....	31
3. Bilan des connaissances sur le littoral de Vendée.....	35
3.1. LES VARIATIONS DU NIVEAU MARIN (EUSTATISME).....	35
3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	37
3.2.1. Unités litho-structurales du substratum.....	37
3.2.2. Descriptions lithologiques.....	41
3.3. ALTERATION DES ROCHES.....	50
3.3.1. Profil d'altération.....	50
3.3.2. BSS.....	51
3.4. FRACTURATION ET STRUCTURE.....	53
3.5. MOUVEMENTS DE TERRAIN EN VENDEE ET RECUL DES FALAISES.....	55
3.5.1. Mouvements recensés.....	55
3.5.2. Etude des mouvements de terrain déjà réalisées sur le secteur.....	57
3.5.3. Questionnaire aux communes.....	58

4. Acquisition de données	61
4.1. DETERMINATION DE LA GEOMETRIE DES VERSANTS A PARTIR DE L'EXPLOITATION DE LA LITTO3D	61
4.1.1. Pente des versants.....	62
4.1.2. Hauteur des versants	64
4.1.3. Altitude du pied de falaise.....	65
4.2. TRAITEMENT DES ORTHOPHOTOGRAPHIES.....	68
4.2.1. Données utilisées	68
4.2.2. Calage de la méthodologie : réalisation de tests et limites.....	71
a) Choix et précision des orthophotographies.....	71
b) Echelle de travail et précision du lever.....	75
c) Choix des indicateurs de falaise	76
4.2.3. Recul moyen obtenu par traitement automatique	79
a) Présentation de la méthode avec l'outil DSAS.....	79
b) Estimation de la marge d'erreur liée à l'imprécision des orthophotographies.....	86
c) Calcul du recul.....	88
4.2.4. Recul maximum ponctuel	90
4.2.5. Résultats retenus pour l'analyse et méthode	92
4.3. INVESTIGATIONS DE TERRAIN	92
5. Interprétations	95
5.1. DECOUPAGE DU LINEAIRE COTIER EN TRONÇONS HOMOGENES SELON DES CRITERES PHYSIQUES	95
5.2. DETERMINATIONS GEOMORPHOLOGIQUES	95
5.3. QUALIFICATION DES ALEAS	97
5.3.1. Aléa Recul des falaises	98
5.3.2. Aléa Mouvement de terrains.....	102
6. Présentation des résultats.....	105
6.1. PRESENTATION DE LA BASE DE DONNEES.....	105
6.2. LES FICHES DES TRONÇONS HOMOGENES.....	106
6.2.1. Création des fiches récapitulatives par secteur homogène	106
6.2.2. Description des notations, nomenclature	108

6.3. ALEA PAR SECTEUR ET COMMUNE ET PREMIERES RECOMMANDATIONS	112
6.3.1. Vue générale.....	112
6.3.2. Secteur 1 : Pays de Monts	114
6.3.3. Secteur 2 : Pays d'Olonne.....	120
6.3.4. Secteur 3 : Pays Talmondais.....	125
6.4. COMPREHENSION DES MECANISMES ET PERSPECTIVES	134
Conclusion	137
7. Bibliographie	139

Liste des illustrations

Illustration 1 – Communes littorales de Vendée, falaises côtières et localisation des roches compétentes affleurentes, d’après la carte géologique 1/50 000 (BRGM)	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 (Paskoff, 1994)	20
Illustration 4 – Différents profils de falaises (A : Roche homogène, B :roche résistante sus-jacente, C : roche résistante sous-jacente) d’après Emery et Kuhn (1982)	22
Illustration 5 - Formation et recul d’une falaise ; développement corrélatif d’une plateforme rocheuse basale d’après Paskoff (1994).....	22
Illustration 6 – Différents type de falaises (A : falaise vive, B : falaise stabilisée, C : falaise morte) d’après Paskoff (1994).....	22
Illustration 7 - Exemple de représentation schématique d’un type de processus d’indentation (BRGM)	24
Illustration 8 - Typologie des instabilités.....	25
Illustration 9 – Chutes de pierres et de blocs observées au niveau de la baie de la Cayola à Château d’Olonne (source BRGM)	26
Illustration 10 - Petit éboulement de sables feldspathiques, calcaires, et sables dunaires vers St Nicolas à Jard sur Mer (source BRGM)	26
Illustration 11 - Chutes de dièdres aux Sables d’Olonne (source : BRGM)	27
Illustration 12 - Exemple de glissement superficiel (péliculaire) observé à Château d’Olonne dans l’Anse aux Moines (source BRGM)	28
Illustration 13 - Ravinement du versant d’une falaise morte à Talmont St Hilaire (source BRGM)	29
Illustration 14 - Ravinement marqué des falaises de Jard sur Mer	30
Illustration 15 – Principales actions continentales et marines à l’origine du recul des falaises et côtes rocheuses (d’après Paskoff, 1993)	31
Illustration 16 – Recul moyen des falaises en fonction des matériaux constitutants (Woodroffe, 2002).....	31
Illustration 17 - Appréciation de l’extension de la plateforme d’abrasion depuis le trait de côte (en rouge) à partir de l’Ortholittorale V2 2012 et Scanlito 25	33
Illustration 18 - Variations du niveau marin par rapport à l’actuel depuis 450 000 ans, d’après Waelbroeck et al. (2002).....	36
Illustration 19 - 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).....	36
Illustration 20 - Carte litho-structurale simplifiée du socle paléozoïque au droit du littoral vendéen	39
Illustration 21 - Carte structurale schématique du front chevauchant en Vendée littorale (modifiée d’après Ballèvre et al., 2012)	40

Illustration 22 - Vue sur les pitons rocheux (pineaux) présent sur le platier, St Hilaire de Riez, Août 2013.....	41
Illustration 23 - Schistes de St Gilles, St Gilles Croix de Vie, Août 2013.....	42
Illustration 24 - Rocher Ste Véronique, Brétignolles sur Mer, Mai 2014.....	43
Illustration 25 - Contact entre métavolcanites claires et les phanites sombres, Brétignolles sur Mer (Mai 2014).....	43
Illustration 26 - Gneiss migmatitiques, la Chaume aux Sables d'Olonne, (Août 2014).....	44
Illustration 27 - Bancs de calcaires du Lias, Talmont St Hilaire, Août 2014.....	45
Illustration 28 - Discordance du Jurassique sur le socle hercynien, Jard sur Mer, Mai 2011.....	46
Illustration 29 – Carte géologique synthétique du département de la Vendée, d’après la carte géologique harmonisée au 1/50 000 (BRGM).....	49
Illustration 30 – Organisation des altérites et de l’aquifère d’après Wyns (1998).....	51
Illustration 31 - Extrait de la banque de données BSS disponibles entre la Pointe du Payré et Bourgenay (source : www.infoterre.brgm.fr) – flèche rouge : sondage 06072X0012 décrit sur l’Illustration 32.....	52
Illustration 32 - Exemple de pile litho-stratigraphique pour le dossier 06072X0012, repéré avec la flèche rouge dans la carte précédente (source : www.infoterre.brgm.fr).....	53
Illustration 33 – Digitalisation des linéaments et interprétation à partir des orthophotographies (exemple sur le secteur de la Chaume, Les Sables d’Olonne).....	54
Illustration 34 – Localisation des mouvements de terrain recensés (source : BDMVT, traitement : BRGM).....	56
Illustration 35 – Réponse des communes au questionnaire.....	59
Illustration 36 – Exemple à l’Anse du Vieux Moulin (Château d’Olonne) de calcul de la pente à partir de la Litto3D sur fond Ortholittorale V2 - 2012 (traitement : BRGM).....	63
Illustration 37- Exemple de résultat du calcul de pente maximum à partir de la Litto3D sur fond Ortholittorale V2 - 2012.....	64
Illustration 38 - Exemple de calcul de hauteur à Cayola (Château d’Olonne) à partir de la Litto3D (traitement : BRGM).....	65
Illustration 39 - Référence Altimétriques Maritimes pour les sites de la zone de marée des abords des Sables d’Olonne et de la Loire.....	66
Illustration 40 - Position du pied de falaise par rapport au niveau de marée, de l’Anse aux Moines à la Baie de la Cayola, au sud de Château d’Olonne.....	67
Illustration 41 - Bordure littorale du cadastre napoléonien en comparaison avec l’isoligne des 4,5 m de la Litto3D (trait rouge).....	69
Illustration 42 - Juxtaposition des orthophotographies de 1920, 1950, 2000 et 2011 au niveau du phare (Corniche vendéenne à St Hilaire de Riez).....	72
Illustration 43 – Exemple de comparaison des positions d’amers entre les différents jeux de données, distance et direction de décalage (secteur St Hilaire de Riez / St Gilles Croix de Vie).....	73
Illustration 44 – Représentation schématique de différents indicateurs de trait de côte (d’après Boak and Turner, 2005).....	76

Illustration 45 – Exemple de cotes constituées de successions de ressauts topographiques de faible hauteur	77
Illustration 46 – Avantages et inconvénients des différents indicateurs considérés dans le cadre de la présente étude	78
Illustration 47 - Schéma récapitulatif de la méthode DSAS.....	80
Illustration 48 - Numérisation des traits de côte sur un secteur de la Corniche Vendéenne	81
Illustration 49 - Création d'une ligne de base	82
Illustration 50 - Représentation des différents paramétrages des transects	84
Illustration 51 - Génération des transects	85
Illustration 52 - Nettoyage des transects	86
Illustration 53 - Exemple du recul moyen annuel entre 1920 et 2011/2012 calculés tous les 5 m, secteur sud de la Corniche Vendéenne, St-Hilaire-de-Riez	89
Illustration 54 - Points d'observation ponctuelle du recul, secteur de la Corniche Vendéenne	90
Illustration 55 - Caractérisation des points d'observation du recul en m/siècle.....	91
Illustration 56 - Caractérisation et organisation verticale de la lithologie	96
Illustration 57 - Exemple de représentation de structure d'une falaise côtière au Bois de la Mine (Talmont St Hilaire)	97
Illustration 58 – Taux de recul et zone de recul du pied de falaises de Cayola à Talmont-St-Hilaire.....	100
Illustration 59 - Cartographie du recul à 100 ans avec la prise en compte de l'éloignement de la tête de falaise	101
Illustration 60 – Echelle d'intensité utilisée pour l'étude	104
Illustration 61 - Schéma présentant la structuration des données	106
Illustration 62 - Découpage et indexation des fiches	107
Illustration 63 - Exemple de fiche réalisée dans le cadre de cette étude	108
Illustration 64 – Cartographie de l'aléa mouvement de terrain sur la zone étudiée du littoral vendéen	113
Illustration 65 – Cartographie du taux de recul annuel.....	114
Illustration 66 – Cartographie des tronçons selon leur niveau d'aléa pour le secteur 1.....	115
Illustration 67 - Cartographie du taux de recul annuel pour le secteur 1.....	116
Illustration 68 - Lutte contre l'érosion par bétonnage et enrochement en fond d'indentation.....	117
Illustration 69 - Axe d'indentation contrôlé par une faille, Brétignolles-sur-Mer	117
Illustration 70 - Zone de départ de blocs, Rocher Ste Véronique à Brétignolles-sur-Mer.....	118
Illustration 71 - Enrochements en fond d'indentation, Brétignolles-sur-Mer.....	119
Illustration 72 - Caractéristiques physiques et analyse des aléas recul à 100 ans et instabilités sur le secteur 1 par zones homogènes	120

Illustration 73 - Cartographie des tronçons selon leur niveau d'aléa pour le secteur 2	121
Illustration 74 - Cartographie du taux de recul annuel pour le secteur 2	122
Illustration 75 - Loupe de glissement favorisée par les argiles du Lias au contact discordant avec les micaschistes.....	123
Illustration 76 - Effondrement récent d'un pan de falaise, baie de Cayola à Talmont-St-Hilaire	124
Illustration 77 - Caractéristiques physiques et analyse des aléas recul à 100 ans et instabilités sur le secteur 2 par zones homogènes. A noter qu'à Tanchet un enrochement continu a été mis en place récemment afin de stopper un recul qui menaçait le chemin côtier.	124
Illustration 78 - Cartographie des tronçons selon leur niveau d'aléa pour le secteur 3	125
Illustration 79 - Cartographie du taux de recul annuel pour le secteur 3	126
Illustration 80 - Indentation active et cavernage en pied de falaise à Talmont-St-Hilaire (fiche 41)	127
Illustration 81 - Paroi fracturée instable menaçant de s'ébouler sur le secteur Est de la baie de Cayola, Talmont-St-Hilaire	127
Illustration 82 – Mise en place d'un enrochement pour une habitation à proximité immédiate de la tête de falaise, Le Grand Quézeau à Talmont-St-Hilaire	128
Illustration 83 - Sentier affecté par le recul, Le Grand Quézeau à Talmont-St-Hilaire	129
Illustration 84 - Erosion différentielle entre le talus dur calcaire et un talus meuble (la dune), plage de Balesbat à St-Vincent-sur-Jard	130
Illustration 85 - Talus principalement structuré par les calcaires du Dogger	130
Illustration 86 - Endiguements privés à Jard-sur-Mer	131
Illustration 87 – Imposant enrochement privé à Jard-sur-Mer	131
Illustration 88 - Enrochement ponctuel instable à Jard-sur-Mer	132
Illustration 89 - Erosion des talus, plage des Goffineaux à Jard-sur-Mer	132
Illustration 90 - Mesures de prévention à Jard-sur-Mer	133
Illustration 91 - Caractéristiques physiques et analyse des aléas recul à 100 ans et instabilités sur le secteur 3 par secteurs homogènes	134

Liste des annexes

Annexe 1 Descriptions d'échantillons en lames minces	143
Annexe 2 Atlas cartographique de la présente étude par secteur.....	151

Introduction

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 Vendée, il est nécessaire de connaître les vitesses de recul des falaises, les volumes potentiellement mobilisables et leur spatialisation ainsi que la typologie des mouvements de terrain pouvant affecter ces falaises.

En 2012, des PPRL ont été prescrits pour 3 Pays littoraux contigus de Vendée (de Notre-Dame-de-Monts à Saint-Vincent-sur-Jard) et qui se développent sur environ 80 km de littoral. Ils présentent des talus et falaises sur près de la moitié de son linéaire. Leur érosion constitue un processus géologique normal se traduisant par des mouvements gravitaires, plus ou moins nombreux et volumineux selon le type de phénomène qui se produit. Ces mouvements de terrain ont pour conséquence un recul plus ou moins rapide de la frange littorale.

Après avoir rappelé 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 sur le littoral de Vendée 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 plans de prévention des risques littoraux, l'étude a pour objectifs d'évaluer l'évolution des talus et falaises côtiers de 3 pays de Vendée (Pays de Monts, Pays d'Olonne, Pays Talmondaï), tels qu'ils sont définis dans les arrêtés préfectoraux pour la prescription d'établissement de PPRL, et de caractériser les aléas correspondants.

Ces derniers sont de deux sortes :

- l'aléa recul de la falaise : l'objectif dans l'évaluation de 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 14 communes littorales de Vendée, réparties en 3 secteurs géographiques. Parmi ces communes, 3 d'entre elles ne sont pas côtières et 2 autres ne présentent pas de falaise côtière littorale (telle que définie dans le paragraphe 2.1) et ne sont donc pas concernées par la présente étude. Elles figurent en italique dans la liste qui suit.

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

- **Secteur 1 / Pays de Monts** : *Notre-Dame-de-Monts, Saint-Jean-de-Monts, Saint-Hilaire-de-Riez, Saint-Gilles-Croix-de-Vie, Le Fenouiller, Brétignolles-sur-Mer*
- **Secteur 2 / Pays d'Olonne** : *Brem-sur-Mer, Olonne-sur-Mer, l'Île-d'Olonne, les Sables-d'Olonne, le Château-d'Olonne*
- **Secteur 3 / Pays Talmondaï** : *Talmont-Saint-Hilaire, Jard-sur-Mer, Saint-Vincent-sur-Jard*



Illustration 1 – Communes littorales de Vendée, falaises côtières et localisation des roches compétentes affleurantes, d'après la carte géologique 1/50 000 (BRGM)

1.2. METHODOLOGIE GENERALE

Pour atteindre son objectif, l'étude a été 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 2011 et 1920 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 ou collectées (au nombre de 3937) ;
- 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.

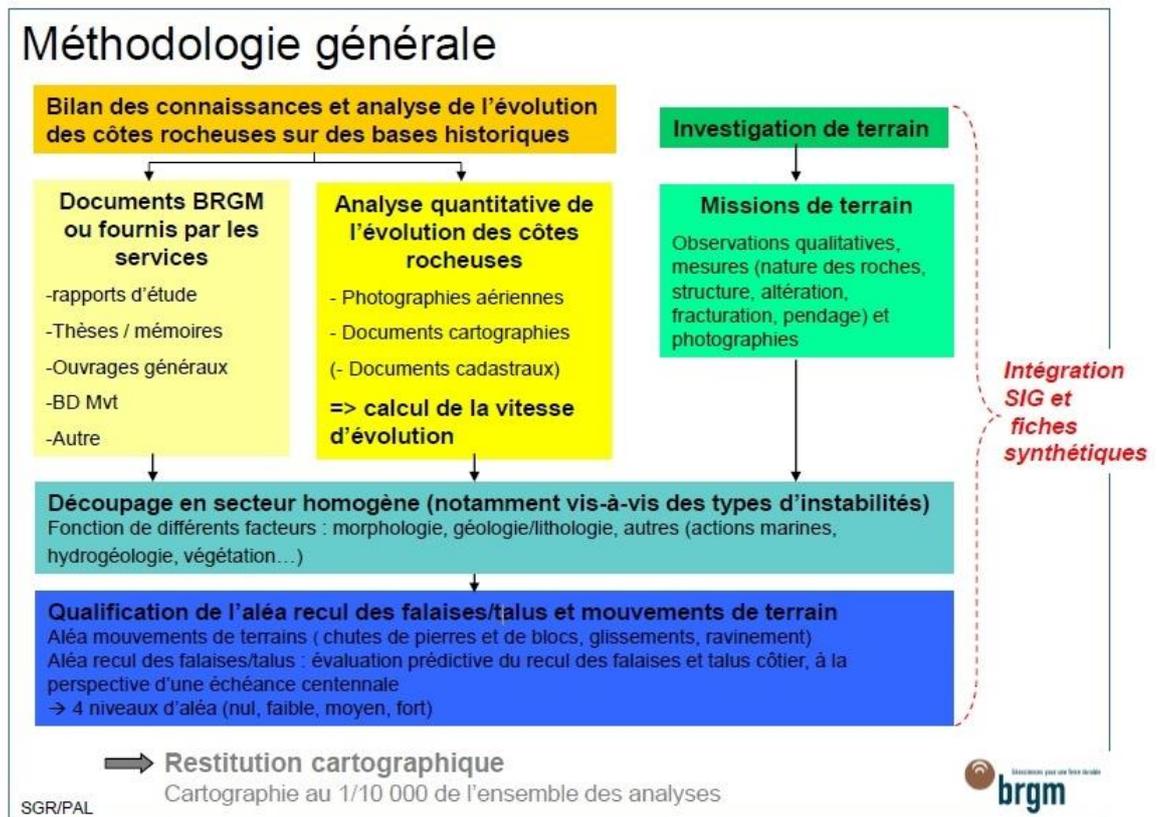


Illustration 2 – Méthodologie générale de l'étude

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 échelle variable en fonction de l'étendue des secteurs présentés) pour une validité au 1/10 000.

Cette étude a été réalisée en s'appuyant sur une méthodologie mise en place pour la Loire-Atlantique (Plat et al, 2013) et les deux études constituent donc un ensemble homogène.

Doté d'un linéaire de côte rocheuse relativement long (environ 40 km), l'approche de l'aléa mouvements de terrain, de type instabilités de falaise, a dû toutefois s'adapter à ce contexte particulier. Malgré cela, 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'ils indiquent quant au mode de mise en place de celui-ci;
- le mode de recul des falaises et les agents déterminants de 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 topographie, 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 séparées 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.

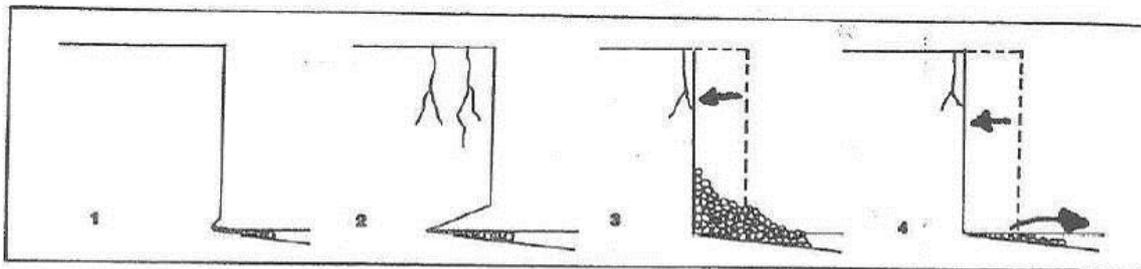


Illustration 3 - Recul par à-coup du pied de falaise sapé par les vagues armées de blocs (Paskoff, 1994)

La falaise est la partie subaérienne d'un versant 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 4).

Le versant est composé de la falaise subaérienne et de sa **plate-forme d'érosion** (ou encore **platier rocheux ou d'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 6).

- les **falaises vives** sont caractérisées par un escarpement généralement raide, car battu par les vagues.
- les **falaises mortes**, qui échappent à l'action marine, présentent un tablier de débris (pente généralement de 20 à 40°, voire plus) issu 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 produits de démantèlement par la mer fait que l'abrupt évolue comme un versant continental.

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 4 à 6 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.

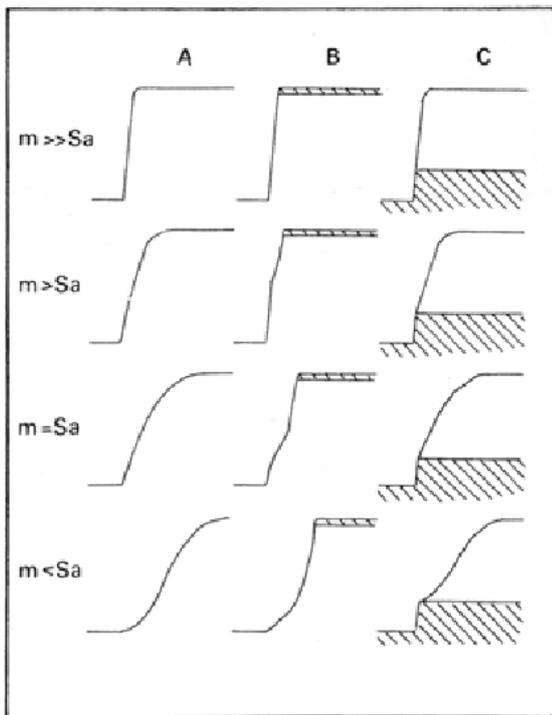


Illustration 4 – Différents profils de falaises (A : Roche homogène, B : roche résistante sus-jacente, C : roche résistante sous-jacente) d'après Emery et Kuhn (1982)

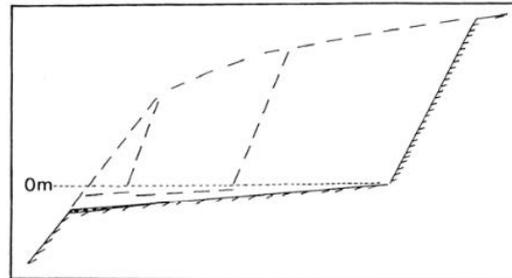


Illustration 5 - Formation et recul d'une falaise ; développement corrélatif d'une plate-forme rocheuse basale d'après Paskoff (1994)

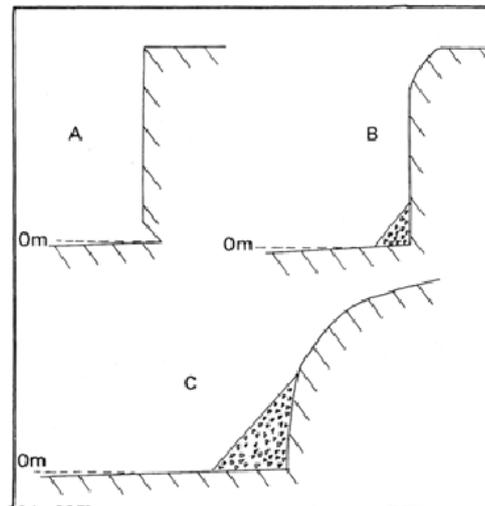


Illustration 6 – Différents type de falaises (A : falaise vive, B : falaise stabilisée, C : falaise morte) d'après Paskoff (1994)

2.2.3. Erosion différentielle marine

Cisélement 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, lignes de faille, plans de stratification...). Leur forme et leur volume dépendent naturellement en premier lieu du pendage des bancs ou de l'inclinaison des plans de faille. D'après Guilcher (1954), les chutes de toit y sont fréquentes, 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 par la formation des indentations au niveau des zones de failles).

L'irrégularisation du trait de côte, matérialisée par des indentations témoigne une forme de réponse à l'érosion qui est contrôlée par un ensemble de caractéristiques pétrographiques, structurales, géomorphologiques et hydrogéologiques. Ces caractéristiques contribuent à l'érosion préférentielle par ses variations (répartition, intensité) sur le linéaire côtier, conséquence donc d'une anisotropie plus ou moins forte contrôlée par :

- des niveaux de compétence de la roche, optimale si elle est dure, massive et homogène (calcaires, (micro)granite, rhyolite, ...)
- par les déformations ductiles (plis, linéaments) ou fragiles (failles) ;
- le degré de fracturation, l'intensité des diaclases ;
- le niveau d'altération et de la variation altimétrique de sa base ;
- la stratigraphie ;
- la paléotopographie (marquée par des niveaux de discordance) ;
- le contexte hydrogéologique (saturation en eau) et hydrographique d'écoulement des eaux continentales ;
- la bathymétrie, et des conditions d'exposition à la houle ;
- les sédiments, matériels ou agents d'érosion (galets, blocs).

L'ensemble de ces facteurs sont intimement imbriqués et forment un contexte particulier d'une portion de linéaire côtier à une époque donnée.

Toute portion de côte rocheuse est soumise donc à un processus d'indentation comportant des phases plus actives et marquées, plutôt liées aux caractéristiques géologiques de la côte (vignettes 1 à 4 de l'illustration 7) et des phases de retour à un linéaire (vignettes 5 à 8) par érosion des derniers reliquats.

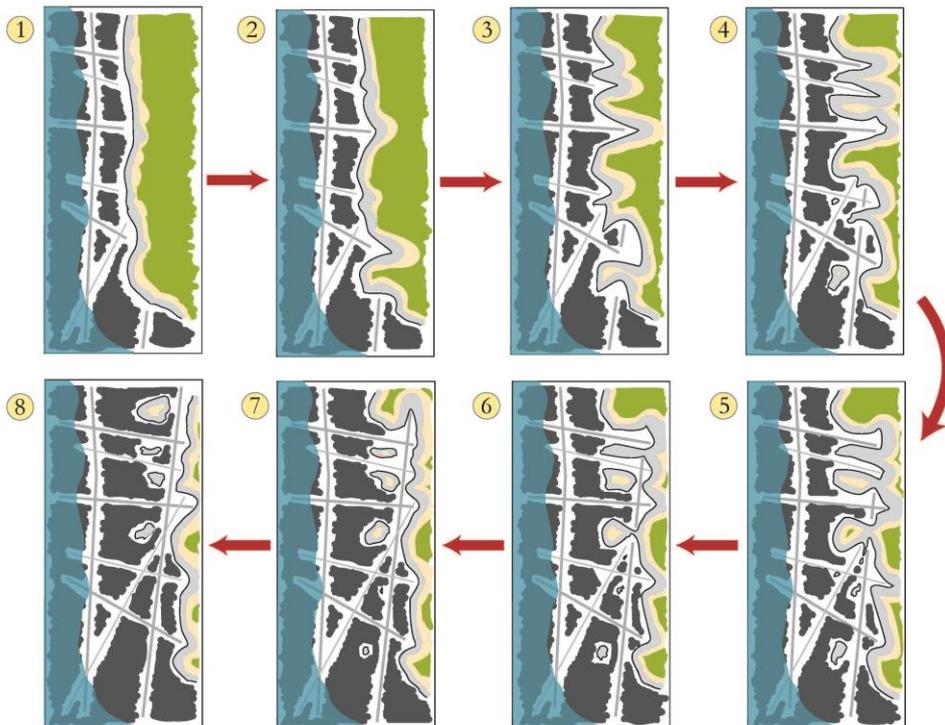


Illustration 7 - Exemple de représentation schématique d'un type de processus d'indentation (BRGM)

L'état irrégulier d'une côte rocheuse est la réponse d'un milieu anisotrope face à une érosion active, caractérisée par un pied connecté à une plateforme d'abrasion. A cet état, le gradient maximum de dispersion de l'énergie de la houle (hydrodynamisme) est atteint. L'érosion est alors plus conditionnée par la géomorphologie, l'exposition aux agents météo-marins et le matériel mobilisable.

1.1. MOUVEMENTS DE TERRAIN AFFECTANT LES FALAISES COTIERES

2.2.4. 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, de l'ordre de 10 à 100 m³ (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 à dominante rocheuse.

Facteurs de prédisposition principaux : lithologie, fracturation, géométrie du versant (pente et hauteur), altération, sous-cavage, présence de vides, hauteur de paroi.

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

Selon les situations et type de couvert végétal, la végétation est considérée comme facteur négatif ou positif (voire les 2 en fonction de la saison).

La présence de végétation peut également être considérée comme facteur aggravant : effet levier joué par le système racinaire pouvant ouvrir des « brèches » dans le sol et favoriser les infiltrations d'eau ...

Les illustrations 9 et 11 fournissent des exemples d'évènements observés sur le littoral de Vendée.



Illustration 9 – Chutes de pierres et de blocs observées au niveau de la baie de la Cayola à Château d’Olonne (source BRGM)



Illustration 10 - Petit éboulement de sables feldspathiques, calcaires, et sables dunaires vers St Nicolas à Jard sur Mer (source BRGM)



Illustration 11 - Chutes de dièdres aux Sables d'Olonne (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 potentiellement :

Le substratum rocheux (roche marneuse, roche fortement fracturée, lentille d'argile dans une formation molassique, etc.), glissements de bancs sur bancs.

Les formations superficielles meubles (alluvions, colluvions, couverture d'altération, produits résiduels d'altération des marnes ou calcaires marneux, etc.)

Facteurs de prédisposition principaux : nature et structure des terrains, géométrie du versant (pente et hauteur), altération, nappe.

Facteurs déclenchant (ou aggravant) principaux : pluie (remontée de nappe, ravinement par écoulement superficiel), actions anthropiques (déblais, remblais, rejets d'eau), séismes.

Facteurs aggravants : absence de végétation dans certains cas.

L'illustration 12 présente un exemple d'évènement de ce type à Château d'Olonne.



Illustration 12 - Exemple de glissement superficiel (péliculaire) observé à Château d'Olonne dans l'Anse aux Moines (source BRGM)

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 principaux : lithologie, pente, altération.

Facteurs déclenchant (ou aggravant) principaux: pluie, rejets d'eau anthropiques.

Facteurs aggravants : absence de végétation.

L'illustration 13 présente un ravinement de versant particulier mais récurrent sur de nombreux secteurs. L'eau s'écoule de la base des sables dunaires qui surmontent la falaise, entraînant de tous petits effondrements de ces sables. Sous cette ligne de résurgences, les entailles érosives produites par le ravinement sont régulières et constantes.

Ce processus est lié à la fois aux propriétés infiltrantes des sables dunaires sur lesquels le ruissellement des eaux météoriques est limité, et à la différence de perméabilité plus faible de la formation sous-jacente.

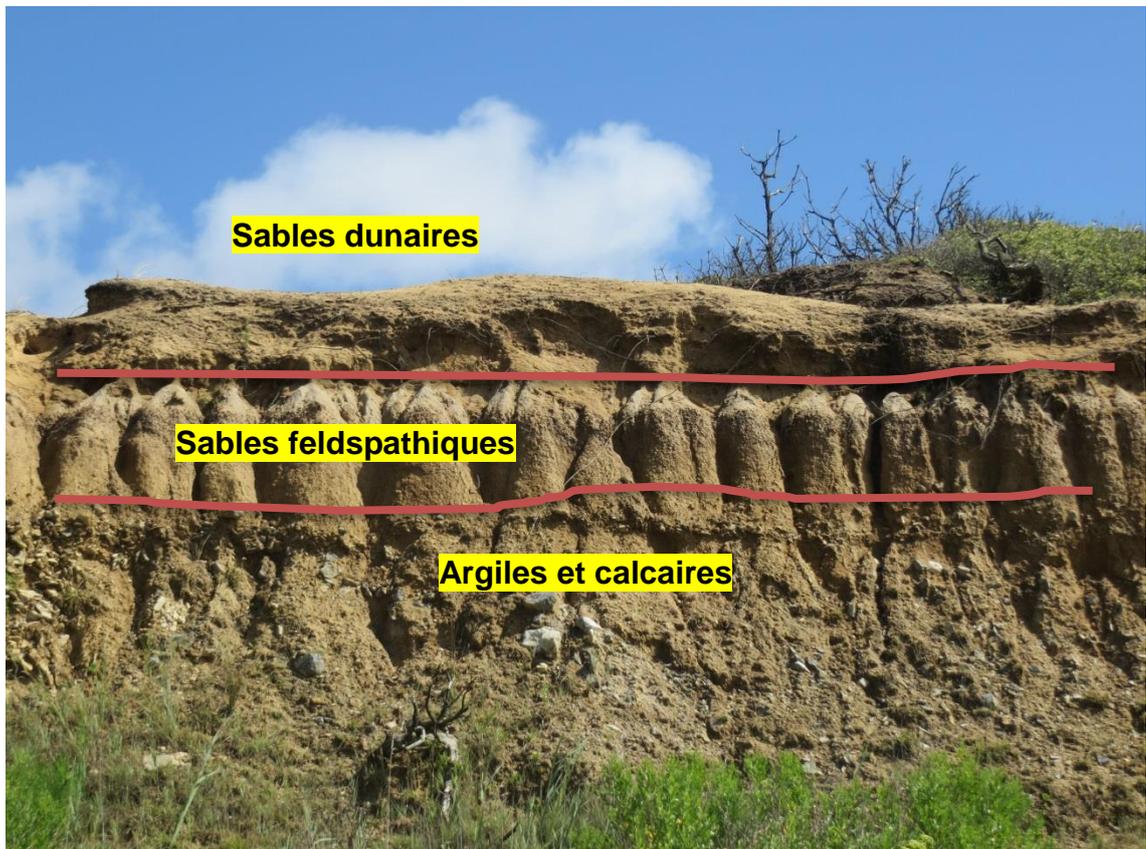


Illustration 13 - Ravinement du versant d'une falaise morte à Talmont St Hilaire (source BRGM)

Dans les cas les plus exposés à une érosion de ce type, les sables dunaires disparaissent et des ravines se forment en sommet de falaise (Illustration 14).



Illustration 14 - Ravinement marqué des falaises de Jard sur Mer

2.2.5. Actions responsables de ces mouvements

Plusieurs types d'actions sont responsables de l'évolution des falaises en milieu 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 d'instabilités 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 15).

Enfin la fréquentation humaine est également une source « perturbatrice » d'équilibres souvent précaires

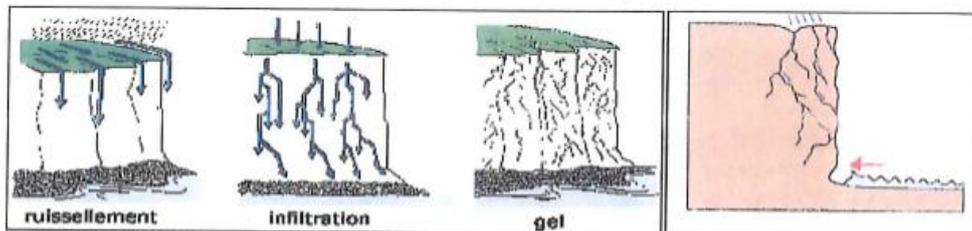


Illustration 15 – Principales actions continentales et marines à l'origine du recul des falaises et côtes rocheuses (d'après Paskoff, 1993)

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.

2.3. VITESSE DE RECU 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 16).

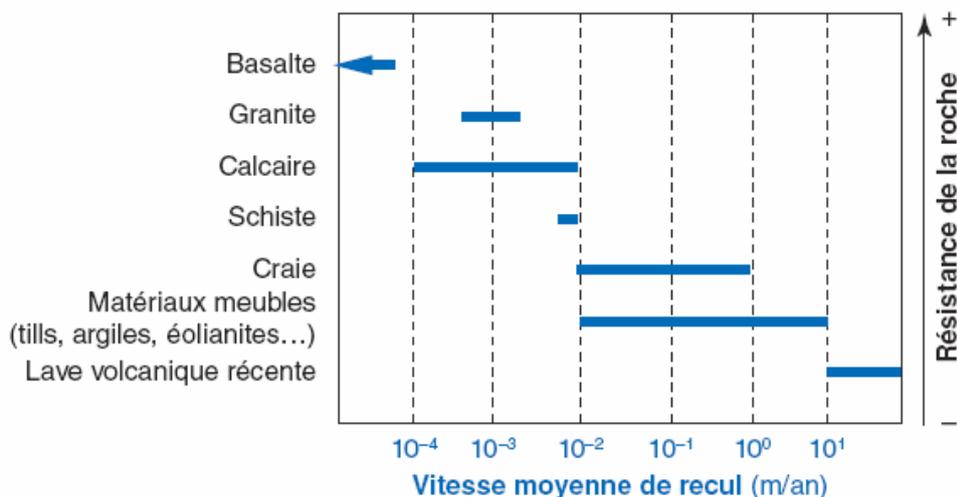


Illustration 16 – Recul moyen des falaises en fonction des matériaux constituants (Woodroffe, 2002)

Pour fournir quelques ordres de grandeur, d'après Aubié et al. (2011), la côte rocheuse aquitaine (littoral basque – Pyrénées-Atlantiques) recule en moyenne de 20 cm par an sur la période de 1954/2009. La vitesse de recul moyenne mesurée sur plusieurs décennies peut localement atteindre plus de 50 cm/an dans les secteurs où les facteurs de prédisposition et facteurs aggravants sont les plus prégnants et dénués d'ouvrage de protection. 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).

Plus récemment Regard et al. (2012) ont développé une nouvelle méthode pour évaluer le retrait des falaises littorales, à partir de la concentration en ^{10}Be dans les roches siliceuses de la plateforme. Il s'agit d'un isotope cosmogénique. Il est généré par le bombardement des rayons cosmiques sur la roche à l'affleurement. Cette concentration détermine depuis combien de temps la roche est exposée à l'affleurement. Ainsi les mesures, réalisées le long d'un transect depuis le pied des falaises actuelles vers le large sur la plateforme d'abrasion, rendent possible une estimation moyenne de recul.

Le résultat obtenu sur un site étudié à Mesnil-Val (76) et pour lequel les dernières observations donnaient un recul d'environ 15 cm/an (Costa et al., 2004), donne un recul de 11-13 cm/an avec un intervalle de confiance comprise entre 10,5 et 14,3 cm/an et validé sur au moins 3000 ans. Aussi sur ce site la plateforme varie de 300 à 600 m pour une hauteur de falaise comprise entre 20 et 80 m.

Ces travaux valident également le caractère contemporain des plateformes qui accompagnent les falaises. En dehors d'une analyse rigoureuse, il peut être admis que leur extension est relative à une vitesse de recul.

Cas des falaises de la Loire-Atlantique

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 (Plat et al., 2013)

Cas des falaises vendéennes

Les côtes rocheuses vendéennes sont aussi bordées de plateformes d'abrasion, platiers rocheux qui pourraient être en partie le témoin d'une érosion de la phase transgressive de l'Holocène final, et ce depuis environ 6000 ans BP, date à laquelle le niveau marin s'est stabilisé à peu près (+/- 5 m) au niveau actuel (3.1 ci-dessous).

A défaut d'une bathymétrie fine des petits fonds (infralittorale) pour mieux connaître les limites de ces plateformes, une appréciation de leur extension reste toutefois facilement observable avec les photographies aériennes réalisées lors de forts

coefficients à marée basse, comme sur l'Ortholittorale V2 de 2011/2012, mais encore avec le ScanLitto25 (IGN-SHOM) comme le montre l'illustration 17 au Nord de Bourgenay à Talmont-St-Hilaire.



Illustration 17 - Appréciation de l'extension de la plateforme d'abrasion depuis le trait de côte (en rouge) à partir de l'Ortholittorale V2 2012 et Scanlitto 25

Les mesures de la largeur de ces plateformes sur l'espace intertidal (voire dans le ou les quelques premiers mètres de l'infratidal), varient entre une centaine de mètre à plus de 500 m sur l'ensemble du littoral étudié. En rapportant cette distance au laps de temps écoulé (5000/6000 ans) cela donne un ordre de grandeur de la vitesse moyenne de recul compris entre environ 2 et 10 cm/an.

3. Bilan des connaissances sur le littoral de Vendée

Une deuxième étape de l'étude a consisté à synthétiser l'ensemble des données sur le littoral de Vendée 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 valorisées avec les données acquises par ailleurs.

3.1. LES VARIATIONS DU NIVEAU MARIN (EUSTATISME)

L'étude des variations du niveau marin permet (1) 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 et d'appréhender l'effet de l'élévation du niveau marin sur les falaises côtières dans le cadre du changement climatique) et (2) de mesurer les temps d'action des différentes périodes d'érosion et particulièrement celle de la dernière phase transgressive holocène que nous connaissons actuellement.

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 suivantes présentent les évolutions du niveau marin et montrent qu'autour de 125 000 ans, 230 000 ans, 330 000 ans et 410 000 ans, le niveau marin a été sensiblement équivalent au niveau actuel, soit à 4 reprises. Les périodes de transgression maximum sont courtes, de l'ordre de la dizaine de milliers d'années.

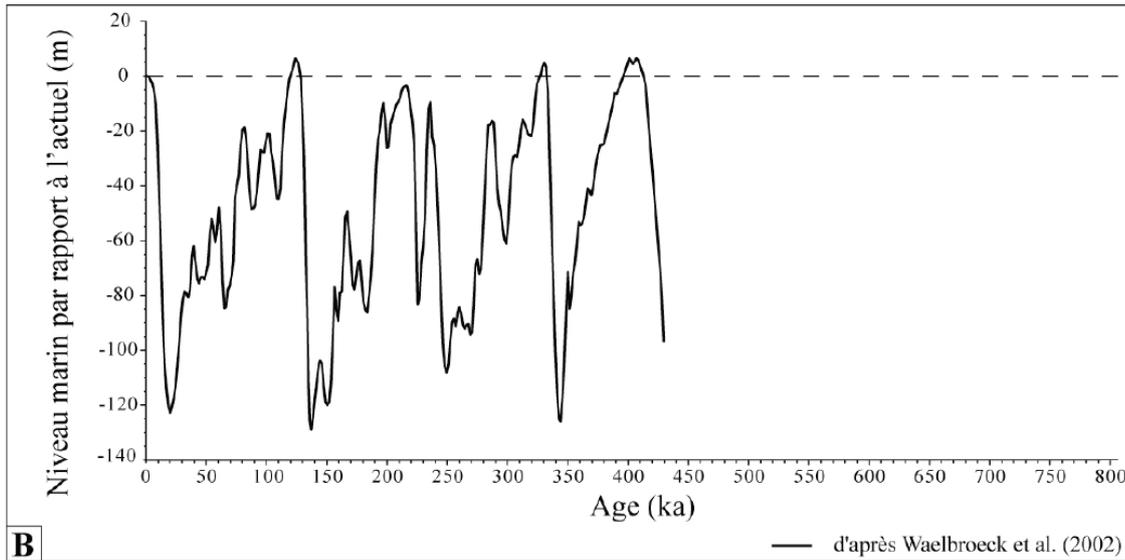


Illustration 18 - Variations du niveau marin par rapport à l'actuel depuis 450 000 ans, d'après Waelbroeck et al. (2002)

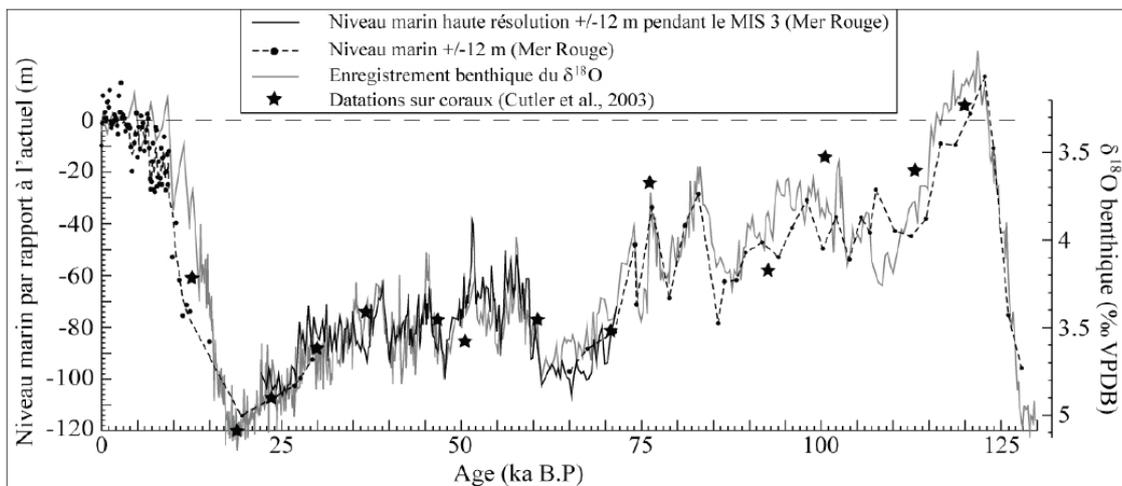


Illustration 19 - Reconstruction des variations du niveau marin par rapport à l'actuel au cours du dernier cycle glaciaire-interglaciaire (Riss/Würm), d'après Siddal et al. (2003)

Depuis 6000 ans, le niveau marin est proche de celui que nous connaissons aujourd'hui.

Bien qu'à une échelle régionale les variations du niveau marin n'évoluent pas avec la même intensité (en raison des phénomènes glacio-hydro-isostatiques), au cours de l'Holocène terminal (ces 6000 dernières années environ), les dernières recherches, réalisées notamment en Rade de Brest, montrent que ce niveau marin connaît un

épisode transgressif plutôt lent et en décélération, de l'ordre de 1 mm/an, sans oscillation majeure (Stéphan P., 2011).

A Brétignolles-sur-Mer sur la plage de la Parée, des sondages relèvent des dépôts de vases saumâtres qui ont mis en évidence des niveaux marins à -6 m NGF à 6000 BP, ce qui correspondrait aux niveaux des plus hautes mers de l'époque.

Au cours de cette période, sur le littoral vendéen, il est enregistré quelques petits épisodes d'oscillation avec des bas niveaux connus, comme le Bas-niveau d'Argentan entre 4600 et 3500 ans BP (-8 m NGF vers 4500 ans BP), à l'âge de Bronze, qui serait l'explication de la mise en place des principaux massifs dunaires de la région, à travers l'exondation de vastes surfaces sableuses propices à la déflation éolienne.

A l'inverse des hauts niveaux sont enregistrés, comme le Haut-niveau de Brétignolles vers 4900 ans BP qui culmine vers -5 m NGF, et Haut-niveau de Camiers vers 3350 ans BP qui s'établit à -2,5 m NGF.

3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

D'un point de vue géologique, la zone d'étude étant située principalement 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. Au Sud, à partir de Talmont-Saint-Hilaire, les premières séries sédimentaires jurassiques du bassin aquitain apparaissent en discordance sur le socle cristallin.

3.2.1. Unités litho-structurales du substratum

Le substratum du littoral des Pays de la Loire est composé de 13 unités litho-stratigraphiques dont quatre concernent les secteurs rocheux étudiés (Illustration 20).

1 - L'unité de St-Gilles-La-Vilaine s'étend du Nord au Sud de la Loire. Considérée comme allochtone, elle est impliquée dans une tectonique qui se manifeste par une foliation subhorizontale et une intense linéation d'étirement. Elle se caractérise principalement par une série de micaschistes et gneiss micacés porphyroclastiques datés de 477 millions d'années. Il s'agit d'un faciès volcanoclastique.

2 - L'unité de Brétignolles affleure uniquement sur l'estran de Brétignolles-sur-Mer, au niveau de la Sauzaie. Les relations entre cette unité et celles adjacentes de La Roche-sur-Yon et des Sables-d'Olonne ne sont pas connues. Elle est constituée d'une série sédimentaire épi-métamorphique comprenant des méta-arkoses, des schistes rouges, etc. L'unité a été interprétée comme étant probablement une succession d'imbrications tectoniques chevauchant les unités avoisinantes.

3 - L'unité de La Roche-sur-Yon, quant-à-elle, est principalement constituée d'un ensemble de méta-sédiments comprenant des micaschistes plus ou moins quartzeux,

et des para-gneiss micacés. Ces séries méta-sédimentaires sont localement recoupées par des méta-rhyolites et des méta-microgranites géologiquement datés de l'ordovicien inférieur (480 à 500 millions d'années).

4 - L'unité des Sables-d'Olonne se cantonne à la bordure littorale sud occidentale du département de la Vendée. Le flanc nord semble passer progressivement à des séries épi-métamorphiques de l'unité de La Roche-sur-Yon. Les faciès sont très variables d'un secteur à l'autre : amphibolite, micaschistes, para-gneiss, granite, microgranite, etc.

Le littoral vendéen résulte d'un processus de construction géologique de plus de 600 millions d'années (collisions, déformations). Bien qu'une partie des événements intervenus demeure toujours mystérieuse, les géologues sont aujourd'hui parvenus à déchiffrer en partie les indices que présente la côte actuelle.

L'histoire géologique de ce secteur est intimement liée à l'ancienne chaîne de montagne présente en Europe il y a 450 à 300 millions d'années, dont témoigne le socle armoricain actuel, la chaîne hercynienne. Depuis, la zone a beaucoup évolué, à travers les successions d'avancées et retraits de la mer, les couches sédimentaires venues se déposer et les processus d'altération et d'érosion.

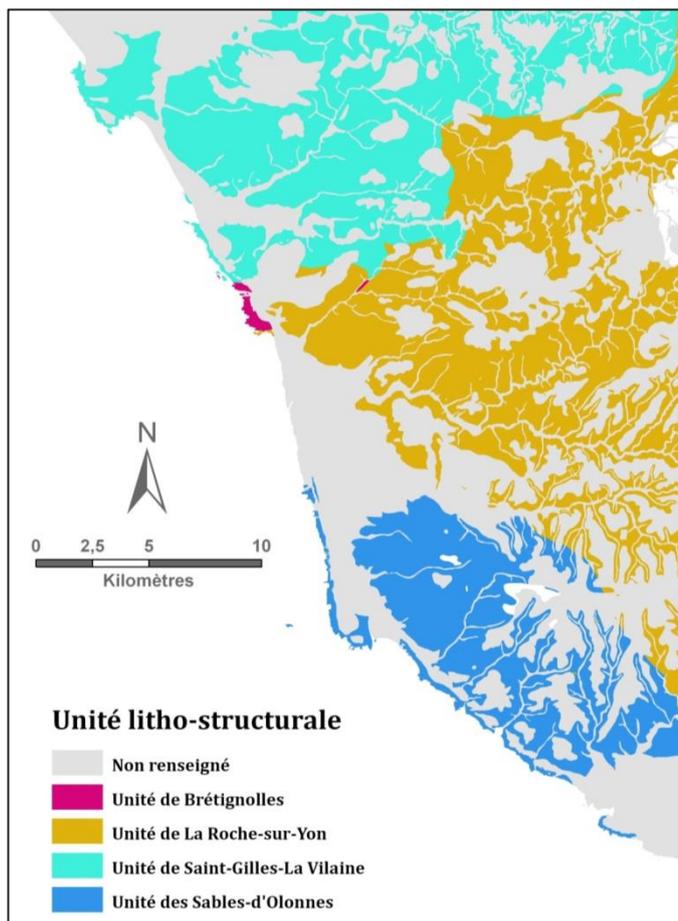


Illustration 20 - Carte litho-structurale simplifiée du socle paléozoïque au droit du littoral vendéen

Dans un article récent intitulé « Histoire géologique du Massif armoricain : actualité de la recherche », Ballèvre et al. (2012) propose une carte structurale schématique du front chevauchant en Vendée littorale (Illustration 21).

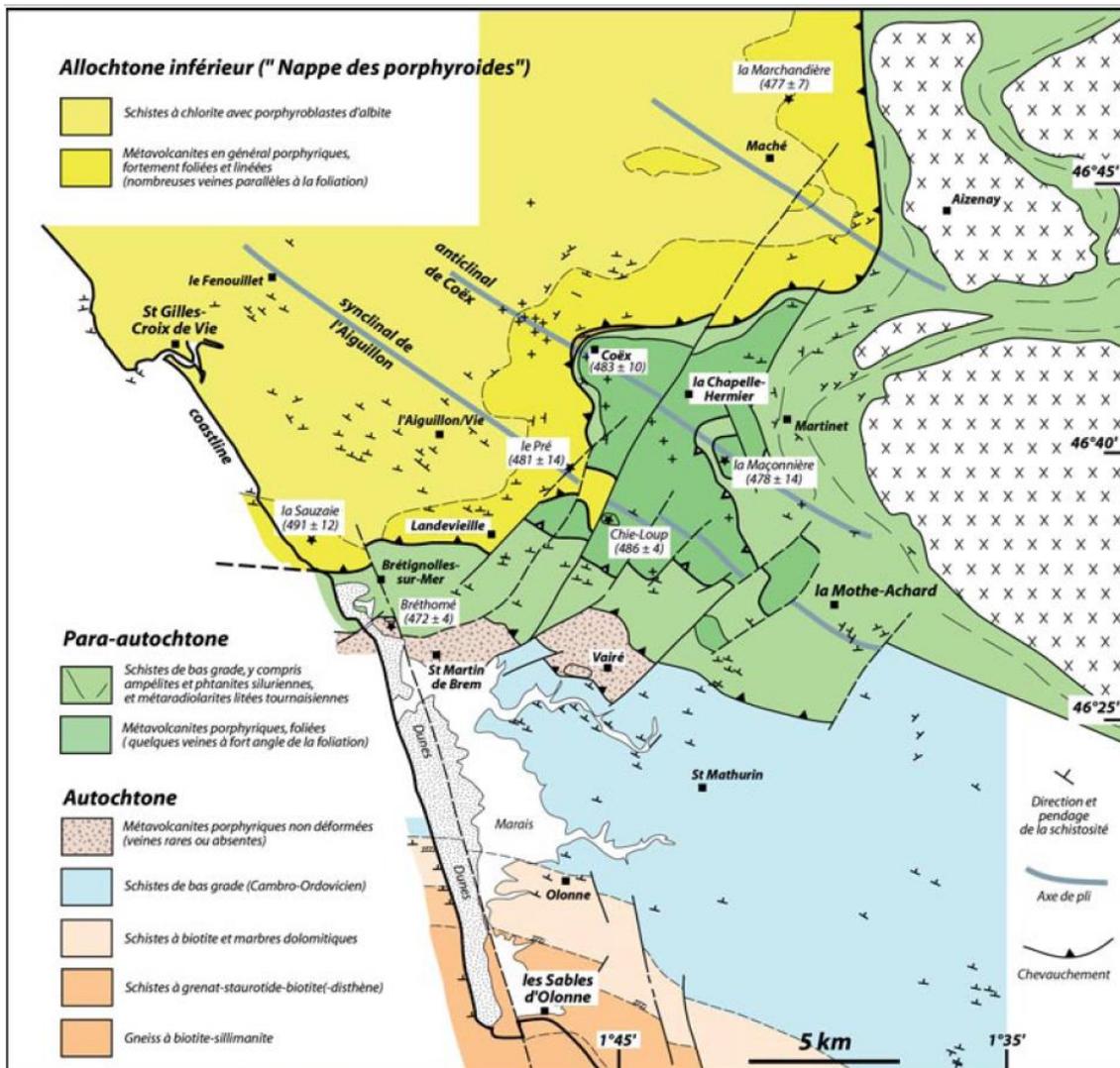


Illustration 21 - Carte structurale schématique du front chevauchant en Vendée littorale (modifiée d'après Ballèvre et al., 2012)

Cette carte montre que la coupe côtière ne permet pas un examen du contact entre l'autochtone et le paraautochtone, le contact étant masqué par des formations quaternaires.

Par contre, le contact basal de l'allochtone inférieure est observé à Brétignolles-sur-Mer, ce qui en fait par ailleurs une coupe de référence.

Sur ce site, les schistes porphyriques chevauchent une unité (Unité de Brétignolles) moins métamorphique, de bas grade (enfouie moins profondément) et constituée de schistes variés (ampélites, phtanites et radiolarites).

Au Sud de cette unité, les derniers affleurements au niveau de la plage de la Normandelière, sont constitués d'une rhyolite massive à porphyroblastes (notée métavolcanites porphyriques sur l'illustration 21) et rattachée à l'Unité de la Roche-sur-Yon.

Enfin, les premiers affleurements de l'unité autochtone des Sables apparaissent à Sauveterre (Olonne sur Mer). En allant vers le Sud, le gradient de métamorphisme augmente (augmentation de la température et de la pression).

Cette organisation structurale n'est pas sans incidence sur les formes du trait de côte observé aujourd'hui. Les propriétés de résistance à l'érosion sont principalement le produit de la nature et de la structure minéralogique. Toutes ces roches du socle cristallin ne possèdent pas une seule et même lithologie.

3.2.2. Descriptions lithologiques

De nombreux secteurs géologiques remarquables se succèdent, dont les caractéristiques changent d'un site à l'autre.

Cette description présente une synthèse géologique des notices des feuilles 560 (St Gilles Croix de Vie), 584-607 (Les Sables d'Olonne), et du guide « Curiosités géologiques du littoral vendéen » (Bouton & al, 2013).

Dans le Pays de Monts, le substratum est constitué des calcaires du Lutétien (Tertiaire). Il affleure à marée basse au Pont d'Yeu (Notre-Dame-de-Monts) uniquement lors des grandes marées (infratidal). Ce secteur ne sera pas conservé puisque l'altitude maximum de ces calcaires ne permet pas la formation d'un talus rocheux.



Illustration 22 - Vue sur les pitons rocheux (pineaux) présent sur le platier, St Hilaire de Riez, Août 2013.

La Corniche vendéenne (St-Hilaire-de-Riez, St-Gilles-Croix-de-Vie) est le fruit de l'érosion par la mer d'une plateforme rocheuse d'une douzaine de mètres de hauteur dont témoignent encore aujourd'hui les cinq pitons rocheux (pineaux) visibles sur le platier (Illustration 22). La falaise est principalement constituée d'un micaschiste à

muscovite très finement feuilleté issu du métamorphisme d'une série sédimentaire et volcano-sédimentaire d'âge paléozoïque inférieur, les schistes de St-Gilles. Cette série métamorphique est formée d'un rubanement de lits sombres et clairs (Illustration 23). On y observe une nette déformation et des filons de quartz (N60 à 70°) dessinent des plis couchés, par la suite déformés par des plis en chevrons. La formation est recoupée par de rares filons de lamprophyre (N155°) que l'érosion marine tend à creuser préférentiellement générant des cavités et des marmites de plusieurs mètres de diamètre.



Illustration 23 - Schistes de St Gilles, St Gilles Croix de Vie, Août 2013

L'estran de Brétignolles-sur-Mer comprend deux grands ensembles, (1) au Nord les porphyroïdes de la Sauzaie, en contact tectonique chevauchant au Sud, à partir du rocher Ste Véronique (2) une série sédimentaire fossilifère très déformée (unité de Brétignolles). Les phanites noires sont surmontées de métavolcanites (Illustration 25).

- 1- Au nord, les porphyroïdes sont d'origine volcanique ou volcano-sédimentaire (unité de St-Gilles). Datée de l'Ordovicien inférieur, celle-ci se caractérise par de gros minéraux blancs (feldspaths centimétriques). Ces derniers sont le fruit d'une ancienne roche rhyolitique (volcanique) ayant subi une déformation spectaculaire et un fort étirement. Plusieurs faciès caractérisent cette première série :
 - a. Des nappes de 0.3 à 10 m à gros phénoblastes (cristaux) de feldspaths alcalins et quartz bleutés dans une matrice sériciteuse ;
 - b. Des nappes schisteuses de 0.5 à 10 m à grands feldspaths, moins nombreux et non jointifs ;

- c. Des bancs d'arkoses granuleuses de 0.5 à 8 m et coulées rhyolitiques, grains cassés, et quartz plus abondant ;
 - d. Des bancs et lentilles de tufs gréseux de 0.1 à 10 m ;
 - e. Des schistes satinés et feuilletés, gris ou noirâtres, jusqu'à 3 m ;
- Ces ensembles peuvent-être recoupés de pegmatites.

- 2- Au Sud entre le rocher Ste Véronique (Illustration 24) et la plage de la Parée :
- a. Les phtanites noires du rocher Ste Véronique ;
 - b. Des roches rythmiques siliceuses (radiolarites) de schistes satinés rouges imbriqués avec des schistes noirs (ampélites), des arkoses et lentilles de calcaires.



Illustration 24 - Rocher Ste Véronique, Brétignolles sur Mer, Mai 2014



Illustration 25 - Contact entre métavolcanites claires et les phtanites sombres, Brétignolles sur Mer (Mai 2014)

Puis, la série se fait de moins en moins plissée jusqu'à atteindre des zones stratifiées faiblement déformées.

Sauveterre (Olonne-sur-Mer) permet d'observer sur le platier rocheux le passage progressif des schistes à des gneiss par une faille (masquée par le sable). On y retrouve une succession de minéraux successifs du Nord vers le Sud : schistes à séricite, schistes à chlorite, micaschistes à biotite, muscovite et grenat, micaschistes à chloritoïde puis calcaire cipolin. Cet ensemble forme une petite falaise plus ou moins ensablée surmontée d'une dune perchée importante.

La Chaume (les Sables-d'Olonne), du Nord au Sud voit les micaschistes à biotite et staurotide atteindre une profondeur suffisante pour commencer à fondre et donner des gneiss et migmatites (Illustration 26), puis même des granites anatectiques. Cette fusion progressive causée par l'épaississement de la croûte lors de la collision hercynienne s'accompagne de plis de plus en plus aplatis. On observe aussi la présence d'un massif plus important d'un granite orienté de teinte claire.



Illustration 26 - Gneiss migmatitiques, la Chaume aux Sables d'Olonne, (Août 2014)

Une grande faille dextre (décrochement) (Illustration 33) amène une répétition de cette série de succession métamorphique du remblai des Sables jusqu'à Château d'Olonne.

Château-d'Olonne se caractérise donc par un affleurement des niveaux de plus en plus profonds avec dans l'ordre d'approfondissement des gneiss et micaschistes à staurotide, gneiss à sillimanite, gneiss migmatitiques et granite anatectique.

L'érosion différentielle permet aisément de distinguer les gneiss des schistes.

Ce métamorphisme se fait plus intense et s'accompagne d'une évolution des plis de moins en moins marqués avec, au Sud, la pointe et une partie de la baie de la Cayola qui se compose de gneiss tendre. Ils alimentent un processus d'érosion actif de la baie qui regorge de ces galets de quartz blanc issus des filons de quartz de cette formation, et non pas des falaises alentour principalement constituées des calcaires silicifiés du Lias.

A Talmont-Saint-Hilaire, cette série d'approfondissement reprend suite à une faille décrochante dans l'axe de la baie, avec toujours des gneiss et micaschistes.

Entre Château-d'Olonne et Jard-sur-Mer, apparaissent les premières séries sédimentaires jurassiques du bassin aquitain, constituées des calcaires silicifiés à la base, d'argiles, de sables feldspathiques, et de marnes (Illustration 27).



Illustration 27 - Bancs de calcaires du Lias, Talmont St Hilaire, Août 2014

En allant donc vers le Sud, la discordance du Jurassique sur le socle métamorphique hercynien est de plus en plus visible (Illustration 28).

La sédimentation est marquée par deux tendances antagonistes : les dépôts carbonatés apparaissent dès l'extrême base mais ce sont d'abord les argiles qui prédominent ; il se produit ensuite une courte période pendant laquelle les deux tendances s'équilibrent. Pour finir, les carbonates deviennent prédominants : on ne trouve dans l'assise supérieure qu'une seule récurrence argileuse à 80 cm du sommet.

A partir de la pointe sud-est de l'anse de Bourgenay, apparaissent de façon continue les premières séries sédimentaires jurassiques, constituées des argiles dolomitiques verdâtres et sables feldspathiques, et de calcaires dolomitiques. En allant vers le Sud, la discordance du Jurassique sur le socle métamorphique hercynien est de plus en plus visible et continue au niveau des falaises. Le secteur de St Nicolas à la pointe du Payré à Jard-sur-Mer est particulièrement remarquable.



Illustration 28 - Discordance du Jurassique sur le socle hercynien, Jard sur Mer, Mai 2011

L'érosion différentielle souligne la variabilité de compétence des différentes formations et place les premières séries de calcaires dolomitiques silicifiés comme étant les plus résistantes. On observe ainsi de nombreux sous-cavages, arches quand celui-ci est directement transgressif sur les micaschistes et gneiss. A contrario les séries terrigènes argileuses et sableuses sont vulnérables aux assauts de la mer, et entraînent localement de nombreux petits éboulements et glissements.

a) Récapitulatif des formations du substratum (socle cristallin et roches sédimentaires)

• Micaschistes

Les micaschistes sont une roche métamorphique commune, à grains généralement moyen, à schistosité et foliation marquées, riche en lamelles de mica visibles à l'œil nu, d'où un débit facile en plaquettes à surface brillante. Altérés, sous l'influence continentale, ils deviennent des argiles de faible cohésion, présents essentiellement au sommet des falaises, favorisant le déclenchement de glissements de terrain et d'éboulements.

• La formation des porphyroïdes de Vendée

La formation dite des Porphyroïdes est un complexe volcano-sédimentaire, constitué par des nappes d'épanchement 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.

• 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).

Le front de falaise gneissique peut être relativement résistant à l'altération.

• Granite anatectique

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 présentes plus sporadiquement associées avec le gneiss (gneiss migmatitiques).

- **Calcaire**

Les calcaires sont des roches carbonatées d'origine marine ou lacustre. Les premières séries transgressives des calcaires du Lias (Hettangien) témoignent d'un milieu marin très peu profond, et un dépôt très lent, condensé. Ces dépôts carbonatés alternent avec des argiles et sables feldspathiques, séries terrigènes qui témoignent d'un environnement proximal, très proche de la bordure continentale.

Les marnes du Toarcien, situées dans la stratigraphie entre les calcaires du Lias et du Dogger, n'affleurent que très peu. Cette roche tendre et peu compétente, dessine l'anse au niveau de la plage de la Mine à Jard sur Mer, masquée par la dune et les sables de l'estran.

a) Les formations superficielles meubles

De nombreuses formations superficielles recouvrent le substratum au niveau de la frange littorale :

- **Sable dunaire**

Les dunes sont des dépôts de sables éoliens, soufflés à partir du littoral. Elles sont fossiles mais récentes, leur mise en place date de quelques milliers d'années. Elles sont présentes et bordent l'ensemble du littoral vendéen à l'exception de quelques éperons rocheux, et peuvent localement dépasser 15 m d'épaisseur.

- **Colluvions sableuses holocènes**

Elles proviennent du fluage et du démantèlement partiel des édifices dunaires.

- **Coulées périglaciaires de solifluxion**

Ce sont des dépôts de solifluxion épais de 3 m au maximum, mis en place lors de la dernière glaciation. C'est un mélange de cailloux, de sables, de limons et d'argiles.

- **Cordons de galets**

Deux cordons de galets imposants sont situés au fond de la baie de Cayola et à Bourgenay.

- **Tourbes**

Les dépôts tourbeux sont des tourbières fossiles qui révèlent le mouvement oscillatoire de la transgression flandrienne finale. Ils se retrouvent dans les dépressions, des cuvettes, à l'abri, comme à Brétignolles et à la Grand'Pointe au Nord des Sables d'Olonne.

• Alluvions

Sur cette marge littorale au relief très faible, les fonds de vallées peuvent être localement recouverts d'alluvions qui présentent à la base un matériau plus grossier, puis des alluvions fines (argiles sableuses, limons ...).

En synthèse, l'illustration 29 présente une carte géologique synthétique des formations géologiques rencontrées sur les communes du littoral de Vendée.

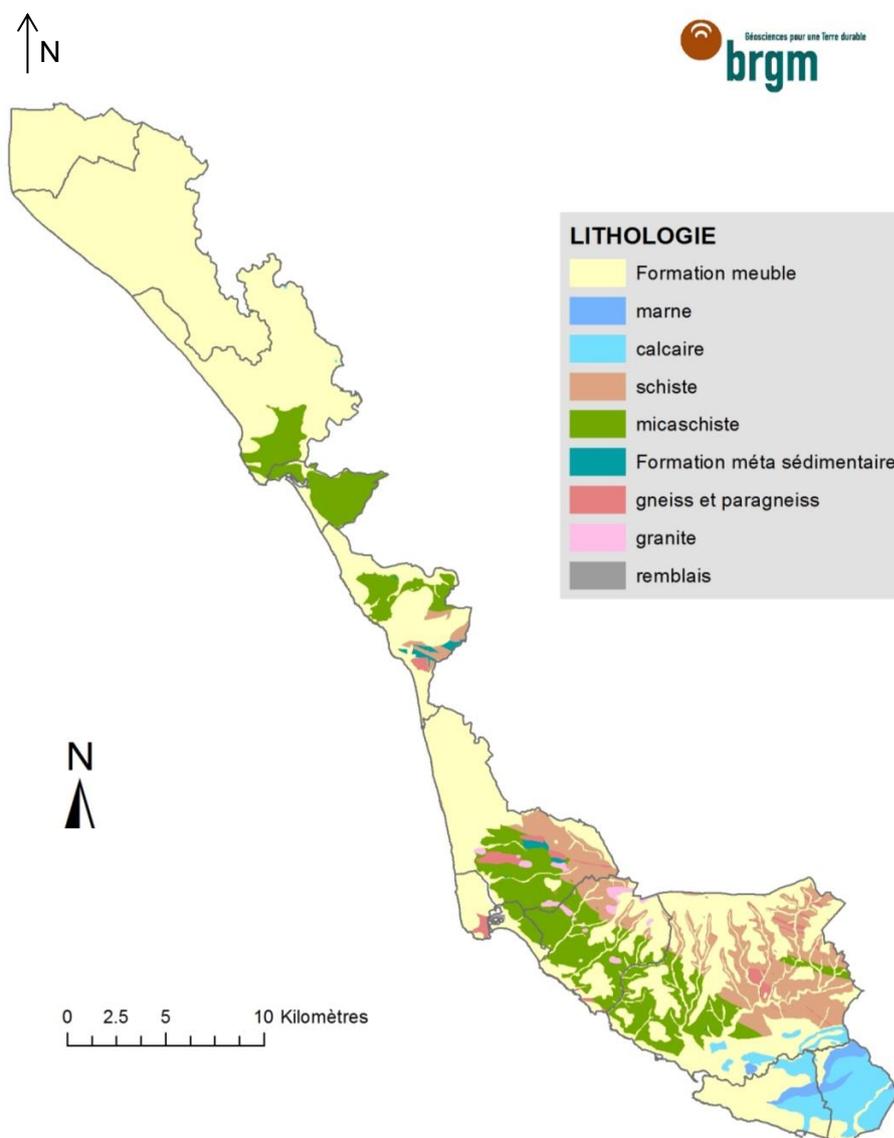


Illustration 29 – Carte géologique synthétique du département de la Vendée, d'après la carte géologique harmonisée au 1/50 000 (BRGM)

3.3. ALTERATION DES ROCHES

3.3.1. Profil d'altération

De la base au sommet, le profil d'altération est le suivant (Illustration 30) :

- 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 de 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 sur le massif armoricain qu'est la cuirasse ferrugineuse.

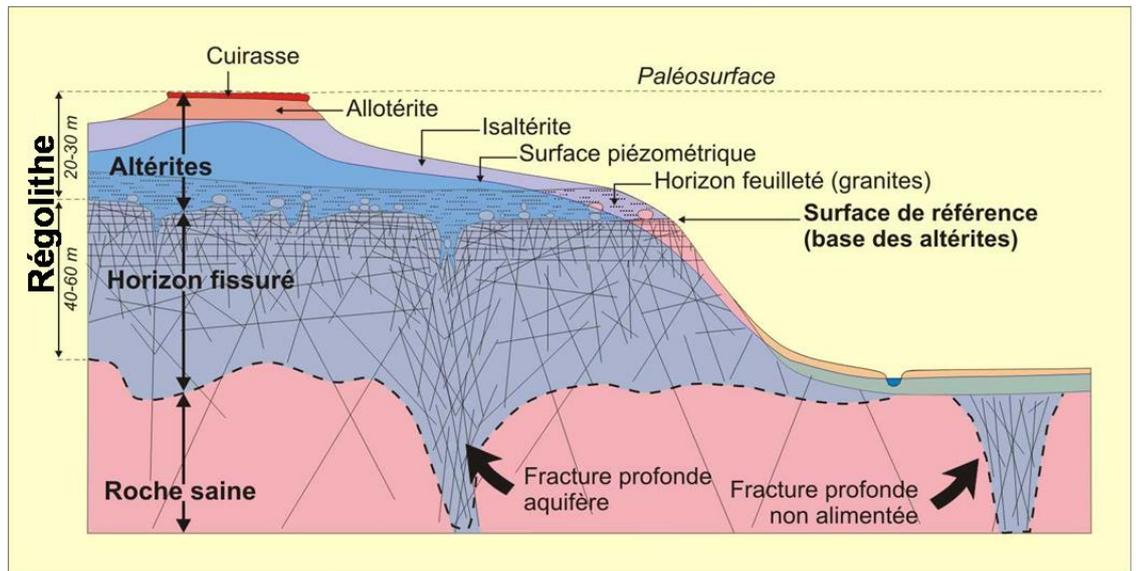


Illustration 30 – Organisation des altérites et de l'aquifère d'après Wyns (1998)

Dans la région, les altérites les plus puissantes sont situées sur le granite de Venansault-La Roche/Yon où les sondages montrent localement des puissances de 15 à 35 m; mais généralement ces profils ne sont pas visibles, d'autant qu'ils peuvent côtoyer du granite affleurant ou subaffleurant ; les "vraies" altérites sont souvent élidées, plus ou moins et recouverts par d'autres formations superficielles déplacées avec un niveau de cailloutis de quartz à la base.

3.3.2. BSS

La Banque de données du sous-sol¹ a été consultée ponctuellement afin de conforter les épaisseurs de formations ou d'altération observées en forage.

On retrouve également 6 descriptions détaillées d'échantillons prélevés en 2007 sur l'estran de St Hilaire et de Brétignolles sur Mer dans le cadre du levé de la feuille géologique du Poiré/Vie. (Annexe 2)

Par exemple, 2 échantillons ont été prélevés sur la Corniche Vendéenne et renseignent d'un faciès de gneiss finement feuilletés et qui s'apparente au micaschiste.

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



Illustration 31 - Extrait de la banque de données BSS disponibles entre la Pointe du Payré et Bourgenay (source : www.infoterre.brgm.fr) – flèche rouge : sondage 06072X0012 décrit sur l'illustration 32.

Un certain nombre de ces dossiers de forage/sondage localisés sur la frange littorale présente aussi des descriptions lithologiques détaillées. Elles sont repérables avec le symbole marron foncé.

La consultation de la coupe géologique du dossier 06072X0012 repéré par la flèche rouge sur l'illustration 31, est présentée dans l'illustration 32.

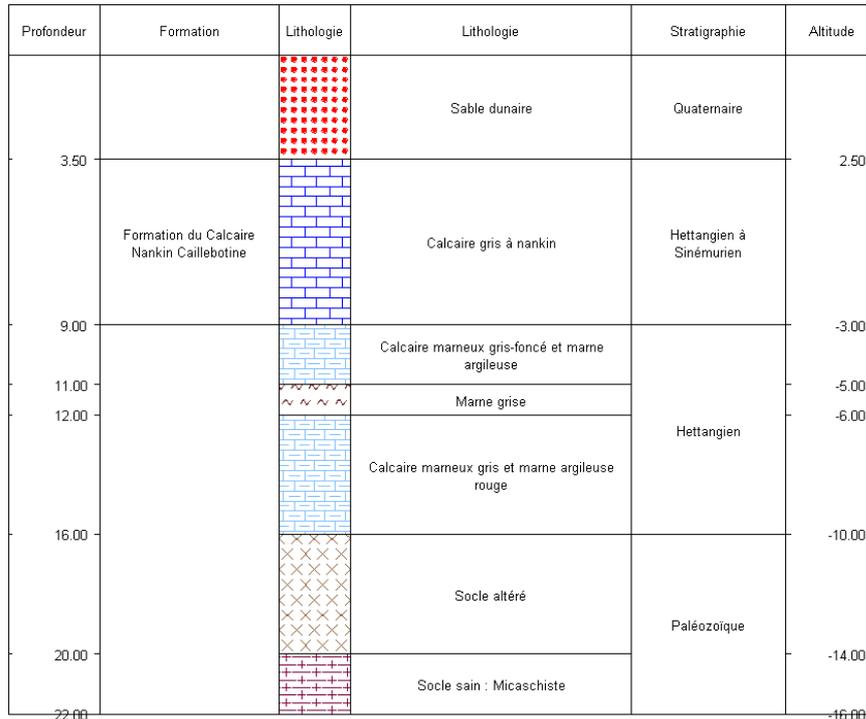


Illustration 32 - Exemple de pile litho-stratigraphique pour le dossier 06072X0012, repéré avec la flèche rouge dans la carte précédente (source : www.infoterre.brgm.fr)

3.4. 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 (ouvertures de grottes, formation des indentations, etc.).

Le littoral de Vendée est fortement faillé et marqué par plusieurs familles de failles directement liées 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 (notamment planches 1/50 000) 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 33 présente un exemple sur les communes d'Olonne sur mer et Les Sables d'Olonne (regroupement des données des feuilles géologiques et de la digitalisation des linéaments).

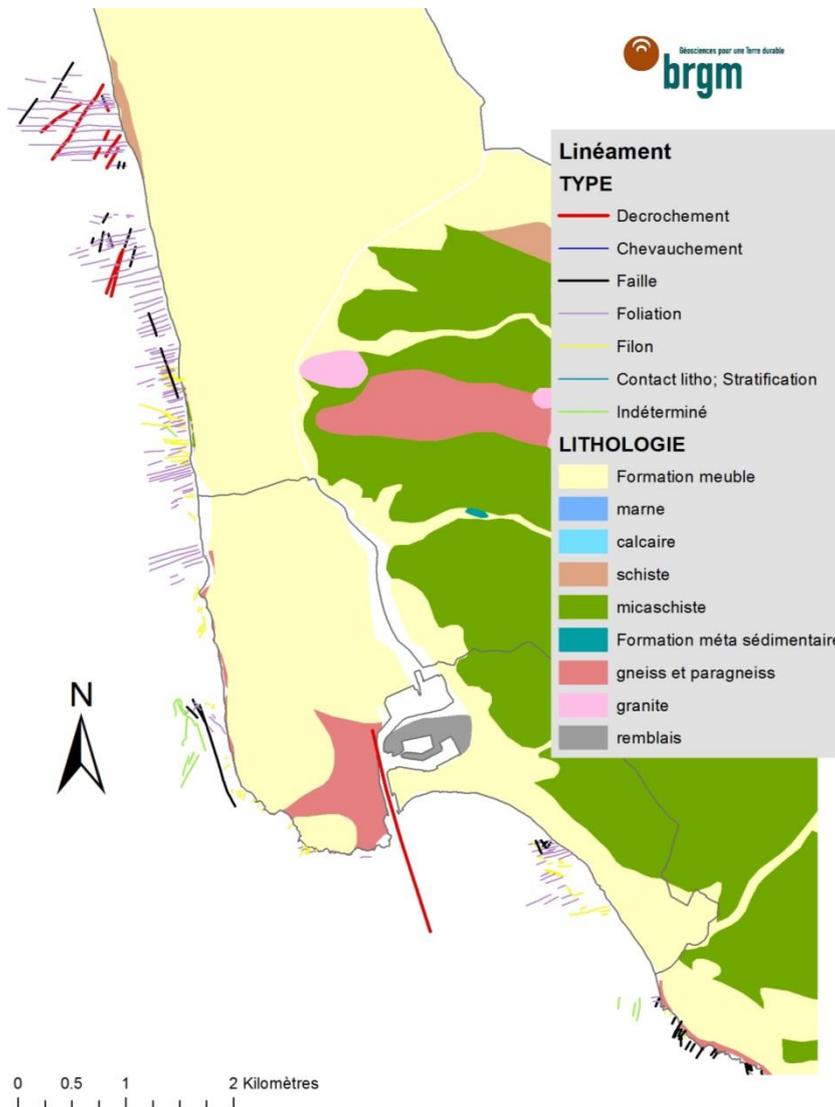


Illustration 33 – Digitalisation des linéaments et interprétation à partir des orthophotographies (exemple sur le secteur de la Chaume, Les Sables d’Olonne)

Plusieurs types de discontinuités ont été rencontrés sur le littoral de Vendée :

- 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 ;
- 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.

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.

3.5. MOUVEMENTS DE TERRAIN EN VENDEE 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.

3.5.1. Mouvements recensés

La base de données BDMVT (www.georisques.gouv.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, affaissement/effondrements, coulées de boue ou érosion de berge. Pour les communes étudiées du littoral de Vendée, cette base de données contient 25 évènements localisés. Par ailleurs les bases de données constituées suite à la tempête Xynthia ont été consultées mais les évènements recensés concernent les côtes basses meubles.

Au total, 25 évènements ont été recensés sur les communes littorales étudiées, à savoir :

- 12 éboulements ;
- 2 glissements ;

- 11 érosions de berge (dont 4 attribuées à la côte basse sableuse au Nord de St Hilaire de Riez).

L'illustration 34 présente la localisation de ces mouvements.

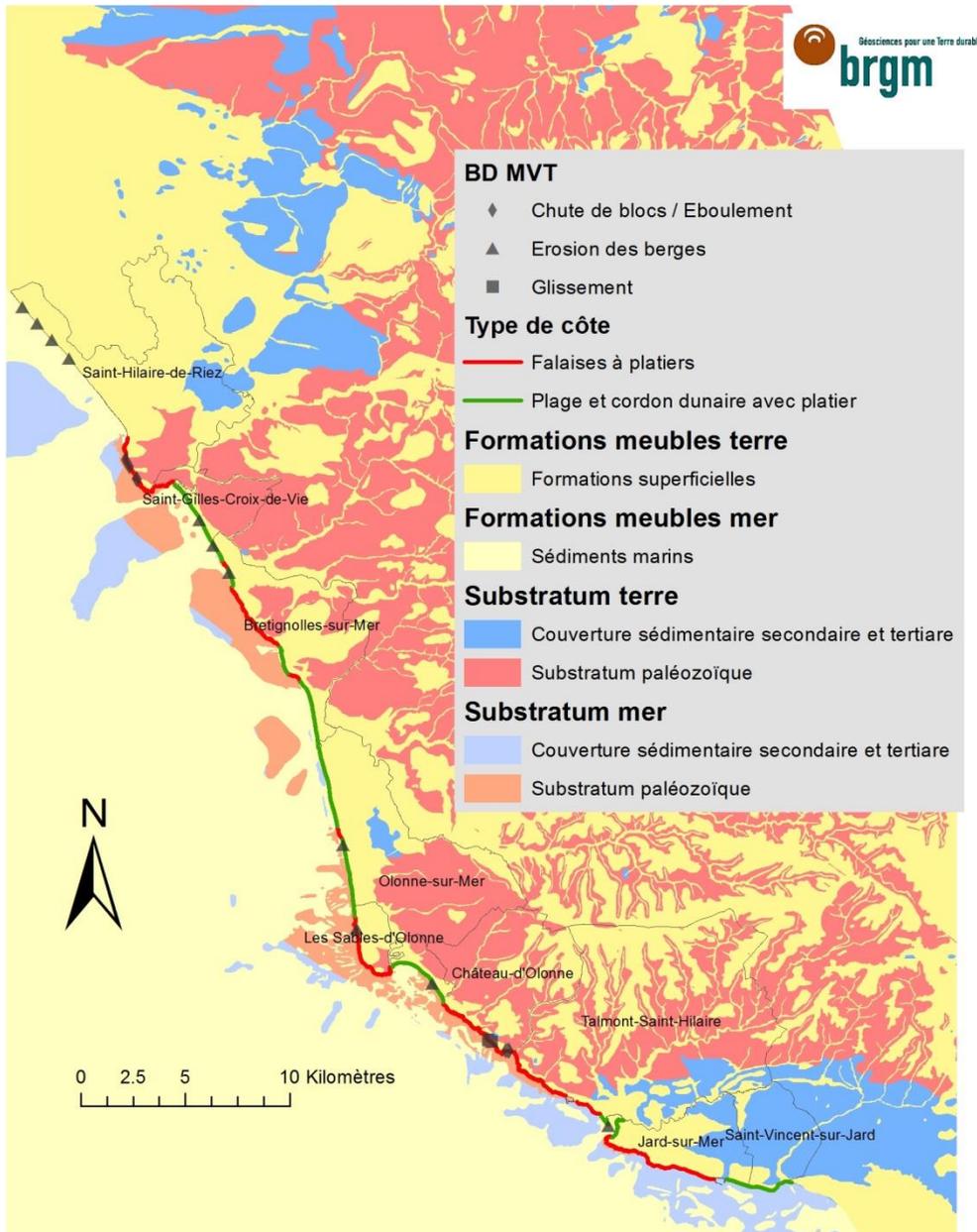


Illustration 34 – Localisation des mouvements de terrain recensés (source : BDMVT, traitement : BRGM)

3.5.2. Etude des mouvements de terrain déjà réalisées sur le secteur

Le premier travail recensé sur l'évolution des côtes en Vendée est celui de Demarty O. en 1989. Il propose un découpage en secteur de tout le littoral de Loire-Atlantique et de Vendée.

Sur le secteur de Brétignolles, il relève une certaine érosion, principalement en tête de falaise. Au Sables d'Olonne, et au Nord du phare d'Armandèche les petites falaises apparaissent stables, mais à surveiller, en raison de la route côtière.

Le secteur de Château d'Olonne présenterait des falaises saines face à un estran peu large qui ne favorise pas la formation des plages de sable. Le recul ne serait pas ou peu observable à l'échelle humaine (50 ans ?) ce qui n'interdit pas la chute de blocs de temps en temps.

A partir de Talmont-St-Hilaire, il note des falaises semi-altérées, évoluant principalement par leur sommet, avec toutefois une érosion peu rapide. Plus au sud les falaises calcaires sont notées plus sensibles à l'érosion. Une remarque est portée quant à l'influence de l'infrastructure portuaire du port de Bourgenay, construit en 1985, sur une éventuelle accélération de l'érosion de part et d'autre.

A Jard-sur-Mer, un recul estimé à 20 cm/an est avancé, mais sans enjeux notables.

Enfin à St-Vincent-sur-Jard les épis et digues auraient été érigés pour palier à un recul auparavant fort.

L'étude ANTEA « Diagnostic de stabilité des falaises de la corniche vendéenne » réalisée en 1995 pour la commune de St Hilaire de Riez dresse un état détaillé sur fond cadastral au 1/1 000 des falaises en soulignant notamment les secteurs les plus vulnérables à l'érosion, accompagnés ou non à une instabilité potentielle ou observée. Ces secteurs sensibles correspondent aux zones de souscavage profond associées aux failles, aux zones fragilisées (parois de falaises, désordres tels que les déchaussements, déstabilisation des ouvrages de protection) et aux ravinements liés au ruissellement des têtes de falaises.

Les zones les plus soumises aux instabilités et au recul concernent les fonds d'indentation et secteurs faillés connectés avec une action érosive marine active.

Les agents d'érosion continentale (gel/dégel, ruissellement, eaux souterraines et météoriques ...) ont une action principale sur la partie sommitale des falaises et ont une action plus ou moins marquée liée à (1) l'état d'altération de la roche, (2) la présence d'une couverture végétale et (3) au contexte topographique qui conditionne le ruissellement.

Ainsi les recommandations portent sur la revégétalisation, le drainage/canalisation et rehaussement des têtes de falaises (merlons), et l'obturation des sous cavages actifs.

En synthèse la question du recul est abordée :

« L'étude des photographies aériennes n'a pas permis de mesurer précisément le recul de la côte. En règle générale, ce dernier semble avoir été très lent sur les vingt dernières années.

Localement, on observe des phénomènes qui semblent plus rapides liés sans doute à une qualité du rocher moins bonne ponctuellement et à une exposition défavorable. Mais globalement le recul du trait de côte paraît assez lent. »

Cette synthèse rend compte d'une érosion différentielle à la fois verticale et longitudinale (le long du linéaire).

La troisième étude concerne la commune de Château d'Olonne. Elle a été réalisée par le BRGM en 2007 : « Diagnostic des risques liés aux mouvements de terrain sur le littoral de la commune de Château d'Olonne ».

La méthodologie pour caractériser les mouvements de terrain contrôlés par l'effet de la gravité s'attache au principal mécanisme qui regroupe les glissements de terrain, chute de pierres et de blocs et écroulements en masse.

La typologie mise en place se base sur les descriptions de morphologie, de hauteur, du type de matériaux et de la fracturation.

A partir des observations d'approche naturaliste, le littoral a été découpé en secteurs homogènes. Ceux-ci s'accompagnent de recommandations par rapport à la perte de biens et la protection du public. Les principales recommandations portent sur une surveillance régulière de l'ensemble du littoral, principalement sur les zones les plus hautes. D'autres actions prévisionnelles pourraient être envisagées suivant les vitesses de recul qui pourraient être établies.

Enfin il convient de rappeler que dans le Fascicule B de l' « Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire » réalisée par le bureau d'étude SOGREAH (Mazeiraud, 2012) l'ensemble des ouvrages de protection du littoral régional ont été inspectés et décrits. Leurs pathologies et effets sur le littoral sont diagnostiqués. Ces relevés ont été réalisés fin août 2009.

3.5.3. Questionnaire aux communes

Un questionnaire a été envoyé à l'ensemble des communes et intercommunalités littorales de Vendée afin de compléter les données. 8 réponses ont été transmises, elles concernent 8 des 11 communes possédant une façade littorale.

Le tableau suivant regroupe les informations relatives aux falaises (Illustration 35).

St Jean de Monts et Notre Dame de Monts sont à exclure, elles ne possèdent pas de côte rocheuse.

Parmi les 8 communes concernées par la partie côte rocheuse/à falaise, les 6 ayant répondu mentionnent des mouvements de terrain.

REPONSE	RECU DU TRAIT DE COTE	SECTEURS	MOUVEMENTS FALAISES	LOCALISATION	IMPACT
Communauté de communes Océan Marais de Monts	Chaque année	Zones basses (cordon dunaire)			
Saint-Jean-de-Monts	Exceptionnellement	Non Répondu	Non Répondu		
Saint-Hilaire-de-Riez	Exceptionnellement De temps en temps	Zones basses (cordon dunaire)	NON		
Communauté de communes du Pays de Saint-Gilles-Croix de Vie	Chaque année	Zones de falaises Zones basses	OUI	Saint Hilaire de Riez Brétignolles	
St Gilles Cx de Vie	Chaque année	Zones basses	NON Répondu		
Brétignolles sur Mer	Exceptionnellement	Zones basses	OUI (érosion ponctuelle)		
Les Sables d'Olonne	Exceptionnellement	Zones basses	OUI	La Paracou Corniche du Nouch	Voie cyclable Voirie
Château d'Olonne	Chaque année	Zones de falaises Zones basses	OUI	Anse aux Moines Anse Paré Baie Cayola	Voie cyclable Voirie
Talmont St Hilaire	De temps en temps	Zones de falaises Zones basses	OUI		
Jard sur mer	De temps en temps	Zones de falaises	OUI (chaque année éboulement falaise de la Pointe du Payré)	Grand Boisvinet Rue du Paradis aux Anes Pointe du Payré	

Illustration 35 – Réponse des communes au questionnaire

4. Acquisition de données

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

Cette étude concerne principalement les littoraux rocheux, mais également quelques pentes littorales et ressauts constitués de matériaux plus meubles (autrement dit talus), qui peuvent être affectés par des phénomènes de type glissement de terrain ou ravinement.

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 contribuant à l'érosion sont plutôt marins ou continentaux. Ces paramètres sont par ailleurs déterminants pour l'évaluation des aléas mouvements de terrains, mais encore influent sur l'aléa de départ. Le développement de fissures par appel au vide par exemple ne sera pas le même selon la hauteur et la pente d'un front rocheux. 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 (zone de propagation).

La géométrie d'un versant présente plusieurs composantes :

- sa (ou ses) pente(s), avec par exemple la présence de ressauts ou au contraire de replats ;
- sa hauteur ;
- éventuellement la présence de surplomb.

Compte-tenu du linéaire de côte examiné (plus de 40 km), 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 2011 et en commun par le SHOM et l'IGN. Le pas (résolution) de ce modèle numérique est de 1 m et les cotes altimétriques 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 arbitrer le découpage des côtes rocheuses en secteurs homogènes du point de vue géomorphologique, à conforter les observations de terrain mais également à cibler les zones de falaises pour le traitement des orthophotographies.

La Litto3D a donc été utilisée pour :

- produire un trait de côte de référence (TDC) avec une isoligne de 4,5 m qui correspond à la base des falaises ou talus (hors zones de plages poches ou plages adossées à la falaise) ;
- par segments de 5 m du TDC de référence :
 - o calculer les pentes maximum des versants ;
 - o calculer les hauteurs des versants ;
 - o calculer l'altitude du pied de falaise, ou du ressaut, pour définir le caractère maritime ou continental du pied de falaise ;
 - o calculer un niveau d'irrégularisation en % par secteur homogène (rapport de la longueur de l'isoligne de 4,5 m avec un trait simplifié).

Cette partie présente en synthèse les traitements réalisés à partir de Litto3D selon une méthodologie développée dans le cadre d'une étude équivalente en Loire-Atlantique (Plat et al., 2013).

4.1.1. Pente des versants

Une première analyse a permis de calculer les pentes des falaises.

La sélection des secteurs de pente des versants pouvant être attribués aux ressauts (talus et falaises) pour le calcul a été réalisée à partir des isolignes de pentes, pour les secteurs supérieurs à 20 degrés.

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. Ce premier résultat correspond donc au calcul raster au pas de 1 m de la pente sur les zones de versants (Illustration 36).

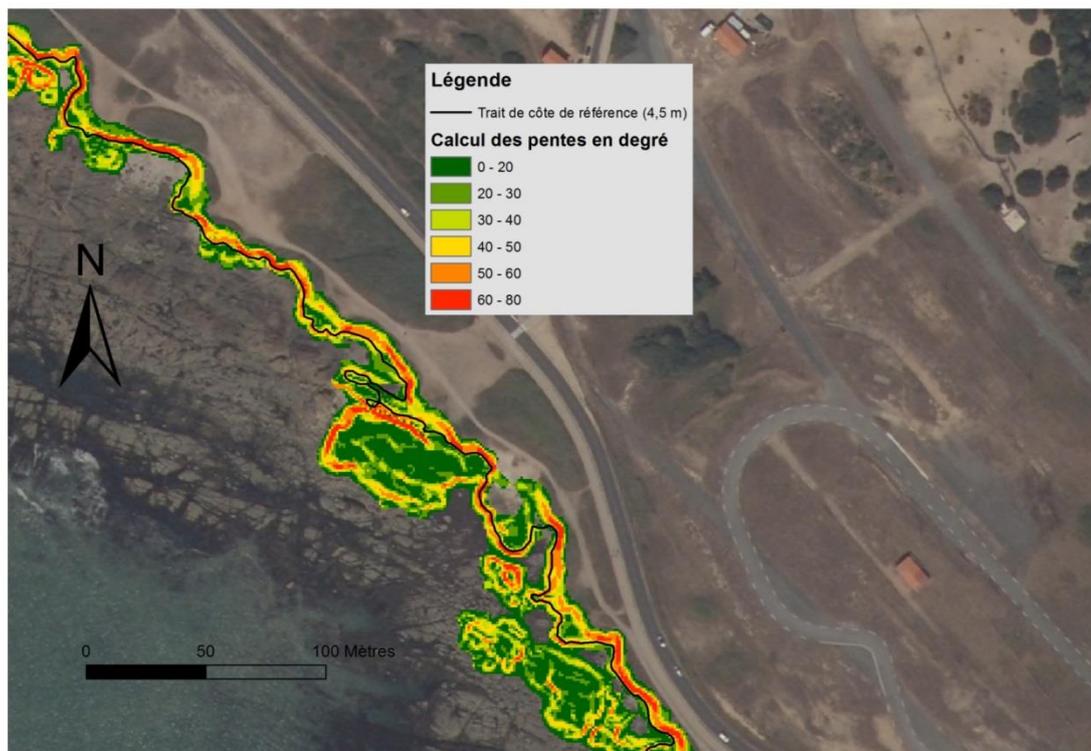


Illustration 36 – Exemple à l’Anse du Vieux Moulin (Château d’Olonne) de calcul de la pente à partir de la Litto3D sur fond Ortholittorale V2 - 2012 (traitement : BRGM)

A noter toutefois que ce calcul, lorsque la pente est assez verticale, a tendance à **sous-estimer la valeur de la pente réelle**. Cela tient à la résolution de la Litto3D et des zones de surplomb non enregistrées.

Dans un second temps les valeurs de pente (minimum, moyenne, maximum) sont attribuées au segment de 5 m de la ligne de hauteur de 4,5 m, ce sera la pente maximale qui sera utilisée (Illustration 37).

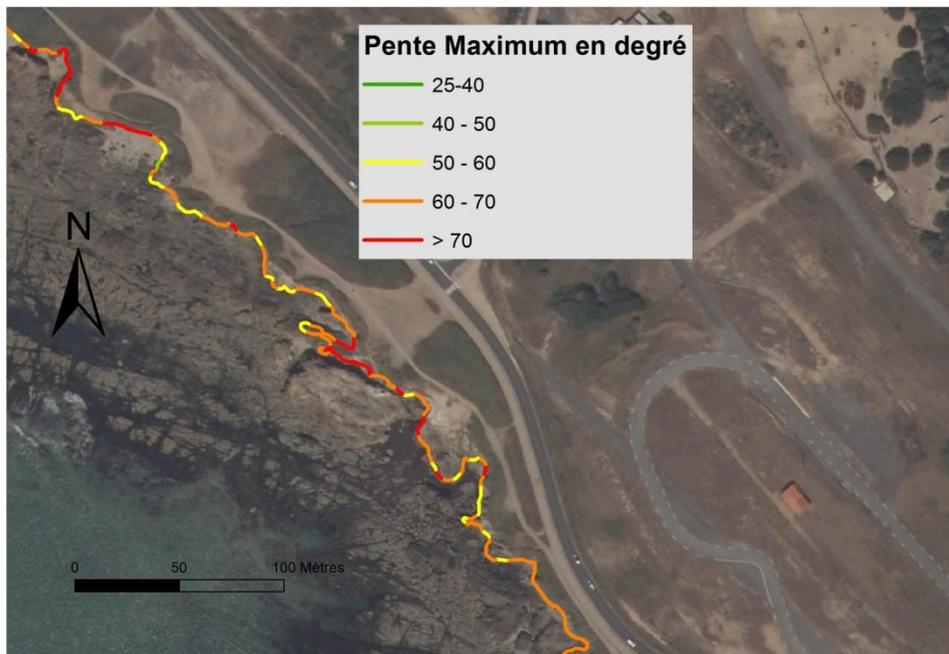


Illustration 37- Exemple de résultat du calcul de pente maximum à partir de la Litto3D sur fond Ortholittorale V2 - 2012

4.1.2. Hauteur des versants

Le calcul des hauteurs de falaise 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).

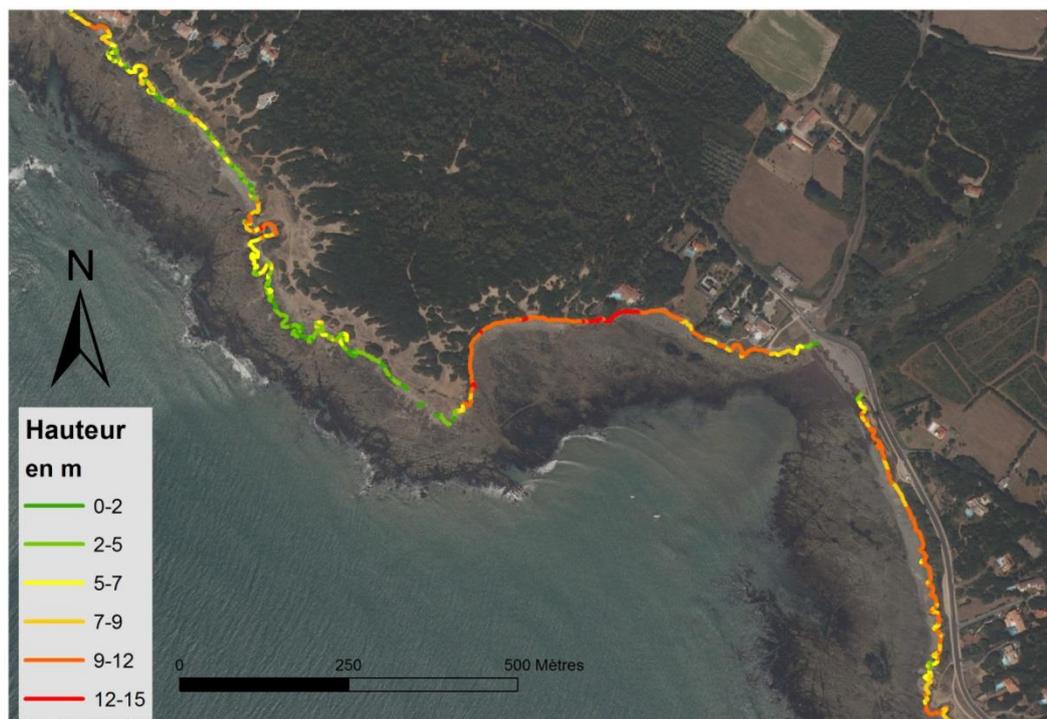


Illustration 38 - Exemple de calcul de hauteur à Cayola (Château d'Olonne) à partir de la Litto3D (traitement : BRGM)

La comparaison entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées in situ sur quelques sites tests montre que le calcul est fiable.

4.1.3. Altitude du pied de falaise

Les différents traitements précédents apportent également l'altitude à la base du ressaut identifié. Cette mesure peut être traduite comme une valeur brute de l'altitude du pied de falaise/talus sans distinction de présence ou non de sédiments (plage poche, cordons de galets, platiers nus).

En dehors de la prise en compte du jet de rive, cette valeur renseigne sur les fréquences de son ennoisement, autrement dit, si la falaise est connectée au système d'érosion marine.

Pour cela, il suffit de mettre cette valeur en relation avec les niveaux de marées du port de référence le plus proche (données REFMAR du SHOM).

A partir de ces valeurs, pour le port de référence des Sables (Illustration 39), on obtient pour les différents niveaux de marée :

1. NM (Niveau Moyen) : 0.37 m NGF
2. PMME (Pleine Mer de Morte Eaux) : 1.37 m NGF
3. PMVE (Pleine Mer de Vive Eaux) : 2.37 m NGF

4. PHMA (Pleine Haute Mer Astronomique) : 3.1 m NGF

Nom	Type	Lat	Long	Et.	Constante	PHMA	PMVE	PMME	NM	BMME	BMVE	PBMA
Les Sables d'Olonne	R	46 30 N	01 48 W	3.35		05.93	05.20	04.20	03.20	02.05	00.75	-0.02
Abords des Sables-d'Olonne et de La Loire												
Saint-Nazaire	P	47 16 N	02 12 W	3.59		06.59	05.85	04.65	03.57	02.20	00.85	-0.02
Le Croisic	S	47 18 N	02 31 W	3.52		06.13	05.40	04.25	03.30	02.00	00.70	-0.03
Le Pouliguen	S	47 15 N	02 24 W	3.49	2007	06.15	05.45	04.30	03.31	02.05	00.80	00.04
Pornichet ¹	S	47 16 N	02 21 W			06.22	05.50	04.40	03.41	02.10	00.85	-0.01
Le Grand Charpentier La Loire	S	47 13 N	02 19 W			06.27	05.55	04.40	03.39	02.10	00.80	00.05
Donges	S	47 18 N	02 05 W			06.73	05.95	04.70	03.58	02.10	00.65	-0.31
Cordemais	S	47 17 N	01 54 W				06.20	04.90		01.95	00.60	
Le Pellerin	S	47 12 N	01 46 W				06.25	04.95		01.75	00.60	
Nantes (Chantenay)	S	47 12 N	01 35 W				06.35	05.10		01.80	00.90	
Pointe de Saint-Gildas ¹	S	47 08 N	02 15 W			06.32	05.55	04.40	03.43	02.00	00.75	00.05
Pornic	S	47 06 N	02 07 W	3.63	2007	06.54	05.80	04.65	03.57	02.20	00.80	-0.02
L'Herbaudière (île de Noirmoutier)	S	47 02 N	02 08 W	3.44		06.21	05.50	04.40	03.36	02.10	00.80	-0.02
Fromentine (embarcadère)	S	46 54 N	02 10 W	3.59		06.01	05.25	04.20	03.20	01.95	01.00	00.44
Bouée Fromentine	S	46 53 N	02 12 W			05.85	05.15	04.15	03.17	02.00	00.75	00.01
Port-Joinville (île d'Yeu)	S	46 44 N	02 21 W			05.70	05.05	04.10	03.09	02.00	00.70	00.04
Saint-Gilles-Croix-de-Vie	S	46 42 N	01 57 W	3.41		05.87	05.15	04.15	03.17	02.05	00.75	00.01

Nom	Repère fondamental	Organisme	Date	ZH/RF	RF/Ref	ZH/Ref	ZHIGRS80	Ref
Les Sables d'Olonne	O.HI-65	IGN	2011	7.756	4.926	-2.830	44.54	IGN69
Abords des Sables-d'Olonne et de La Loire								
Saint-Nazaire	O.KS-69	IGN	2010	9.252	6.092	-3.160	44.63	IGN69
Le Croisic	O.KS-1	IGN	1975	7.792	4.932	-2.860		IGN69
Le Pouliguen	O.KS-23	IGN	1975	7.075	4.158	-2.917		IGN69
Pornichet ¹	O.KS-35	IGN	1996	14.038	11.111	-2.927		IGN69
Le Grand Charpentier La Loire								
Donges								
Cordemais								
Le Pellerin								
Nantes (Chantenay)								
Pointe de Saint-Gildas ¹	O.S.K3-68	IGN	1986	13.960	10.882	-3.078		IGN69
Pornic	O.S.K3L3-6	IGN	1985	41.636	38.437	-3.199		IGN69
L'Herbaudière (île de Noirmoutier)	MHA78 digue nord	SHOM	2006	8.868	5.767	-3.101		IGN69
Fromentine (embarcadère)	O.I.K3N3-30A	IGN	2004	11.835	9.022	-2.813		IGN69
Bouée Fromentine								
Port-Joinville (île d'Yeu)	Repère sur le mur d'enceinte de l'équipement	SHOM	1979	9.830				IGN69
Saint-Gilles-Croix-de-Vie	O.I.K3M3-34	IGN	2008	7.805	5.053	-2.752		IGN69

Illustration 39 - Référence Altimétriques Maritimes pour les sites de la zone de marée des abords des Sables d'Olonne et de la Loire

Les pieds de falaises élevés (>PMVE) correspondent aux zones avec des plages pochés, et/ou à la présence de cordons de galets, ou bien encore peuvent indiquer une côte à dénudation. Pour les valeurs les plus élevés, de l'ordre de 5 m et plus, cela pourrait signifier une falaise morte ou un talus abrité.

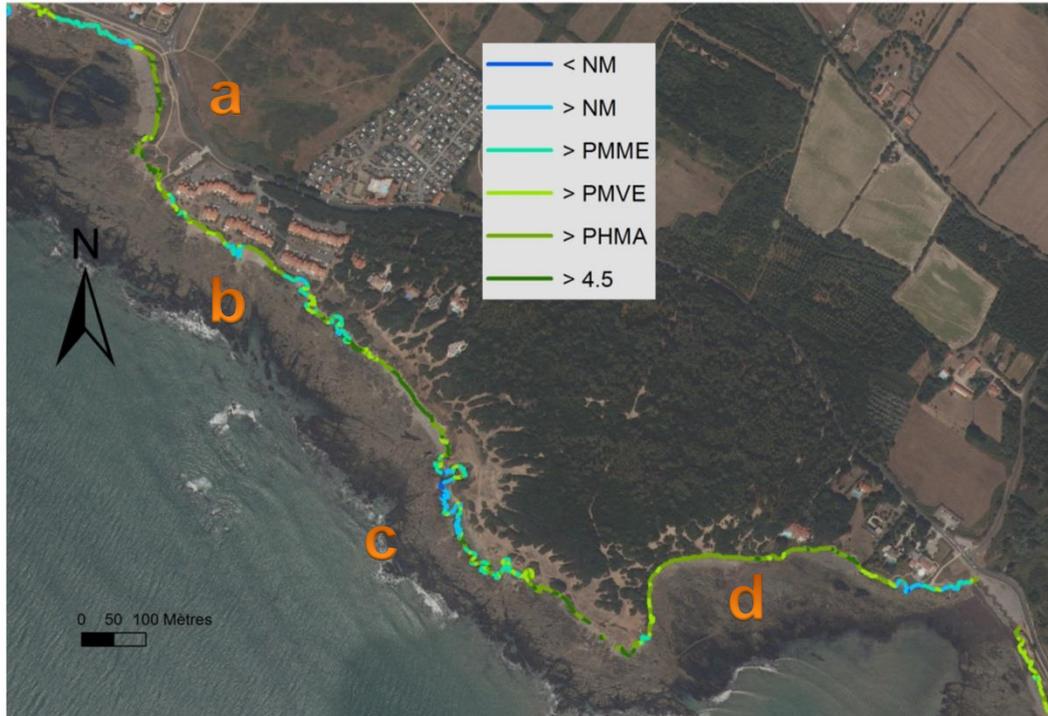


Illustration 40 - Position du pied de falaise par rapport au niveau de marée, de l'Anse aux Moines à la Baie de la Cayola, au sud de Château d'Olonne.

L'exemple de l'illustration 40 présente différents contextes d'exposition du pied de la côte rocheuse :

- a. Un pied de falaise élevé lié aux sédiments accumulés (une plage adossée avec une abondance de galets) dans une anse exposée plein ouest, illustre l'action érosive possible lors d'évènements extrêmes (houle, haute mer de fort coefficient, surcote ...). L'action potentielle de l'érosion continentale ne doit pas être exclue ;
- b. Un pied de falaise bas qui traduit un front actif par l'érosion marine, accompagné d'indentations ;
- c. Un pied de falaise irrégulier et plutôt élevé avec des indentations actives ;
- d. Un pied de falaise dans une anse semi abritée par son exposition aux houles, sensible à la fois aux processus d'érosion marine et continentale.

Cette donnée constitue un paramètre important pour schématiser et sectoriser les processus d'érosion préférentiels, qui pourra compléter les observations et relevés de terrain.

4.2. 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.

4.2.1. 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, datant du XVIII^{ème} siècle) ainsi que les photographies aériennes obliques ou cartes postales sont souvent riches d'information mais ne fournissent que des informations qualitatives ; les orthophotographies (photographies aériennes corrigées des déformations), 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 Vendée pour les falaises ont été peu concluantes. Ainsi, le cadastre n'a pas été utilisé dans le cadre de la présente étude.

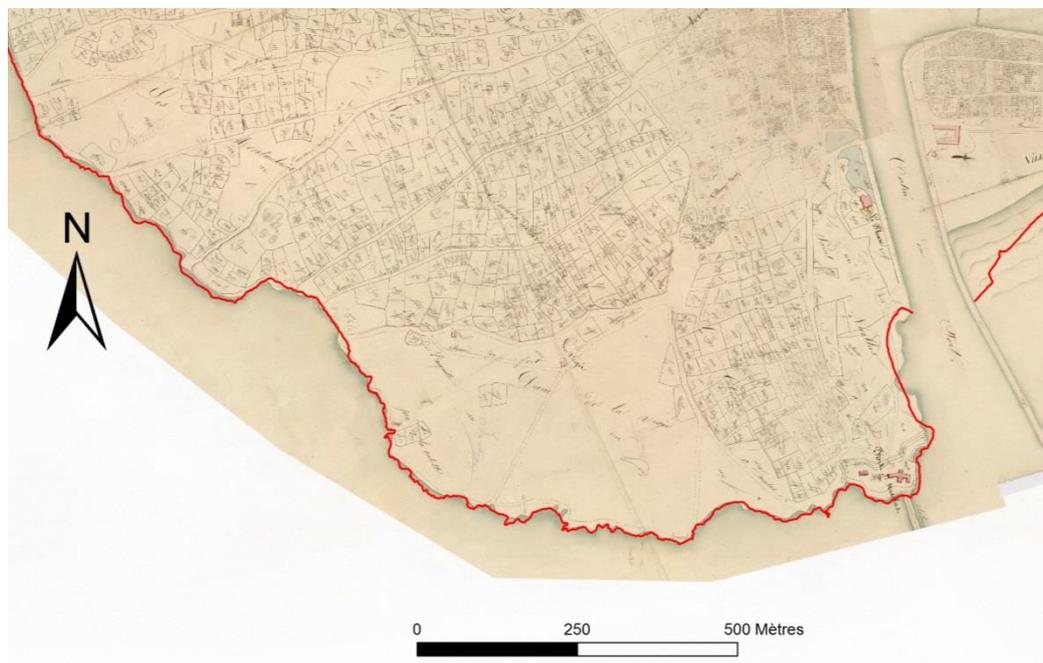


Illustration 41 - Bordure littorale du cadastre napoléonien en comparaison avec l'isoligne des 4,5 m de la Litto3D (trait rouge)

Pour établir l'évolution des falaises littorales, ce sont principalement les photographies aériennes verticales orthorectifiées (correction des déformations dues au relief du terrain, à l'inclinaison de l'axe de prise de vue, et à la distorsion de l'objectif) qui ont été utilisées.

L'inventaire puis la compilation des jeux d'orthophotographies disponibles se basent sur les jeux fournis par la cellule SIG de la DDTM, présentés dans le Tableau 1.

L'Ortholittorale V2 levé en deux temps (2011 et 2012) a été complétée ultérieurement pour la partie sud Vendée.

<i>Jeu d'ortho- photographie</i>	<i>Produit</i>	<i>Système natif</i>	<i>Producteur</i>	<i>Résolution</i>
1920	Les orthophotographies de 1920 et 1921 du littoral vendéen	NTF Lambert 2 Etendu	IFREMER	20 cm
1950	BD ORTHO® Historique : Les photographies aériennes anciennes début années 50 sur le littoral et les agglomérations	RGF_1993_Lambert_93	IGN	50 cm
2000	Ortho Littoral V1	NTF Lambert 2 Etendu	? pour MEDDE	50 cm
2001	BD ORTHO® V1	NTF Lambert 2 Etendu	IGN	50 cm
2006	BD ORTHO® V2	NTF Lambert 2 Etendu	IGN	50 cm
2009	InterAtlas 2009	Lambert Zone II	InterAtlas pour Géo Vendée	20 cm
2009	InterAtlas 2009	RGF_1993_Lambert_93	InterAtlas pour Géo Vendée	20 cm
2010	BD ORTHO® V2	RGF_1993_Lambert_93	IGN	50 cm
2011	ORTHO LITTORAL V2	RGF_1993_Lambert_93	AeroData pour MEDDE	50 cm

Tableau 1: Liste des jeux d'orthophotographies disponibles

Ces données ont une large couverture temporelle puisqu'elle s'échelonne entre 1920 et 2011/2012. A noter que la photographie aérienne de 1920 ne couvre pas totalement le territoire étudié.

Après le regroupement et le catalogage de ces différentes collections d'orthophotographies, il a été indispensable d'harmoniser les systèmes de projection, par une opération de géotraitement lourde. Une reprojection de l'ensemble des images rasters des jeux de 1920 et de 2000 a été réalisée avec l'application logicielle FME (File Manipulation Engine).

Le système géodésique de référence utilisé est le RGF93 en coordonnées projetées Lambert 93. Il s'agit du système géodésique et de projection actuellement en vigueur en France.

La synthèse complète et détaillée de l'ensemble des jeux de données constitués est présentée dans le Tableau 2.

Les jeux historiques 1920 de l'Ifremer et l'Ortholittorale V1 2000 projetés dans le système RGF 93 – Lambert 93 pourront être transmis à la DDTM.

Jeu_Ortho	Jeu_Ortho_Detail	Produit	Producteur	Proj_native	Provenance	Modificateur	Projetee	Resolution	Utilisation
		Cadastré napoléonien de 1815 à 1845		RGF_1993_Lambert_93	GeoPAL/BRGM				NON
1920_1_L2E	OL_1920_sect_1	Les orthophotographies de 1920 et 1921 du littoral vendéen	IFREMER	NTF Lambert 2 Etendu	DDTM 85		NTF Lambert 2 Etendu	20 cm	NON
1920_2_L2E	OL_1921_sect_2	Les orthophotographies de 1920 et 1921 du littoral vendéen	IFREMER	NTF Lambert 2 Etendu	DDTM 85		NTF Lambert 2 Etendu	20 cm	NON
1920_3_L2E	OL_1921_sect_3	Les orthophotographies de 1920 et 1921 du littoral vendéen	IFREMER	NTF Lambert 2 Etendu	DDTM 85		NTF Lambert 2 Etendu	20 cm	NON
1920_4_L2E	OL_1920_sect_4	Les orthophotographies de 1920 et 1921 du littoral vendéen	IFREMER	NTF Lambert 2 Etendu	DDTM 85		NTF Lambert 2 Etendu	20 cm	NON
1920_5_L2E	OL_1920_sect_5	Les orthophotographies de 1920 et 1921 du littoral vendéen	IFREMER	NTF Lambert 2 Etendu	DDTM 85		NTF Lambert 2 Etendu	20 cm	NON
1920_1_RGF	ol_1920_1	Les orthophotographies de 1920 et 1921 du littoral vendéen	IFREMER	NTF Lambert 2 Etendu	DDTM 85	BRGM	RGF_1993_Lambert_93	20 cm	OUI
1920_2_RGF	ol_1921_2	Les orthophotographies de 1920 et 1921 du littoral vendéen	IFREMER	NTF Lambert 2 Etendu	DDTM 85	BRGM	RGF_1993_Lambert_93	20 cm	OUI
1920_3_RGF	ol_1921_3	Les orthophotographies de 1920 et 1921 du littoral vendéen	IFREMER	NTF Lambert 2 Etendu	DDTM 85	BRGM	RGF_1993_Lambert_93	20 cm	OUI
1920_4_RGF	ol_1920_4	Les orthophotographies de 1920 et 1921 du littoral vendéen	IFREMER	NTF Lambert 2 Etendu	DDTM 85	BRGM	RGF_1993_Lambert_93	20 cm	OUI
1920_5_RGF	ol_1920_5	Les orthophotographies de 1920 et 1921 du littoral vendéen	IFREMER	NTF Lambert 2 Etendu	DDTM 85	BRGM	RGF_1993_Lambert_93	20 cm	OUI
1950_RGF	Orthophoto_1950_RGF93	BD ORTHO ⁰ Historique : Les photographies aériennes anciennes début années 50 sur le littoral et les agglomérations	IGN	RGF_1993_Lambert_93	DDTM 85		RGF_1993_Lambert_93	50 cm	OUI
2000_L2E	Ortho_littoral_2000_L2E	Ortho Littoral V1	? pour MEDDE	NTF Lambert 2 Etendu	DDTM 85		NTF Lambert 2 Etendu	50 cm	NON
2000_RGF	Ortho_littoral_2000_RGF	Ortho Littoral V1	? pour MEDDE	NTF Lambert 2 Etendu	DDTM 85	BRGM	RGF_1993_Lambert_93	50 cm	OUI
2001_L2E	bd_ortho_2001_L2E	BD ORTHO ⁰ V1	IGN	NTF Lambert 2 Etendu	DDTM 85		NTF Lambert 2 Etendu	50 cm	NON
2001_RGF	BD_ORTHO_85_2001	BD ORTHO ⁰ V1	IGN	RGF_1993_Lambert_93	GeoPAL/BRGM		RGF_1993_Lambert_93	50 cm	NON
2006_L2E	bd_ortho_2006_L2E	BD ORTHO ⁰ V2	IGN	NTF Lambert 2 Etendu	DDTM 85		NTF Lambert 2 Etendu	50 cm	NON
2006_RGF	BD_ORTHO_85_2006	BD ORTHO ⁰ V2	IGN	RGF_1993_Lambert_93	GeoPAL/BRGM		RGF_1993_Lambert_93	50 cm	OUI
2009_L2E	Absent	InterAtlas 2009	InterAtlas pour Géo Vendée	Lambert Zone II			Lambert Zone II	20 cm	NON
2009_RGF	bd_ortho_2009_20CM_RGF93	InterAtlas 2009	InterAtlas pour Géo Vendée	RGF_1993_Lambert_93	DDTM 85		RGF_1993_Lambert_93	20 cm	NON
2010_RGF	bd_ortho_2010_ecw_RGF93	BD ORTHO ⁰ V2	IGN	RGF_1993_Lambert_93	DDTM 85		RGF_1993_Lambert_93	50 cm	OUI
2011_RGF	Ortho_littoral_2011_RGF93	ORTHO LITTORAL V2	AeroData pour MEDDE	RGF_1993_Lambert_93	DDTM 85		RGF_1993_Lambert_93	50 cm	OUI

Tableau 2 - Description détaillée de l'ensemble des jeux d'orthophotographies

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

Le guide PPRL de décembre 2013 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'études précisent 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 en considérant que le décalage n'est pas identique partout.

L'illustration 38 présente un exemple de juxtaposition des 4 jeux d'orthophotographies sélectionnées.

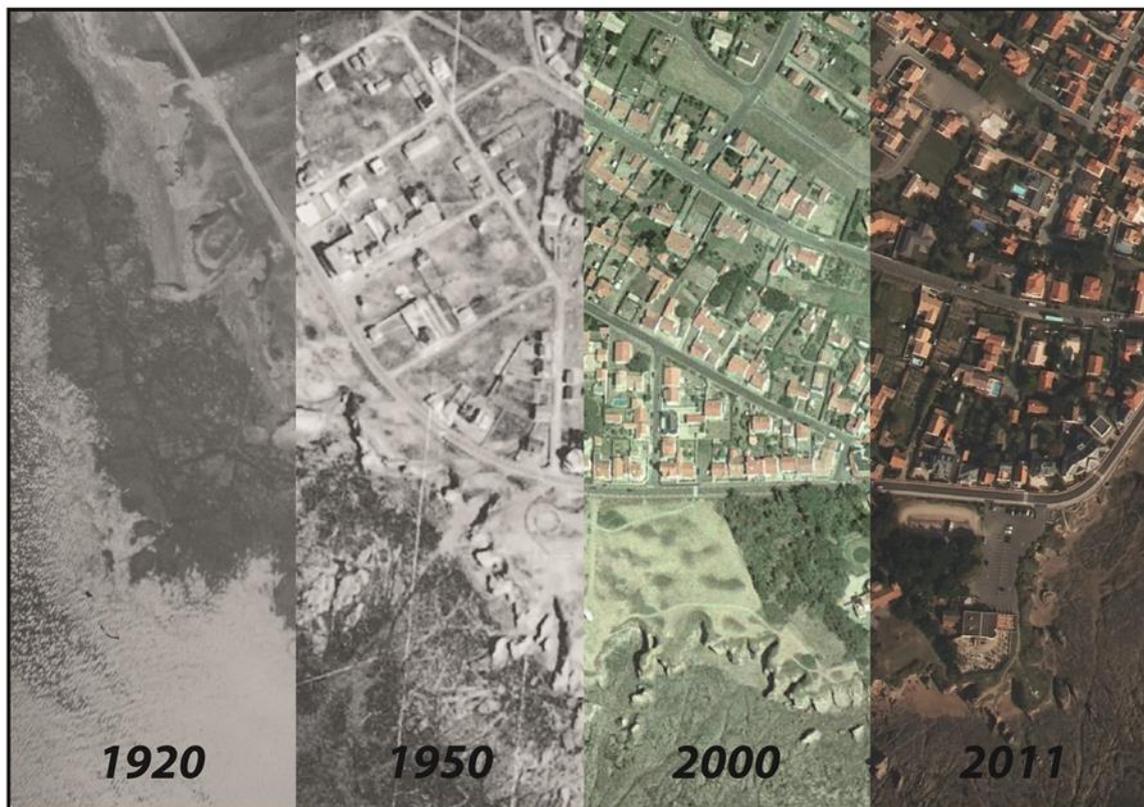


Illustration 42 - Juxtaposition des orthophotographies de 1920, 1950, 2000 et 2011 au niveau du phare (Corniche vendéenne à St Hilaire de Riez)

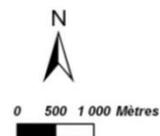
Afin de quantifier les décalages relatifs entre les différents jeux de données dans le même système RGF93-Lambert 93, des points d'amers ont été réalisés.

Une base de 1682 points de calage à partir de repères physiques précis et facilement repérables (amers) a été réalisée pour l'ensemble des orthophotographies. A ces points numérisés, il est enregistré le numéro de l'objet repère et son libellé (par exemple « muret »). Le calcul des distances et angles des vecteurs de décalage entre les différentes origines d'orthophotographies a été effectué pour chaque comparaison.



**Comparaisons d'amers
entre les différentes
orthophotographies historiques
et/ou littorales
(1920/1950/2000/2011)**

Distance	Axe de décalage
◇ < 1 m	◇ 90 °
◇ 1 m - 1,5 m	◇ 45 °
◇ 1,5 m - 3 m	◇ 0 °
◇ 3 m - 4,5 m	◇ -45 °
◇ > 4,5 m	◇ -90 °



Orthophoto 1920 / BD Ortho Historique 1950



Orthophoto 1920 / Ortho Littorale 2000



Orthophoto 1920 / Ortho Littorale 2011



Ortho Historique 1950 / Ortho Littorale 2000



Ortho Historique 1950 / Ortho Littorale 2011



Ortho Littorale 2000 / Ortho Littorale 2011



Illustration 43 – Exemple de comparaison des positions d'amers entre les différents jeux de données, distance et direction de décalage (secteur St Hilaire de Riez / St Gilles Croix de Vie).

La représentation cartographique de ces observations de comparaison précise l'importance des décalages observables entre différents jeux de données, comme le montre en partie l'illustration 43. Ce travail a pu mettre en évidence que les secteurs qui bénéficient d'une moins bonne précision sont à la fois (1) les secteurs les moins urbanisés et (2) à ressauts topographiques comme les falaises côtières, où les points de référence topographique utilisés pour l'orthorectification sont absents. Des décalages plus ou moins importants concernent donc les falaises les plus hautes.

Jeux comparés	Nombre d'amers	Moyenne (en m)	Ecart type (en m)
1920 - 1950	98	3.63	1.91
1920 - 2000	119	3.29	2.06
1920 - 2001	116	3.21	1.95
1920 - 2006	122	3.52	2.2
1920 - 2009	134	3.9	2.62
1920 - 2010	123	3.24	1.94
1920 - 2011	96	3.52	2.33
1950 - 2000	153	2.6	1.59
1950 - 2001	153	2.5	1.31
1950 - 2006	158	2.04	1.23
1950 - 2009	168	2.93	1.64
1950 - 2010	161	2.32	1.36
1950 - 2011	111	2.24	1.47
2000 - 2001	160	1.89	1.2
2000 - 2006	157	2.05	1.23
2000 - 2009	166	2.47	1.61
2000 - 2010	158	1.75	1.16
2000 - 2011	114	1.64	1.29
2001 - 2006	161	1.6	0.93
2001 - 2009	166	2.07	1.32
2001 - 2010	162	1.23	0.9
2001 - 2011	111	1.81	1.42
2006 - 2009	171	2.39	0.96
2006 - 2010	167	1.39	0.75
2006 - 2011	113	1.41	1.26
2009 - 2010	173	1.58	1.21
2009 - 2011	123	2.43	1.33
2010 - 2011	119	1.38	1.24

Tableau 3 - Ecart des points d'amers entre les différents jeux d'orthophotographies

NB : à cette étape de travail, l'Ortholittorale V2 de 2012 qui couvre le sud Vendée des Sables d'Olonne à St Vincent sur Jard n'était pas encore disponible. C'est la raison pour laquelle le nombre d'amers pour les comparaisons sur cette zone est sensiblement moins élevé.

Au regard d'un bilan complet sur l'ensemble des jeux de données (Tableau 3), ces premiers constats sont confirmés. Outre la qualité des clichés des photos historiques de 1920 et 1950, l'orthorectification a été réalisée probablement avec un nombre moins importants de points de calage pour ces photos plus anciennes, ce qui est plus particulièrement vérifié avec le jeu de 1920.

Dans le cas d'une étude historique de l'évolution et de l'analyse du recul des falaises, ces clichés historiques ont tout de même leur importance, les décalages sont en moyenne de 3,5 m (+/- 2 m) avec les levés les plus récents.

Ces différents tests ont mis en évidence :

- qu'il existe des décalages de quelques mètres entre les 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, et du besoin de jeux historiques suffisamment éloignés dans le temps, il a été décidé d'utiliser les 4 jeux suivants :

- les orthophotographies historiques de 1920 et 1950 ;
- les Ortholittorales V1 et V2 de 2000 et 2011/2012, cette dernière étant utilisée comme image de référence.

b) Echelle de travail et précision du lever

Ensuite, différents tests ont été réalisés concernant l'échelle à laquelle doit être réalisé le levé 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 d'information associée à l'image) et la précision des falaises (une échelle trop faible engendrant la perte des détails de la falaise).

L'échelle retenue pour le levé des falaises varie entre le 1/1 000 et le 1/1 500, fourchette qui, après différents tests, nous a paru présenter le meilleur rapport entre

visibilité et précision. A noter que nous considérons que, bien que ce levé 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 levé manuel a été estimée à 1 m (distance maximale obtenue lors de la répétition du levé 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 et 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 46 fournit une représentation schématique de ces différents indicateurs de trait de côte.

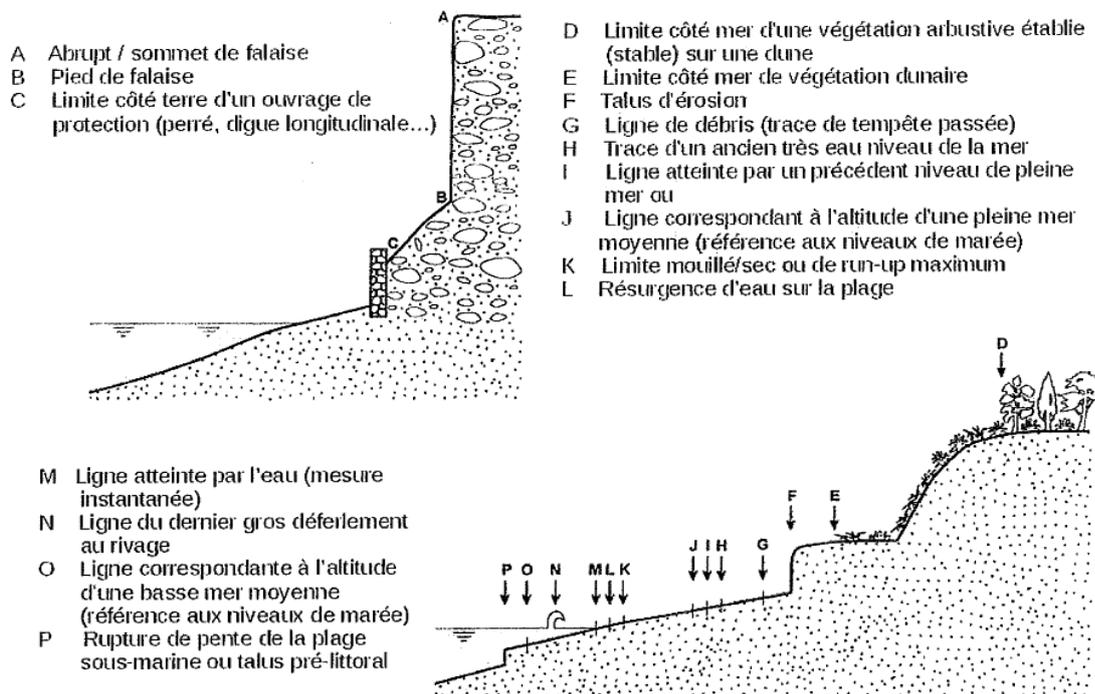


Illustration 44 – Représentation schématique de différents indicateurs de trait de côte (d'après Boak and Turner, 2005)

Par ailleurs, considérant uniquement l'objet falaise (indicateurs A, B et C de l'illustration 44), 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, puis l'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 avec l'action marine prédominante) ne soit pas visible sur les orthophotographies. Par ailleurs, les indicateurs sont parfois difficilement positionnables car soit masqués par l'ombre soit par la végétation arbustive (par exemple dans le secteur de Cayola à Château d'Olonne).

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 d'une cote constituée par une succession de ressauts topographiques, cf. Illustration 45).

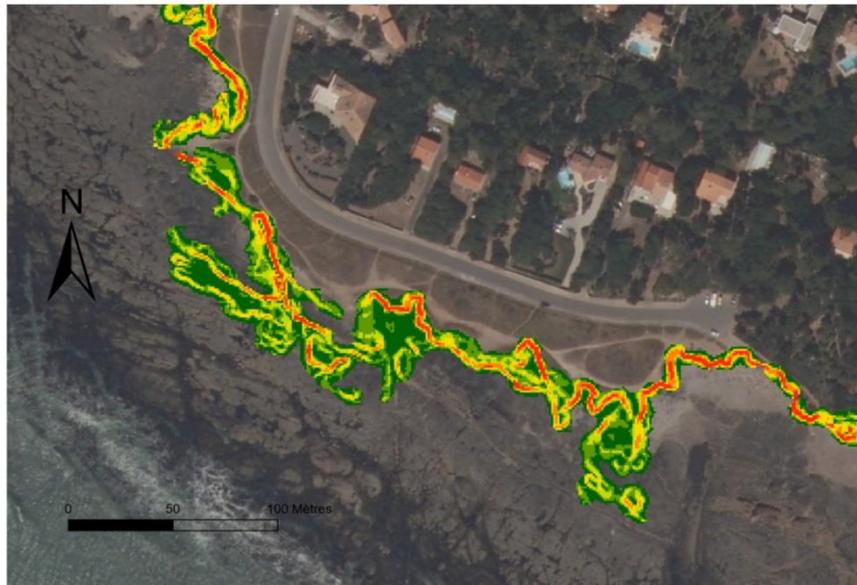


Illustration 45 – Exemple de cotes constituées de successions de ressauts topographiques de faible hauteur

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.	la végétation avance et recule 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 46 – 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.

4.2.3. Recul moyen obtenu par traitement automatique

Malgré les limites exprimées dans le paragraphe précédent 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)². 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.

a) Présentation de la méthode avec l'outil DSAS

L'application de la méthodologie suivante permet de calculer automatiquement le recul du trait de côte sur la période couverte par la quatre jeux d'orthophotographies retenues et de produire différentes données statistiques à l'aide de l'extension ArcGis DSAS (Digital Shoreline Analysis System). Son principe de fonctionnement est simple (Illustration 47) :

- A) Numérisation des traits de côte ;
- B) Création d'une ligne de base onshore ou offshore (parfois les deux) ;
- C) Génération de transect depuis la ligne de base, vers les traits de côte ;
- D) Traitements statistiques et mesure du recul.

² 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

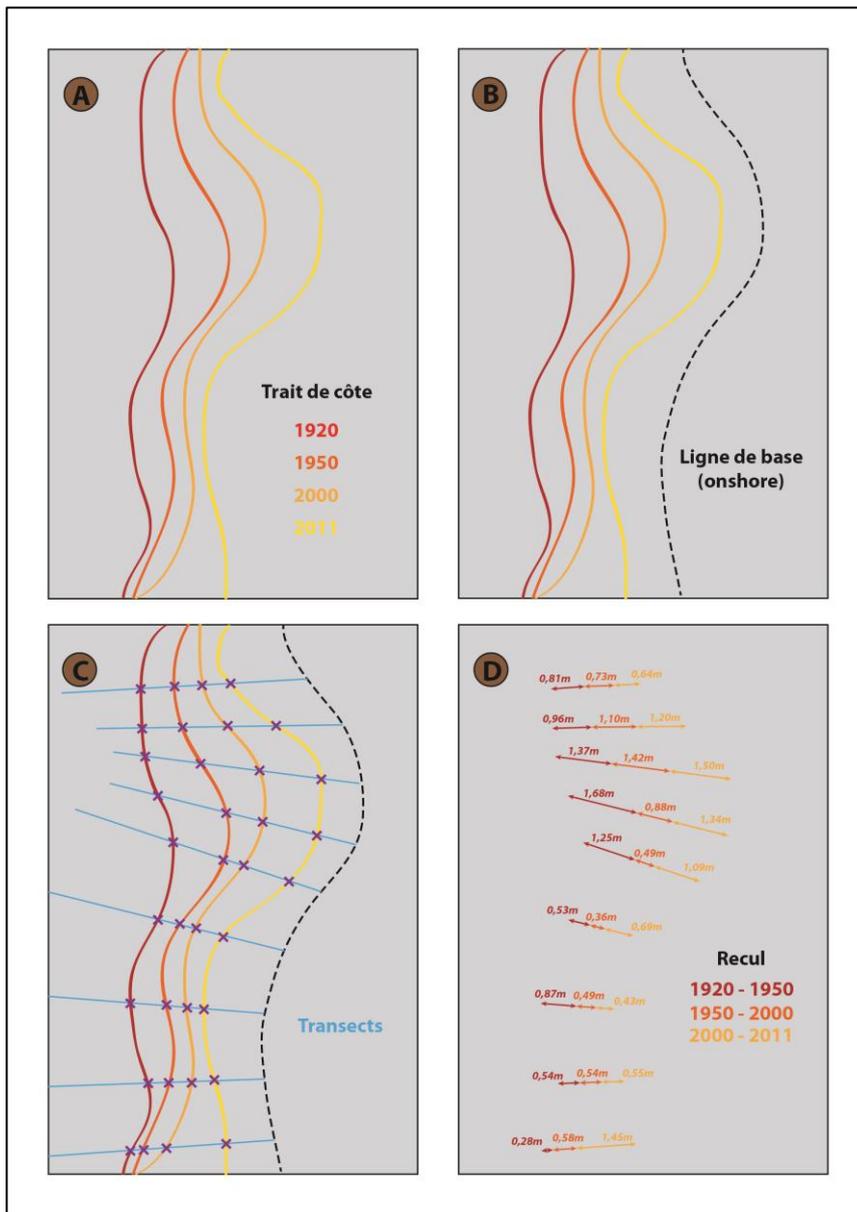


Illustration 47 - Schéma récapitulatif de la méthode DSAS

La première étape consiste donc à numériser les traits de côte de tout le littoral à falaise pour chacune des dates retenues, à l'échelle du 1/1000 (A). Il est nécessaire de rester rigoureux et se fixer sur une ligne de numérisation qui restera la même d'une date à l'autre. Les têtes de la falaise sont les traits généralement les plus visibles. Néanmoins la principale difficulté réside dans le fait que les limites retenues par priorité 1) de la tête dénudée 2) du contraste entre la tête et le pied 3) de la limite de végétation, ne sont pas reproductibles d'un jeu à l'autre. Les secteurs qui ne peuvent être comparés sont exclus du traitement.

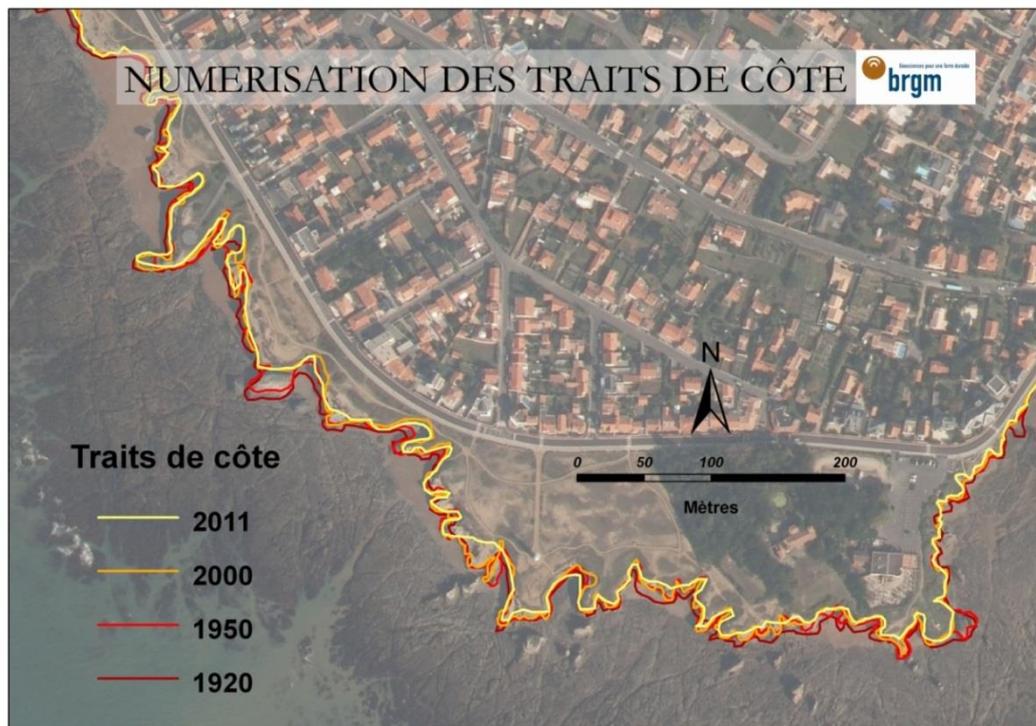


Illustration 48 - Numérisation des traits de côte sur un secteur de la Corniche Vendéenne

Dans un second temps, il est nécessaire de dessiner une ligne de base (Baseline) qui servira de support pour mesurer les écarts entre les différentes lignes et le recul (il s'agit d'une ligne imaginaire de référence permettant de fournir une origine aux transects perpendiculaire aux différents traits de côte). Cette ligne peut être continue onshore ou offshore ou bien discontinue en alternant les deux côtés. Elle ne doit jamais couper aucune des lignes de trait de côte. L'option choisie a été de générer automatiquement une ligne de base en créant une zone tampon autour des traits de côte numérisés. Le résultat est présenté par l'illustration 49.

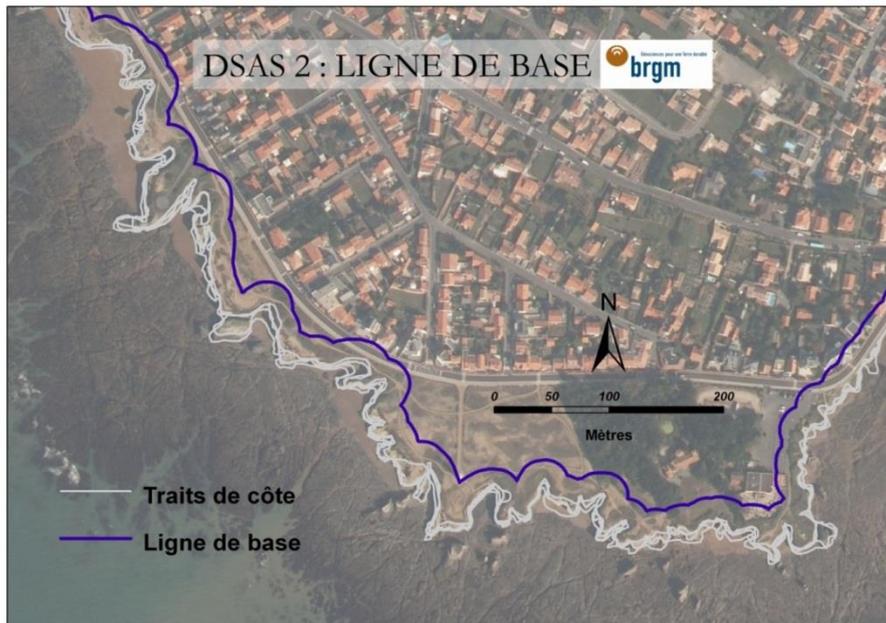


Illustration 49 - Création d'une ligne de base

Les transects sont des segments, de longueur définie, générés à intervalles constants et partant de la ligne de base vers les lignes de trait de côte numérisées. Ils doivent être correctement paramétrés en fonction du type de côte étudiée, du caractère onshore ou offshore de la ligne de base ainsi que de la distance qui sépare celle-ci des traits de côte.

Paramétrage des transects :

3 principaux paramètres permettent la variabilité des transects.

Espacement (Transect Spacing) : Cet outil permet de choisir l'écart voulu entre les transects qui seront générés. Ici, les indentations de notre trait de côte nécessitent un resserrement de ces derniers afin de ne pas trop lisser l'information et garder une précision suffisante. Un écart de 1 m (vignette N°5) est néanmoins trop faible et entraînerait un alourdissement conséquent des traitements par la suite. Un écart de 20 m en revanche (vignette N°6) générerait une perte d'information. Nous retenons donc un espacement de 5 m (par ailleurs cohérent avec les autres traitements réalisés).

Longueur des transects (Transects Length) : Les transects doivent recouper l'ensemble des traits de côte sur tout le linéaire côtier, ils ne doivent donc pas être trop court (vignette N°7). Trop long (vignette N°8) ils risquent de venir couper une deuxième fois les traits de côte dans certains secteurs et fausser les données obtenues par la suite.

Distance de lissage (Smoothing Distance) : Ce paramètre permet de générer une ligne fictive de lissage de la ligne de base, de longueur variable. En ne rentrant aucune distance, les transects seront tracés perpendiculairement à la ligne de base (vignette N°1). Plus la distance sera courte et plus les transects seront fidèles au tracé de la ligne de base (vignette N°2). Plus elle sera grande et plus la ligne de base sera lissée, tendant vers une ligne droite et des transects associés qui seront parallèles les uns aux autres (Vignette N°3).

Le tableau et les schémas suivants (Tableau 4 et Illustration 50) décrivent le paramétrage des vignettes.

N° transect	Espacement (m)	longueur (m)	Lissage (m)
1	5	50	Aucun
2	5	50	10
3	5	50	200
4	5	50	50
5	1	50	50
6	20	50	50
7	5	10	50
8	5	100	50

Tableau 4 - Présentation des variations de paramétrage des transects

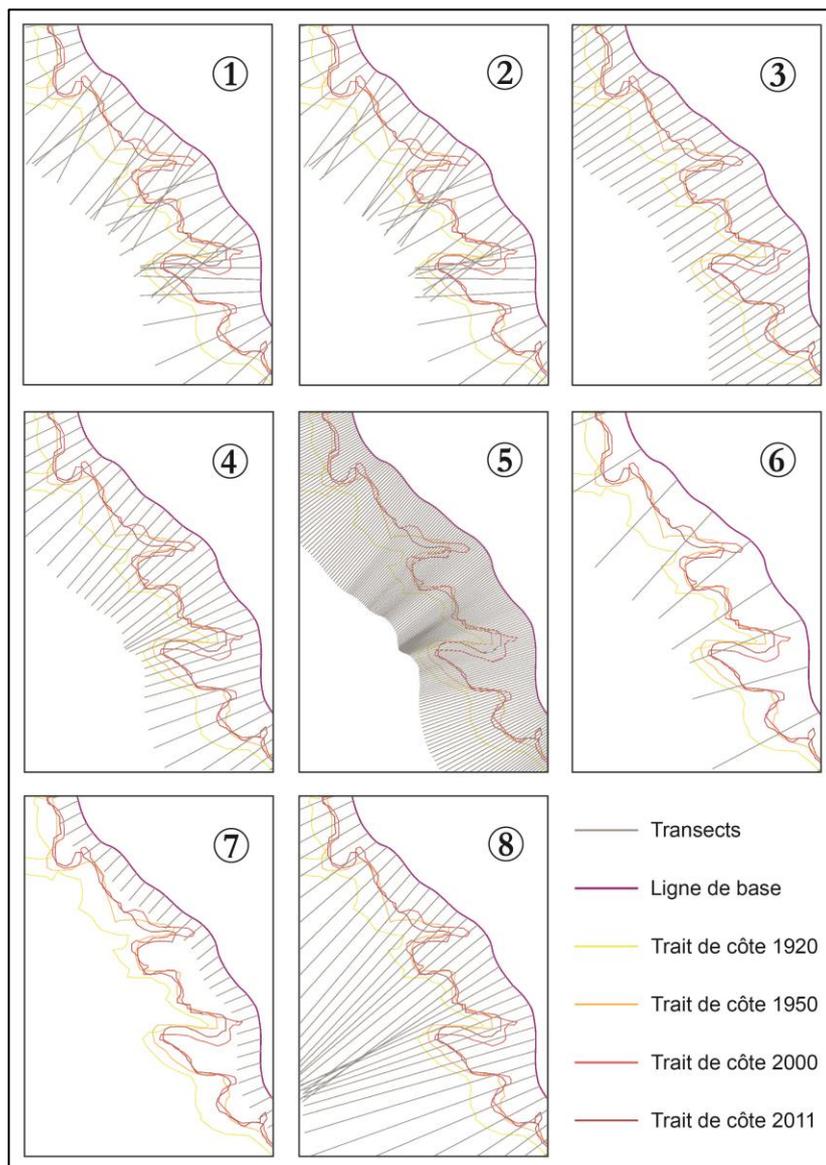


Illustration 50 - Représentation des différents paramétrages des transects

C'est le choix N°4 qui a été retenu grâce à un paramétrage intermédiaire satisfaisant.

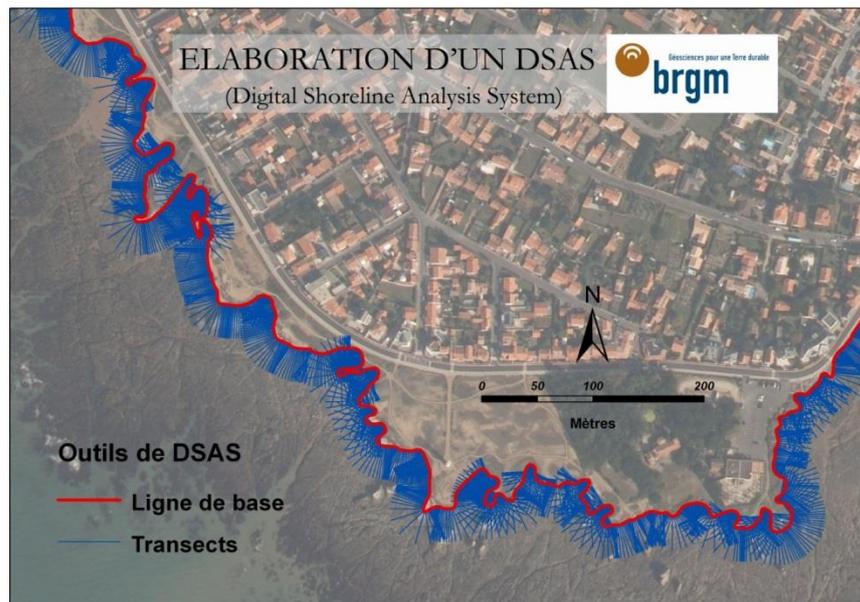


Illustration 51 - Génération des transects

Une fois les transects générés (Illustration 51) et malgré le paramétrage sélectionné, une partie d'entre eux risquent de venir fausser l'information à cause de leur positionnement et de la nature du linéaire. En effet les traits de côte numérisés sont souvent marqués par un degré d'indentation important. Ces indentations ne sont pas toujours perpendiculaires au trait de côte et sont variables d'une date à l'autre. Il est donc nécessaire d'effectuer un nettoyage complet en supprimant une partie des transects qui recoupent plus d'une fois un même trait. Les principales erreurs rencontrées sont les suivantes (Illustration 52) :

A – les transects rouges coupent les traits de côte dans une bordure d'indentation qui ne semble pas avoir beaucoup évolué, pourtant ils risquent de mesurer un recul important en interprétant un approfondissement de l'indentation plutôt qu'un élargissement.

B - Les transects rouges sont générés en fin de secteur. Le lissage de la ligne de base (Smoothing distance) à 50m leur donne un angle absurde, il convient donc de les supprimer.

C – La courbe dessinée par la ligne de base entraîne la génération de transects rouges qui se croisent avant de couper les traits de côte, ce qui fausse les résultats éventuels puisque ceux de gauche vont mesurer l'évolution du trait de côte côté droit alors que ceux de droite vont la mesurer du côté gauche. Une fois les statistiques générées, cela entraînera des erreurs dans la représentation linéaire du recul.

D – Il est indispensable que les transects coupent au moins 2 traits de côtes à deux dates différentes pour en mesurer le recul, les transects pour lesquels ce n'est pas le cas peuvent être supprimés.

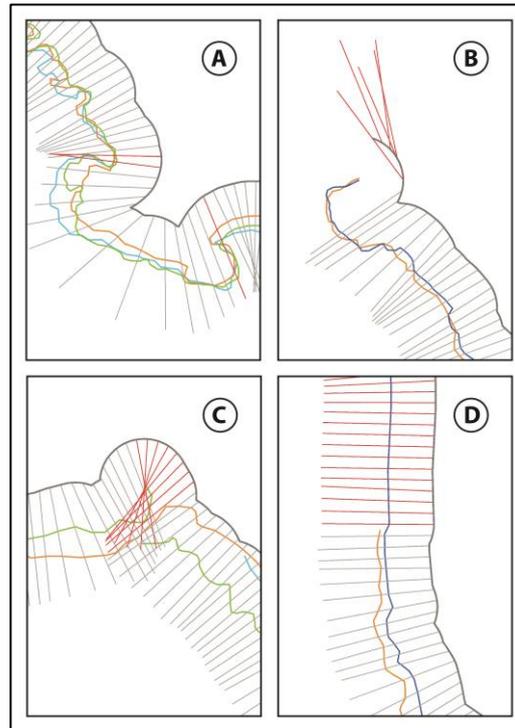


Illustration 52 - Nettoyage des transects

Ce nettoyage a été indispensable pour la suite de l'analyse du recul. Des 11 000 transects générés au départ, 8 000 environ ont été conservés à l'issue de cette étape de nettoyage.

b) Estimation de la marge d'erreur liée à l'imprécision des orthophotographies

La marge d'erreur liée à l'imprécision des orthophotographies utilisées dans le traitement doit être connue. Elle regroupe différents facteurs d'incertitude qui doivent être évalués indépendamment.

La résolution de l'image est le premier facteur d'imprécision (1). Il peut se mesurer en retenant la longueur de la diagonale dans un carré de 4 pixels. Par exemple, l'image de 2000 qui possède une résolution de 0,5 m entraînera une erreur de résolution de 1,41 m.

La qualité de la numérisation du trait de côte en fonction de la qualité de l'image (2), sa lisibilité, son échelle d'exploitation ainsi que l'imprécision due à l'opérateur de saisie lors du travail de digitalisation constituent également des facteurs d'incertitude forts. Il s'agit de prendre en compte les limites de discernement et donc d'une possible confusion entre la tête de falaise, le pied, ou bien la limite de végétation, etc.

Enfin, le troisième facteur d'erreur retenu (3) est celui de l'incertitude liée à l'ortho rectification des images, leur calage, etc. Ce travail fait référence au chapitre 4.2.2. La moyenne de ces écarts sera la marge d'erreur retenue pour ce critère. Ainsi, pour l'image de 1950, cela représente un écart moyen de 2,24 m.

Ces trois facteurs retenus vont ensuite être joints pour établir une valeur globale d'incertitude en considérant une année de référence (2000 ou 2011).

Le tableau ci-dessous fait un premier état de la marge d'erreur calculée. Notons que les orthophotographies de 1920 sont réparties en 3 mosaïques différentes, avec des valeurs d'incertitude dans leur calage différentes, et des zones de superposition. Par commodité nous ne conserverons qu'une valeur moyenne pour l'ensemble de ces mosaïques.

Marge d'erreur en metres

Date	1920	1950	2000	2011
Résolution	0,20	0,50	0,50	0,50
(1)Erreur résolution	0,57	1,41	1,41	1,41
(2)Interpretation/lisibilité	2,50	3,00	1,50	1,20
(3)Dérive orthorectification/2011	3,52	2,24	1,64	0
(3)Dérive orthorectification/2000	2,29	2,60	0	
Marge d'erreur globale / 2011	4,35	4,00	2,63	1,85
Marge d'erreur globale / 2000	4,89	4,56	2,22	

Dans le traitement qui suivra, l'objectif, hors considération des incertitudes, sera de comparer les traits numérisés dans le pas de temps le plus large (un trait historique/un trait de référence, 1920/2011 étant optimal).

Ainsi en fonction des différentes discontinuités des traits de côte numérisés, et donc du pas de temps considéré, ce ne seront pas les mêmes valeurs d'incertitude qui entreront en ligne de compte.

Les marges d'erreurs moyennes issues des différents binômes possibles sont alors calculées en reprenant les valeurs de marge d'erreur globale relatives à l'année de référence.

L'incertitude, ou erreur moyenne, est alors la racine carrée de la somme des carrés des marges d'erreurs des années considérées, divisée par le nombre d'années. Ce résultat est ensuite ramené en m/siècle (Tableau 5).

1920	1950	2000	2011	Erreur moyenne	Nombre d'années	Marge d'erreur moyenne en m/siècle	Années comparées
				5.37	80	6.7	1920/2000
				5.07	50	10.1	1950/2000
				4.73	91	5.2	1920/2011
				4.41	61	7.2	1950/2011

Tableau 5 - Marges d'erreurs en fonction des années de comparaisons

L'incertitude dans l'analyse du recul à 100 ans s'échelonne sur des moyennes comprises entre 5,2 m à 10,1 m. En ne considérant que 2011, l'écart se réduit avec des moyennes comprises entre 5,2 m et 7,2 m.

Par précaution une marge d'erreur de 7 m peut être retenue.

c) Calcul du recul

Le paramétrage du module DSAS doit être effectué de manière rigoureuse afin d'optimiser les résultats et leur fiabilité. La dernière étape consiste à lancer les calculs statistiques sur les transects et mesurer les écarts entre les lignes de traits de côte numérisées. Les calculs sont automatisés et les statistiques sont générées dans une nouvelle table attributaire qui renseigne chaque transect. Le module propose différents calculs statistiques souvent orientés pour les côtes meubles sableuses où les phénomènes d'accrétion sont possibles.

Pour son application dans le cas de côtes rocheuses, c'est l'EPR (End Point Rate) ou l'évolution moyenne annuelle qui peut être utilisée.

Ce paramètre est calculé en rapportant l'évolution nette du trait de côte au nombre d'années entre le plus ancien et le plus récent trait. Le principal avantage de ce calcul est qu'il ne nécessite que 2 dates différentes pour être mesuré, néanmoins, dans le cas où beaucoup de dates sont disponibles, toutes les dates intermédiaires sont ignorées. Les variabilités de l'évolution ne sont pas prises en comptes (exemple : succession de périodes d'érosion et d'accrétion). **L'intérêt d'un tel calcul est de permettre de palier les interruptions de la numérisation du trait de côte à certaines dates lorsque l'information n'est pas disponible ou interprétable.**

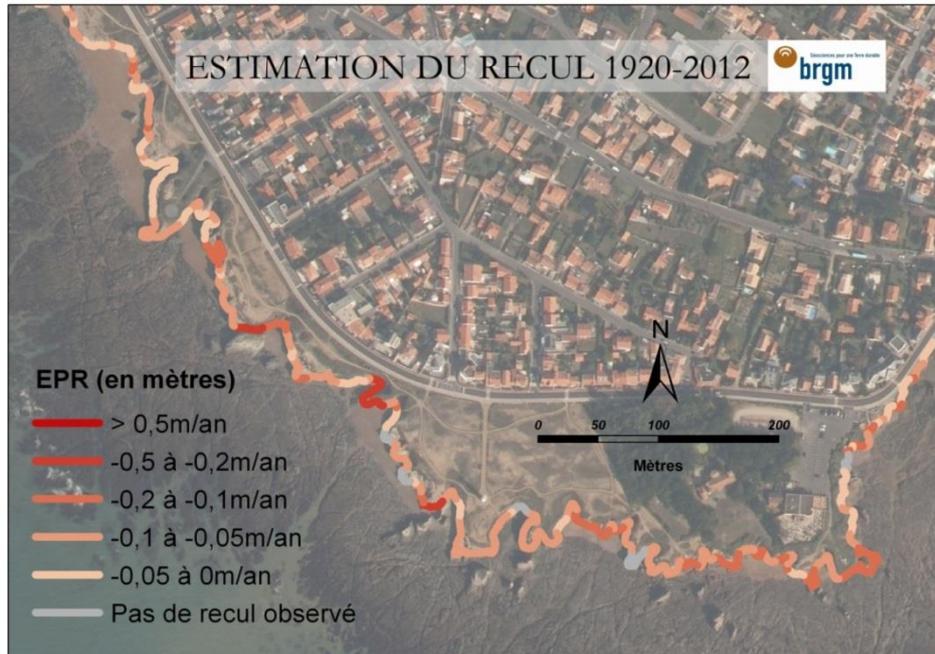


Illustration 53 - Exemple du recul moyen annuel entre 1920 et 2011/2012 calculés tous les 5 m, secteur sud de la Corniche Vendéenne, St-Hilaire-de-Riez

Comme mentionné plus haut, ce calcul doit être, compte-tenu des incertitudes liées aux données de base utilisées et à la précision du levé, considéré avec une certaine prudence.

L'application du modèle DSAS est une méthode relativement fiable pour traiter de grands ensembles. Elle permet d'automatiser les calculs et d'obtenir une grande précision ainsi qu'une multitude de données statistiques à exploiter. Néanmoins, si son application sur les côtes sableuses linéaires est très intéressante, cela n'est pas toujours le cas sur les côtes rocheuses. En effet, le caractère irrégulier de certains secteurs tend à être lissé lors de la création des transects. Lorsqu'un axe d'indentation est parallèle au linéaire, le recul en profondeur n'est pas analysé puisque le transect va venir le couper latéralement. Ce sont pourtant ces axes d'indentation qui devront être surveillés car ils sont les plus actifs en termes d'érosion.

De plus, le traitement DSAS se base sur la numérisation des traits de côte. Or, cette numérisation peut parfois être imprécise entre la tête ou le pied de la falaise à différentes dates, les photographies sont parfois floues et les objets difficiles à distinguer précisément. Ce traitement est donc tributaire de ces imprécisions et, il convient de se méfier du fait que sur certains secteurs la mesure d'un recul ne soit que le fruit de ces erreurs car les deux points comparés ne sont pas les mêmes.

4.2.4. Recul maximum ponctuel

Compte-tenu de l'ensemble des éléments exposés dans le paragraphe précédent, il a été décidé de conforter le traitement systématique des différentes positions des traits numérisés sur orthophotographie (Image photographique sur laquelle ont été corrigées les déformations dues au relief du terrain, à l'inclinaison de l'axe de prise de vues et à la distorsion de l'objectif. Une orthophotographie peut toutefois présenter des déformations résiduelles et des manques de couverture d'autant moins négligeables que les pentes du terrain sont plus fortes et les superstructures plus nombreuses et élevées).

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

- confrontant dans la mesure du possible 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 tout 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.

Des points de comparaisons ont été digitalisés sur l'ensemble du linéaire et pour les 4 jeux de photographies aériennes retenus (1920-1950-2000-2011/2012). L'objectif consiste à repérer des indicateurs de falaises qui montrent une cinétique franche sur ce laps de temps (Illustration 54).

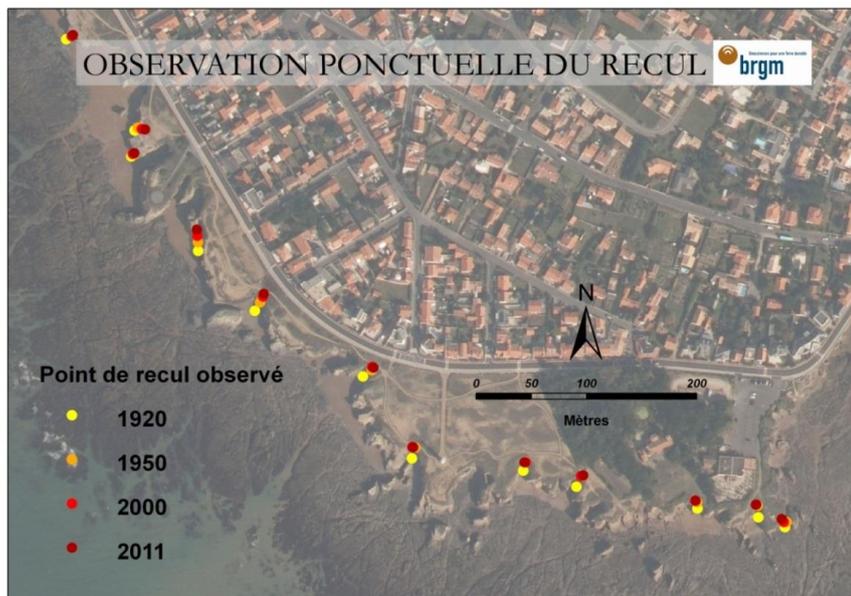


Illustration 54 - Points d'observation ponctuelle du recul, secteur de la Corniche Vendéenne

Le traitement suivant amène deux résultats : la mesure du recul et sa direction (Illustration 55).

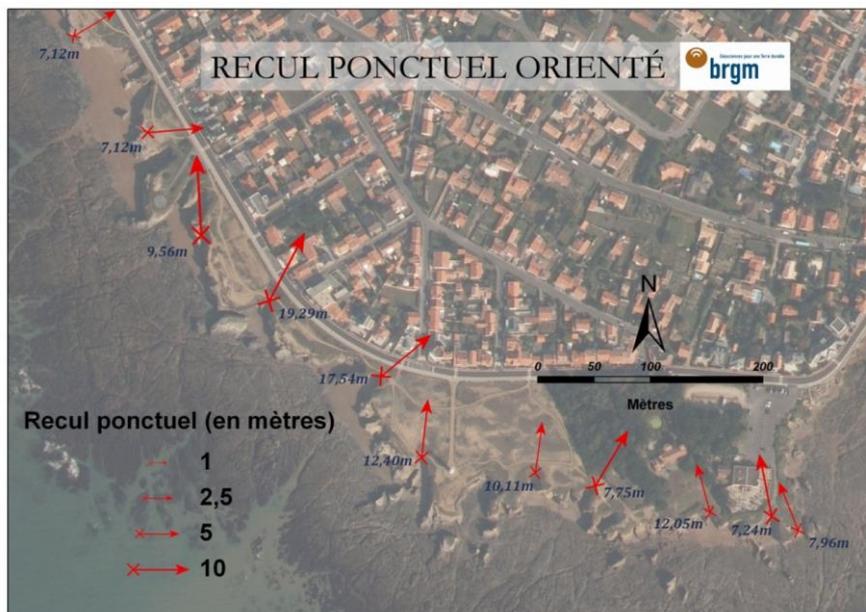


Illustration 55 - Caractérisation des points d'observation du recul en m/siècle

L'information n'est donc pas linéaire et complète puisqu'elle dépend de la lisibilité des informations de départ (photographies) mais elle apporte des éléments supplémentaires quant au processus d'érosion qui touche les falaises. La méthode avec le DSAS permet de mesurer le recul, cette seconde méthode permet de le caractériser.

Ce sont au total 723 points d'observations pour l'analyse du recul qui ont été réalisés. 689 concernent les secteurs rocheux retenus.

On constate une complémentarité entre ces deux méthodes. Ces recherches aboutissent donc à une mesure linéaire du recul, une mesure ponctuelle ainsi que l'orientation de ce dernier.

Contrairement aux côtes sableuses dont l'avancée ou le recul sont linéaires, la côte rocheuse se constitue d'une multitude d'irrégularités, d'anfractuosités qui évoluent différemment les unes des autres. La composition de la roche, son pendage, ainsi que sa fracturation ou son niveau d'altération vont décider de son évolution. L'analyse rigoureuse d'une côte rocheuse va donc nécessiter la prise en compte de tous ces éléments et l'on ne pourra pas traiter du recul sur une échelle très large. L'érosion se caractérise principalement par des axes de pénétration où le phénomène se fait plus actif et ce sont précisément ces secteurs qui pourront être surveillés. Il était donc indispensable de les identifier.

4.2.5. Résultats retenus pour l'analyse et méthode

Les résultats retenus sont ceux obtenus par transects avec le traitement DSAS étant donné de la plus grande régularité et représentativité du linéaire de côte étudié.

Les relevés ponctuels établissent une base de référence et de comparaison mais ne seront pas intégrés dans l'estimation finale du recul par secteur homogène.

La cartographie finale de l'aléa recul des falaises et talus à 100 ans est présentée dans le paragraphe 5.3.1.

4.3. INVESTIGATIONS DE TERRAIN

Outre les apports présentés dans le paragraphe 4.2, 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 4.1) ;
- une description succincte des formations constituant cette falaise (ou talus) et de leurs caractéristiques géo-mécaniques ainsi que de leurs éventuelles propensions à être affectées par des mouvements de terrain ou de l'érosion localisée ;
- une identification des événements encore détectables sur site au moment de la visite ;
- la présence d'ouvrages de confortement ou autres aménagements 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. En effet, concernant l'altération des roches par exemple, la seule utilisation des données de l'atlas du littoral ne nous a pas paru suffisante.

Le deuxième point important a été d'observer les nombreuses discontinuités lithologiques des versants des falaises et talus. La description des natures et des puissances verticales de l'empilement des différentes formations (substratum, altération, et formations superficielles) s'est avérée indispensable et complémentaire pour mieux caractériser la nature des versants.

L'ensemble des données ont été reportées sur des fiches de terrain.

Au total, 15 jours de terrains ont été réalisés pour couvrir la totalité du littoral.

Ces visites de terrain ont permis la rédaction de 67 fiches et la prise de 3514 photographies géoréférencées. L'ensemble des informations collectées a été intégré au SIG.

Les fiches récapitulent et synthétisent les caractéristiques des différents secteurs.

4 thèmes sont abordés :

1/ géographie, géomorphologie et géologie ;

2/ indicateurs d'érosion ;

3/ évènements et enjeux ;

4/ niveaux d'aléa instabilité et recul.

5. Interprétations

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

Le littoral de Vendée 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 de recul et d'érosion.

Au total, 67 zones homogènes ont été identifiées et décrites. La longueur moyenne des tronçons est de 572 m. Ceux-ci sont de tailles variables. Le plus petit tronçon mesure 120 m et le plus long, un peu plus de 1740 m.

5.2. DETERMINATIONS 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 de dresser des figures géomorphologiques, conditionnées par la nature lithologique des formations (Illustration 56).

Lithologie - Pétrographie		Horizons décrits		Dominance matériel mobilisable		
				a	b	
				Chute		
Sols	Sols	Terre végétale			Pierres	
Formations superficielles	Roche allochtone : peu cohésif, meuble	Sable dunaire			Sable	
		Matériel soliflué (colluvions)			Pierres, galets, petits blocs, argiles et sables	
Substratum	(a) Roche sédimentaire secondaire litée, stratifiée // (b) Roche sédimentaire secondaire massive (dolomitisée, silicifiée) ou primaire (peu ou pas métamorphosée)	Bancs meubles argileux à sableux altéré, altération (b)			Pierres, petits blocs, argiles à sables	
		Bancs fissurés (diaclasses, réseaux de fissures)			Blocs, pierres	
		Bancs meubles argileux à sableux			Sans objet	Sables, argiles
		Bancs massifs et niveaux argileux (fractures, failles)				(a) Blocs, (b) Gros blocs, blocs
		Altérite 2 (allotérites) :				Sable, limon et argile, pierres
		Altérite 1 (isaltérites) : cohésif, friable				Sable, limon et argile, pierres, blocs
		Horizon fissuré (diaclasses, réseaux de fissures)				Blocs, pierres
		Massif fracturé (grandes diaclasses)				Blocs, gros blocs
		Massif sain (quelques grandes fractures, failles)				Gros blocs, blocs
		Marin	Sédiments présents en pied de falaise (cordons de galets, plages, chaos de blocs)			
					Galets, chaos de blocs	
					Sables, graviers	

Illustration 56 - Caractérisation et organisation verticale de la lithologie

Cette typologie orientée pour décrire les mécanismes d'érosion et du mode évènementiel (chute de blocs, éboulements, glissements) schématise à la fois :

- 1- l'organisation stratigraphique (organisation des horizons géologiques) ;
- 2- la lithologie, la nature de la roche (litée, massive, ...) ;
- 3- la pétrographie (débit de l'affleurement, structure et texture de la roche).

Ainsi des profils types ont été construits tout en respectant les dimensions et formes des falaises et leur position verticale vis-à-vis du niveau marin.

La résolution verticale est de 50 cm et son échelle exagérée de 5 fois sur les schémas.

L'illustration 57 présente un exemple simple d'interprétation du profil et de structure d'une falaise de calcaire dolomitique à bancs décimétriques à pluri-décimétriques. Les éléments mobilisables sont principalement des blocs. Des dépôts de sables éoliens recouvrent la falaise. La discordance avec un substratum schisteux se situe dans l'espace intertidal, ce qui signifie que, sur ce secteur (Bois de la Mine au Nord du port de Bourgenay à Talmont St Hilaire), c'est l'ensemble des dépôts carbonatés qui se trouvent érodés. Le cordon de galets adossé à un pied de falaise sapé et accompagné de nombreux blocs anguleux témoigne d'une érosion marine active.

Le calage des niveaux de marées hautes (mortes eaux, vives eaux et plus hautes mers astronomique) s'appuie sur le traitement de la Litto3D, et en lien avec le port de référence.

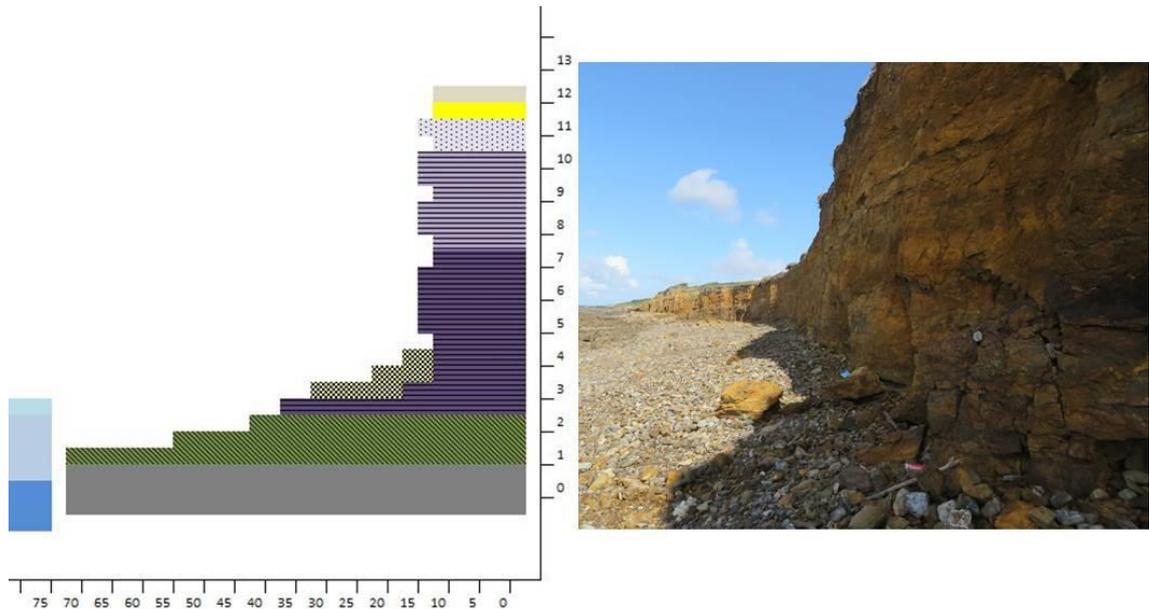


Illustration 57 - Exemple de représentation de structure d'une falaise côtière au Bois de la Mine (Talmont St Hilaire)

Chacune des 67 fiches est ainsi illustrée d'un schéma récapitulatif accompagné de sa légende.

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 et volumes mobilisables (pierre, blocs ou gros blocs) qui permet d'apprécier l'intensité des phénomènes pour les mouvements de terrain (cf. paragraphe 5.3.2) comme il est d'usage dans la qualification des aléas préconisés dans le guide d'élaboration des PPR MVT.

Dans la présente étude, deux aléas ont été définis :

- l'aléa Recul des falaises (correspondant à une bande de positionnement prospectif à + 100 ans du trait de côte ;
- 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.

Pour information, 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.

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 exprimé en cm/an ou m/siècle, 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. »

Le phénomène de recul a largement été observé et présente une cinétique moyenne sur la période d'observation globalement supérieure à la précision de la méthodologie. Ponctuellement (au niveau des zones de failles, des indentations, ou sur un petit

linéaire de tronçon homogène), le recul peut être important et atteindre voire même dépasser 0,3 m/an.

En reprenant les résultats de la partie 4.2, c'est un recul moyen qui a été quantifié pour chacun des 67 secteurs homogènes.

Ces valeurs de recul sont établies par secteurs homogènes, en moyennant la moitié supérieure des valeurs par transects du traitement avec le DSAS. Ces valeurs, rapportées à 100 ans, exprimées en cm/an ou m/siècle, constituent l'aléa fort du recul.

En comparaison avec les moyennes des valeurs du recul maximum issues des observations ponctuelles (cf. paragraphe 4.2.4), le résultat par secteur obtenu avec l'analyse DSAS est supérieur en moyenne de 5,5 cm/an. Ainsi il apparaît que le recul est maximisé et présente intrinsèquement une marge de sécurité face à l'incertitude dans l'équivalence des objets comparés.

Rapportée à l'ensemble du linéaire rocheux, la valeur moyenne, pondérée avec la longueur des secteurs, s'établit à 11,5 cm/an, avec un écart-type de 4,7 cm.

Enfin, une zone tampon de ces taux de recul a été générée en s'appuyant sur un trait de côte correspondant à la ligne d'égale altitude de 4,5 m qui borde au mieux falaises, talus et début des ressauts de la côte rocheuse (Illustration 58).

Dans le guide méthodologique, le recul doit être appliqué depuis la tête de falaise. Toutefois ce type de trait de côte est inexistant et ne peut être réalisé rigoureusement à partir d'orthophotographies, en l'occurrence de l'Ortholittorale V2, de manière homogène, ininterrompue et précise sur tout le linéaire étudié. Le report du recul évalué considère de cette manière un recul général de la côte rocheuse (falaises, fausses falaises et talus) et s'appuie sur un caractère géométrique connu, reproductible et suffisamment précis (point 1 qui suit), sur la totalité du linéaire.

En toute rigueur la zone de recul doit être appliquée depuis le sommet ou la limite de la zone rocheuse qui porte potentiellement les cicatrices d'une érosion, qu'elle soit marine ou continentale, à l'année de référence. Dans la pratique il conviendrait de réaliser ce relevé sur le terrain. Alors pour palier à cette incertitude quant au départ de la zone tampon, un calcul de l'éloignement moyen de la ligne des 4,5 m avec la tête a été calculé par secteur (Illustration 59). En moyenne sur toute la zone d'étude il s'établit à 5,5 m.

Cette extension, cartographiée sur les fiches, correspond au zonage global de l'aléa.

Il faut rappeler justement que des incertitudes (intégrées ou pas dans la cartographie finale) coexistent dans la lecture des zones de recul :

1. La précision du trait de côte réalisée à partir de l'isoligne 4,5 m de la Litto3D qui est de l'ordre du mètre, sera négligée.
2. La marge d'erreur de l'analyse du recul à 100 ans inhérente à la précision globale des orthophotographies exploitées est de l'ordre de 7 m (paragraphe 1.1.b).

3. Les incertitudes liées aux erreurs d'interprétation qui surestiment ou sous estiment est difficilement appréciable et inhérente à la méthodologie.
4. La validité de l'isoligne des 4,5 m pour représenter le trait de la tête de falaise (ou limite des aléas à la date de référence 2011/2012), support pour établir la zone de recul à 100 ans.

En toute rigueur l'incertitude liée aux orthophotographies (point 2) devrait être ajoutée à la valeur du recul à 100 ans pour le tracé de la délimitation de l'aléa. Néanmoins, comme cette incertitude n'est pas prise en compte dans les autres études (et notamment celles concernant le recul des côtes sableuses) et par souci d'homogénéité, il a été décidé de ne pas le faire.

Par contre l'incertitude liée à la précision du trait de côte (point 3) a été prise en compte *de facto* dans le tracé de l'extension de l'aléa reporté sur les fiches (en comparaison avec les points de recul maximum).

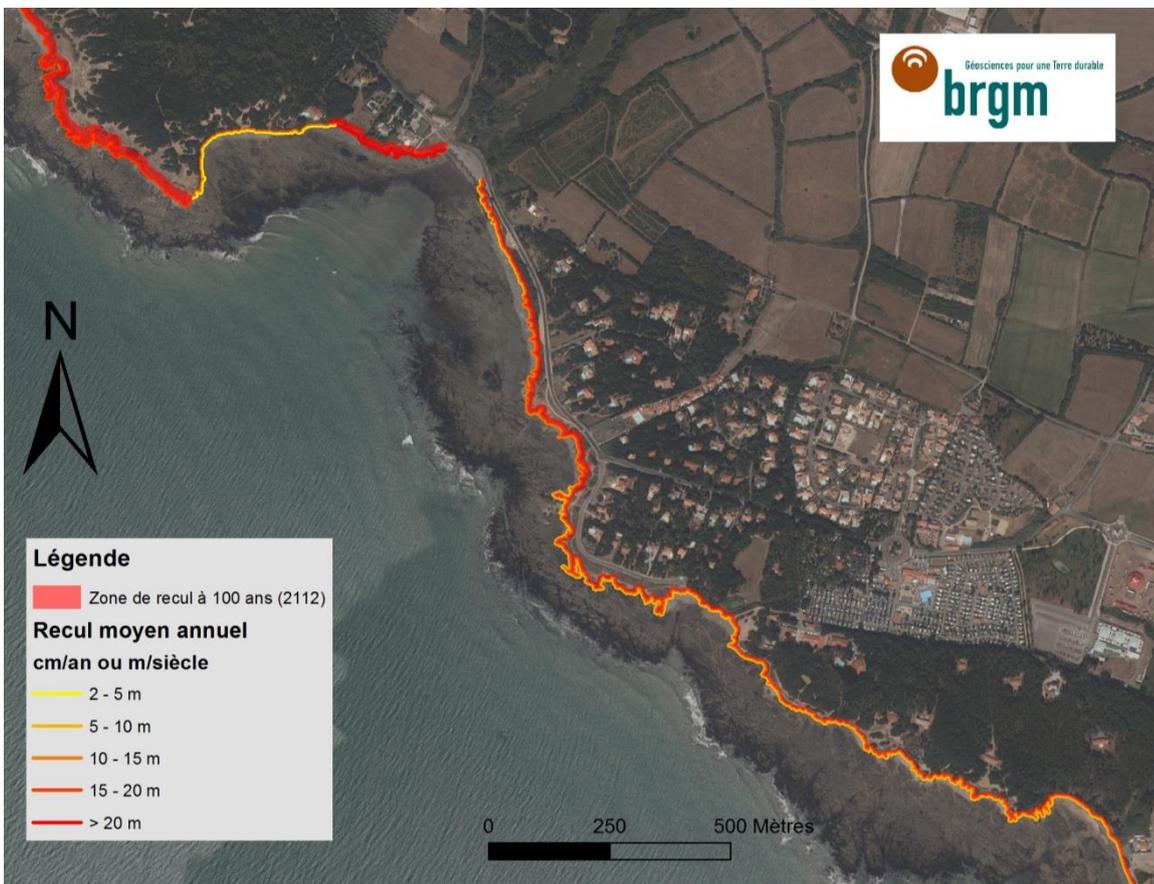


Illustration 58 – Taux de recul et zone de recul du pied de falaises de Cayola à Talmont-St-Hilaire

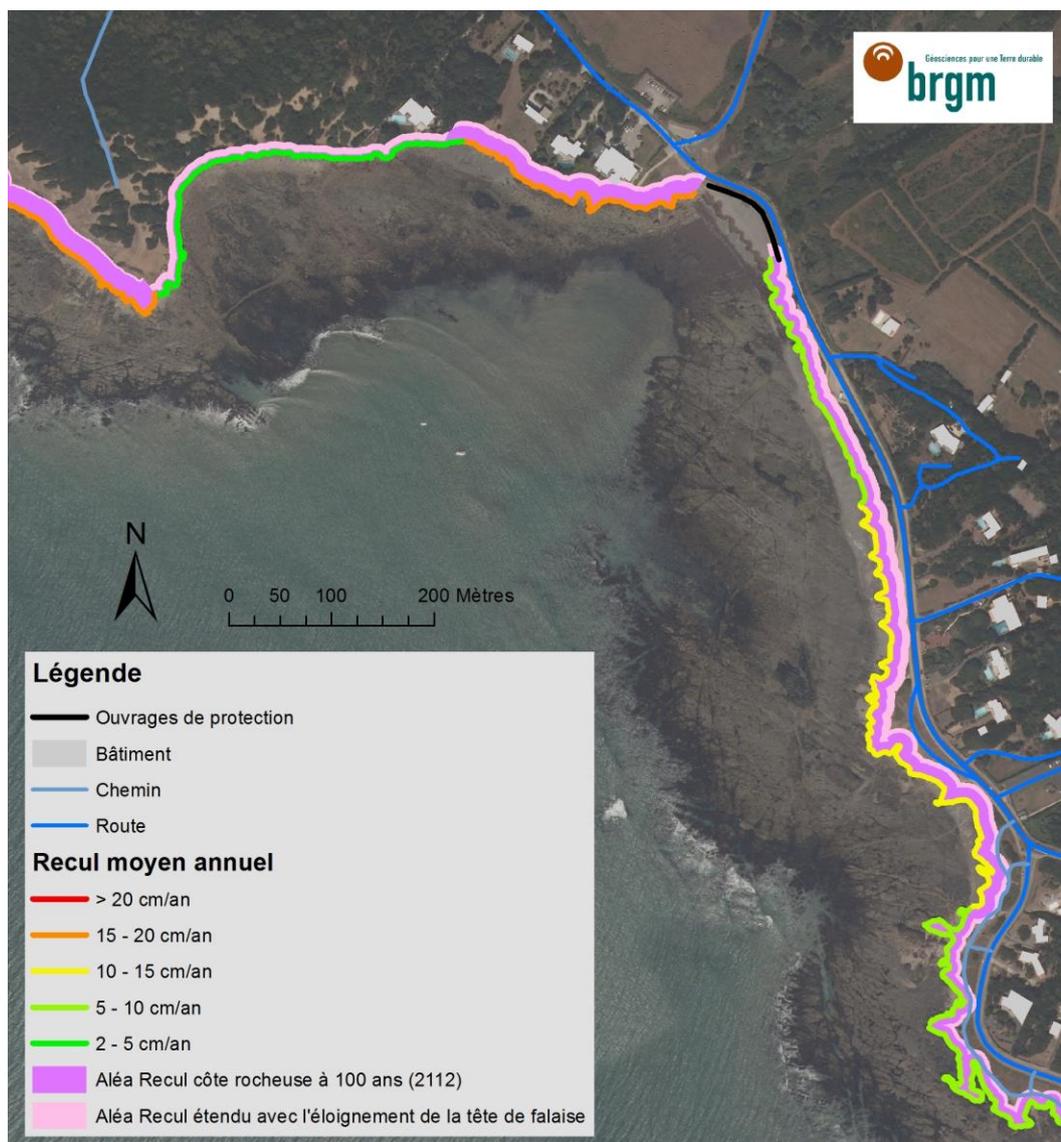


Illustration 59 - Cartographie du recul à 100 ans avec la prise en compte de l'éloignement de la tête de falaise

Prise en compte du changement climatique

Pour cette étude, comme pour la côte aquitaine (Aubie et al., 2011) et pour le littoral de la Loire-Atlantique (Plat et al., 2013), 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 protections (mur maçonné, enrochements ...). Ainsi, dans la majorité des cas concernés, une valeur moyenne du recul a été donnée à ces secteurs quand ils s'avéraient limités dans leur extension.

En revanche, bien que des valeurs de recul aient été établies, les secteurs sur lesquels existe aujourd'hui un enrochement massif ont été écartés du résultat de l'analyse. C'est le cas par exemple pour une large portion de la côte de Brétignolles-sur-Mer, ou encore de la zone du port de Bourgenay.

5.3.2. Aléa Mouvement de terrains

La caractérisation de l'aléa mouvement de terrain repose sur la synthèse des données collectées sur les mouvements de terrain, et principalement sur les investigations de terrain.

Mouvements de terrain retenus

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

- chutes de pierres ;
- chutes de blocs ;
- chutes de gros blocs ;
- éboulements et éboulements en masse ;
- glissements/coulées/ravinement.

Niveaux d'aléa retenus

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

- la référence à un type de 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 du phénomène sur la période considérée.

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, elle a été assimilée à la probabilité très faible ;
- 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 60.

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 ou masses instables 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 60 – 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, tout en considérant la pente et la hauteur.

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

Seuls les ouvrages de protection limités, isolés 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 (comportant 3473 photographies) ;
- les 3473 photographies ;
- une table de point comprenant un lien vers les photographies d'archives (plus ou moins anciennes) ;
- les 464 photographies d'archives ;
- une table de polygones présentant le numéro du tronçon homogène (réalisation par ordre chronologique du terrain et n'est donc pas continu) et comportant 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 pied de falaise en 2011 (issu du traitement de la Litto3D) et une table de polygones montrant la zone affectée par le recul d'ici à 2109 sur la base des connaissances actuelles.

Toutes ces données ont été consignées et intégrées à une importante base de données. Elles sont rattachées à une ligne de référence en tronçons de 5 m. Les 88 fiches d'observation renseignées durant les missions de terrain ont elles aussi été consignées et intégrées à la base de données.

Chaque information est rattachée à notre base de données centrale en fonction d'un niveau de rattachement que sont les segments de 5m, les divisions des secteurs terrain et les divisions finales pour les fiches d'aléa (Illustration 61).

L'intérêt a été de pouvoir produire tout type de traitements test en faisant varier les niveaux de regroupements et les paramètres. La cartographie de la hauteur par exemple, pourra se faire de manière précise sur chaque segment de 5m, ou bien être lissée sur un secteur entier pour pouvoir le comparer à un autre. Toutes les données peuvent être emboîtées, comparées et disséquées pour produire toutes sortes de statistiques. Une synthèse par commune est aussi possible.

La base de données a aussi été construite dans une volonté de continuité, elle constitue un état zéro.

Les fiches ont été réalisées directement à partir de cette base de données (Illustration 63).

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

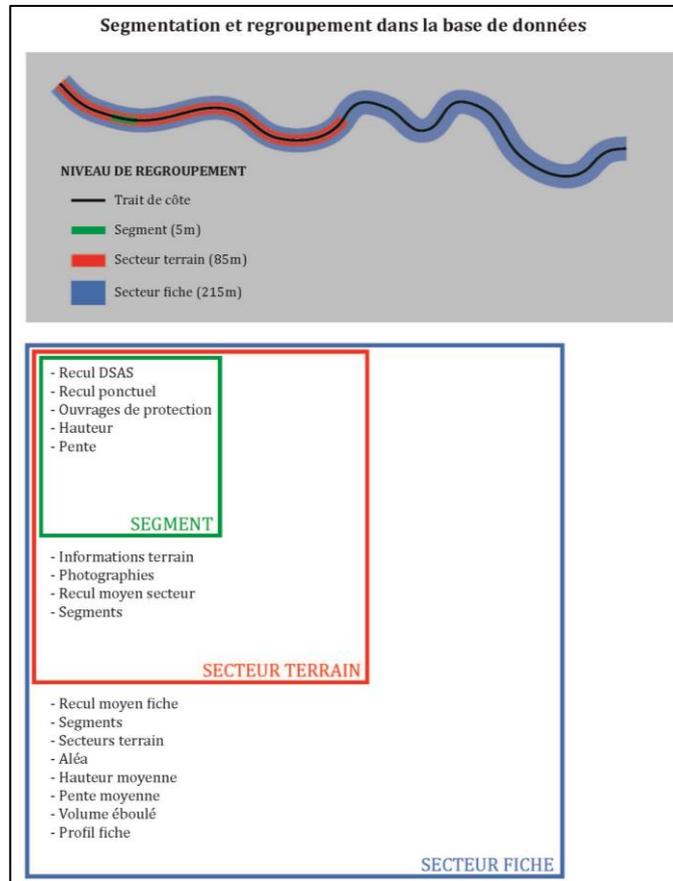


Illustration 61 - Schéma présentant la structuration des données

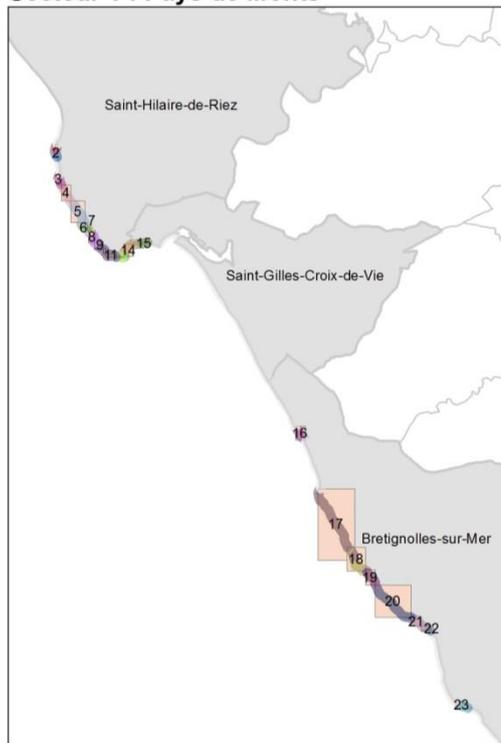
6.2. LES FICHES DES TRONÇONS HOMOGENES

6.2.1. Création des fiches récapitulatives par secteur homogène

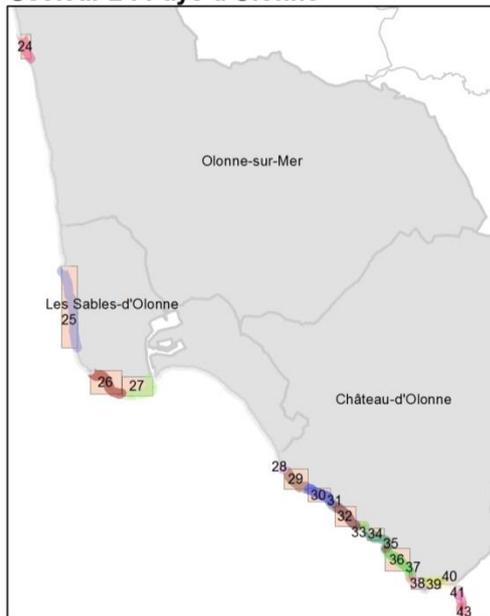
Pour chaque tronçon homogène, une fiche de présentation a été réalisée (Illustration 63) à partir d'ArcGis de manière automatique (Pages dynamiques).

67 fiches ont été générées et suivent le découpage suivant (Illustration 62) :

Secteur 1 : Pays de Monts



Secteur 2 : Pays d'Olonne



Secteur 3 : Pays Talmondais

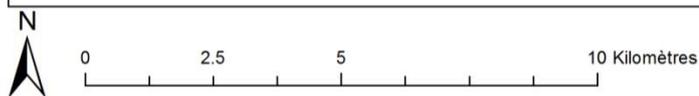


Illustration 62 - Découpage et indexation des fiches

Ces fiches récapitulent les points suivants :

- Identification : position et longueur du tronçon ;
- Généralités : brève description ;
- Coupe schématique et photographies récentes ;

- Descriptif détaillé : géologie, discontinuités, hydrogéologie, géométrie du versant, végétation, constructions, instabilités constatées ;
- Travaux et ouvrages existants ;
- Diagnostic de stabilité et catégorie géomorphologique ;
- Probabilité de départ par catégorie de taille des éléments ;
- Aléas.

Etant donné leur mode de conception, ces fiches peuvent être reproduites facilement en adaptant la mise en page au besoin. L'illustration ci-dessous (Illustration 63) présente un exemple de fiche. Elles sont fournies en annexe 3 présentée hors texte uniquement au format numérique PDF.

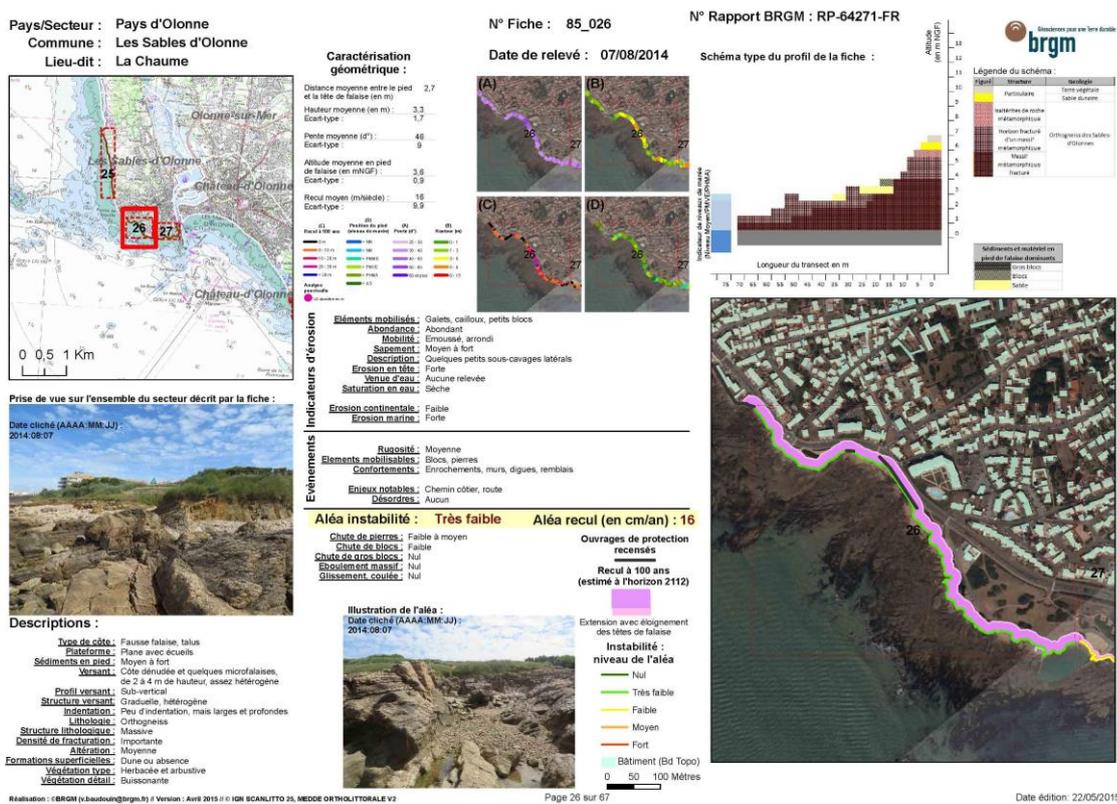


Illustration 63 - Exemple de fiche réalisée dans le cadre de cette étude

6.2.2. Description des notations, nomenclature

Type de côte :

Les talus : ce sont les ressauts globalement inférieurs à 2 m de hauteur, partiellement ou totalement masqués par des sédiments ou des cordons littoraux.

Les microfalaises : petites falaises avec des escarpements verticaux ou sub-verticaux de l'ordre de 2 à 4 m.

Les fausses falaises : côte rocheuse dénudée avec un versant de faible pente sans falaise apparente en front, mais pouvant présenter des parois verticales dans les indentations ou zones de criques.

Les falaises : falaises avec des versants verticaux ou sub-verticaux de plus de 4 m.

Plateforme :

Appréciation de l'irrégularité de la plateforme d'abrasion.

Sédiments en pied :

Abondance (absent, faible, moyen, fort) des sédiments en pied de falaise ou sur l'estran, répartition et type (plage, plage poche, cordons de galets ...).

Versant :

Brève description physique du versant.

Profil versant :

Forme générale du versant.

Structure du versant :

Description générale du type de variations des compétences et comportements mécaniques du versant.

Homogène : même résistance sur toute la hauteur.

Hétérogène : des variations séquentielles ou non organisées de niveaux ou masses de roches dures avec des roches tendres, molles, plastiques, meubles.

Graduelle : roche de moins en moins compétente de bas en haut, phénomène essentiellement lié aux processus d'altération.

Discordance : versant composé de deux natures lithologiques totalement différentes, principalement dans le cas d'un dépôt sédimentaire d'origine marine (meuble ou induré) ayant un comportement à l'érosion différent de son substratum cristallin.

Indentation :

Degré d'indentation de la portion de côte considérée, de nulle à forte. Caractérise l'hétérogénéité de la résistance à l'érosion sur un linéaire, et du niveau d'érosion préférentielle.

Densité de fracturation et/ou de fissuration :

Quantifie l'état général de fracturation du massif, de faible (>10m) à fort (<1m).

Altération :

Niveau d'altération, présence et proportion d'allotérites (meuble), d'isaltérites (peu induré).

Formations superficielles :

Description du type de formations superficielles.

Végétation :

Type de végétation (pelouse, arbustive, arborée) et état de couverture de la végétation (érodée, partielle, totale ...).

Éléments mobilisés :

Taille des éléments présents en pied de falaise qui participent à l'érosion mécanique, par percussion (pierres, galets blocs ...).

Abondance :

Abondance des éléments en pied de falaise (absent, rare, présent, abondant, saturé).

Mobilité :

Indices de mobilité du matériel érosif.

Anguleux : pas de traces de mouvement ce qui se traduit par un matériel faiblement voire pas mobile. Peut être le cas d'un matériel très récent qui n'a pas eu le temps d'être mobilisé.

Emoussé : matériel qui porte des marques de mouvements (chocs, éclats).

Arrondis : matériel constamment mobilisé.

Sapement :

Encoche en pied de falaise provoquée par la percussion du matériel présent en pied. Elle peut-être ancienne ou active, et évoluer en cavernage.

Erosion en tête :

Intensité du recul ou de la dégradation de la tête de falaise, par les actions de l'érosion continentale, anthropique (fréquentation, aménagements), et dans une moindre mesure, marine.

Venue d'eau :

Eau de surface, ruissellement : écoulement de surface, ravinement.

Eau souterraine : suintements, sources.

Saturation en eau :

Niveau de saturation en eau de la falaise (sèche, humide, saturée).

Erosion marine :

Niveau d'intensité d'érosion (de nulle à forte) marine par l'action mécanique lié à l'hydrodynamisme, par la percussion du matériel en pied, le sapement, par lessivage des parois, et dans une moindre mesure chimique. Cette action d'érosion décroît du bas vers le haut.

Erosion continentale :

Niveau d'intensité d'érosion (de nulle à forte) qui comprend l'érosion hydrique avec l'action de l'eau de surface (ravinement par ruissellement), météorique (érosion par splash, percussion de la goutte d'eau). La saturation en eaux souterraines de la falaise combinée à des propriétés alternant entre des niveaux ou couches perméables et imperméables, argileuses, peut amener à des instabilités. Elles peuvent conduire à des chutes de blocs, éboulements ou bien même des glissements, liés aux surcharges, qui tendent à rééquilibrer la pente du versant. Les sources traduisent généralement des niveaux ou secteurs plus sensibles à l'érosion.

L'action de l'érosion continentale est très variable au gré des caractéristiques litho-structurales, hydrogéologiques et des réseaux d'écoulements.

Rugosité :

Le niveau de rugosité du versant noté de nulle à forte, traduit la prédisposition du versant à la chute de blocs.

Éléments mobilisables :

Taille et abondance du matériel susceptible de décrocher des parois.

Confortements :

Brève description des différents ouvrages mis en place pour la lutte contre l'érosion.

Enjeux notables :

Aménagements et constructions susceptibles d'être impactés par l'action de l'érosion.

Désordres :

Ouvrages et aménagements publics ou privés (ouvrages de protection, installations de lutte contre l'érosion, aménagements de loisirs, voirie, foncier ...) impactés par l'érosion (recul et/ou instabilité).

6.3. ALEA PAR SECTEUR ET COMMUNE ET PREMIERES RECOMMANDATIONS

6.3.1. Vue générale

Mouvement de terrain :

En Vendée, aucun aléa fort mouvement de terrain n'a été attribué. Sur les 38,4 km étudiés, les secteurs où la proportion de falaises concernée par un aléa mouvement de terrain moyen représente 33 % du linéaire (12,7 km), 31,4 % (12 km) pour un aléa faible, 23,2 % (8,9 km) pour l'aléa très faible et 12,4 % (4,7 km) pour un aléa nul (Illustration 64).

Ce résultat est en partie lié au fait que la côte rocheuse est peu élevée, avec une hauteur moyenne de l'ensemble des zones considérées de 5,6 m, pour une hauteur maximale enregistrée à 14,5 m (fiche 85_021).

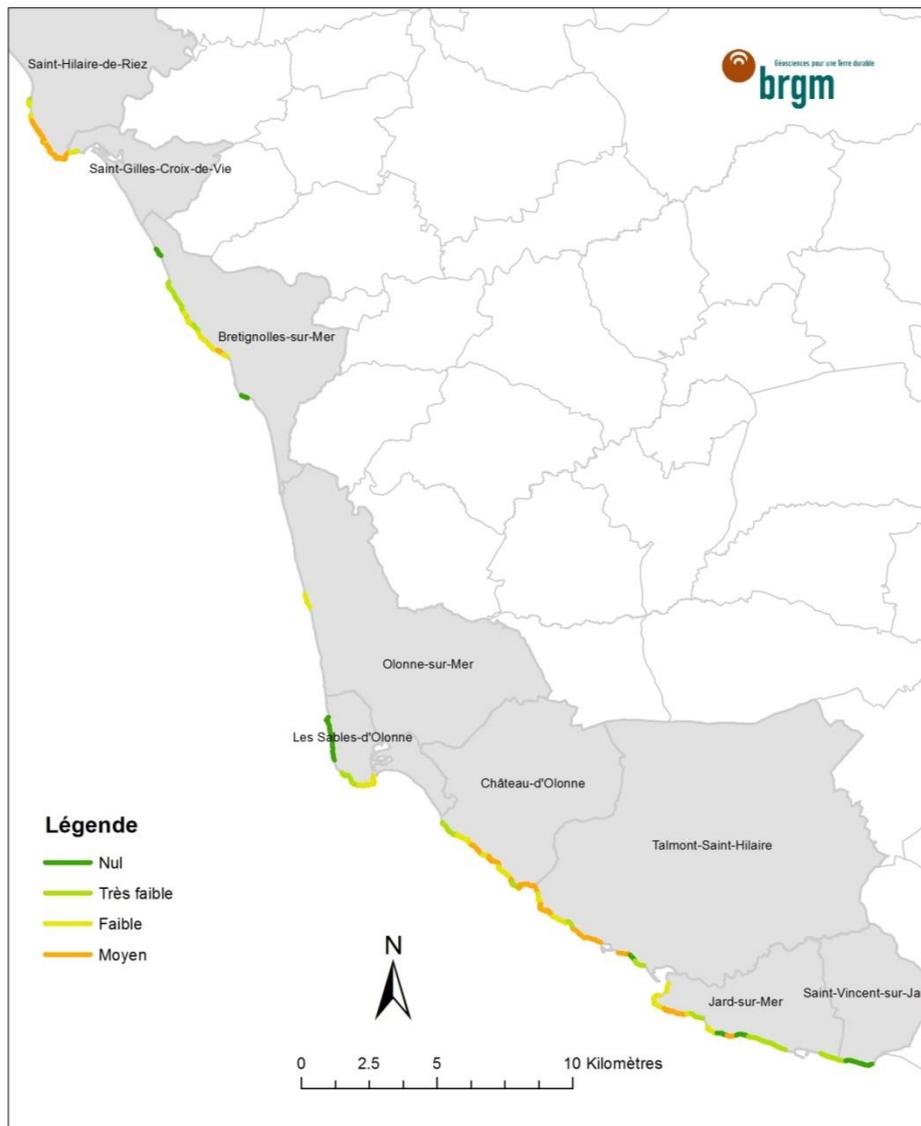


Illustration 64 – Cartographie de l'aléa mouvement de terrain sur la zone étudiée du littoral vendéen

Recul :

En moyenne, les falaises de Vendée sur les Pays étudiés reculent de 11,5 cm par an (contre 8 cm/an sur la côte de la Loire-Atlantique et 20 cm/an sur la côte aquitaine). La vitesse de recul mesurée sur plusieurs décennies la plus importante est située sur le secteur de Sauveterre. La proportion de côtes rocheuses concernées par un recul supérieur ou égal à 15 cm/an représente 28,7 % du linéaire, et par un recul supérieur à 20 cm/an la proportion ne représente plus que 5,8 % (Illustration 65).

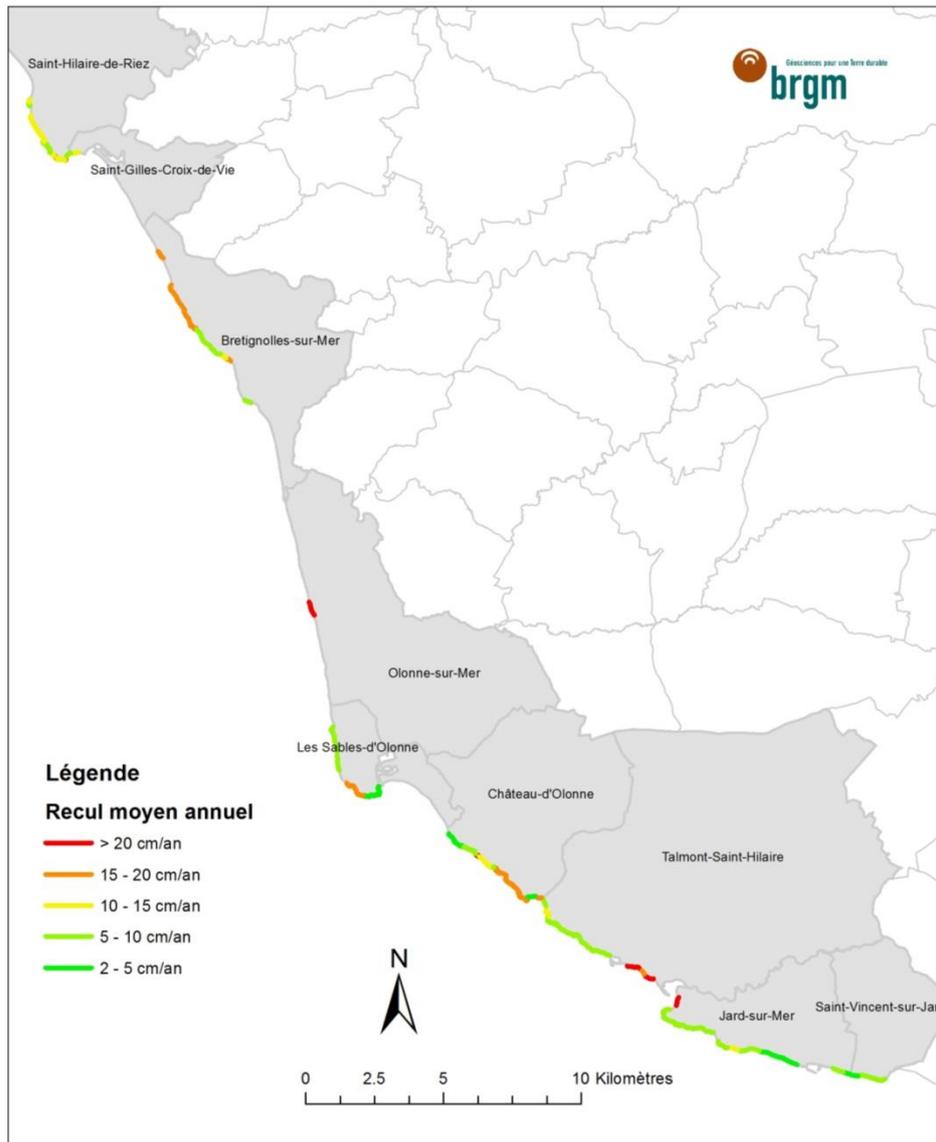


Illustration 65 – Cartographie du taux de recul annuel

6.3.2. Secteur 1 : Pays de Monts

Ce secteur comprend 11 km de côte à falaises. Le linéaire de falaises concerné par un aléa mouvement de terrain moyen représente 40,3 % de ce total, 31,7 % pour un aléa faible, 21,3 % pour l'aléa très faible et 6,7 % pour un aléa nul (Illustration 66).

Le recul pour les secteurs rocheux des Pays de Monts est de 12 cm/an. 31,7 % du linéaire a un taux de recul supérieur ou égal à 15 cm/an et 67,3 % du linéaire un taux de recul supérieur ou égal 10 cm/an (Illustration 67).

Le secteur est découpé en 23 zones et est caractérisé par 2 ensembles.

Un tableau récapitulatif reprend un ensemble de paramètres étudiés (Illustration 72).

La corniche vendéenne (de la fiche 1 à 15) forme un ensemble de falaises abruptes de 6 à 10 m de hauteur. L'érosion marine marquée par le sapement est active bien qu'elle ne mobilise que peu de matériel en pied localisé dans les indentations plutôt exposées. La zone médiane des versants souvent bien fracturée et en surplomb est la plus sensible aux événements de chute de blocs. La partie sommitale plus altérée (roche fissurée et désagrégée) et très souvent dénudée est également propice aux détachements de petits blocs et pierres.

L'irrégularité de la côte tend par les variations des orientations des parois à favoriser localement le détachement de blocs.

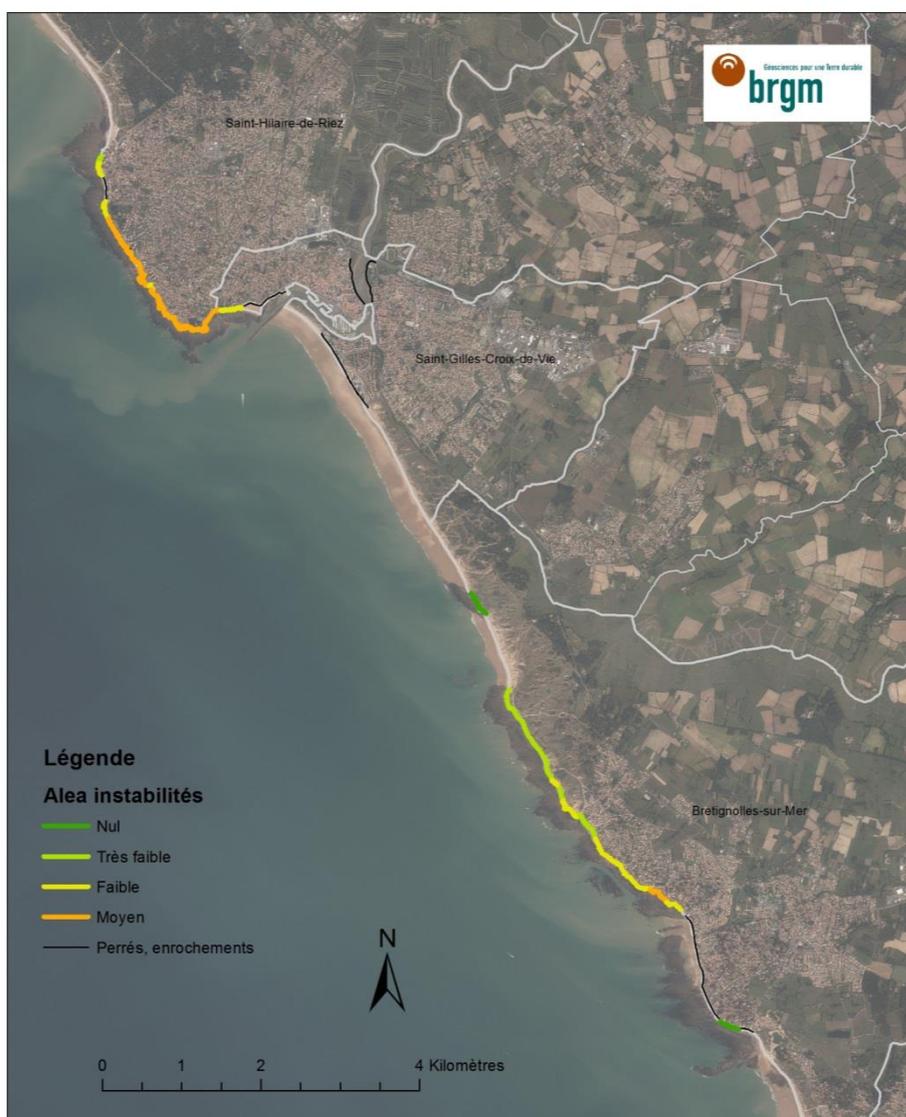


Illustration 66 – Cartographie des tronçons selon leur niveau d'aléa pour le secteur 1

Le recul est globalement modéré et largement favorisé par des axes d'indentations contrôlés par les failles, et secondairement par les directions des plis et du plan de schistosité.

Les îlots (pineaux) sont les témoins anciens de ce démantèlement du trait de côte, ainsi que de nombreuses arches et profonds cavernages aux droits de failles ou grandes fractures ouvertes.

Les mesures de confortement prises pour limiter le recul par l'obturation de points sensibles (entrées de grottes, failles ouvertes et profondes ...) ou par la construction de mur maçonnés, d'enrochements, présentent une certaine efficacité. Une attention particulière doit être tout de même prise par rapport au déchaussement de certains ouvrages de protection, fragilisés par les démaigrissements épisodiques (périodes de tempêtes) et aux désolidarisations avec le massif rocheux.

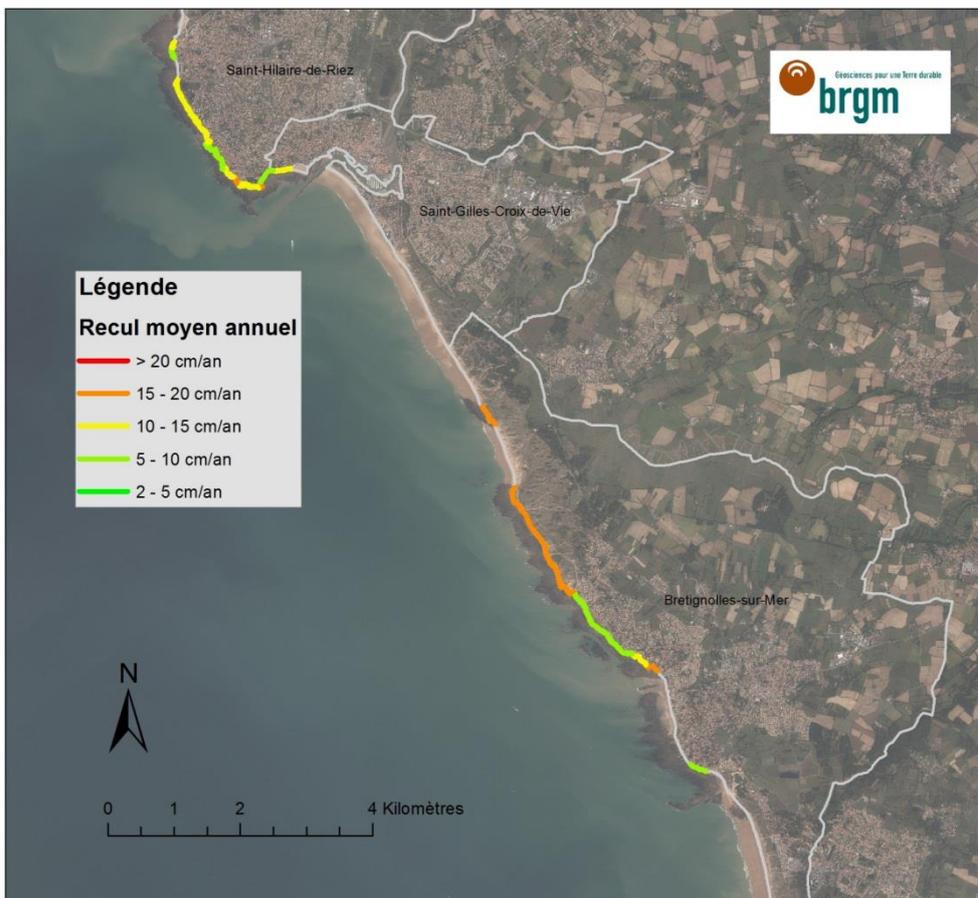


Illustration 67 - Cartographie du taux de recul annuel pour le secteur 1

La côte nord de Brétignolles-sur-Mer (de la fiche 16 à 20) est formée de microfalaises et talus accompagnés de niveaux dénudés à préfalaises.

Le recul bien que relevé plus faible vers la Sauzaie, peut présenter quelques enjeux au niveau des aménagements. De nombreuses indentations ont été colmatées par bétonnage et enrochement.



Illustration 68 - Lutte contre l'érosion par bétonnage et enrochement en fond d'indentation

Les indentations contrôlées par des failles et qui ne sont pas obturées (Illustration 69) révèlent être des points de recul sensibles à l'érosion marine (roche fracturée, altérée et plus tendre) et à l'action des eaux continentales (axe de drainage).

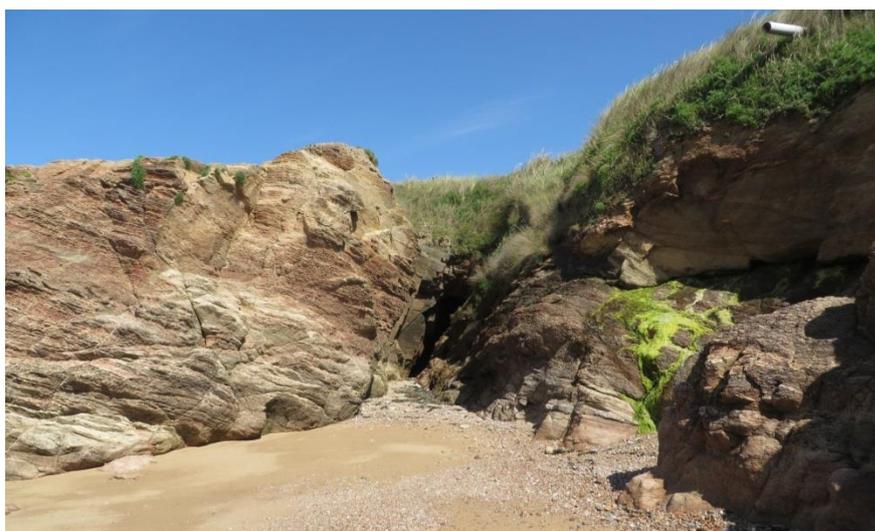


Illustration 69 - Axe d'indentation contrôlé par une faille, Brétignolles-sur-Mer

La plage de la Parée et au niveau du rocher Ste Véronique (fiches 21 à 22) est formée d'une falaise en moyenne de 8 à 9 m et qui peut atteindre 12 m. D'aspect rugueuse, très fracturée et fissurée, elle présente des instabilités et quelques petites faces fraîches de rupture (Illustration 70). Une zone plus fragilisée en rapport avec un contact en chevauchement de deux unités géologiques, figure majeure de l'orogénèse, est localisée au niveau du rocher de Ste Véronique. Ici la structure des falaises est très hétérogène et plutôt altérée, ce qui se traduit par de nombreuses faiblesses à la résistance à l'érosion.



Illustration 70 - Zone de départ de blocs, Rocher Ste Véronique à Brétignolles-sur-Mer

Le recul est modéré, il est estimé à 15 – 20 cm/an et pourrait impacter à moyen terme les aménagements et la voirie. Plusieurs enrochements sont localisés en fond de criques (Illustration 71) sur les secteurs les plus en recul, et témoignent de la lutte engagée contre l'érosion.



Illustration 71 - Enrochements en fond d'indentation, Brétignolles-sur-Mer

Plus au Sud, la côte, totalement enrochée, a été exclue de l'analyse, puisque les mouvements de terrain sont gérés par les aménagements, les ouvrages longitudinaux s'étant totalement substitués au trait de côte.

L'installation récente de ces enrochements ne permet pas aujourd'hui d'apprécier l'impact aux extrémités, il conviendrait alors de prendre en considération l'aspect « aggravation des processus érosifs ».

La dynamique d'érosion demeurant active, la surveillance de l'abaissement de l'estran et de la bathymétrie des petits fonds doit être envisagée également.

Fiche	Commune	Lieu Dit	Longueur en m	Alea instabilité	Moy de Pente Max	H Moy en m	Alt Moy Pied en mNGF	Niveau d'irrégularisation	Recul 100 ans
85_001	Saint-Hilaire-de-Riez	Sion l'Océan	205	Très faible	55	3.7	2.8	67.9	13
85_002	Saint-Hilaire-de-Riez	Sion l'Océan	300	Faible	65	6.2	1.6	59.8	6
85_003	Saint-Hilaire-de-Riez	Les Cinq Pineaux	355	Faible	71	8.1	1.5	39.9	15
85_004	Saint-Hilaire-de-Riez	Les Cinq Pineaux sud	560	Moyen	72	9.3	2.5	32.5	11
85_005	Saint-Hilaire-de-Riez	Corniche Vendéenne	860	Moyen	66	6.4	3.6	46.9	12
85_006	Saint-Hilaire-de-Riez	Trou du Diable	335	Moyen	68	7.3	1.1	55.3	10
85_007	Saint-Hilaire-de-Riez	La Baillelte	125	Faible	68	6.5	4.0	36.7	7
85_008	Saint-Hilaire-de-Riez	Corniche Vendéenne	425	Moyen	66	6.3	2.8	28.9	7
85_009	Saint-Hilaire-de-Riez	Anse du Fort	370	Moyen	73	9.3	1.8	40.4	15
85_010	Saint-Hilaire-de-Riez	Bel Air	195	Moyen	62	7.5	2.9	61.9	18
85_011	Saint-Hilaire-de-Riez	Phare	505	Moyen	71	9.2	1.8	41.7	11
85_012	Saint-Hilaire-de-Riez	Pointe de Grosse Terre	205	Moyen	65	8.7	2.7	58.4	12
85_013	Saint-Hilaire-de-Riez	Pointe de Grosse Terre est	120	Moyen	69	8.4	1.6	20.0	17
85_014	Saint-Hilaire-de-Riez	Blockhaus (Plage de Boisvinet)	415	Moyen	63	6.5	2.6	14.6	6
85_015	Saint-Gilles-Croix-de-Vie	Plage de Boisvinet	415	Faible	64	5.9	2.4	47.6	11
85_016	Brétignolles-sur-Mer	Roche Biron nord	455	Nul	45	2.5	2.9	22.7	18
85_017	Brétignolles-sur-Mer	Plage de la Sauzaie	1675	Très faible	44	3.0	4.5	5.5	15
85_018	Brétignolles-sur-Mer	La Sauzaie nord	755	Faible	55	4.4	2.9	39.2	19
85_019	Brétignolles-sur-Mer	La Sauzaie front de mer	460	Très faible	40	2.0	5.0	23.4	7
85_020	Brétignolles-sur-Mer	La Sauzaie sud	1245	Faible	50	4.9	3.3	20.3	8
85_021	Brétignolles-sur-Mer	Rocher de Ste Véronique	430	Moyen	68	9.2	2.1	26.8	14
85_022	Brétignolles-sur-Mer	Plage de la Parée	285	Faible	59	7.5	3.2	28.4	19
85_023	Brétignolles-sur-Mer	Marais Girard	280	Nul	43	2.6	4.0	5.4	8

Illustration 72 - Caractéristiques physiques et analyse des aléas recul à 100 ans et instabilités sur le secteur 1 par zones homogènes

6.3.3. Secteur 2 : Pays d'Olonne

Le secteur 2 comprend 12 km de côte à falaises. Sur ce secteur, la proportion du linéaire de falaises concernée par un aléa mouvement de terrain moyen représente 25,1 % du total, 37,1 % pour un aléa faible, 23,2 % pour un aléa très faible et 14,5 % pour un aléa nul (Illustration 73).



Illustration 73 - Cartographie des tronçons selon leur niveau d'aléa pour le secteur 2

Le recul pour les secteurs rocheux du Pays d'Olonne est de l'ordre de 15 cm/an.

En excluant la zone de Sauveterre qui connaît un recul très marqué, le recul moyen est de 11,5 cm/an (Illustration 74). 7,7 % du linéaire a un taux de recul supérieur ou égal à 20 cm/an, 43,6 % du linéaire a un taux de recul supérieur ou égal à 15 cm/an et 51,1 % du linéaire un taux de recul supérieur ou égal 10 cm/an (Illustration 74).

Un tableau récapitulatif reprend un ensemble de paramètres étudiés (Illustration 77).

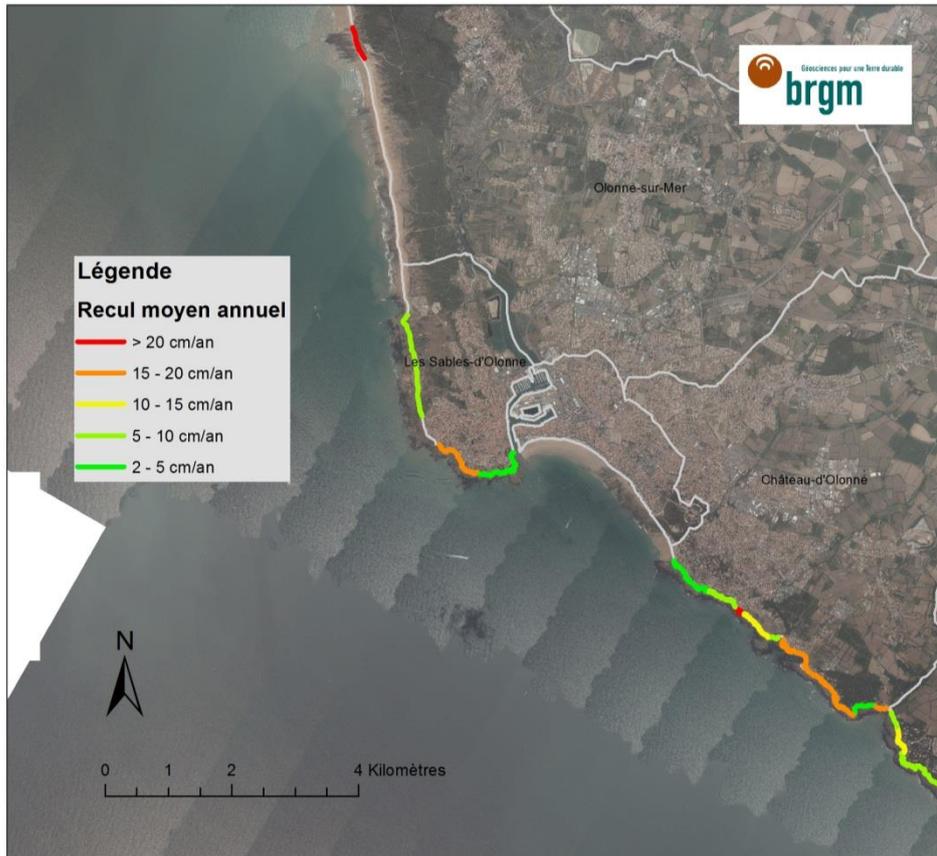


Illustration 74 - Cartographie du taux de recul annuel pour le secteur 2

Sauveterre à Olonne-sur-Mer, est un point dur plus rehaussé et accompagné d'une plateforme d'érosion, il concentre l'énergie des houles. Sa microfalaise d'isaltérites, friable connaît un recul très important. En dehors des aménagements d'accès, il n'y a pas d'enjeux à déplorer.

La Chaume (Fiche 27) se caractérise par un ensemble de microfalaises de gneiss fortement fracturées, irrégulières. Des enrochements partiels, principalement en tête de falaise, présentent certaines limites dans leur stabilité. Leur pérennité n'est pas assurée.

Château d'Olonne connaît des zones de recul modéré, qui peuvent s'accompagner d'instabilités. En raison du début de présence du Lias (argiles et calcaires) en discordance sur le socle de micaschistes et gneiss, plusieurs types d'aléas instabilités sont observables : chutes de blocs, glissements/coulées, petits éboulements.

Par exemple une petite coulée dans l'anse aux Moines apparait avoir été provoquée par un engorgement des argiles du Lias et vient se déverser sur la plage (Illustration 75 et fiche 35).



Illustration 75 - Loupe de glissement favorisée par les argiles du Lias au contact discordant avec les micaschistes

Les principaux éboulements et chutes de blocs ont été observés dans la baie de Cayola. Protégé à l'arrière de la Pointe de Cayola, un accident tectonique cloisonne sous une forme de petit graben un niveau de Lias peu compétant (argiles, sables feldspathiques, calcaires dolomités). L'érosion préférentielle a permis le dessin de cette baie. Le recul semblerait assez lent, de l'ordre de 4 cm/an, mais sa falaise de 10 à 12 m connaît quelques éboulements de quelques dizaines de m³ apparemment sans grande conséquence (Illustration 76). Ces éboulements très récents qui datent probablement du début de l'hiver 2014, ne sont pas intégrés dans l'analyse du recul, le jeu de photographies aériennes le plus récent date de 2012.



Illustration 76 - Effondrement récent d'un pan de falaise, baie de Cayola à Talmont-St-Hilaire

Ce secteur est difficile d'accès, la fréquentation du public est canalisée par un chemin côtier qui surplombe la baie.

Les reculs les plus marqués se situent aux droits des failles qui subissent une érosion active préférentielle dans le secteur du Puits d'Enfer, et de manière plus problématique du Roc St Jean à l'Anse aux Moines (Fiches 34 et 35).

Fiche	Commune	Lieu Dit	Longueur en m	Alea instabilité	Moy de Pente Max	H Moy en m	Alt Moy Pied en mNGF	Niveau d'irrégularisation	Recul 100 ans
85_024	Olonne-sur-Mer	Sauveterre	575	Faible	48	6.5	4.0	6.7	80
85_025	Les Sables d'Olonne	La Chaume	1740	Nul	37	1.5	4.6	1.7	10
85_026	Les Sables d'Olonne	La Chaume	1025	Très faible	46	3.3	3.6	13.3	16
85_027	Les Sables d'Olonne	La Chaume	1149	Faible	53	4.8	2.9	12.0	4
85_028	Château d'Olonne	Tanchet	235	Très faible	51	3.7	3.1	74.9	3
85_029	Château d'Olonne	Domaine de la Pironnière	905	Très faible	47	3.3	3.4	20.7	5
85_030	Château d'Olonne	Nord Puits d'Enfer	1160	Faible	60	5.8	1.8	89.2	7
85_031	Château d'Olonne	Puits d'Enfer	365	Faible	59	5.6	1.2	75.5	22
85_032	Château d'Olonne	Sud du Puits d'Enfer	925	Moyen	65	8.2	1.7	47.6	13
85_033	Château d'Olonne	Secteur de la parée	300	Faible	61	5.7	2.5	11.5	9
85_034	Château d'Olonne	Le Roc Saint-Jean	840	Moyen	60	6.5	2.3	22.4	18
85_035	Château d'Olonne	L'Anse aux Moines	230	Moyen	63	6.9	3.7	9.2	17
85_036	Château d'Olonne	Le Village de Bois St-Jean	979	Faible	51	5.4	3.3	35.6	16
85_037	Château d'Olonne	Bois de St-Jean	335	Moyen	62	7.3	1.9	80.0	16
85_038	Château d'Olonne	Pointe de Cayola	625	Très faible	47	3.4	3.2	52.1	19
85_039	Château d'Olonne	Baie de Cayola ouest	450	Moyen	73	11.2	3.5	9.4	4
85_040	Château d'Olonne	Baie de Cayola	325	Moyen	68	8.5	2.5	18.7	15

Illustration 77 - Caractéristiques physiques et analyse des aléas recul à 100 ans et instabilités sur le secteur 2 par zones homogènes. A noter qu'à Tanchet un enrochement continu a été mis en place récemment afin de stopper un recul qui menaçait le chemin côtier.

6.3.4. Secteur 3 : Pays Talmondais

Le secteur 3 comprend 15,4 km de côte à falaises. Sur ce secteur, la proportion du linéaire de falaises concernée par un aléa mouvement de terrain moyen représente 33,9 % du total, 26,8 % pour un aléa faible, 24,5 % pour un aléa très faible et 14,8 % pour un aléa nul.

L'illustration 78 présente la cartographie des tronçons selon leur niveau d'aléa instabilité.

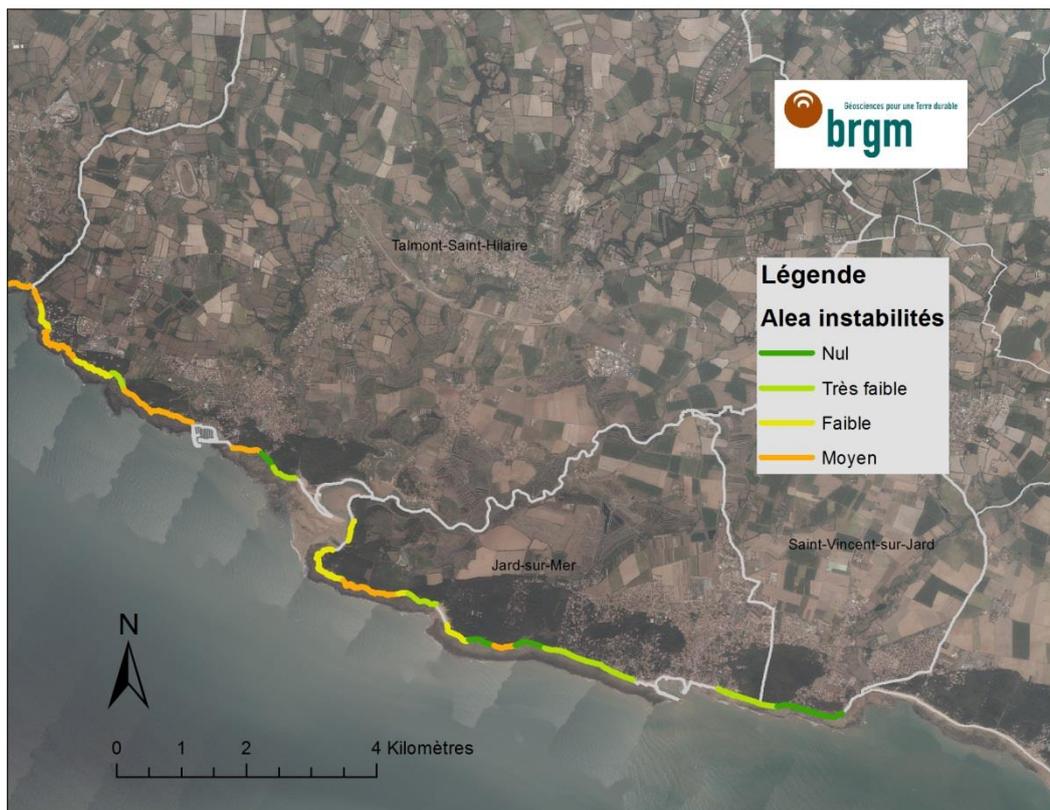


Illustration 78 - Cartographie des tronçons selon leur niveau d'aléa pour le secteur 3

Par ailleurs, sur le secteur 3, le taux de recul moyen est de 8,4 cm/an. 8,3 % du linéaire a un taux de recul supérieur ou égal à 20 cm/an, 10,2 % du linéaire a un taux de recul supérieur ou égal à 15 cm/an et 17,3 % du linéaire un taux de recul supérieur ou égal à 10 cm/an (Illustration 79).

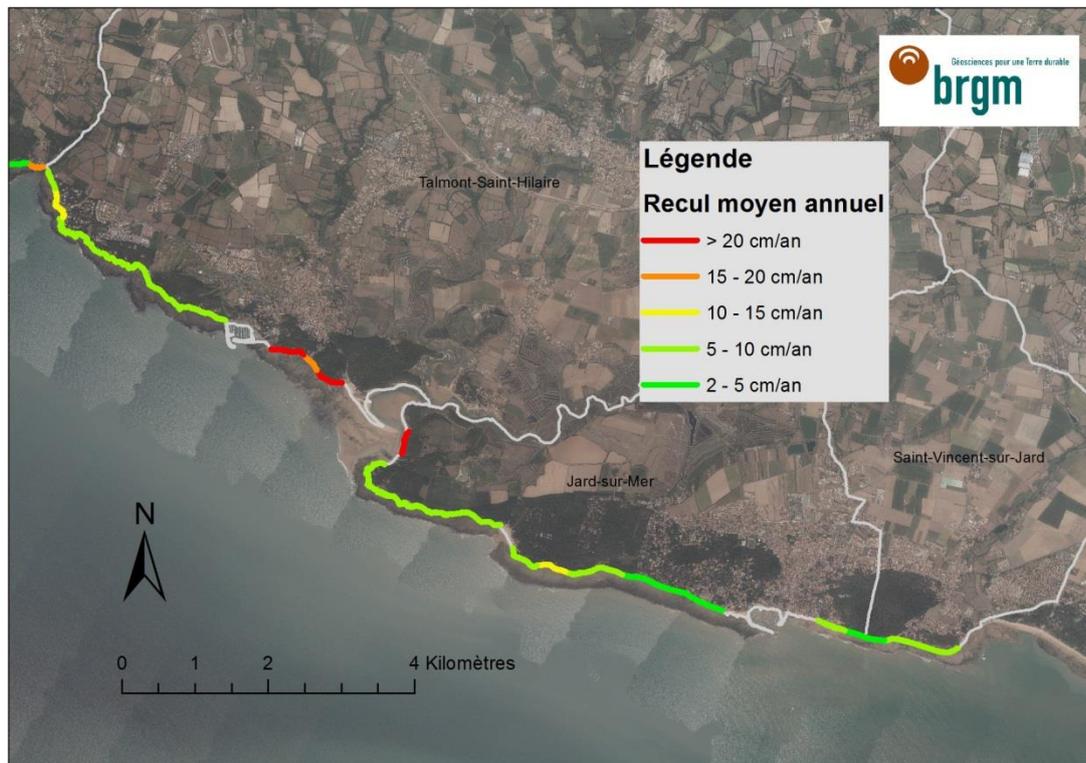


Illustration 79 - Cartographie du taux de recul annuel pour le secteur 3

A Talmont-Saint-Hilaire, en tout début de zone (fiches 41, 42 et 43), de la baie de Cayola au Parc de la Salle-Roy, un puissant cordon de galets très actif sape le pied d'une falaise bien indentée. Un mode d'indentation avec cavernage se développe à de nombreuses reprises dans les plans de failles, et peut se révéler important et dynamique. Comme le montre la photo suivante (Illustration 80), le plan de schistosité de 30° amont accentue l'instabilité.



Illustration 80 - Indentation active et cavernage en pied de falaise à Talmont-St-Hilaire (fiche 41)

Localement certaines parois sont instables, des éboulements plus importants peuvent se produire (Illustration 81).



Illustration 81 - Paroi fracturée instable menaçant de s'ébouler sur le secteur Est de la baie de Cayola, Talmont-St-Hilaire

Le chemin côtier est localement affecté par le recul, et la proximité immédiate de la route côtière (D32) pourrait à moyen terme (de l'ordre de quelques dizaines d'années) s'avérer problématique).

Au Sud du port de Bourgenay, le recul estimé à 20 cm/an menace plusieurs habitations contraintes de mettre en place des enrochements. C'est notamment le cas pour les 3 dernières habitations qui se situent face à un point de recul plus marqué (Illustration 82). Ces points plus sensibles au recul concernent les secteurs où prédominent des niveaux supérieurs de formations meubles périglaciaires plus concentrés dans de petites dépressions topographiques. Le sentier côtier est également largement affecté par l'érosion prononcée et risque à court terme (la décennie) de disparaître (Illustration 83).



Illustration 82 – Mise en place d'un enrochement pour une habitation à proximité immédiate de la tête de falaise, Le Grand Quézeau à Talmont-St-Hilaire



Illustration 83 - Sentier affecté par le recul, Le Grand Quézeau à Talmont-St-Hilaire

Les falaises, microfalaises et talus de calcaires du Lias et du Dogger à Jard-sur-Mer et St-Vincent-sur-Jard, moins compétents que le substratum cristallin en règle générale, observent un recul bien plus régulier et homogène.

De très nombreux petits éboulements de terres illustrent un trait de côte sensible et vulnérable à l'érosion. Néanmoins, l'érosion sur ces secteurs se révèle moins rapide que sur les secteurs précédents, vraisemblablement du fait d'une orientation semi abritée, très sud, et exposée à des houles obliques. Un cordon continu de galets choqués adosse le pied de ces microfalaises (Illustration 85). En abondance et à une cote supérieure à 4 m NGF (Illustration 91), ces galets constituent une barrière naturelle dans une majorité d'épisodes érosifs (houles par marée haute).

A St-Vincent-sur-Jard, le talus calcaire s'amenuise au profit d'une dune perchée plus vulnérable et en retrait sur le niveau colluvionné (Illustration 84).

Ce type de côte basse à dominante sableuse illustre parfaitement la fonction d'une ossature rocheuse et justifie sa prise en compte pour l'analyse du recul. Une distinction doit donc être faite avec une côte basse sableuse pure, puisque il existe une discontinuité entre la plage et la dune.



*Illustration 84 - Erosion différentielle entre le talus dur calcaire et un talus meuble (la dune),
plage de Balesbat à St-Vincent-sur-Jard*



Illustration 85 - Talus principalement structuré par les calcaires du Dogger

De part et d'autre du port de plaisance de Jard-sur-Mer tout comme à l'extrême sud de St-Vincent-sur-Jard, des endiguements bétonnés privés désorganisés font front à l'océan (Illustration 86). Ces secteurs ont été exclus de l'étude.



Illustration 86 - Endiguements privés à Jard-sur-Mer

Aussi, plusieurs enrochements privés, au Nord du port de plaisance de Jard-sur-Mer, viennent conforter ces calcaires très fissurés, voire des talus meubles, au droit de terrains privés construits en retrait.

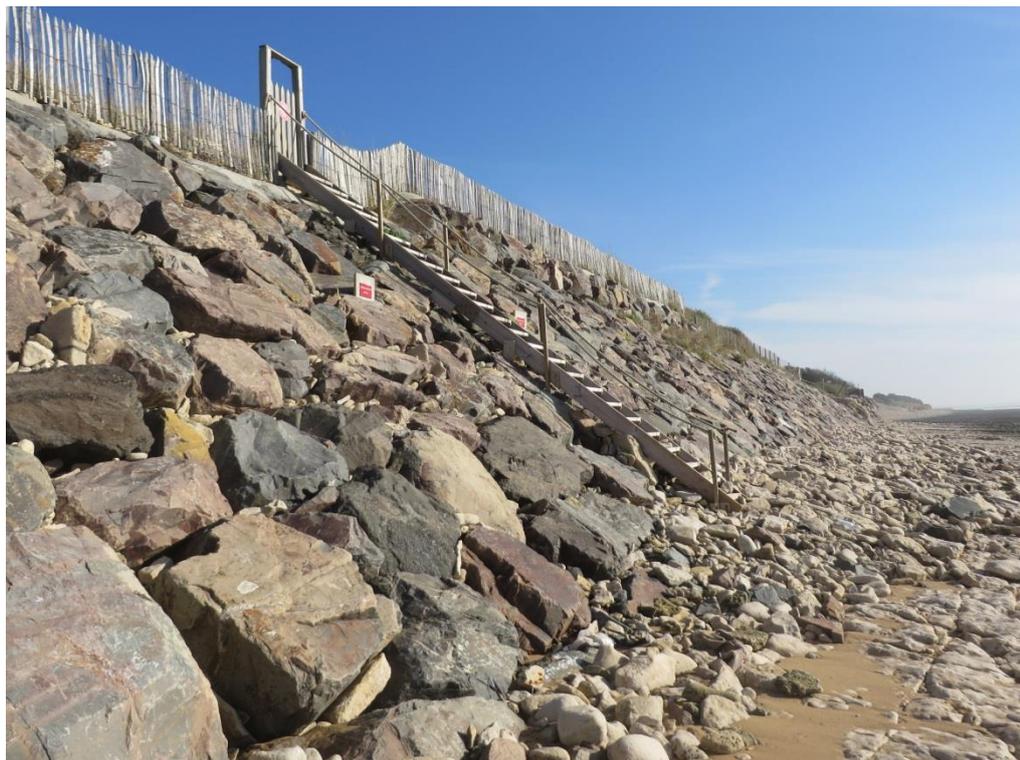


Illustration 87 – Imposant enrochement privé à Jard-sur-Mer



Illustration 88 - Enrochement ponctuel instable à Jard-sur-Mer

Certains de ces enrochements (Illustration 88) plus limités forment des points durs comparés aux calcaires et risquent de présenter des désordres à court terme, comme en témoigne de petits aménagements d'accès de plage privatifs (Illustration 89).



Illustration 89 - Erosion des talus, plage des Goffineaux à Jard-sur-Mer

En mesure de protection du public, la commune a interdit l'accès sur l'interface talus/dune tout en sensibilisant les promeneurs grâce à des panneaux avertissant des dangers d'un éboulement massif de la dune.

De son côté, l'ONF prévient des dangers de chute de blocs à Ragonite, partie Ouest.



Illustration 90 - Mesures de prévention à Jard-sur-Mer

Comme pour les Pays précédents, le tableau suivant (Illustration 91) récapitule les caractéristiques par secteur homogène pour les 3 communes étudiées du Pays Talmondais.

Fiche	Commune	Lieu Dit	Longueur en m	Alea instabilité	Moy de Pente Max	H Moy en m	Alt Moy Pied en mNGF	Niveau d'irrégularisation	Recul 100 ans
85_041	Talmont-Saint-Hilaire	Baie de Cayola est	390	Moyen	69	9.2	3.5	15.9	9
85_042	Talmont-Saint-Hilaire	La Salle-Roy	385	Faible	58	8.6	3.4	36.4	10
85_043	Talmont-Saint-Hilaire	Le Parc de la Salle-Roy	285	Faible	62	6.3	3.2	35.0	12
85_044	Talmont-Saint-Hilaire	Le Parc de la Salle-Roy sud	1075	Moyen	64	6.4	2.1	59.3	8
85_045	Talmont-Saint-Hilaire	Colonie de vacances	260	Moyen	60	5.9	2.9	25.0	7
85_046	Talmont-Saint-Hilaire	La Mine nord	985	Faible	63	6.4	2.6	40.5	6
85_047	Talmont-Saint-Hilaire	La Mine	365	Très faible	45	2.5	4.8	3.1	6
85_048	Talmont-Saint-Hilaire	Bois de la Mine	830	Moyen	65	8.7	3.8	12.2	7
85_049	Talmont-Saint-Hilaire	Bourgenay	534	Moyen	64	8.2	4.1	6.0	8
85_050	Talmont-Saint-Hilaire	Le Grand Quezeau	485	Moyen	56	4.8	3.8	3.2	20
85_051	Talmont-Saint-Hilaire	Les Murailles	300	Nul	43	2.2	4.5	3.2	17
85_052	Talmont-Saint-Hilaire	Plage du Veillon nord	430	Très faible	44	2.6	4.6	4.9	27
85_053	Jard-sur-Mer	Hâvre du Payré	375	Faible	64	6.7	2.9	13.4	28
85_054	Jard-sur-Mer	Pointe du Payré Ouest	710	Faible	59	7.8	3.0	31.2	9
85_055	Jard-sur-Mer	Pointe du Payré Sud Est	670	Faible	59	8.3	2.5	50.9	8
85_056	Jard-sur-Mer	St Nicolas	1285	Moyen	71	9.0	2.3	26.9	7
85_057	Jard-sur-Mer	St Nicolas	175	Faible	64	7.3	3.3	13.2	8
85_058	Jard-sur-Mer	Plage de la Mine	505	Très faible	50	3.6	4.7	1.8	7
85_059	Jard-sur-Mer	La Mine sud	545	Faible	59	3.9	3.2	13.4	8
85_060	Jard-sur-Mer	Entre Ragonite et la Mine	420	Nul	45	2.2	4.4	1.7	11
85_061	Jard-sur-Mer	Ragonite Ouest	450	Moyen	66	5.5	2.5	25.2	6
85_062	Jard-sur-Mer	Ragonite	490	Nul	45	3.2	4.6	1.1	5
85_063	Jard-sur-Mer	De la plage des Goffineaux à	950	Très faible	45	4.1	3.9	1.5	2
85_064	Jard-sur-Mer	De la plage Cap de Chef aux	535	Très faible	44	3.7	4.4	1.1	5
85_065	Jard-sur-Mer	Bois Vinet	420	Très faible	47	3.6	4.5	5.4	5
85_066	Jard-sur-Mer	Grand Bois Vinet	565	Très faible	56	5.8	4.0	1.1	2
85_067	Saint-Vincent-sur-Jard	Ragnette, plage de Belesbat	1065	Nul	42	3.8	4.7	1.6	6

Illustration 91 - Caractéristiques physiques et analyse des aléas recul à 100 ans et instabilités sur le secteur 3 par secteurs homogènes

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 et les dynamiques de recul des falaises et côtes rocheuses dans un contexte géologique extrêmement hétérogène.

D'après les observations réalisées sur le terrain puis croisées avec les traitements géomatiques, l'érosion différentielle est un des processus qui conduit aux instabilités et aux reculs les plus marqués.

Cette érosion différentielle est associée à la fois à des variations de compétences latérales (filons, failles, passages fracturés, argilisés) et verticales (lithologie, topographie).

De nombreuses figures illustrant ces instabilités et reculs peuvent être facilement observées comme la formation de grottes au niveau de zones de plus faible compétence que sont par exemple les zones de failles et de grandes fractures, ou bien une organisation verticale hétérogène, discordante.

La chute du toit de ces cavités et surplombs conduisent à l'élaboration des indentations qui peuvent être très profondes. 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.

Même si l'analyse du recul à partir de photos historiques sur un pas de temps de quelques décennies (60 ou 90 ans) ne permet pas de relever avec précision cette cinétique, elle souligne tout de même le mode de recul. Les points de comparaisons les plus marquants entre les jeux de photos concernent à la fois les axes principaux ou secondaires des indentations et les talus meubles et microfalaises altérées.

Dans la perspective du changement climatique accompagné d'une remontée plus rapide du niveau marin de l'ordre de 3 mm/an, les conséquences seraient une augmentation de l'énergie délivrée en pied de falaise à marée haute avec une remobilisation de blocs et galets, plus une augmentation de la hauteur de falaise atteinte par le jet de rive. Le climat joue un rôle également important dans la modification des propriétés physico-chimiques de la roche (altération minérale, gélifraction ...) et de ce fait accentuerait un recul généralisé.

Les travaux très récents de datation à partir de la formation d'un isotope du Béryllium (^{10}Be) par le bombardement de particules cosmiques de la roche exposée comme le sont les plateformes d'abrasion marine, permettent d'ores et déjà de quantifier avec précision des vitesses de recul depuis l'Holocène (Regard et al. 2012, Hurst et al. 2015).

Or la mise en perspective de ces valeurs de taux de recul sur une longue période avec les vitesses calculées sur une période récente (moins de 150 ans) tend à montrer une érosion généralement active. Les modifications du milieu (budget sédimentaire, hausse du niveau marin, climat) pourraient accentuer les processus d'érosion (continentale et marine).

Afin de poursuivre la compréhension des mécanismes en jeu et notamment au niveau des zones de failles qui représentent des zones de faiblesses marquées du littoral, il pourrait être intéressant de poursuivre ce travail, notamment par des investigations de type géophysique ou par levés LIDAR, des relevés précis et le recueil de désordres occasionnés par des phénomènes climatiques extrêmes (précipitations, tempêtes, fortes houles ...).

Conclusion

Dans le cadre d'un partenariat entre la DDTM de Vendée et le BRGM, ce dernier est intervenu pour réaliser, sur le littoral de 3 Pays (Monts, Olonne, Talmondais), 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 et Vendée ;
- 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 photographies aériennes orthorectifiées de 1920, 1950, 2000 et 2011/2012) ;
- l'analyse géologique et expertise naturaliste du linéaire, découpage typologique ;
- la constitution d'une base de données comprenant notamment des photographies géoréférencées prises in situ : 3501 photographies de 2013 à 2015, et 468 photographies historiques de 2007 et 2011 ;
- la qualification des aléas 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 38 km de côte à falaises de Vendée ont été découpés en 67 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 la qualification et le zonage des 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 pied de falaise qui a été réalisée à partir de l'isoligne de 4,5 m (Litto3D levé 2010).

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

Sur le littoral de Vendée étudié, la proportion de falaises concernées par un aléa mouvement de terrain moyen représente 33 % du linéaire (12,7 km sur un total de 38,4 km étudié), 31,4 % (12 km) pour un aléa faible, 23,2 % (8,9 km) pour un aléa très faible et 12,4 % (4,7 km) pour un aléa nul. Aucun secteur n'est concerné par un aléa fort compte-tenu notamment des caractéristiques géomorphologiques du littoral peu propices à la survenue d'instabilités d'ampleur importante.

Par ailleurs, en moyenne, les falaises et zones de talus rocheux sur les 3 Pays étudiés reculent de 11,5 cm par an, avec un écart type de 4,7 cm/an. Le linéaire concerné par une érosion supérieure ou égale à 20 cm/an représente moins de 6 % de la côte rocheuse. Ces résultats sont à mettre en perspective avec l'incertitude associée aux orthophotographies entre elles sur la période 1920/2012, incertitude qui rapportée au siècle, est de l'ordre de 7 m (soit 7 cm/an). De même, la démarche ne prend pas en compte les effets du changement climatique.

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.

Ballèvre M., Bosse V., Dabard M-P., Ducassou C., Fourcade S. et al.. (2013) - Histoire Géologique du massif Armoricaïn : Actualité de la recherche. Bulletin de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne, Société géologique et minéralogique de Bretagne, (D), 10-11, pp.5-96

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 O. (1989) – Les tendances d'évolution des côtes de Loire-Atlantique et de Vendée : bilan et cartographie, Mémoire de maîtrise BRGM & IGARUN, 179 p.

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

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

Hurst M.D., Rood D.H., Ellis M.A., Anderson R.S., (2015) - Observations of historical sea cliff retreat rates exceed long-term estimates derived from cosmogenic ¹⁰Be, Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-14367

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.

Mazeiraud V., Ledoux.S, Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire, Schéma directeur des cellules, Avril 2012, 108p.

Mazeiraud V., Ledoux.S, Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire, Fascicule B : Fiches d'inspection du littoral, Avril 2012, 324p.

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.

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.

Plat E. avec la collaboration de V. Baudouin, 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

Regard V. et al. (2012) - Late Holocene seacliff retreat recorded by 10Be profiles across a coastal platform: Theory and example from the English Channel, *Quaternary Geochronology*, Elsevier

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.

Waelbroeck C., L. 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

Descriptions d'échantillons en lames minces

Levé de la carte géologique du Poiré-sur-vie (0561)



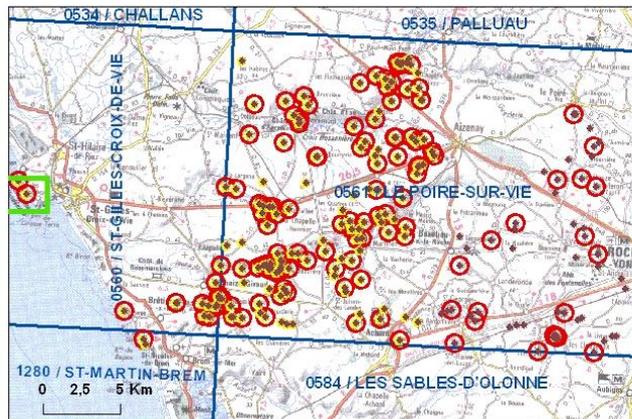
Localisation et description des affleurements échantillonnés

Carte globale de localisation des échantillons.

Fiche d'identité

Indice : 05607X0075
 Numéro d'identifiant : FB1509
 Date : 01/02/2007
 Auteur : F. Béchenec
 Unité :
 Unité de Saint-Gilles/ La Vilaine

Sous-groupe ou formation :
 Formation de Saint-Gilles



Source : IGN, scan250, BRGM, BSS.

Carte précise de localisation de l'affleurement.



Source : IGN, scan25, BRGM, BSS.

Légende

- * Points échantillonnés
- Minéralogie des lames minces
- Structures (telles que la schistosité, l'axe des plis et le plan axial)
- Rectangle d'emprise
- Coupure de cartes géologiques

Type de structure	Orientation (en °)	Pendage (en °)
S1	25	30N
L2 (axe des plis)	315	15

Description de l'échantillon :

gneiss fin micacé, gris argenté sombre, finement feuilleté, à muscovite et chloritoïde

Type d'affleurement :

estran de Saint-Gilles-Croix-de-Vie à Sion

Lithologie principale :

gneiss fin micacé

Composition minéralogique :

Nom du minéral	Teneur en %
Quartz	40
Muscovite	30
Feldspath	24
Opaques	5
Biotite	1
Chlorite	1

Levé de la carte géologique du Poiré-sur-vie (0561)



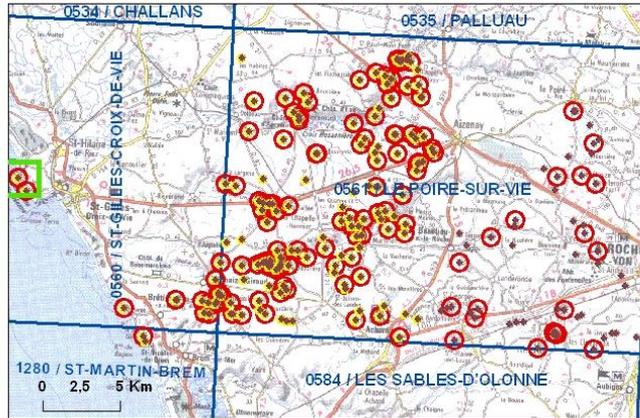
Localisation et description des affleurements échantillonnés

Carte globale de localisation des échantillons.

Fiche d'identité

Indice : 05607X0074
 Numéro d'identifiant : FB1508
 Date : 01/02/2007
 Auteur : F. Béchenneq
 Unité :
 Unité de Saint-Gilles/ La Vilaine

Sous-groupe ou formation :
 Formation de Saint-Gilles



Source : IGN, scan250, BRGM, BSS.

Carte précise de localisation de l'affleurement.



Source : IGN, scan25, BRGM, BSS.

Légende

- * Points échantillonnés
- Minéralogie des lames minces
- Structures (telles que la schistosité, l'axe des plis et le plan axial)
- Rectangle d'emprise
- Coupure de cartes géologiques

Type de structure	Orientation (en °)	Pendage (en °)
S1	70	20
L2 (axe des plis)	330	10
PA (Plan Axial)	330	sub-vertical

Description de l'échantillon :

gneiss fins micacé, gris-vert, assez massif mais finement feuilleté

Type d'affleurement :

estran de Saint-Gilles-Croix-de-Vie à Sion

Lithologie principale :

gneiss fin micacé

Composition minéralogique :

Nom du minéral	Teneur en %
Quartz	40
Muscovite	35
Feldspath Alcalin/Plagioclase	25

Levé de la carte géologique du Poiré-sur-vie (0561)

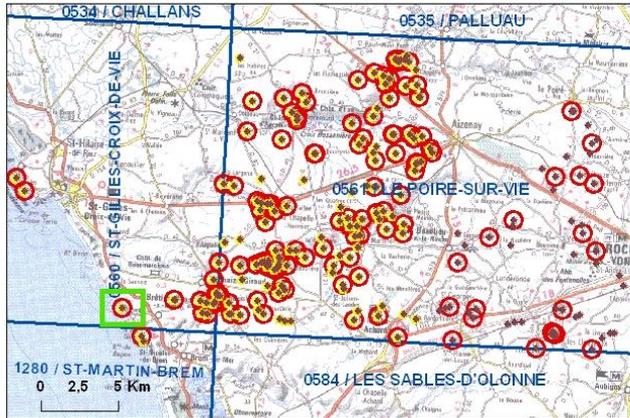


Localisation et description des affleurements échantillonnés

Fiche d'identité

Indice : 05608X0075
 Numéro d'identifiant : FB1417A
 Date : 26/04/2006
 Auteur : F. Béchenec
 Unité :
 Unité de Saint-Gilles/ La Vilaine
 Sous-groupe ou formation :
 Formation des porphyroïdes de la Sauzaie

Carte globale de localisation des échantillons.



Source : IGN, scan250, BRGM, BSS.

Carte précise de localisation de l'affleurement.



Source : IGN, scan25, BRGM, BSS.

Légende

- * Points échantillonnés
- Minéralogie des lames minces
- Structures (telles que la schistosité, l'axe des plis et le plan axial)
- Rectangle d'emprise
- Coupure de cartes géologiques

Type de structure	Orientation (en °)	Pendage (en °)
S1	155	50N
L2 (axe des plis)	345	10
PA (plan axial)	345	25S

Description de l'échantillon :

micaschiste lustré avec nombreux porphyroclastes centimétriques de feldspath et de quartz moulés par la foliation principale qui porte une forte linéation d'étiement

Type d'affleurement :

estran de Brétignolles-sur-Mer

Lithologie principale :

micaschiste porphyroclastique

Composition minéralogique :

Nom du minéral	Teneur en %
Quartz	40
Séricite	38
Feldspath Alcalin	10
Plagioclase	10
Opaques	2
Zircon	

Levé de la carte géologique du Poiré-sur-vie (0561)

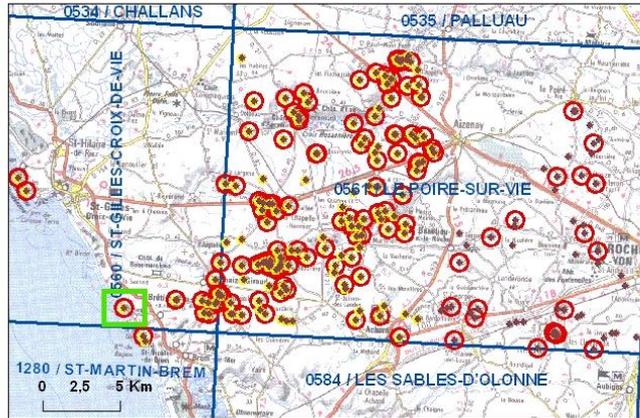


Localisation et description des affleurements échantillonnés

Carte globale de localisation des échantillons.

Fiche d'identité

Indice : 05608X0076
 Numéro d'identifiant : FB1417B
 Date : 26/04/2006
 Auteur : F. Béchenneq
 Unité :
 Unité de Saint-Gilles/ La Vilaine
 Sous-groupe ou formation :
 Formation des porphyroïdes de la Sauzaie



Source : IGN, scan250, BRGM, BSS.

Carte précise de localisation de l'affleurement.



Source : IGN, scan25, BRGM, BSS.

Légende

- * Points échantillonnés
- Minéralogie des lames minces
- Structures (telles que la schistosité, l'axe des plis et le plan axial)
- Rectangle d'emprise
- Coupure de cartes géologiques

Type de structure	Orientation (en °)	Pendage (en °)
S1	155	50N

Description de l'échantillon :

micaschiste gris finement feuilleté avec nombreux clastes millimétriques de quartz et de feldspath et formant des passées alternant avec le faciès porphyroclastique

Type d'affleurement :

estran de Brétignolles-sur-Mer

Lithologie principale :

micaschiste clastique

Composition minéralogique :

Nom du minéral	Teneur en %
Quartz	40
Séricite	25
Plagioclase	17
Feldspath Alcalin	15
Opaques	3

Levé de la carte géologique du Poiré-sur-vie (0561)

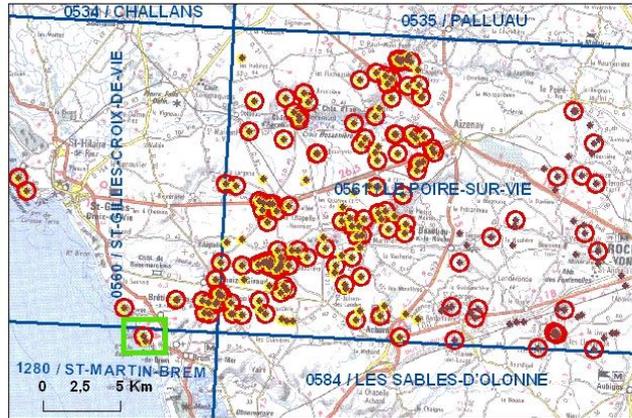


Localisation et description des affleurements échantillonnés

Fiche d'identité

Indice : 12804X0024
 Numéro d'identifiant : FB1498
 Date : 31/01/2007
 Auteur : F. Béchenec
 Unité :
 Unité de La Roche-Sur-Yon

Carte globale de localisation des échantillons.



Source : IGN, scan250, BRGM, BSS.

Carte précise de localisation de l'affleurement.



Source : IGN, scan25, BRGM, BSS.

Légende

- * Points échantillonnés
- Minéralogie des lames minces
- Structures (telles que la schistosité, l'axe des plis et le plan axial)
- Rectangle d'emprise
- Coupure de cartes géologiques

Type de structure	Orientation (en °)	Pendage (en °)
S1	115	50 N

Description de l'échantillon :

micaschiste fin, bleu-vert, avec nombreux clastes millimétriques de quartz et de feldspath ; la granulométrie est variable d'un banc à l'autre

Type d'affleurement :

estran de Brétignolles-sur-Mer

Lithologie principale :

micaschiste clastique

Composition minéralogique :

Nom du minéral	Teneur en %
Séricite	40
Quartz	30
Feldspath Alcalin	20
Plagioclase	10

Levé de la carte géologique du Poiré-sur-vie (0561)

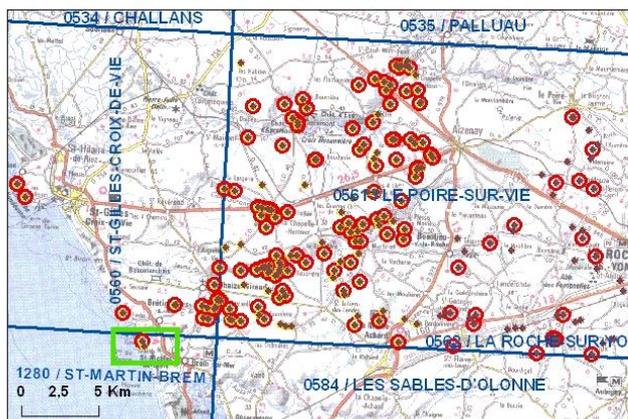
Localisation et description des affleurements échantillonnés



Carte globale de localisation des échantillons.

Fiche d'identité

Indice : 12804X0023
 Numéro d'identifiant : FB1497
 Date : 31/01/2007
 Auteur : F. Béchenec
 Unité :
 Unité de La Roche-Sur-Yon



Source : IGN, scan250, BRGM, BSS.

Carte précise de localisation de l'affleurement.



Source : IGN, scan25, BRGM, BSS.

Légende

- * Points échantillonnés
- Minéralogie des lames minces
- Structures (telles que la schistosité, l'axe des plis et le plan axial)
- Rectangle d'emprise
- Coupure de cartes géologiques

Description de l'échantillon :

rhyolite massive avec porphyroblastes plurimillimétriques de quartz et de feldspath dans une matrice aphanitique

Type d'affleurement :

estran de Brétignolles-sur-Mer

Lithologie principale :

rhyolite

Composition minéralogique :

Nom du minéral	Teneur en %
Feldspath Alcalin	60
Quartz	47
Opaques	3

Annexe 2

Atlas cartographique de la présente étude par secteur

Cf. fichier PDF joint



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

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