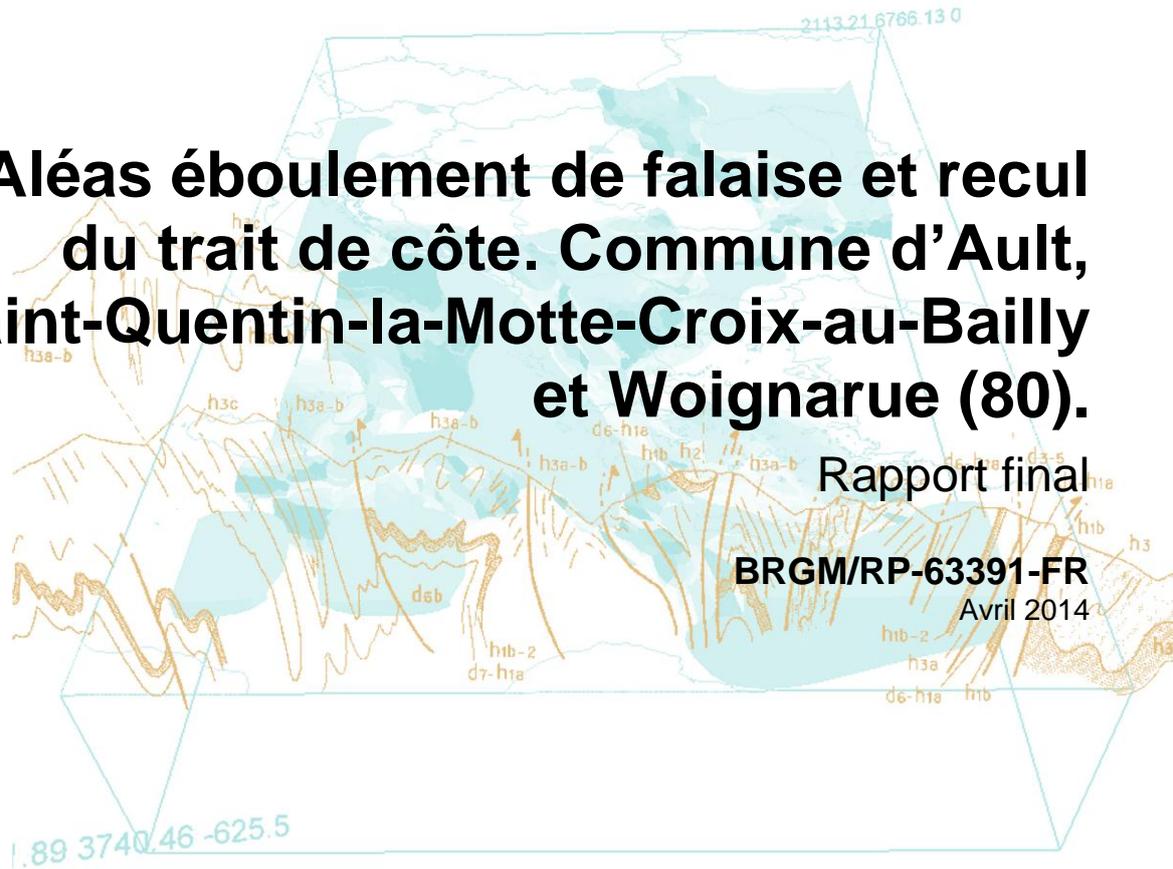




Aléas éboulement de falaise et recul du trait de côte. Commune d'Ault, Saint-Quentin-la-Motte-Croix-au-Bailly et Woignarue (80).



Rapport final

BRGM/RP-63391-FR

Avril 2014



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Aléa éboulement de falaise et recul du trait de cote. Communes d'Ault, Saint- Quentin-la-Motte-Croix-au-Bailly et Woignarue (80).

Rapport final

BRGM/RP-63391-FR

Avril 2014

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

P. Pannet, T. Dewez, L-C. Chemir, M. Leroi

Avec la collaboration de

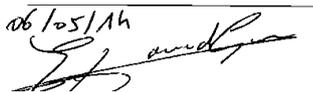
D. Idier, A. Bonjour, M. Branellec, L. Raymond, M. Boulet

Vérificateur :

Nom : E. Vanoudheusden

Date : 06/05/2014

Signature :

06/05/14


Approbateur :

Nom : D. Maton

Directeur régional de Picardie :

Date : 07/05/2014

Signature :



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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès différé :

Le tirage initial de ce rapport, en nombre fixé par convention, est diffusé à son commanditaire, la DREAL de PICARDIE. Sa communicabilité ultérieure à des tiers est liée à la prise d'une décision administrative formelle à laquelle il concourt, conformément à la loi n° 78-753 du 17 Juillet 1978. Passé ce délai, ce rapport devient communicable à tout tiers extérieur qui en ferait la demande ; le BRGM ne peut plus être tenu comme responsable de l'usage qui pourrait en être fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Mots-clés : Falaise, craie, érosion littorale, recul, trait de côte, éboulement, chute de blocs, sous-cavage, fracturation, altération, lithologie, cortège sédimentaire, houle, Ault, Somme, Picardie

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

Pannet P., Dewez T., Chemir L.C., Leroi M. (2014) – Aléa éboulement de falaise et recul du trait de côte. Communes d'Ault-Onival, Saint-Quentin-la-Motte-Croix-au-Bailly et Woignarue (80). Rapport final. BRGM/RP-63391-FR, 109 p., 55 ill., 5 ann., 2 CD.

Synthèse

Le littoral Aultois est à la fois fortement urbanisé et marqué par l'érosion des falaises de craie qui le constituent, induisant un recul inexorable du trait de côte. Depuis longtemps, les habitants tentent par des aménagements, de se prémunir contre ce recul.

De nombreuses études ont déjà traité de cette problématique, notamment celle du premier plan de prévention des risques (PPR) de 2001, réalisée dans les règles de l'art et conforme aux connaissances de l'époque. Elles se concentrent surtout sur l'estimation des moyennes de recul. Cette information importante n'est, dans ce contexte de côte à falaise, pas suffisante pour appréhender l'évolution du trait de côte. En effet, les vitesses moyennes d'érosion des falaises mentionnées dans ces documents masquent d'importantes disparités spatiales et temporelles, avec notamment l'existence d'une érosion par à-coups qui se traduit souvent localement par l'occurrence d'éboulements mobilisant de grands volumes de roche et générant des reculs importants.

Depuis plusieurs années, les différentes recherches menées sur le sujet (Universités de Caen, de Rouen, du Havre, d'Amiens, de Dunkerque, BRGM, CETE,...) tendent à montrer que les facteurs et les dynamiques qui régissent le recul des falaises sont multiples (lithologie, fracturation de la roche, houle, cortège sédimentaire, saturation en eau de la craie, gel/dégel, impact anthropique,...), et difficiles à appréhender et à quantifier.

A l'issue de ce constat en 2012, les services de l'Etat (DREAL de Picardie et DDTM de la Somme) ont demandé au BRGM de mener la présente étude pour actualiser l'aléa de recul du trait de côte sur le littoral Aultois.

Pour ce faire, le BRGM s'est appuyé sur les nombreuses données existantes, et a pu acquérir des données de haute précision, facilitant l'étude des dynamiques responsables de l'érosion.

Les facteurs intervenant dans la mise en place des chutes de blocs et d'éboulement de falaise ont ainsi été analysés. Les dynamiques passées et actuelles de recul du trait de côte ont été définies ; les caractéristiques intrinsèques à la falaise ont été détaillées ; les dynamiques littorales et sédimentaires et leur évolution ont été analysées.

De plus, les impacts anthropiques passés ou récents ont été pris en compte. Il est notamment apparu que les éléments de protection (perré, épis,...), s'ils jouent un rôle de défense contre l'érosion, au moins à court terme, peuvent aussi avoir des impacts négatifs (interruption du régime de transit des galets,...) et nécessitent un entretien lourd et régulier. L'éventuelle mise en place de nouveaux aménagements littoraux nécessite une étude d'impact sur les conséquences des ouvrages à implanter à long terme sur l'objet à protéger mais aussi sur les éventuelles modifications des dynamiques d'érosion de la falaise de part et d'autre de ceux-ci.

La prise en compte des différents facteurs, et surtout des dynamiques d'érosion par tronçon du littoral permet d'estimer avec précision les vitesses de recul du trait de falaise, au moins sur les 30 prochaines années, et par extrapolation à horizon de 100 ans. Les tracés résultant du travail sous système d'information géographique (SIG) ont été reportés sur le fond orthophotographique de 2011 produit par l'IGN.

Au final, il a aussi pu être proposé un zonage de péril imminent en haut de falaise, à l'intérieur duquel il est recommandé de proscrire toute activité humaine. Les résultats indiquent que si

aucun bâtiment ne se trouve actuellement en situation de péril grave et imminent, c'est tout de même le cas de quelques enjeux (parkings ou jardins par exemple).

Selon les scénarii d'aménagements identifiés, plusieurs bâtiments seront en situation à risque dès l'horizon de 10 ans (4 à 8 bâtiments) et encore plus à horizon de 30 ans (8 à 31 bâtiments).

Toutefois, il faut garder en mémoire que si cette étude prend en compte de nombreux facteurs, ce qui lui confère une certaine précision, les dynamiques de recul dépendent fortement de certains évènements, notamment climatiques ou anthropiques. A titre d'exemple, des successions de tempêtes et fortes houles comme celles de l'hiver 2013-2014 peuvent fortement endommager le pied de falaise, accélérant le recul de la falaise. A contrario, des périodes plus calmes comme la période 2010-2013 peuvent amener à réduire les vitesses d'érosion.

Par la suite, une actualisation périodique de cette cartographie des zonages d'aléas est nécessaire afin qu'elle reste un outil d'aide à la décision pour les autorités publiques. Il est recommandé qu'un suivi régulier et homogène de l'évolution du recul de la falaise soit mise en place selon la méthodologie décrite dans cette étude.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Contextes	13
2.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE	13
2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE	13
2.2.1. Formations géologiques rencontrées	13
2.2.2. Contexte structural	15
2.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	16
2.4. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	17
2.4.1. Secteur « Falaise morte- Woignarue »	17
2.4.2. Secteur « Ault nord »	18
2.4.3. Secteur « Casquette nord »	18
2.4.4. Secteur « Rue de Paris »	19
2.4.5. Secteur « Casquette sud »	19
2.4.6. Secteur « rue de la Montagne »	20
2.4.7. Secteur « Esplanade du Casino »	20
2.4.8. Secteur « Bel-Air »	20
2.4.9. Secteur « Premier val »	21
2.4.10. Secteur « Deuxième val »	21
2.4.11. Secteur « Bois de Cise nord »	22
2.4.12. Secteur « Bois de Cise »	22
2.4.13. Secteur « Bois de Cise sud »	22
3. Méthodologie : éléments pris en compte, données recueillies	23
3.1. IDENTIFICATION DES VITESSES DE REcul ET DE LEUR EVOLUTION ...	23
3.1.1. Données existantes	23
3.1.2. Acquisition de données (imagerie / géoréférencement)	25
3.1.3. Traitement de la donnée	28
3.2. CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES A LA FALAISE	34
3.2.1. Lithologie	34
3.2.2. Fracturation	35
3.3. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE / COURANTS MARINS	38
3.3.1. Impact de la houle	38
3.3.2. Cortège sédimentaire	38
3.3.3. Réserves sédimentaires	40

3.4. AUTRES FACTEURS D'ÉROSION	42
3.4.1. Climat	42
3.4.2. Actions chimiques et biologiques.....	42
3.5. IMPACT ANTHROPIQUE	43
3.5.1. Identification et caractérisation des éléments de protection	43
3.5.2. Bilan de l'impact des éléments de protection	47
3.5.3. Gestion de l'eau	47
3.6. ESTIMATION D'UN ZONAGE DE PERIL IMMINENT	50
3.6.1. Méthodologie.....	50
3.6.2. Typologie des phénomènes d'éboulement majeur.....	55
3.7. ESTIMATION DES VITESSES DE REcul	64
4. Résultats.....	65
4.1. IDENTIFICATION DE L'ALEA FORT A TRES COURT TERME (ZONAGE PERIL IMMINENT)	65
4.2. ESTIMATION DES VITESSES DE REcul A COURT ET MOYEN TERME....	66
4.2.1. Cas des zones non protégées	66
4.2.2. Cas des zones protégées.....	67
4.3. ESTIMATION DES VITESSES DE REcul A LONG TERME.....	74
4.4. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA	75
5. Conclusions	77
6. Bibliographie.....	79

Liste des illustrations

Illustration 1 : Extrait de la carte géologique de la France au 1/50 000 (©BRGM)	14
Illustration 2 : Coupe géologique de la côte à falaise normand-picarde selon la classification de Mortimore (Mortimore et Duperret, 2004)	14
Illustration 3 : Correspondance entre l'échelle stratigraphique et la classification de Mortimore. Série crayeuse du Crétacé supérieure (Mortimore et Duperret, 2004). En rouge, formations rencontrées à Ault.	14
Illustration 4 : Schéma des différents états de contraintes entre le Crétacé inférieur et l'Oligocène (Martinez et al., 2001, d'après Quinif et al., 1997 et Vandycke, 1992).....	15
Illustration 5 : Caractéristiques des zones étudiée à Ault et au Bois de Cise lors du projet ROCC16	
Illustration 6 : Direction des familles principales et secondaires relevées lors de l'étude de la fracturation menée dans le cadre du projet ROCC (Martinez et al., 2001)	16
Illustration 7 : Vue du secteur « falaise morte » et de la partie nord du secteur « Ault-nord » (2013)	18
Illustration 8 : Représentation schématique des aménagements réalisés(Source DDTM)	19
Illustration 9 : Vue des secteurs "Casquette sud" (partie droite) et "rue de Paris" (partie gauche). 2013	19
Illustration 10 : Secteur "rue de la Montagne" (au centre). à Droite, partie nord de l'esplanade du Casino (juillet 2013)	20
Illustration 11 : Partie sud de l'esplanade du Casino et secteur "Bel-Air" (2013)	21
Illustration 12 : Pied de falaise, secteur Bois de Cise nord (mai 2013).....	21
Illustration 13 : Photo oblique su secteur "Bois de Cise" en juillet 2013	22
Illustration 14 : Photographie aérienne oblique des zones "rue de la Montagne" et « esplanade du Casino », 1986.....	24
Illustration 15 : Photographie du Bois de Cise au début du XXe siècle	25
Illustration 16 : Photographie oblique des zones « rue de la Montagne » et « Esplanadu du Casino », le 22 juillet 2013	26
Illustration 17 : Comparaison entre les photos obliques de juillet 2013 et de mars 2014. Secteur Bel-Air.....	27
Illustration 18 : Représentation du nombre de transects de mesure du recul automatisé du trait de côte (TdC sur l'illustration) au nord du Bois de Cise	29
Illustration 19 : Representation de l'évolution du recul du trait de côte au Bois de Cise sur fond PVA 1946 (©IGN).....	29
Illustration 20 : Moyenne des reculs identifiés par zone	30
Illustration 21 : Exemple d'erreur d'ortho rectification	31
Illustration 22 : Exemple de vue 3D de la partie de la zone d'étude située au sud d'Ault bourg	33
Illustration 23 : Reculs calculés (en m) de la falaise au sud du bourg d'Ault entre 2009 et 201333	
Illustration 24 : Exemple de lever lithologique (et de la fracturation) de la falaise. Bois de Cise, 2013.	34
Illustration 25 : Identification des principales fractures visibles sur la falaise et le platier (juillet 2013). On note les sous-cavages profonds (>10 m) calés sur la fracturation. En rouge, une zone de fait potentiellement instable.	36

Illustration 26 : Exemple du traitement des données relevées sur le platier au sud du Bois de Cise	37
Illustration 27 : Exemple d'ouvrage transversal bloquant le cortège sédimentaire (Mesnil-Val - Criel-sur-Mer, mars 2014)	40
Illustration 28 : Cartographie des dépôts sous-marins meubles sur l'interface Manche - mer du Nord issue du Schéma des carrières de la Somme (Pannet et al., 2009) – Données IFREMER	41
Illustration 29 : Représentation schématique de l'aménagement de protection du pied de falaise et de la « casquette »	44
Illustration 30 : Vue de l'avancée du pied de falaise protégée par un perré, probablement peu avant 1940	45
Illustration 31 : Vue de face de l'ensemble de l'aménagement erochement-digue-"casquette" (2013)	45
Illustration 32 : photographies comparatives du nord du Bois de Cise au début du XXe siècle et en 2014 : inversion entre rentrant et saillant.....	48
Illustration 33 : Exemple d'épi très dégradé. Bois de Cise, 2014	49
Illustration 34 : Identification des sous-cavages générés durant l'hiver 2013-2014 (photo du 15 mars 2014). Cette photo permet aussi de constater la disparition des galets piégés par les deux épis les plus au sud du Bois de Cise	51
Illustration 35 : Différentiel 3D entre 2009 et 2013 : permet de caractériser les reculs entre ces deux dates	51
Illustration 36 : Exemple d'instabilités visibles (plusieurs écailles désolidarisées), secteur "rue de la Montagne" (photo mai 2013).....	52
Illustration 37 : Exemple de racine d'altération ayant provoqué un recul important en tête de falaise en 2013 (secteur deuxième val, photo mars 2014)	53
Illustration 38 : Comparaison de Photos du sud de la vallée du Bois de Cise en juin 2012 (gauche) et en mars 2014 (droite) : Altération très marquée due à un rejet d'eau usée acide.	54
Illustration 39 : Exemple de craie altérée sous la partie la plus au sud de la casquette (mars 2014)	54
Illustration 40 : Schéma d'évolution d'une falaise vide érodée par néoformation de sous-cavages	56
Illustration 41 : Vue d'une falaise marquée par un éboulement délimité par la fracturation, avant et après le phénomène	57
Illustration 42 : représentation schématique des mécanismes de rupture d'écailles (d'après LCPC)	58
Illustration 43 : Ecaille désolidarisée du versant, nord Bois de Cise (2012)	58
Illustration 44 : Situation du phénomène de 2007 à Criel-sur-Mer	59
Illustration 45 : Mise en évidence de la fracturation complexe à l'origine de l'éboulement de Mesnil-val en 2007.....	59
Illustration 46 : Prises de vue aériennes obliques de 2009 et 2013 mettant en évidence l'occurrence d'un éboulement majeur lié à une fracturation complexe, commune de Mers-les-Bains	60
Illustration 47 : exemple de zone identifiée comme prédisposée à l'occurrence d'éboulement complexe.....	61

Illustration 48 : lois statistiques représentant les occurrences et caractéristiques d'éboulements et chutes de blocs par an et par km linéaire de falaise. Exemple de Criel-sur-Mer (76) (Dewez et al. 2013).....	62
Illustration 49 : Photo permettant de montrer une craie altérée et ses résidus d'érosion diffuse en pied (probable cryoclastie), ainsi que l'impact d'actions anthropiques non maîtrisées (sud Bois de Cise, 2013)	63
Illustration 50 : Estimations des vitesses de recul et du zonage correspondant par extrapolation des dynamiques actuelles	68
Illustration 51 : Estimation des vitesses de recul et du zonage associé en fonction du scénario n°1	69
Illustration 52 : Estimation des vitesses de recul et du zonage associé selon de scénario n°2 .	71
Illustration 53 : Estimation des vitesses de recul et du zonage associé selon de scénario n°3 .	73
Illustration 54 : Estimation des vitesses de recul et du zonage associé à horizon 100 ans, en partant d'un hypothèse d'abandon des éléments de protection	74
Illustration 55 : Exemple de présentation graphique de l'aléa recul du trait de côte (ici recul fonction des dynamiques actuelles)	75

Liste des annexes

Annexe 1 Localisation des zones d'étude	84
Annexe 2 Caractéristiques des craies rencontrées sur la zone d'étude	88
Annexe 3 Modélisation de la potentialité de mobilisation des réserves sédimentaires sous-marines profondes	91
Annexe 4 Synthèse des campagnes de construction d'ouvrages de lutte contre l'érosion	102
Annexe 5 Synthèse des observations de terrain réalisées sur les ouvrages de protection.....	105

1. Introduction

Le littoral Aultois est à la fois fortement urbanisé, et aussi fortement marqué par l'érosion induisant un recul inexorable des falaises de craie.

Depuis très longtemps, les habitants tentent par des aménagements, de se prémunir contre ce recul.

Une bibliographie fournie est disponible sur ce sujet suite aux nombreuses études qui ont déjà traité de cette problématique.

Ces études, et notamment celle du premier PPR de 2001 (réalisée dans les règles de l'art et conforme aux connaissances de l'époque) se concentrent surtout sur l'estimation des moyennes de recul.

Cette information importante, n'est, dans ce contexte, pas suffisante pour appréhender l'évolution du trait de côte à long terme.

En effet, derrière les vitesses moyennes d'érosion des falaises, se cachent d'énormes disparités spatiales et temporelles, avec notamment l'existence d'une érosion par à-coups se traduisant souvent par l'occurrence d'éboulements mobilisant de grands volumes et des engendrant des reculs importants.

Depuis plusieurs années, les différentes recherches menées sur le sujet (Universités de Caen, Rouen, Le Havre, Amiens, Dunkerque, Southampton, Durham... ; BRGM ; CETE...) tendent à montrer que les facteurs et les dynamiques qui régissent le recul des falaises sont multiples (lithologie, fracturation, houle, cortège sédimentaire, précipitations, gel/dégel, piézométrie, impact anthropique...) et difficile à appréhender et à quantifier.

Au cours de cette étude, les travaux menés par le BRGM ont mobilisé des technologies nouvelles afin d'essayer de quantifier les différents facteurs susceptibles d'intervenir dans le recul du trait de côte à moyen et long terme.

Le présent rapport présente les approches utilisées pour y parvenir, les difficultés rencontrées, la méthodologie de définition du zonage d'aléa et les résultats obtenus.

2. Contextes

2.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

La ville d'Ault est située en Picardie, le long du littoral de la Manche, au sud de la vallée de Somme. Cette commune de 6 km² comprend trois quartiers distincts : Ault-bourg, qui occupe les deux flancs d'une vailleuse, Onival directement au nord, colline surplombée par le phare, et le Bois de Cise, qui regroupe des villas dans une autre vailleuse boisée située à quelques centaines de mètres au sud-ouest d'Ault. Ault abrite un peu plus de 2000 habitants pour une densité de population de 346 hab/km².

La zone d'étude comprend une partie de la commune de Woignarue au nord (falaise morte), le littoral de la commune d'Ault ainsi que le petit couloir maritime de la commune de Saint-Quentin-La-Motte-Croix-Au-Bailly située juste au sud de la vailleuse du Bois de Cise.

Le secteur d'étude est caractérisé par :

- une falaise morte à Woignarue orientée environ N050,
- la falaise vive (qui naît à Ault) de direction N045 en moyenne,
- des vailleuses perpendiculaires à la falaise,
- la présence d'éléments de protection sur le platier et sur la falaise,

La falaise vive, battue par la houle, présente une forte hauteur. Elle est affectée par une fracturation marquée, des sous-cavages parfois profonds, ainsi que des racines d'altération. A sa base, elle possède un cordon de galets à géométrie variable.

Les vailleuses, callées sur des discontinuités importantes (failles), ont des hauteurs plus faibles mais sont sujettes à une forte altération.

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

2.2.1. Formations géologiques rencontrées

D'après la carte géologique de la France au 1/50 000 (feuille n°31-32, Saint-Valery-sur-Somme-Eu ; *Broquet et al.*, 1984), au niveau d'Ault, la falaise de craie est constituée de formations datées du Turonien Supérieur jusqu'au Santonien inférieur (C3c, C3c-4a, C4b, C4c, C5a, illustration 1).

Selon la classification litho-géotechnique de Mortimore (ou de l'Université de Brighton), on trouve au niveau d'Ault la *Lewes nodular Chalk* sur une bonne partie de la falaise et la *Seaford Chalk* (Upper chalk) en partie supérieure de falaise (illustrations 2 et 3).

La *Lewes nodular chalk* (LNC, illustration 2, caractéristiques mécaniques en annexe 2) est caractérisée par la présence de nombreux nodules déposés sous formes de bancs ou dispersés dans la masse. Cette craie contient des bancs très résistants et son érosion lui donne un aspect rugueux. Elle est datée du Turonien moyen au Coniacien moyen.

La *Seaford Chalk* (SfC) est caractérisée par une craie blanche à silex à grains fins, tendre et se serait déposée du Coniacien moyen au Santonien moyen. Cette unité se distingue par ses bancs de larges nodules de silex bien visibles et semi-continus.

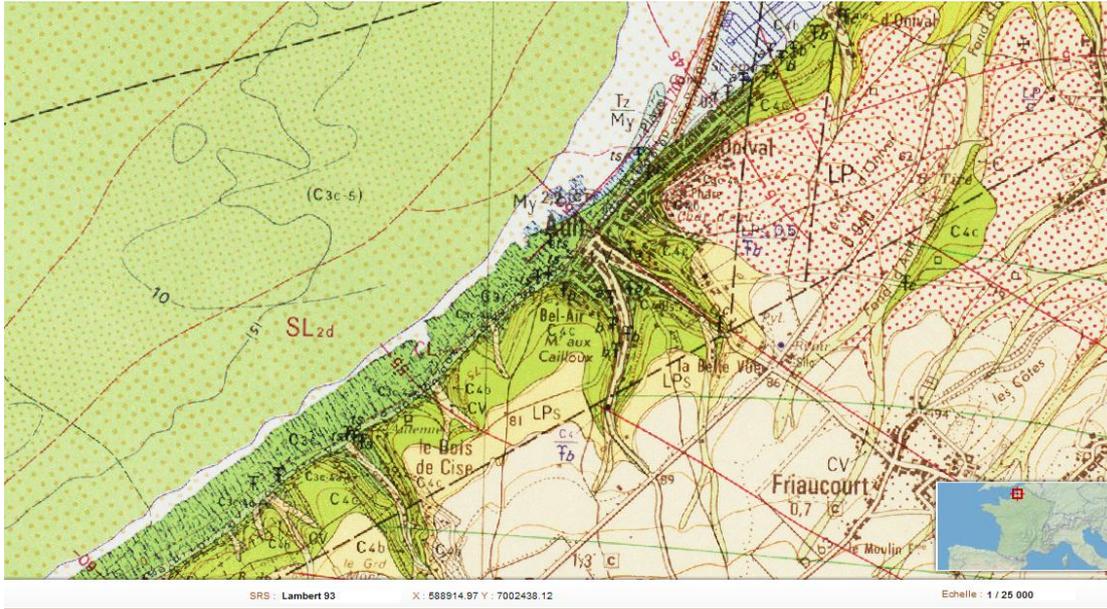


Illustration 1 : Extrait de la carte géologique de la France au 1/50 000 (©BRGM)

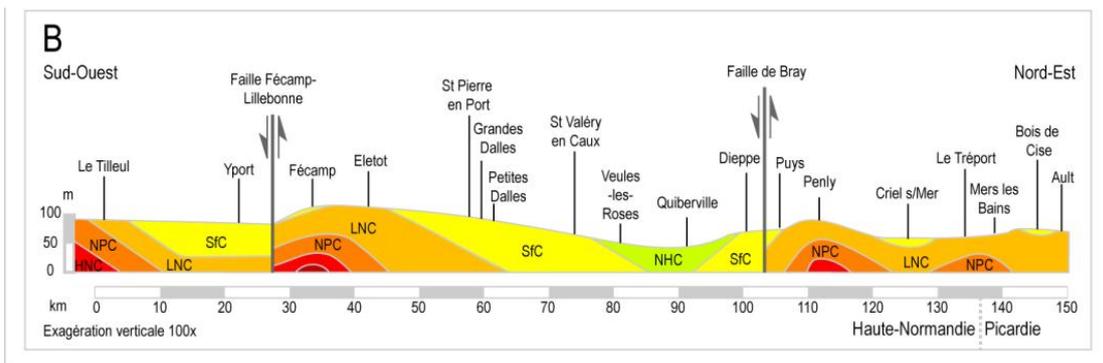


Illustration 2 : Coupe géologique schématique de la côte à falaise normand-picarde selon la classification de Mortimore (in Dewez et al., 2013 d'après Mortimore et Duperret, 2004)

Stratigraphy		Lithostratigraphy	
UPPER CRETACEOUS	Campanian		Culver chalk
	Santonian		Newhaven chalk
	Coniacian		Seaford chalk
	Turonian		Lewes chalk
	Cenomanian		New Pit chalk
			Holywell chalk
			Zigzag chalk
			West Melbury chalk

Illustration 3 : Correspondance entre l'échelle stratigraphique et la classification de Mortimore. Série crayeuse du Crétacé supérieure (Mortimore et Duperret, 2004). En rouge, formations rencontrées à Ault.

En tête de falaise de craie, on distingue la présence de matériaux d'altération (craie altérée, argiles contenant quelques silex), peu épaisse (quelques décimètres) en moyenne, mais s'enfonçant en poches au niveau des discontinuités.

Ces matériaux d'altération sont recouverts d'une couche de limons éoliens (lœss) peu épaisse.

On peut noter aussi au niveau des valleuses la présence de dépôts de versant sur quelques centimètres à quelques mètres d'épaisseur.

2.2.2. Contexte structural

Plusieurs analyses structurales ont été menées dans la craie sur plusieurs zones d'étude (le bassin de Mons, le bassin du Boulonnais et l'île de Wight notamment) et différentes phases tectoniques ont été mises en évidence depuis le Crétacé jusqu'à l'Oligocène.

L'illustration 4, donne les directions des principaux états de contrainte repérés sur les sites étudiés.

- Le régime extensif NE-SW (en vert) est retrouvé sur les trois sites.
- Les régimes extensifs NW-SE (en rouge), extensif N-S (en bleu) et extensif E-W (en rose) sont retrouvés dans le bassin de Mons et le bassin du Boulonnais
- Le régime extensif E-W associé à régime compressif N-S (en orange) est présent dans le bassin du Boulonnais et sur l'île de Wight.

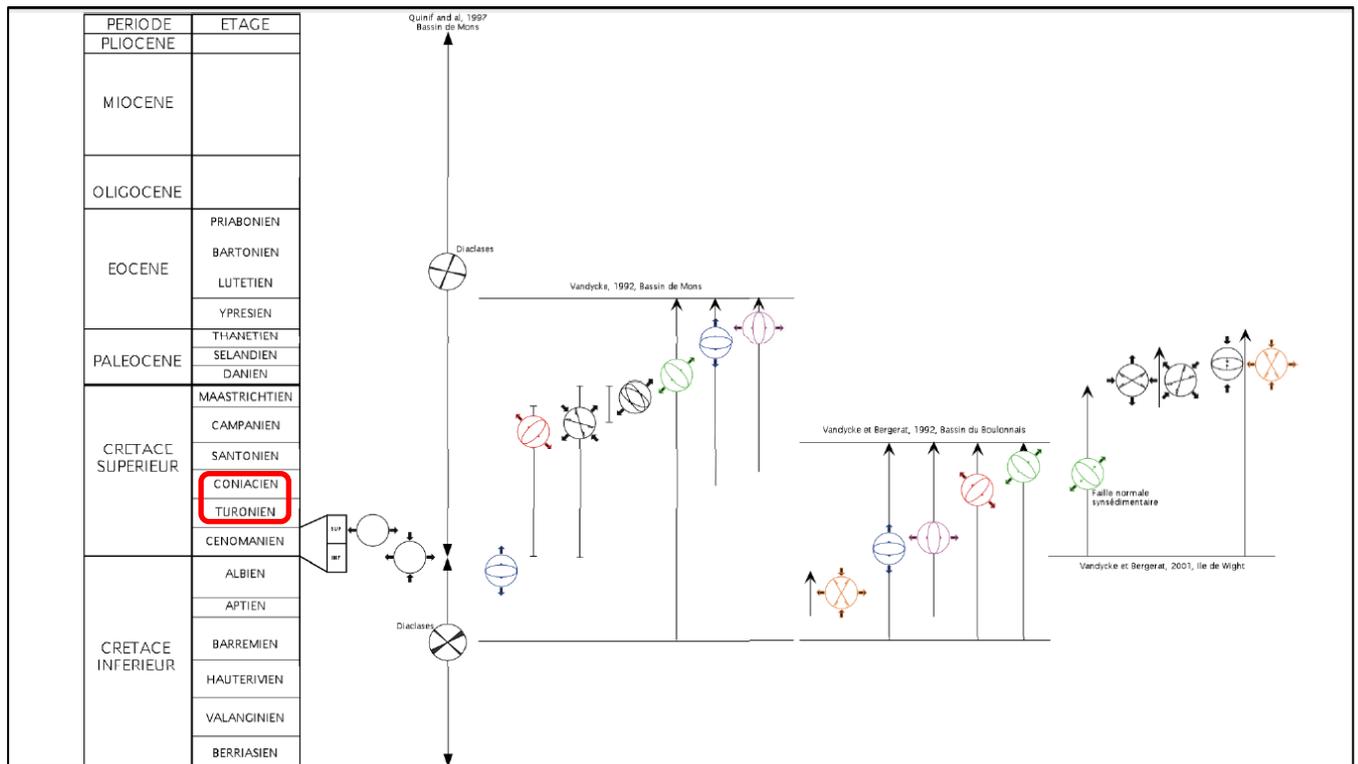


Illustration 4 : Schéma des différents états de contraintes entre le Crétacé inférieur et l'Oligocène (Martinez et al., 2001, d'après Quinif et al., 1997 et Vandycke, 1992).

D'autre part, les tableaux suivants (illustrations 5 et 6) correspondent aux données recueillies sur Ault et le Bois de Cise lors de l'étude de la fracturation menée dans le cadre du projet ROCC (Martinez et al., 2001).

Site d'étude	Nombre d'unités lithologiques	Nom des Unités lithologiques	Orientation de la falaise	Nombre de données sur la falaise	Nombre de données sur le platier
Ault Nord	2	Lewes et Seaford	N040	32	0
Ault Sud	2	Lewes et Seaford	N040	34	0
Bois de Cise Nord	2	Lewes et Seaford	N045	100	123

Illustration 5 : Caractéristiques des zones étudiées à Ault et au Bois de Cise lors du projet ROCC

Site	Direction principale falaise 1	Direction principale falaise 2	Direction secondaire falaise 1	Direction secondaire falaise 2	Direction secondaire falaise 3	Typologie principale falaise	Typologie secondaire falaise	Direction principale platier	Direction secondaire platier 1	Direction secondaire platier 2	Direction secondaire platier 3
Ault Nord	N120		N25	N105	N160	fractures					
Ault S	N140	N110									
Bois-de-Cise N	N130		N110	N020	N155	fractures		N120	N055		

Illustration 6 : Direction des familles principales et secondaires relevées lors de l'étude de la fracturation menée dans le cadre du projet ROCC (Martinez et al., 2001)

Ces travaux permettent de déduire que sur les falaises de la zone d'étude devraient être retrouvées des fractures liées à un régime extensif NE-SW principalement puis secondairement, à un régime E-W. Sur le platier, on retrouve un régime principal NE-SW qui correspondrait probablement au régime extensif de même direction affectant la falaise. Un régime secondaire est à noter, de direction NW-SE.

La craie du terrain d'étude serait donc affectée par :

- une première famille de fractures « perpendiculaires » à la falaise (le régime de contrainte associé ayant la même direction que la falaise).
- Une deuxième famille de fractures parallèles à la falaise (surtout visibles sur le platier)

2.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

a) Généralités sur la nappe de la craie

La nappe de la craie est une nappe libre alimentée par les précipitations efficaces d'automne et d'hiver. C'est entre les mois de novembre et mars que près de 90% de l'infiltration vers les nappes se réalise.

La craie est affectée par différents accidents et soumise à des altérations dont l'un des résultats est le développement de réseaux karstiques. La craie est ainsi un milieu mixte, poreux, fissuré, et karstique. Lorsque la craie est compacte (sous les plateaux et à grande profondeur), les eaux s'écoulent dans les pores intergranulaires qui ont des dimensions de l'ordre du micron. Les valeurs de perméabilité sont égales ou inférieures à 1.10^{-6} m/s. Les vitesses de circulation de la nappe sont alors de l'ordre de 1 à 10 mètres par an. Dans les vallées, des fissures d'ouverture millimétriques à centimétriques affectent ce milieu, mais il est encore assimilable à un milieu poreux car les écoulements ont un régime laminaire et respectent la loi de Darcy. Les perméabilités ont alors des valeurs comprises entre 1.10^{-5} et 1.10^{-3} m/s. Les vitesses

d'écoulement peuvent atteindre plusieurs dizaines et même plusieurs centaines de mètres par an. Lorsque l'ouverture des fissures s'agrandit et que les conditions de charge le permettent, le régime d'écoulement devient turbulent, avec des vitesses atteignant plusieurs centimètres à la seconde. Les écoulements obéissent à d'autres lois que celles de Darcy et parfois à d'autres conditions (flux) que les conditions de pression. Ces réseaux sont connus dans toute la région recouverte par la craie, mais ils n'intéressent que certains talwegs, certaines vallées sèches et humides, et n'occupent qu'une petite partie de l'aquifère.

La surface piézométrique de la nappe épouse fortement la morphologie du sol qui, elle, dépend en partie de la répartition de la fissuration de la craie. Elle forme des dômes d'alimentation sous les plateaux où l'aquifère peu fissuré a une fonction capacitive, et des dépressions dans les zones fissurées drainantes à fonction transmissive (vallées humides et sèches, réseaux karstiques).

b) Informations concernant la zone d'étude

La craie renferme un puissant aquifère au niveau fluctuant dont l'impact sur l'érosion et l'instabilité a toujours été constaté mais reste mal quantifié.

La hauteur de saturation est l'un des facteurs qui détermine le plus les instabilités des falaises à un instant quelconque donné (Projet ROCC).

Au niveau d'Ault, l'absence d'écoulement en pied de falaise semblerait montrer que la nappe se raccorderait à la mer à marée basse en dessous du niveau du platier (ANTEA 1999).

2.4. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude a été divisée en secteurs homogènes, c'est-à-dire admettant des caractéristiques similaires au niveau :

- de la hauteur de falaise,
- de la géologie
- de l'état d'altération,
- des dynamiques les impactant,
- des éléments de protection,
- des enjeux.

Ainsi, treize secteurs ont été définis. Une carte récapitulative est disponible en annexe 1. Leur description du nord au sud est détaillée ci-après :

2.4.1. Secteur « Falaise morte- Woignarue »

Ce secteur est situé à plusieurs centaines de mètres à l'arrière du trait de côte actuel et n'est jamais impacté par les dynamiques littorales. Il s'agit donc à cet endroit d'un versant réglé, plus qu'une falaise, puisqu'on n'observe presque plus d'affleurements sub-verticaux, mais un versant admettant une pente souvent inférieure à 45°. La pente actuelle de ce versant est le résultat de son érosion (continentale), non reprise en pied par la mer, mais aussi de travaux humains qui ont par endroits permis une réduction de la pente par terrassement. Aujourd'hui, le comportement de ce versant est similaire à celui de tous les versants réglés sur formations crayeuse, en milieu continental (vallée de la Bresle, vallée de la Somme...)

Il s'agit d'un ancien tracé du trait de côte, duquel la mer s'est retiré au cours du Quaternaire, après la mise en place naturelle du cordon de galets des bas-champs de Cayeux. Une des hypothèses de cette modification du trait de côte à cet endroit est la possibilité d'un rejeu tectonique au Quaternaire d'une faille N60-70° passant au niveau du Hâble d'Ault, qui aurait entraîné un affaissement relatif de la partie nord (Antoine et al., 2011), créant un point d'accroche à la flèche de galets. Cette hypothèse récente nécessite toutefois d'être vérifiée par des travaux de recherche complémentaires.



Illustration 7 : Vue du secteur « falaise morte » et de la partie nord du secteur « Ault-nord » (2013)

2.4.2. Secteur « Ault nord »

Il s'agit ici de la « façade » maritime du secteur de falaise morte. Les terrains naturels à cet endroit sont des dépôts marins Quaternaires venant buter au sud contre des dépôts de versants, issus de l'érosion de la paléo-falaise. Ce secteur est aujourd'hui totalement artificialisé, notamment par la présence d'un mur parabolique et d'un épi au sud permettant de piéger les galets. Sa limite nord (flèche rouge, illustration 7, marque le début du cordon de galets des bas-champs de Cayeux).

2.4.3. Secteur « Casquette nord »

Ce secteur, comprenant un linéaire de falaise de 230 m environ, admet une faible hauteur de falaise (inférieure à 20 m par rapport à la protection en pied ; tête située entre 25 et 30 m NGF). Cette dernière est protégée en pied par la présence d'une digue constituée par une levée de terre (craie), haute de 8 à 10 m, protégée par un enrochement.

La tête de falaise est couverte d'un aménagement appelé casquette (ou console, sur l'illustration 8), constitué d'un radier d'une dizaine de mètres de largeur, posé sur deux ancres bétonnées à l'intérieur du massif crayeux.

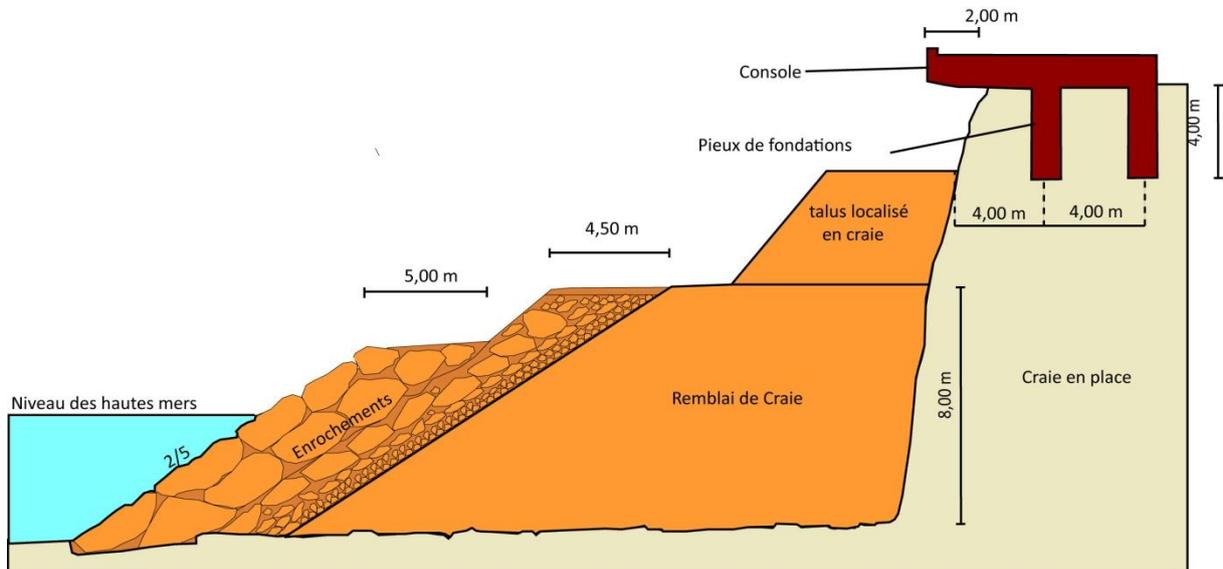


Illustration 8 : Représentation schématique des aménagements réalisés (Source DDTM)

2.4.4. Secteur « Rue de Paris »

Ce secteur, long de 150 m, admet la même protection au niveau du pied de falaise, mais sa tête n'est pas artificialisée. Le pied de falaise ne subit donc pas l'impact direct de la houle. La falaise, haute d'une vingtaine de mètres, est fortement fracturée et altérée. On constate par ailleurs la présence d'enjeux proches de la tête de falaise à cet endroit.



Illustration 9 : Vue des secteurs "Casquette sud" (partie droite) et "rue de Paris" (traits rouges). 2013

2.4.5. Secteur « Casquette sud »

Ce secteur, comprenant environ 200 m de linéaire de falaise, est protégé en pied par le même aménagement que les deux précédents, et admet en tête le même aménagement que le

secteur « casquette nord ». La falaise est ici plus élevée que sur la partie sud (entre 15 et 30 m de hauteur selon les endroits, 25 à 42 m NGF).

Ce secteur est marqué par la présence d'une craie très altérée sous la casquette.

2.4.6. Secteur « rue de la Montagne »

Ce secteur n'est pas (ou plus) protégée par des aménagements anthropiques. Toutefois, la digue située au sud génère un piégeage des galets, qui permet ici de protéger en partie le pied de falaise (jusqu'à 7 m d'épaisseur de galets par endroits, environ 100 000 m³ de sédiments actuellement piégés ici).

La falaise, sur un linéaire de 160 m, reste directement impactée par la mer. Haute de 30 à 40 m, elle est intensément fracturée et est affectée par des sous-cavages en pied.

Ce secteur a été impacté par un éboulement majeur au cours des années 2000 (en limite sud).



Illustration 10 : Secteur "rue de la Montagne" (au centre). à Droite, partie nord de l'esplanade du Casino (juillet 2013)

2.4.7. Secteur « Esplanade du Casino »

Ce secteur comprenant 270 m de linéaire de trait de côte se trouve au niveau d'une vailleuse. Il s'agit ici d'un secteur totalement protégé des actions de la mer, par la présence d'un perré en pied, protégé par des enrochements, puis d'un mur maçonné recouvrant l'ensemble de la falaise. Cette protection a pour conséquence d'empêcher toute analyse visuelle de l'état d'altération et de facturation de la roche qu'elle recouvre. Cette zone admet par ailleurs beaucoup d'arrivées d'eau douce, bien visibles à marée basse.

2.4.8. Secteur « Bel-Air »

Ce secteur marque la limite sud de la partie urbanisée du bourg d'Ault. Il prend en compte environ 250 m de linéaire de falaise vive au sud de l'esplanade du casino. La falaise admet ici une hauteur comprise entre 30 et 60 m du nord au sud. Elle est directement impactée par la houle à marée haute, seule la limite nord du secteur étant partiellement protégée par la présence d'un cordon de galets transitoire en pied pouvant dépasser 5 mètres d'épaisseur (volume estimé à 3000 m³ sur les 60 mètres au sud de l'esplanade du Casino). On constate une fracturation très marquée et la présence de sous-cavages en pied de falaise. Ce secteur a

été impacté par plusieurs éboulements depuis 2000 (traces des éboulements de 2009 et 2010 encore visibles sur le platier en 2013, à droite de la photo, illustration 11).



Illustration 11 : Partie sud de l'esplanade du Casino et secteur "Bel-Air" (2013)

2.4.9. Secteur « Premier val »

Il s'agit ici d'un secteur sans enjeu, comprenant un linéaire de falaise de 550 m s'étendant au sud du secteur « Bel-Air », et de part et d'autre de la vailleuse nommée « premier val ». Il s'agit d'un secteur de falaise vive, haute d'une soixantaine de mètres sur les parties les plus hautes, et environ 45 m dans la vailleuse située au sud du secteur. Ces falaises sont relativement facturées et n'admettent que très peu de galets en pied.

2.4.10. Secteur « Deuxième val »

Ce secteur qui s'étend sur 800 m au sud du précédent (jusqu'en limite du Bois de Cise), admet des falaises plus hautes (dépassant par endroits 70 m), plus fracturées et plus altérées. Cette altération est bien visible au niveau de la vailleuse au centre de cette zone, perchée à 45 m de hauteur. On ne trouve que très peu de galets en pied de falaise sur ce secteur, mis à part au niveau de la vailleuse où le cordon de galets peut atteindre 4 m d'épaisseur en pied de falaise.



Illustration 12 : Pied de falaise, secteur Bois de Cise nord (mai 2013)

2.4.11. Secteur « Bois de Cise nord »

Il s'agit d'un secteur comprenant environ 130 m de linéaire de falaise, directement au nord de l'épi le plus au nord du Bois de Cise. La hauteur de falaise descend de 70 à 40 m du nord au sud. Ce secteur n'a pas de protection en pied et est légèrement urbanisé à proximité de la tête de falaise. On constate une fracturation marquée et une quasi absence de cordon de galets en pied de falaise.

2.4.12. Secteur « Bois de Cise »

Il s'agit ici d'un secteur admettant des éléments de protection en pied de falaise, long d'environ 220 m, correspondant à la valleuse du Bois de Cise. On trouve à cet endroit 4 épis permettant de piéger des galets au sud de chacun. La hauteur de falaise est inférieure à 15 m au centre de la valleuse, tandis qu'elle est proche de 40 m au niveau des limites nord et sud du secteur. On y observe une craie assez fracturée et très altérée, notamment au centre et au sud de la valleuse.



Illustration 13 : Photo oblique du secteur "Bois de Cise" en juillet 2013

2.4.13. Secteur « Bois de Cise sud »

Ce secteur long de près de 500 m, rejoint le territoire de la commune de Mers-les-Bains au sud. Les hauteurs de falaise s'échelonnent de 40 m à l'approche du Bois de Cise, à plus de 75 m au sud de la partie urbanisée du Bois de Cise. Le cordon de galets est très restreint, voire absent par endroits en pied (limite SW de l'illustration 13), et on constate une falaise très fracturée et marquée par de nombreux sous-cavages au niveau du pied.

3. Méthodologie : éléments pris en compte, données recueillies

3.1. IDENTIFICATION DES VITESSES DE REcul ET DE LEUR EVOLUTION

3.1.1. Données existantes

Bibliographie

Le recul des falaises à Ault est un phénomène qui préoccupe depuis longtemps la population. Aussi, la bibliographie est riche en tentatives de quantification du recul.

On citera :

- Billy, 1952, qui estimait un recul des falaises de 0,8 m/an à Ault-Onival entre 1792 et 1940 ;
- Dallery, 1955 : 0,5 m/an ;
- Hascoet, 1988 : 0,3 à 0,6 m/an ;
- Ledoux, 1989 : 0,7 m/an (« observés à Ault bourg avant les travaux »)
- Dolique, 1991 : 0,4 m/an ;
- Costa, 1997 : 0,1 à 0,7 m/an selon les endroits (chronique 1966-1995) ;
- SOGREAH, 1999 : 0,43 m/an ;
- Creoccean (2001) : 0,1 à 0,5 m/an selon les endroits pendant le XXe siècle ;
- ROCC (2001) : 0,43 m/an (chronique 1978-1997).

Ces études sont fondées sur des techniques d'analyses solides. La synthèse de S. Costa est d'ailleurs toujours une référence sur l'ensemble du littoral du Havre à Ault.

Toutefois, ces études utilisent des techniques variées, présentent des marges d'erreur différentes et des pas de temps d'étude différents (Costa, 2007). Les objets d'étude sont aussi souvent différents.

Par ailleurs, les images utilisées présentent d'important problèmes de calage, d'orthorectification, qu'il est parfois, même encore aujourd'hui, compliqué de corriger malgré les techniques numériques modernes.

PVA IGN

De nombreuses Prises de Vues Aériennes (PVA) ont été levées depuis la seconde guerre mondiale et sont mises à disposition par l'IGN. Deux jeux pseudo-verticaux (1946, 1973) ont été recalés afin d'identifier le recul du trait de côte depuis la seconde guerre mondiale.

Orthophotographies et LIDAR IGN

Plusieurs jeux d'orthophotographies rectifiées sont mis à disposition par l'IGN (2000, 2001, 2003, 2011) et ont été utilisés dans le cadre de cette étude.

L'« ortho littorale » 2000 (levé en août 2001), correspondant à l'état de la falaise au moment de la première étude PPR, et les orthophotographies 2011 ont particulièrement été utilisées. Il s'agit des données IGN les plus fiables.

C'est notamment le cas des orthophotographies 2011, dont l'acquisition a été couplée avec un lever LIDAR aéroporté, ce qui confère à la donnée une précision planimétrique de la tête de falaise de 1 m (maille du MNT correspondant).

Acquisition LIDAR BRGM

Le BRGM a réalisé en 2009 une acquisition par télédétection laser (LIDAR) héliportée de la falaise. Ces données permettent la reconstruction d'un modèle numérique de surface de haute-précision (de l'ordre de 10 cm par maille). Cette information 3D photogrammétrique a pu ainsi servir d'élément de comparaison avec l'acquisition 3D réalisée dans le cadre de cette étude.

Le jeu de données LIDAR héliporté de 2009 a été géoréférencé avec précision dans le cadre de cette étude par le bureau d'études spécialisé SCAN MAP – CABESTAN.

Photos obliques

L'ensemble de la côte à falaise de Haute-Normandie et de Picardie a été levée en photographie oblique en 1986 (illustration 14). Ces données apportent des informations quant aux faciès de la falaise, et donc ses dynamiques d'érosion à l'époque, ainsi que sur la présence de galets en pied de falaise et piégés par les éléments de protection. On peut aussi distinguer une nette évolution de l'état des éléments de protection (cf. illustrations 10 ou 17).



Illustration 14 : Photographie aérienne oblique des zones "rue de la Montagne" et « esplanade du Casino », 1986.

Le BRGM a aussi fourni deux jeux de photos obliques, de 2009 (correspondant au lever LIDAR) et 2010, apportant des informations sur l'évolution de la falaise, et notamment des sous-cavages et l'occurrence d'éboulements majeurs.

Photos anciennes

De nombreuses photos anciennes montrant la falaise à Ault et au Bois de Cise à différentes époques ont pu être retrouvées.

Ces photos montrent notamment l'évolution des éléments de protection présents en pied de falaise.

Elles permettent une meilleure compréhension des vitesses moyennes de recul en fonction des endroits, et permettent d'expliquer pourquoi des dynamiques observées récemment n'ont pas impacté le trait de côte par le passé.

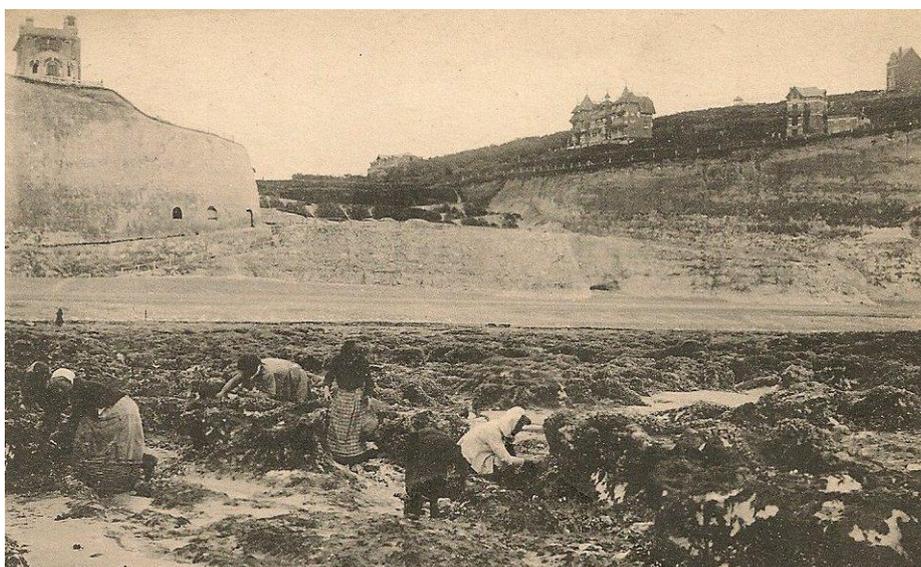


Illustration 15 : Photographie du Bois de Cise au début du XXe siècle

3.1.2. Acquisition de données (imagerie / géoréférencement)

Photographies obliques

Un vol visant à réaliser des photographies obliques a été réalisé le 22 juillet 2013 dans le cadre de cette étude. Le but était d'avoir une vision complète de la falaise, du platier et des enjeux, ainsi que d'obtenir un outil de travail géoréférencé.

En effet, pour cette acquisition un développement méthodologique a été réalisé afin de pouvoir obtenir un Modèle Numérique de Surface suite à un traitement photogrammétrique de ces photographies.

Pour cela, il a été disposé durant le vol trois appareils photo de haute précision, orientés selon trois angles différents (triscopie). Ces appareils sont asservis au même déclencheur et à un GPS chacun afin que les déclenchements soient simultanés et chaque photo géoréférencée (illustration 16).



Illustration 16 : Vue du dispositif de prise de vue

En parallèles, des cibles géoréférencées (type panneaux de signalisation routière) ont été placées au sol. Ce dispositif permet un post-traitement photogrammétrique de précision.

Le vol a été doublé, une première fois éloigné de la falaise afin d'obtenir une vue complète du platier (illustration 17) et aussi une vue comparable à la mission de 1986 (illustration 14), et une seconde fois plus proche de la falaise afin d'avoir une précision d'image suffisante pour le traitement de données concernant la falaise.



Illustration 17 : Photographie oblique des zones « rue de la Montagne » et « Esplanade du Casino », le 22 juillet 2013

Par ailleurs, à l'issue de l'hiver 2013-2014 marqué par des tempêtes et surtout des fortes houles associées, un second vol a été effectué le 15 mars 2014. Il a notamment permis d'identifier l'impact érosif des tempêtes successives sur le pied de la falaise et sur le cortège sédimentaire.



*Illustration 18 : Comparaison entre les photos obliques de juillet 2013 (haut) et de mars 2014 (bas).
Secteur Bel-Air*

On peut voir par exemple sur l'illustration 18, en comparant la même prise de vue à 8 mois d'intervalle, que les éboulis présents en pied (résidus des éboulements successifs de 2009 et 2010) ont été totalement déblayés et que le pied de falaise a subi une forte érosion durant l'hiver 2013-2014.

Lever GPS

Afin d'assurer un calage le plus précis possible entre les différents jeux de données interprétés, un lever au GPS centimétrique a été réalisé. Il concerne l'ensemble des enjeux, les aménagements de lutte contre l'érosion, ainsi que la tête et le pied de falaise (nombre de points levés peu nombreux pour des raisons de sécurité).

3.1.3. Traitement de la donnée

Recul de la tête de falaise

Différents jeux de données ont été interprétés afin d'identifier les reculs du trait de côte depuis la seconde guerre mondiale.

Un outil statistique spécialisé a été utilisé pour réaliser ces travaux. Il s'agit de l'application ArGIS DSAS (Digital Shoreline Analysis System) qui permet de calculer des taux de variation du trait de côte.

Pour cela, la PVA IGN de 1946 et les orthophotographies de 2001 ont été calées sur les orthophotographies de 2011 puis le trait de tête de falaise a été digitalisé.

La PVA IGN de 1973 a été ponctuellement utilisée en contrôle.

Le trait de tête de falaise des orthophotographies de 2011 a aussi été reporté sous SIG. Son couplage avec un lever LIDAR lui confère une très bonne précision.

Les levés photogrammétriques BRGM de 2009 et 2013, ainsi que le lever GPS de 2014 ont aussi été utilisés pour les zones à enjeux. Ces deux derniers jeux de données nous ont permis de tracer le trait de tête de falaise le plus actualisé possible.

Traitement DSAS

Le traitement DSAS permet donc par le traçage d'une ligne de référence sur des éléments fixes, de calculer des distances entre plusieurs traits de côte digitalisés. Cet outil permet aussi de calculer des moyennes de taux de recul par zone.

Sur la zone d'étude, le calcul a été réalisé sur 331 transects, soit environ un tous les 10 mètres (illustration 19).

Une première analyse statistique a été réalisée pour comparer la tête de falaise entre 1946 et 2001, date du PPR en vigueur. A la marge d'erreur inhérente à la précision de la donnée près, les résultats trouvés sont cohérents avec ceux présentés dans l'étude PPR de 2001, ainsi qu'avec l'étude de référence du professeur Costa portant sur la chronique 1966-1995 (Costa, 2001).

Une seconde analyse statistique a été réalisée sur le laps de temps 2001-2011 (ou 2013 et 2014 en fonction des endroits), révélant une évolution très notable des vitesses de recul.



Illustration 19 : Représentation du nombre de transects de mesure du recul automatisé du trait de côte (TdC sur l'illustration) au nord du Bois de Cise

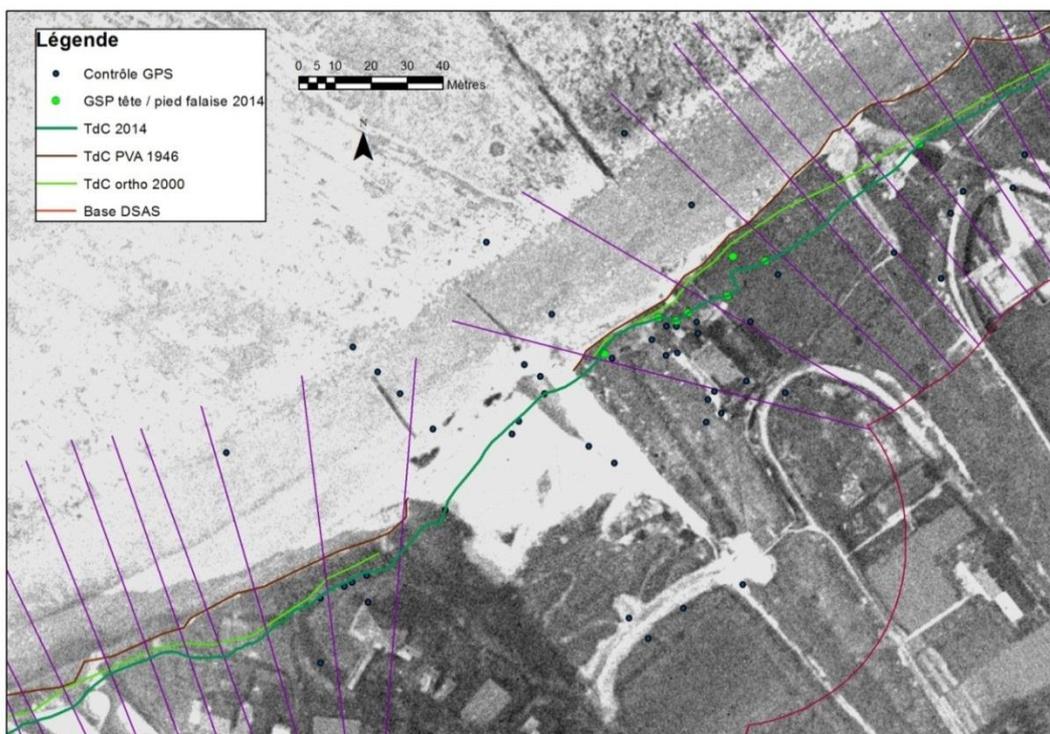


Illustration 20 : Représentation de l'évolution du recul du trait de côte au Bois de Cise sur fond PVA 1946 (©IGN)

Données complémentaires

Un contrôle de cohérence a été réalisé manuellement sur la première analyse DSAS, à partir des PVA IGN de 1973.

La seconde analyse (2001-2011) a été affinée avec les données photogrammétriques de 2009 et 2013 et le lever GPS de 2014.

Résultats

Il en ressort une évolution très notable des vitesses de recul du trait de falaise depuis 2000 :

Secteur	Zone	Recul 1946-2000 (m/an)	Recul 2000-2014 (m/an)
Ault Bourg	Ault nord	-	-
	Casquette nord	0,1	-
	Rue de Paris	0,1	0,1
	Casquette sud	0,2	-
	Rue de la Montagne	0,15	0,35
	Espanade du Casino	-	-
	Bel Air	0,3	0,7
Entre Ault et Bois de	Premier val	0,25	0,5
	Deuxième val	0,25	0,55
Bois de Cise	Bois de Cise nord	0,4	0,6
	Bois de Cise épis	0,2*	0,2
	Bois de Cise sud	0,2	0,4

Illustration 21 : Moyenne des reculs identifiés par zone

- Sur le secteur Ault nord, la précision des données ne permet pas d'identifier de recul avec certitude ;
- Sur les secteurs situés au nord de l'esplanade du casino, on constate des vitesses de recul relativement faibles depuis 1946, essentiellement lié au fait que l'ensemble des prises de vues aériennes depuis la seconde guerre mondiale montrent que ce secteur est protégé par des aménagements anthropiques, et a longtemps bénéficié d'un large cordon de galets. Ces moyennes cachent quelques disparités, notamment sur une partie du secteur « rue de la Montagne » où on observe des reculs plus rapides par endroits et une forte variabilité dans le temps, correspondant probablement à l'état des éléments de protection ;
- Sur les secteurs « casquette nord » et « casquette sud », l'aménagement marque aujourd'hui la tête de falaise sur les prises de vues verticales, et donc n'admet aucun mouvement depuis sa mise en place ; Il en va de même pour l'esplanade du casino, où les ouvrages de protection ne permettent pas de percevoir d'évolution ;
- On constate par contre des fortes évolutions de vitesses de recul sur les secteurs non protégés ou pour lesquels les protections sont en état de dégradation avancée ;

- Enfin, il faut noter que le secteur « Bois de Cise épis » n'admet pas de mesures représentatives pour plusieurs raisons. La première concerne la fiabilité des données (lisibilité, illustration 20 ; erreurs d'orthorectification), ne permettant pas de mesures précises du recul. La seconde, la plus importante, concerne les actions anthropiques nombreuses au niveau de la vallée du Bois de Cise, avec une taille complète de la falaise ayant engendré un retrait important de la tête de falaise par rapport à son pied. Aussi, la tête de falaise a très peu reculé, alors que l'avancée du pied, présente au début du XXe siècle et en 1946 a totalement disparu. Les données du recul de la tête de falaise ne représentent donc pas la dynamique effective du recul de la falaise.



Illustration 22 : Exemple d'erreur d'ortho rectification

Limites

Il s'avère que les données orthophotographiques non couplées à un lever LIDAR peuvent être à l'origine d'erreurs, parfois grossières, de mesures, liées à la qualité du MNT utilisé pour l'orthorectification (il est fondamental que le MNT décrive exactement la position de l'abrupt de falaise, ce qui n'est possible qu'avec un MNT à résolution métrique). Les reliefs importants, peuvent, en post traitement, être à l'origine d'erreurs. C'est spécifiquement le cas en bordure de falaise.

Une erreur importante a par exemple été relevée au niveau du Bois de Cise, avec des décalages important en planimétrie (illustration 22), bien visible au niveau des extrémités d'épis ou des angles de bâtiment.

Ces images ont donc été recalées à partir des éléments fixes présents sur l'ortho littorale de 2000 et le LIDAR 2011.

Il semble donc important de préciser que les données d'avant 2009 sont localement sujettes à des erreurs de géoréférencement, influant sur les mesures de vitesses de recul.

Traitement 3D

Le lever de photo oblique nous a permis d'obtenir 580 photos obliques de la falaise du secteur d'étude. Cela implique un recoupement de chaque point de la falaise par 12 à 16 photos.

Les photos sont toutes horodatées et géoréférencées, grâce à l'encodage en vol des coordonnées GPS à chaque déclenchement.

Par ailleurs, des cibles ont été posées en pied et en tête de falaise lors du lever. Ces cibles et tous les éléments remarquables au sol ont été levés par un GPS centimétrique, fournissant des repères géoréférencés en X, Y et Z.

L'ensemble des données de photos sont ensuite traitées par le logiciel de photogrammétrie Visual SFM, qui, à l'aide des données des cibles au sol, permet de transformer les données photographiques en nuage de points géoréférencés.

La densité de photos permet de restituer le relief de la falaise en 3D avec environ 1 point tous les 20 cm, qui correspond au maillage du Modèle Numérique de Surface obtenu.

Ces données permettent un post-traitement en 3D de l'évolution de la surface de la falaise.

Trois jeux de données ont ainsi pu être traités :

- La couverture LIDAR héliportée du 13 mars 2009,
- Les photos terrestres du 22 mai 2013,
- Les photos aériennes obliques du 22 juillet 2013.

Le traitement photogrammétrique de ces données, permet une représentation 3D des informations (illustration 23), ainsi qu'un fond de carte SIG permettant le géoréférencement de l'ensemble des observations réalisées sur la falaise ou à proximité (il faut toutefois noter que les parties sub-horizontales situées à l'arrière de la tête de falaise ont une densité de point très faible du fait de l'obliquité de la données source. Elles ont donc de ce fait une précision beaucoup moins bonne (Cela occasionne par exemple des erreurs sur les parties sub-horizontales de l'illustration 24). Cette imprécision est toutefois compensée par les données LIDAR de 2011, qui, elles, sont verticales).

Ce traitement 3D a par ailleurs permis de soustraire les données de 2013 aux données de 2009, et ainsi définir les volumes perdus en chaque point de la falaise. Ce type d'information permet de mieux appréhender les dynamiques d'érosion qui affectent la falaise, et permet de définir précisément les reculs et les volumes érodés dans le laps de temps considéré. Ainsi, entre 2009 et 2013, comme le montre l'illustration 24, plusieurs secteurs ont subi un recul de plus de 10 m sur l'ensemble de la hauteur de falaise, et on constate aussi la mise en place de nombreux sous-cavages, indiquant une érosion active du pied de falaise préparant les prochains éboulements de masse.

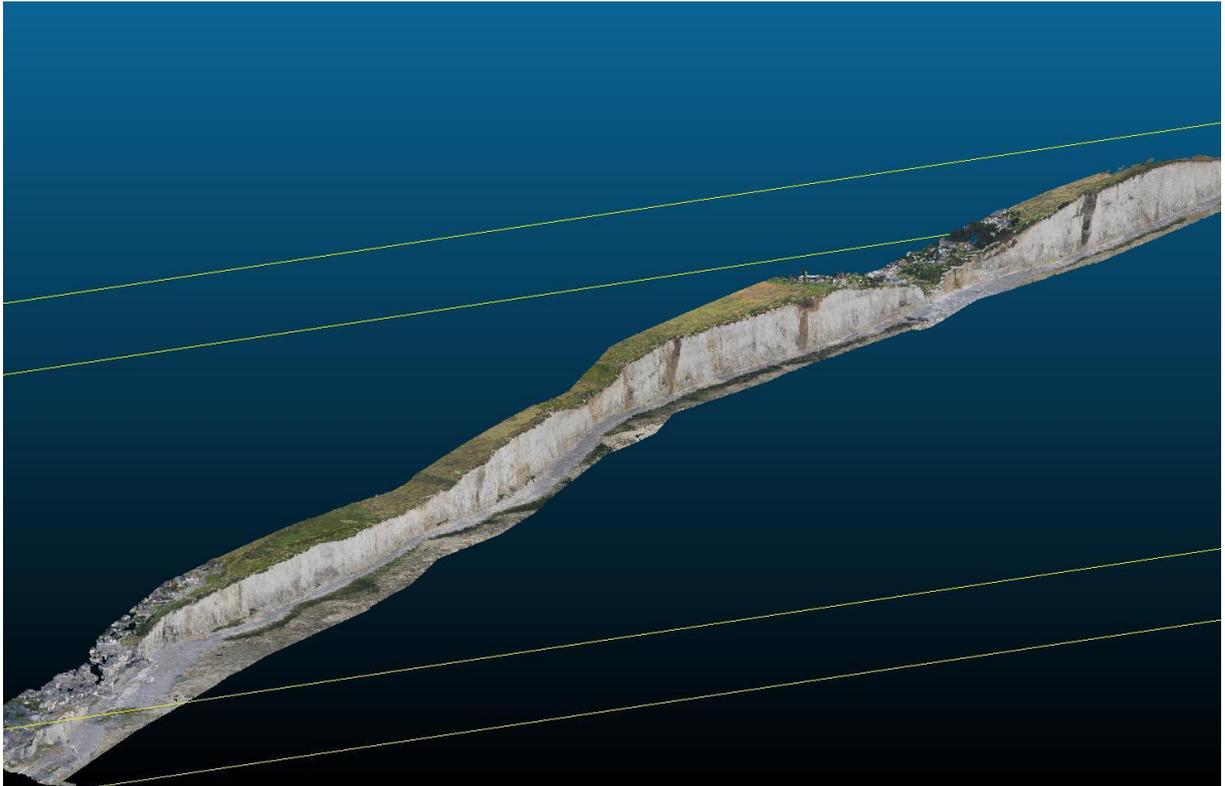


Illustration 23 : Exemple de vue 3D de la partie de la zone d'étude située au sud d'Ault bourg

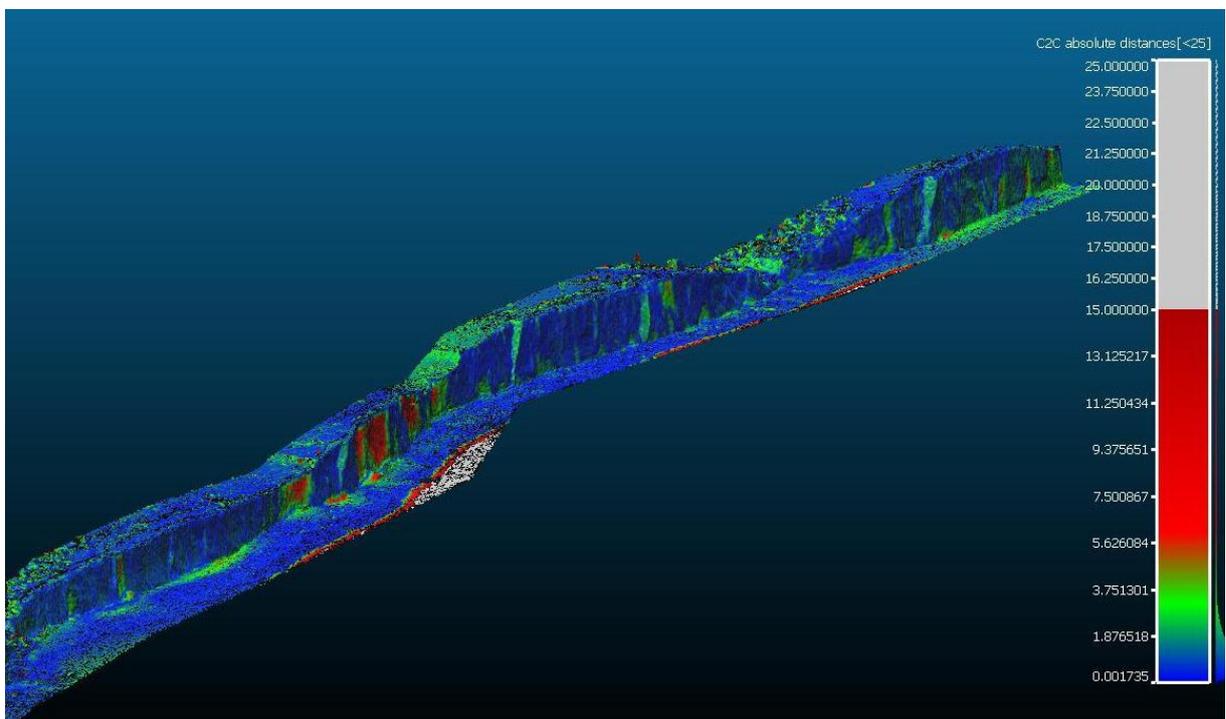


Illustration 24 : Reculs calculés (en m) de la falaise au sud du bourg d'Ault entre 2009 et 2013

Enfin, ce type de traitement permet aussi une analyse automatisée de la fracturation. Il s'agit toutefois d'un outil en développement dont les résultats pas toujours concluants ont été doublés par des relevés de terrain et une analyse classique.

3.2. CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES A LA FALAISE

3.2.1. Lithologie

La classification issue de la carte géologique de la France au 1/50 000 étant basée sur la biostratigraphie, très peu d'information sont données sur la lithologie de la craie. La classification anglaise (craie de Seaford, craie de Lewes, pour ce qui concerne notre zone d'étude) est un peu plus précise à ce sujet, mais n'entre pas dans le détail à l'échelle d'une portion de falaise.

Or, il apparaît que l'organisation des lithofaciès, aussi bien en vertical, qu'en variation latérale, est susceptible de jouer un rôle sur l'occurrence des éboulements de falaise.

En effet, un banc friable en pied de falaise entrainera une susceptibilité forte à l'érosion par la houle, tandis qu'un niveau induré surmontant un banc friable en milieu de falaise entrainera la mise en place de surplombs susceptibles de déstabiliser la partie supérieure de la falaise.

Par ailleurs, la mise en évidence de variations latérales de faciès pourrait, dans certains cas, expliquer en partie des différentiels de vitesse de recul.

C'est pourquoi une cartographie fine des lithofaciès rencontrés sur l'ensemble du terrain d'étude a été réalisée, sur fond photo géoréférencé issu de l'acquisition d'images aéroportée du 22 juillet 2013.

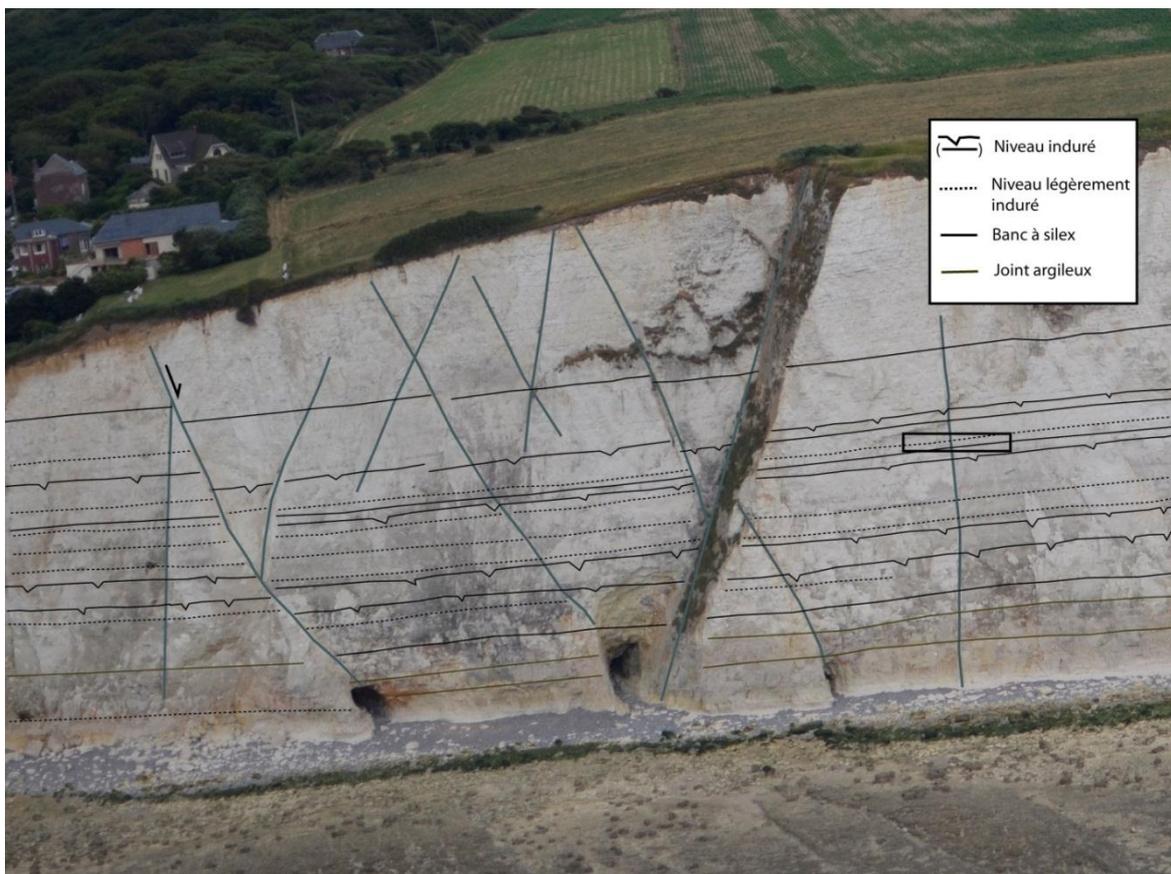


Illustration 25 : Exemple de lever lithologique (et de la fracturation) de la falaise. Bois de Cise, 2013.

Les niveaux identifiés indiquent que les 30 premiers mètres de la falaise se trouvent dans la craie dite de « Saint-Pierre-en-Port », correspondant à la partie supérieure de la Lewes chalk (Turonien supérieur ; Coniacien inférieur) selon la classification de Mortimore. La partie supérieure de la falaise correspond à la craie de Veulettes, correspondant à la base de la Seaford chalk (selon la classification de Mortimore, Coniacien moyen).

A l'issue, deux informations principales concernant les vecteurs de recul du trait de côte peuvent être apportées :

- Le pied de falaise, sur une bonne partie de la zone d'étude est composé d'un banc assez friable sur 2 à 6 mètres de hauteur, surmonté d'un banc légèrement induré. Le pied de falaise est donc susceptible au phénomène de sous-cavage en l'absence de cordon de galet conséquent ;
- Il n'y a pas de variation latérale de faciès au sud du bourg d'Ault, tout au plus une légère flexure constatée, ainsi que de légers décalages décimétriques à métriques calés sur fracture. On constate toutefois un soulèvement de la partie de falaise au nord de la faille passant sous l'esplanade du Casino.

En conclusion concernant la lithologie, on peut donc dire que la lithologie du secteur d'étude, très homogène, n'a pas de rapport avec d'éventuelles variations latérales de vitesses de recul. Mais elle entraîne une susceptibilité à l'érosion du pied de falaise, facilitant la genèse d'éboulements de masse.

3.2.2. Fracturation

Un levé systématique des fractures rencontrées sur la falaise et sur le platier a été réalisé. Par ailleurs, un traitement photogrammétrique de la fracturation a été réalisé.

Ces données viennent confirmer et compléter les études partielles de la fracturation réalisées dans le cadre du projet ROCC en 2001 (*Martinez et al.*, 2001).

D'une manière générale, les fractures visibles admettant un pendage marqué et des miroirs de faille bien visible sur les photos obliques sont liées au réseau de faille normale. Celles, moins nombreuses, qui ont un pendage vertical sont des joints ou « masterjoints » (*Mortimore et Duperret*, 2004).

L'ensemble des données de fractures ont été traitées via un logiciel stéréographique, permettant d'identifier les familles de fracture et leur récurrence.

Ces données de fractures sont à relier à l'orientation de la falaise, leur géométrie étant susceptible ou non de générer des instabilités.

Sur la falaise, les mesures font ressortir deux familles de fracture :

- Une famille principale, largement majoritaire, d'orientation N120, ce qui les oriente perpendiculairement au plan de falaise. Deux pendages opposés (NE et SW) variant entre 55° et 80° sont associés à cette orientation. Il s'agit très probablement de la représentation du réseau de faille normale, associée à leur faille conjuguée, ce qui a pour conséquence de délimiter de nombreux dièdres, parfois de grande taille (>500 m²) sur l'ensemble du trait de falaise. Il faut toutefois noter qu'à part la probable faille passant sous l'esplanade du casino, aucun rejet notable n'est à relier à ces accidents.

Cette famille de fracture détermine très régulièrement sur l'ensemble du terrain d'étude, des sous-cavages, parfois profonds de plus de 10 mètres. Leur mise en place est probablement facilitée par le fait que leur orientation correspond grossièrement au courant dominant, et qu'il existe probablement un « effet piston » déterminant un fort pouvoir érosif au niveau des zones de fracture.

- Une famille secondaire, rarement observée, d'orientation N20 à N30.



Illustration 26 : Identification des principales fractures visibles sur la falaise et le platier (juillet 2013). On note les sous-cavages profonds (>10 m) calés sur la fracturation. En rouge, une zone de fait potentiellement instable.

Sur le platier, trois familles sont distinguées :

- La même famille principale d'orientation N110 à N120, correspondant à l'orientation majoritairement observée en falaise ; Cette famille présente sur le platier des ouvertures métriques, probablement due à l'érosion induite par les marées et au fait que la conjonction entre la direction de ces fractures et des courants principaux entraîne la création de chenaux. Certaines de ces fractures se propagent sur toute la largeur du platier découvert à marée basse, dans la continuité des failles normales affectant toute la hauteur de la falaise.

- Deux autres familles orientées N20 à N30 et N40 à N50, cette dernière étant pseudo parallèle à la falaise. Aucune fracture orientée N50 n'a pu être observée sur la falaise. Cependant, en observant les différents jeux de photographies obliques à disposition, il est possible d'observer juste après des éboulements majeurs, des discontinuités qui pourraient correspondre à cette orientation. Ces failles peuvent donc délimiter l'arrière des éboulements et contrôler partiellement l'épaisseur potentielle des écailles.

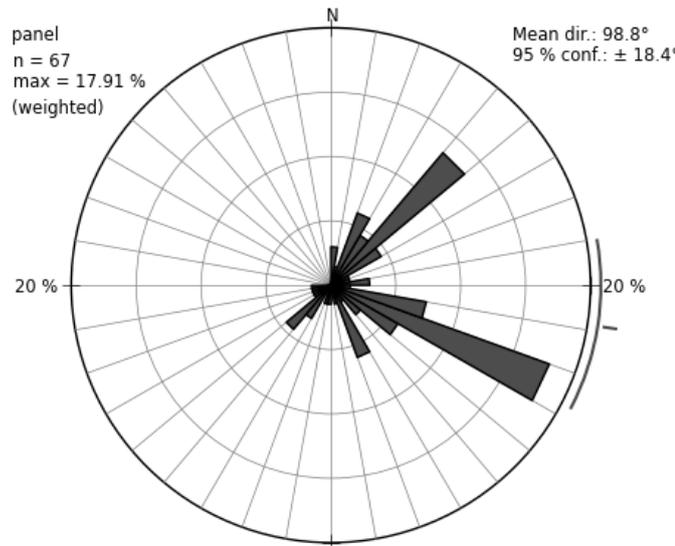


Illustration 27 : Exemple du traitement des données relevées sur le platier au sud du Bois de Cise

Les résultats de l'analyse de la facturation montrent la délimitation de grandes surfaces par une fracturation d'orientation perpendiculaire à la falaise, potentiellement susceptible de définir des instabilités majeures de par les pendages relevés. Un exemple des surfaces potentiellement concernées est nettement visible en rouge sur l'illustration 25, les sous-cavages calés sur fracture étant des facteurs supplémentaires d'instabilité. Cette susceptibilité est accentuée par l'analyse des familles de fractures relevées sur le platier, indiquant de potentielles discontinuités pseudo-parallèles à la falaise, permettant la délimitation de masses instables.

Cette susceptibilité correspond à l'analyse de plusieurs éboulements de très grand volume (de 10 000 à plus de 70 000 m³) observées à Ault ou à proximité (Mers les Bains, Le Tréport, Criel-sur-Mer) depuis 2000.

3.3. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE / COURANTS MARINS

Les courants de houle jouent un rôle majeur dans les dynamiques d'érosion du trait de côte. Il apparaît qu'il existe un courant majeur (WSW – ENE) à l'origine d'une dérive littorale impactant l'ensemble du littoral du cap d'Antifer jusqu'à la baie de Somme.

3.3.1. Impact de la houle

Le littoral de la manche est une zone à très fort marnage (différence entre la basse mer et la haute mer). Ce marnage peut dépasser 9 mètres sur la zone d'étude (environnement macrotidal). Cela implique que le pied de falaise, sur plusieurs mètres de hauteur, est directement soumis à l'impact de la houle en période de pleine mer, notamment de vive eau, soit pendant près de 8 heures par jour. Cette houle, parfois violente, notamment lors des tempêtes hivernales, joue un rôle d'érosion mécanique sur le pied de falaise. Cette érosion peut être atténuée en cas de présence d'un épais cordon de galets en pied de falaise, qui va pouvoir absorber une partie de l'énergie transmise par l'onde de translation qu'est la houle au moment du déferlement.

Cette force érosive peut toutefois être accrue en cas de présence d'un très fin cordon de galets et de sable, qui vont être projetés contre la falaise à chaque déferlante, et ainsi accentuer l'érosion mécanique liée au courant de houle. La majeure partie du littoral concerné par cette étude se trouve dans cette configuration.

Il convient donc d'identifier les dynamiques sédimentaires qui peuvent jouer un rôle sur l'estimation des vitesses de recul du trait de côte.

3.3.2. Cortège sédimentaire

La bibliographie existante (*Costa, 1997 ; Morel, 1999 ; Costa, 1999 ; Costa, 2001 ; Augris et al., 2004, Costa et al., 2005, Augris, 2007 ; Costa et al, 2007...*) ainsi que les échanges avec les acteurs des travaux de recherche actuels (*A. Duperret* notamment), permettent d'avoir une bonne vision d'ensemble sur les dynamiques sédimentaires et l'évolution du cordon de galets de la côte à falaise normand-picarde.

Une dynamique naturelle

En simplifiant au maximum, il est possible de dire que la dérive littorale déplace les sédiments (sables et graviers) le long du littoral du SW vers le NE, ce qui a notamment pour conséquence l'existence d'un cordon de galets mobile en haut de l'estran, et donc en pied de falaise.

On peut définir deux origines à ces galets. La première est à relier aux phénomènes actuels d'érosion, les bancs de silex contenus dans la craie puis dans les éboulis venant alimenter le cortège sédimentaire. La bibliographie semble toutefois montrer que les volumes concernés ne permettent pas de compenser les volumes déplacés par l'érosion (chiffres très divers en bibliographie). Par ailleurs, concernant la cellule hydro-sédimentaire allant du Tréport à la baie de Somme, la craie considérée est très pauvre en silex. L'alimentation du cordon de galet par l'érosion sur le secteur d'étude est donc probablement très faible.

L'autre source d'alimentation provient du système érosion-transport-dépôt qui était en place lors de la dernière glaciation (grossièrement de -100 000 à -10 000 BP) quaternaire.

Le Quaternaire admet des alternances climatiques majeures, avec des périodes glaciaires relativement longues, de l'ordre de 90 000 ans dans le cycle actuel, et des périodes interglaciaires relativement courtes (de l'ordre de 10 000 ans). Cela implique une évolution cyclique des niveaux marins. Le dernier maximum glaciaire se situe il y a environ 18 000 ans et on considère le début de l'actuel interglaciaire entre 8 000 et 10 000 BP.

Il faut donc considérer lors de la dernière période froide des niveaux marins beaucoup plus bas (de l'ordre de 120 mètres au dernier maximum glaciaire), et donc une limite entre le milieu continental et le milieu marin se situant au large de la Bretagne.

Les débuts et fins de périodes glaciaires sont des périodes très actives en termes d'érosion, de transport et de dépôts de matériaux. Les dynamiques induites peuvent considérablement modifier le paysage et générer des dépôts importants de sédiments (à titre d'exemple, il existe actuellement environ 30 m de sédiments meubles sous le niveau de la Seine au niveau du pont de Normandie, déposés lors du cycle actuel).

Il faut donc considérer à l'aube du présent interglaciaire des versants réglés ou glacis à la place des falaises s'étendant sur plusieurs centaines de mètres et d'épais dépôts, parfois d'éléments grossiers (graviers, galets) au niveau des vallées. C'est notamment le cas au niveau de la baie de Seine.

La mer, en remontant jusqu'à son niveau actuel (il y a 3000 à 5000 ans) a donc dû déblayer ces nombreux résidus d'érosion, probablement pendant plusieurs milliers d'années.

Parmi ces résidus d'érosion, les éléments les plus grossiers situés à proximité du littoral actuel ont généré et alimenté, par l'intermédiaire des courants, le cordon de galets.

Ces « réserves » en sédiment semblent aujourd'hui épuisées, et il semble que la seule réalimentation du cordon de galets vienne des résidus de silex issus des éboulements de falaise.

Stéphane Costa (Université de Caen, labo Geophen) parle ainsi depuis le début des années 2000 de « crise sédimentaire » sur le littoral normand-picard.

Par ailleurs, les actions anthropiques jouent un rôle non négligeable et ont provoqué une modification récente des dynamiques sédimentaires.

Les actions anthropiques

Tout d'abord, les galets de plage, matériau d'excellente qualité de par ses caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, ont été exploités pendant une bonne partie du XXe siècle. Les volumes prélevés sont estimés à plus de la moitié de la réserve actuelle (soit de l'ordre de 3 millions de m³. Volume officiel, probablement inférieur à la réalité. *Costa et al.*, 2007).

Des volumes importants de galets s'introduisent dans les chenaux des principaux ports. Ils sont (ou ont été, selon les cas) alors dragués et rejetés au large, induisant une perte nette dans le système sédimentaire.

Autre phénomène, depuis les années 1970, de nombreux ouvrages transversaux (épis, jetées portuaires) ont été créés afin de protéger des enjeux (plages, ports, industries) en amont dérive littorale. On citera pour les plus importantes du SW vers le NE les jetées : du port d'Antifer, du port de Fécamp, de la centrale nucléaire de Paluel, de la plage de Sainte-Marguerite, du port de

Dieppe, de la centrale nucléaire de Penly, de la plage de Criel-plage, de la plage de Mesnil-val et enfin du port du Tréport.



Illustration 28 : Exemple d'ouvrage transversal bloquant le cortège sédimentaire (Mesnil-Val - Criel-sur-Mer, mars 2014)

La présence de ces aménagements a eu pour conséquence la mise en place de micro-cellules sédimentaires, caractérisées par une érosion accrue en aval (dans le sens de la dérive littorale) de l'aménagement, une quasi absence de galets en pied de falaise, et un piégeage de la quasi-totalité des sédiments grossiers sur les quelques centaines de mètres en amont de l'équipement. En 1995, on estimait à 65% de la réserve le stock bloqué sur les plages en amont des jetées. Ce chiffre est probablement beaucoup plus important aujourd'hui.

3.3.3. Réserves sédimentaires

Les travaux réalisés ces dernières années par l'IFREMER montrent d'importantes réserves en matériaux meubles de toutes tailles au large des côtes (illustration 29). Toutefois, ces réserves se trouvent à des profondeurs relativement importante (>20 m). Afin de définir si leur mobilisation par les fortes houles de tempête était possible naturellement pour alimenter l'estran, le BRGM a réalisé une modélisation à partir d'un courant de tempête représentatif.

Cette modélisation a été réalisée à partir d'éléments connus, à savoir les stocks de galets présents au large de Dieppe et le courant de la tempête Johanna du 10 mars 2008.

La question posée était : « est-ce que l'évènement Johanna a pu mettre en mouvement des sédiments de >5 cm de diamètre, au large de Dieppe, par 20 mètres de fond ? ».

Les caractéristiques et résultats de la modélisation sont disponibles en annexe 3.

Les résultats de cette modélisation, réalisée avec les données optimum de mise en mouvement de sédiment montrent qu'il est très peu probable que des sédiments de plus de 5 cm puissent être mis en mouvement, même lors de forts courants de tempête.

Il ne paraît donc pas possible que les cordons de galets puissent être rechargés par des apports de sédiments grossiers venant du large.

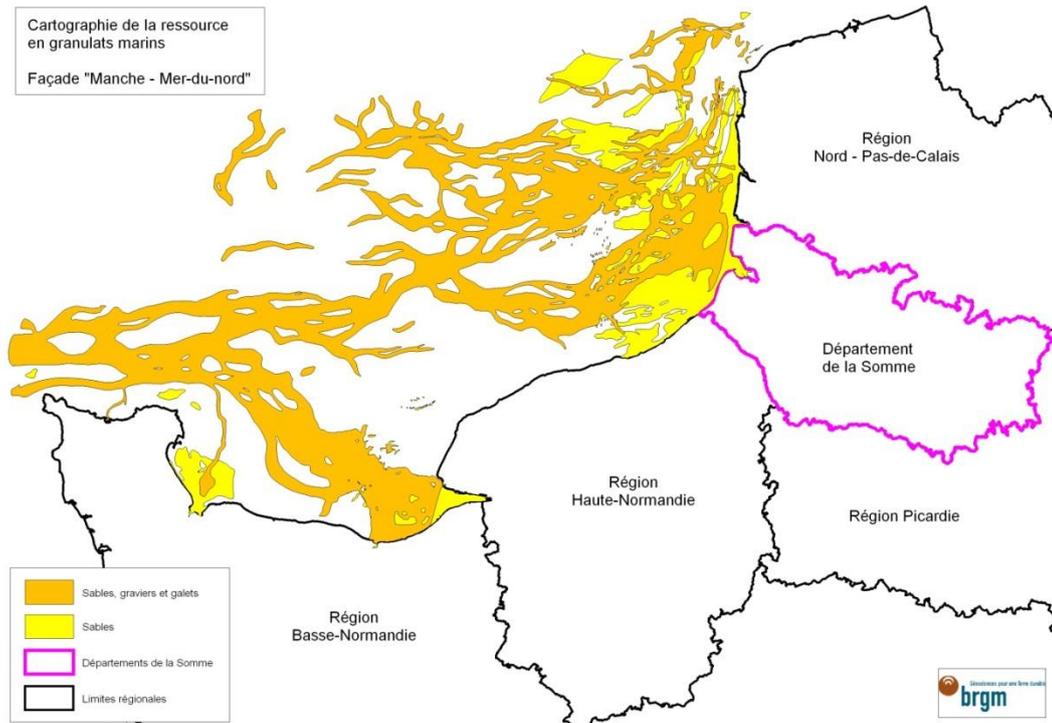


Illustration 29 : Cartographie des dépôts sous-marins meubles sur l'interface Manche - mer du Nord issue du Schéma des carrières de la Somme (Pannet et al., 2009) – Données IFREMER

En conclusion sur ce paragraphe, il s'avère aujourd'hui que le cordon de galets au niveau de la zone d'étude est extrêmement réduit et ne joue aucun rôle de protection de la falaise. Le cordon de galets réduit semble même augmenter le pouvoir érosif de la houle en pied de falaise.

Les observations montrent que les volumes enlevés sont supérieurs aux volumes apportés par l'érosion des falaises.

Les études actuelles (programme Crocolit notamment, impliquant une cartographie des sédiments présents sur les petits fonds, missions du bateau spécialisé de l'IFREMER *Haliotis* en avril et octobre 2013) ne montrent aucune réserve mobilisable sur les petits fonds (*Duperret, 2013, communication écrite*) à proximité de la zone d'étude (« sur la plateforme littorale devant Ault : pas de galets en zone sous-marine »).

Par ailleurs, les modélisations réalisées montrent que les réserves potentiellement existantes, au large, plus en profondeur, ne sont pas mobilisables.

On considèrera donc pour les estimations de recul du trait de côte une quasi-absence de cordon de galets à long terme, et donc un rôle plus érosif que protecteur des sédiments présents en pied de falaise.

3.4. AUTRES FACTEURS D'ÉROSION

3.4.1. Climat

Le climat joue un rôle important dans l'érosion à plusieurs titres : arrivée d'eau continentale, phénomène de gel/dégel, tempêtes.

Aussi, même difficilement quantifiable en l'état actuel des connaissances, l'impact du changement climatique peut jouer un rôle non négligeable sur l'évolution du recul du trait de côte.

En effet, les différents rapports du Groupement intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) apportent plusieurs informations en lien avec les facteurs responsables sur recul du trait de côte :

- Une élévation du niveau de la mer estimée entre 18 et 38 cm selon le scénario le plus favorable et 26 à 59 cm selon le scénario le plus pessimiste. L'impact de la houle ayant un rôle considérable sur l'érosion du pied de falaise, une hausse du niveau marin ne ferait qu'amplifier ce phénomène ;
- Une augmentation du nombre d'évènements extrêmes, qui peut se traduire par différents phénomènes. On peut citer l'augmentation du nombre de tempêtes, de périodes très sèches et de périodes très humides, de l'amplitude thermique (alternance gel/dégel),... Autant de phénomènes qui sont susceptible de renforcer les différents facteurs responsables de l'érosion des falaises.

Aussi, si ces éléments ne sont pour l'instant pas ou peu quantifiables, ils constituent un argument supplémentaire nous permettant de considérer que les dynamiques de recul et les vitesses induites, observées depuis le début des années 2000 peuvent être extrapolées à plus long terme.

3.4.2. Actions chimiques et biologiques

L'eau est le facteur d'érosion chimique qui impacte le plus les falaises, par l'intermédiaire de la dissolution du carbonate de calcium.

Ce phénomène se développe dans la roche par l'intermédiaire des réseaux karstiques (front d'altération calé sur fracture par exemple) ou en surface, soit par l'impact de l'eau de pluie, soit par l'impact de l'eau salée ou des embruns.

La solubilité du carbonate de calcium est égale à (*Flahaut & Detourbe, 2014*) :

- dans l'eau pure, à 20°C et en vase clos (pH = 7) : 12 à 14 ppm (ou mg/L) ;
- dans l'eau pure, à 20°C et en présence de CO₂ (pH = 5,6 à saturation en CO₂) : 110 à 130 ppm ;
- dans l'eau de mer, à 20°C et en présence de CO₂ (pH = 8,2 à 8,5 à saturation en CO₂) : 60 à 70 ppm (la calcite précipite en totalité pour des pH supérieurs).

Concernant les impacts biologiques, on citera l'action des algues et de la faune sur le platier rocheux, qui a pour conséquence de faire baisser régulièrement la surface du platier (de l'ordre du millimètre/an (Andrews et Williams, 2000), ce qui, ajouté à l'effet du gel (Dewez *et al.*, soumis) implique une baisse altitudinale du platier de l'ordre de 1,5 à 2 mm/an). Cela a pour conséquence à long terme d'offrir moins de résistance à l'énergie transmise par la houle.

3.5. IMPACT ANTHROPIQUE

En milieu relativement urbanisé, et depuis très longtemps, il apparaît que les actions anthropiques ont pu ou peuvent jouer un rôle important sur le façonnement du dessin actuel du trait de côte, ainsi que sur son évolution future. Les deux éléments principaux que nous avons cherché à caractériser concernent les éléments de protection contre l'érosion, ainsi que la gestion des eaux, pluviales ou usées, pouvant jouer un rôle érosif important.

3.5.1. Identification et caractérisation des éléments de protection

Les éléments de lutte contre l'érosion littorale, passés ou actuels ont été identifiés et caractérisés lors de cette étude. A l'aide d'une recherche bibliographique d'abord, puis par des visites de terrain ayant permis de caractériser l'état actuel de l'ensemble des éléments de protection toujours présents.

La bibliographie sur ce sujet est relativement importante. Elle n'est toutefois pas exhaustive, puisque quelques éléments de protection datant de la première moitié du XXe siècle, non indiqués en bibliographie, ont pu être observés sur des photographies anciennes. C'est notamment le cas au Bois de Cise.

3.5.1.1 Typologie, rôle et fonctionnement des ouvrages

- **Les épis**

Ce sont parmi les premiers ouvrages de protection à avoir été construits. D'abord en bois, mais rapidement détruits, ils ont ensuite été bâtis en béton ou avec des palplanches. Ces épis constituent un frein au transport de galets du SW vers le NE, entraînés par la dérive littorale. Ils ont pour rôle de bloquer les galets du côté amont afin de générer l'apparition et le maintien de plages artificielles. Cette accumulation de galet permet aussi une protection de la falaise en jouant un rôle « tampon » absorbant l'énergie de la houle. Les épis, même en l'absence de galets, jouent aussi le rôle de « brise-lame » face aux courants dominants, réduisant ainsi l'énergie érosive de la houle.

Il faut aussi noter que l'érosion à l'aval de ces épis/jetées est accrue, d'une part car ils empêchent toute présence de cordon de galets en pied de falaise en aval dérive littorale, et d'autre part parce qu'ils modifient localement les courants.

- **Les perrés**

Il s'agit de murs, principalement bétonnés ou revêtus de pierres sèches ayant pour mission de protéger le trait de côte des assauts de la mer.

Bien qu'assurant un rôle de protection immédiate évident, les perrés ont toutefois aussi des effets néfastes sur le long terme, d'une part en réduisant la capacité d'adaptation morphologique des cordons de galets, et d'autre part en favorisant la réflexion de la houle, et

donc l'abaissement des profils de plage (Costa, 2007). La capacité d'absorption de l'énergie transmise par la houle s'en trouve ainsi réduite.

- **Les enrochements**

Ceux que l'on trouve à Ault sont composés de plusieurs épaisseurs (plusieurs files) de gros blocs (allant de plusieurs centaines de kilos à plusieurs tonnes). Ils jouent un rôle important de protection. Ils nécessitent toutefois un ré-engraissement régulier.

Au nord d'Ault, ils ont été placés devant une levée de terre sur laquelle se trouve une promenade. On constate avec de tels équipements que les enrochements n'empêchent pas le lessivage des éléments fins et favorisent donc la mise en place d'affaissement/effondrement sur les équipements présents à l'arrière.

- **La casquette**

Il s'agit d'une dalle en béton reposant sur deux pieux de fondations ancrés parallèlement à la falaise sur 4 m de profondeur, sur environ 400 m de long. Elle a pour but de protéger la tête de falaise des écoulements d'eaux météoriques et de stabiliser la tête de falaise. Cet équipement est associé à la présence d'une digue en pied de falaise, elle-même protégée par un perré ou des enrochements, empêchant la houle d'impacter directement la falaise.

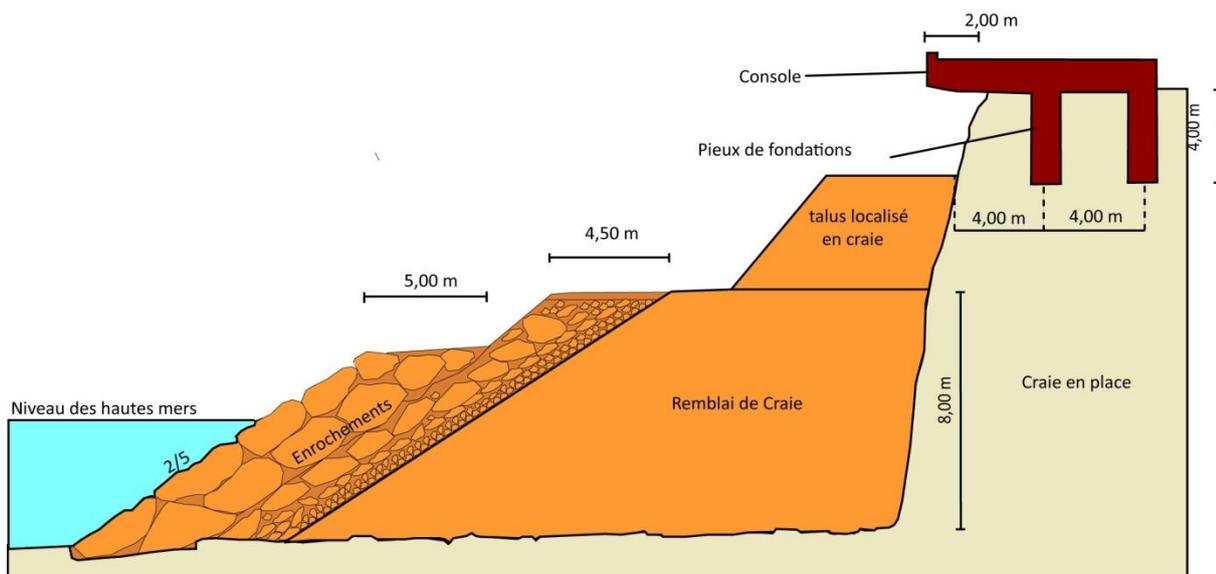


Illustration 30 : Représentation schématique de l'aménagement de protection du pied de falaise et de la « casquette »

3.5.1.2 Historique des ouvrages de protection

Les travaux d'aménagement du littoral d'Ault commencent dès le 18^{ème} siècle avec la mise en place d'épis en bois.

Durant le XIX^e et surtout le XX^e siècle, de nombreux épis sont détruits par la houle puis reconstruits, en bois, puis en palplanche et en béton à Ault boug, ainsi qu'au Bois de Cise.

L'esplanade du Casino a été très tôt un élément protégé. Bien que l'on ne retrouve pas l'ensemble des aménagements en bibliographie, les images disponibles montrent clairement

une protection importante, au moins dès la seconde guerre mondiale, ce qui explique une absence de recul à cet endroit.

Dallery établit en 1955 un recensement des épis situés entre l'esplanade du casino et le nord de la commune : 23 épis construits entre 1920 et 1939 y sont recensés.

Au niveau du Bois de Cise, l'ensemble des éléments construits ne sont pas décrits en bibliographie. Là aussi, l'analyse des différents documents imagés (PVA, cartes postales anciennes) permet de montrer que la vailleuse a été protégée dès le début du XXe siècle. D'abord par une avancée du pied de falaise laissée suite à la taille de la vailleuse par l'homme, puis la présence d'épis, puis la présence d'un perré (illustration 31), puis à nouveau la présence d'épis, qui prennent leur disposition actuelle en 1952.



Illustration 31 : Vue de l'avancée du pied de falaise protégée par un perré, probablement peu avant 1940

Plusieurs épis sont reconstruits ou construits à Ault et Onival en 1947, 1969 et 1974.



Illustration 32 : Vue de face de l'ensemble de l'aménagement rochement-digue-"casquette" (2013)

Dans les années 80, une grande campagne de travaux est menée, suite à des désordres apparus dans une partie du quartier des quatre rues, fait marquant survenu en 1979. Ces

travaux qui consistent en la réalisation d'une digue à la base de la falaise (en orange sur l'illustration 30) et d'une casquette en béton au dessus (en marron sur l'illustration 30 ; illustration 32) ont permis de faire cesser l'érosion maritime, cependant l'absence de protection par endroits permet à la mer de continuer à avancer.

Dans les années 2000 sont ajoutés des enrochements pour protéger l'esplanade du casino, ou encore pour protéger la falaise suite à l'éboulement de 2009 directement au nord de l'esplanade du casino dans le secteur « rue de la Montagne ».

Le tableau en annexe 4 fait une synthèse, probablement non exhaustive, des campagnes d'aménagement réalisées sur la commune d'Ault depuis le 18^{ème} siècle.

3.5.1.3 Recensement, typologie et état des différents ouvrages actuellement présents sur le territoire de l'étude

L'ensemble des ouvrages a été recensé d'abord en bibliographie, puis sur les différentes images à disposition (paragraphe précédents), puis enfin, observés lors de visite de terrain. Chaque ouvrage retrouvé sur le terrain a fait l'objet d'une fiche descriptive indiquant notamment son état de dégradation.

L'ensemble de ces données ont été retranscrites dans un système d'information géographique SIG (en annexe hors texte, fichier numérique), permettant un géoréférencement, avec un lien vers la fiche descriptive et vers des photos de l'ouvrage.

Suite à la campagne de terrain, 21 ouvrages de protection du littoral actuellement visibles ont été recensés (tableau de synthèse en annexe 5 ; en lien avec le SIG en annexe hors texte), deux ayant totalement disparus, seules les fondations sont encore visibles.

Sur les 12 épis présents sur le littoral Aultois, 5 sont en état de ruine totale et ne remplissent plus leur rôle, seuls quelques vestiges, morceaux de dalle ou de palplanches, restent visibles. 6 épis sont en partie démolis, ou très fortement abîmés par l'érosion marine. Enfin, un seul épi semble en bon état malgré une légère érosion du béton.

5 éléments de protection sont fait de mur en béton et pierres lisses, deux d'entre eux sont très dégradés, fondations apparentes, parties effondrées, etc., tandis que les 3 autres sont en bon état apparent (à condition d'un entretien régulier). Parmi les éléments en bon état apparent, on trouve le mur recouvrant la falaise de l'esplanade du casino, qui admet tout de même quelques fissures, mais surtout empêche toute observation de l'état d'altération/vieillessement de la falaise à l'arrière.

3 ouvrages sont constitués d'enrochements, l'un d'entre eux (AB2-9, cf annexe 5) étant sensé être un renforcement « provisoire » suite à l'effondrement de la promenade. Les ouvrages en enrochements semblent stables et en bon état apparent mais l'eau avance tout de même par endroit et abîme d'autres éléments liés, notamment la promenade au nord du secteur « casquette nord » (présence de nombreux affaissements/effondrements).

Enfin, la casquette semble subir un tassement de la falaise qui la soutient. Il est possible d'observer des fissures sous la dalle de béton, à des endroits où la falaise sous-cave, ainsi que sur la dalle où des fissures perpendiculaires à la falaise sont visibles sur le trottoir et remontent parfois jusque sur la route.

A plusieurs endroits, le premier mur vertical, constituant les fondations, est visible, témoin de l'érosion de la falaise, fortement altérée en plusieurs endroits sous la casquette.

3.5.2. Bilan de l'impact des éléments de protection

La plupart des éléments de protection, lorsqu'ils sont en bon état, assurent un rôle protecteur contre l'érosion du trait de côte.

C'est le cas à Ault, et c'est d'ailleurs en grande partie pour ça qu'on observe des vitesses de recul relativement réduites au niveau des zones à enjeux.

La plupart des éléments de protection répertoriés jouent ou ont joué un rôle de protection sur l'élément cible, au moins à court terme.

Toutefois, plusieurs impacts négatifs sont imputables à ces éléments de protection :

- Les épis entraînent une érosion accrue en aval dérive littorale, par un blocage du cortège sédimentaire et une probable modification des courants. C'est particulièrement visible au nord du Bois de Cise, où on constate une « inversion de relief » entre les rentrant et les saillants sur la période d'un siècle (illustration 33) ;
- Le vieillissement des ouvrages entraîne des modifications de dynamiques pouvant générer de l'érosion (circulations d'eau entre la falaise et l'épi par exemple) ou des instabilités associées (affaissement/effondrement sur la promenade du secteur « casquette nord » suite au lessivage des éléments fins) ;
- L'ouvrage de l'esplanade du Casino empêche toute appréciation de l'état d'altération de la craie située à l'arrière. Etant donné les arrivées d'eaux visibles sur le platier à cet endroit, il est probable que la craie soit fortement altérée. Par ailleurs, plusieurs fissures sont visibles sur le mur principal. Il paraît donc nécessaire de diagnostiquer cet équipement et l'état de la craie située à l'arrière à court terme, et de définir les instabilités potentielles induites ;
- La casquette en cas de rupture entraînera un recul important de la tête de falaise de l'ordre de 10 m. Cette rupture est envisageable à moyen terme à la vue de l'érosion diffuse constatée et de l'état d'altération de la craie sous-jacente.

3.5.3. Gestion de l'eau

La gestion de l'eau est un facteur important influant sur le recul de la falaise, notamment dans les zones à enjeux. En effet, les eaux pluviales sont canalisées et peuvent arriver en masse dans certaines zones. Il faut y ajouter la gestion des eaux usées, parfois acidifiées, notamment par la présence de produits chimiques.

Ainsi, on constate une craie beaucoup plus altérée au niveau des zones à enjeux qu'ailleurs. C'est vrai à Ault bourg, comme au Bois de Cise. Une bonne partie de cette altération est déterminée par la fracturation, et aux circulations d'eau, naturellement beaucoup plus importantes au niveau des valleuses où sont installés les enjeux.

Toutefois, une partie non négligeable de cette altération est liée à la gestion de l'eau, qui explique une altération plus marquée sous certaines parties de la caquette, ou encore sous l'hôtel « Le Cise » (voir paragraphe 3.6.1).



Illustration 33 : photographies comparatives du nord du Bois de Cise au début du XXe siècle et en janvier 2014 : inversion entre rentrant et saillant.

A l'issue des travaux visant à définir l'impact des actions anthropiques, plusieurs éléments sont à noter :

- La quasi-totalité des zones urbanisées bénéficient d'éléments de protection depuis plus d'un siècle, ayant permis de ralentir l'action érosive.
- Il apparaît que depuis que les mesures du trait de côte sont effectuées de manière scientifique et régulière, l'état « naturel » de l'action érosive sur la falaise n'a jamais pu être mesuré. En effet, les actions de lutte contre l'érosion, admettant une forte diversité dans l'espace et dans le temps, sont largement présentes sur le territoire de l'étude, au moins depuis le XIXe siècle. Aussi leur impact, fort, explique, au moins en partie, les

fortes disparités d'estimation du recul du trait de côte que l'on peut trouver en bibliographie sur ce territoire.

- De fait, la doctrine visant à se servir des mesures de recul passées pour l'estimation du recul à venir ne peut pas s'appliquer sur le territoire de cette étude, sous peine de grossières erreurs.
- Plusieurs éléments ont été détruits puis reconstruits à plusieurs reprises au cours du XXe siècle, témoignant du pouvoir érosif très important de la mer, même face à des éléments de protection très solides.
- Une bonne partie des éléments de protection sont aujourd'hui détruits ou en état de dégradation très avancée (illustration 34), impliquant un changement récent des dynamiques d'érosion.
- Certains éléments de protections, s'ils jouent un rôle protecteur sur un espace souhaité peuvent modifier les dynamiques et augmenter l'érosion sur une autre partie du territoire. C'est notamment le cas des épis. Ces conséquences sont particulièrement visibles au nord du Bois de Cise, avec une inversion des saillants et des rentrants depuis la seconde guerre mondiale ayant entraîné une modification non négligeable du paysage (illustration 33).



Illustration 34 : Exemple d'épi très dégradé. Bois de Cise, 2014

3.6. ESTIMATION D'UN ZONAGE DE PERIL IMMINENT

A partir des différentes données acquises durant cette étude, il nous est possible de définir un « zonage de péril imminent ». Il s'agit ici de définir une zone, à l'arrière de la tête de falaise, susceptible d'être menacée à très court terme. Il s'agit donc d'une zone soumise à un aléa fort de recul du trait de côte.

Ça ne signifie évidemment pas que toute cette zone sera impactée à très court terme, mais il s'agit d'une zone à l'intérieur de laquelle aucune garantie ne peut être apportée quant à la sécurité des biens et des personnes à très court terme.

De fait, il est donc recommandé de proscrire toute activité humaine à l'intérieur de ce zonage.

3.6.1. Méthodologie

Plusieurs données recueillies tout au long de l'étude ont permis de définir ce zonage. Il s'agit :

a) De la lithologie

Bien que nous ayons vu auparavant que la lithologie est relativement homogène à l'échelle du territoire de l'étude, elle entraîne une susceptibilité au sous-cavage et définit des niveaux indurés surmontant des niveaux plus friables à l'origine de la mise en place de surplombs. Ces surplombs, quand ils sont marqués peuvent induire des ruptures brutales emportant la partie supérieure de la falaise.

b) De la fracturation

Bien que peu de familles d'orientation aient été identifiées sur la falaise d'Ault, la fracturation est très présente sur le territoire de l'étude, formant notamment, comme vu précédemment, des dièdres de grande taille. Par ailleurs, les zones de faiblesses induites sont à l'origine de sous-cavages hauts et profonds en pied de falaise favorisant le déséquilibre de la falaise.

c) Des sous-cavages

Comme indiqué ci-dessus, les sous-cavages sont souvent en lien avec la fracturation.

Une autre famille de sous-cavage est identifiable. Il s'agit de l'érosion de la partie de la falaise soumise à l'impact de la houle. Cette dernière, chargée en galets a pour conséquence de rogner le pied de falaise par érosion mécanique, et ainsi mettre en surplomb toute la partie de la falaise située au-dessus. Ce phénomène est aussi en lien avec la lithologie, les bancs situés à la base de la falaise étant relativement friables sur l'ensemble de la falaise vive considérée.

Les courants de tempêtes, nombreux durant l'hiver 2013-2014 ont par ailleurs montré que ces sous-cavages pouvaient s'approfondir rapidement (effet mécanique de la houle conjuguée aux sédiments transportés), préparant ainsi la falaise à de futurs éboulements (illustration 35).



Illustration 35 : Identification des sous-cavages générés durant l'hiver 2013-2014 (photo du 15 mars 2014). Cette photo permet aussi de constater la disparition des galets piégés par les deux épis les plus au sud du Bois de Cise

Le traitement 3D des différents MNS haute-précision de la falaise (2009 et 2013) ont aussi permis de mettre en évidence que la création des sous-cavages, notamment calés sur fracture, s'effectuait très rapidement (illustration 36).

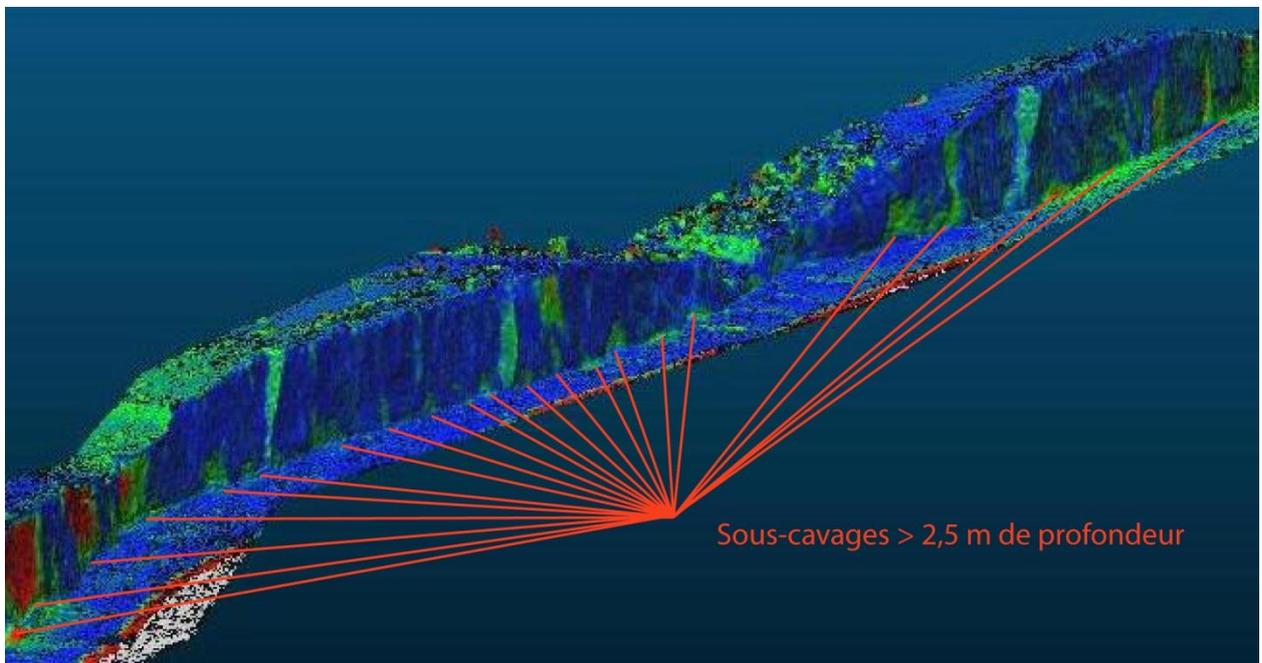


Illustration 36 : Différentiel 3D entre 2009 et 2013 : permet de caractériser les reculs entre ces deux dates

Il apparaît ainsi que la préparation des éboulements peut être rapide et donc que l'occurrence des phénomènes sur une même zone peut être importante.

d) Des instabilités visibles

Plusieurs instabilités visibles (fractures ouvertes ; écailles désolidarisées du massif notamment) ont pu être observées lors des acquisitions de données. Elles indiquent une forte probabilité d'occurrence d'évènement à court terme, qui doit être prise en compte dans la définition de ce zonage.



Illustration 37 : Exemple d'instabilités visibles (plusieurs écailles désolidarisées), secteur "rue de la Montagne" (photo mai 2013)

e) De l'altération

La craie est un élément sensible à l'altération chimique. Aussi les zones de faiblesses, dans lesquelles l'eau circule préférentiellement sont davantage sensibles à l'altération.

On constate ainsi un niveau altéré sur la partie supérieure de la falaise, susceptible de descendre sous forme de racine d'altération au niveau de discontinuités (diaclasses, illustration 38).

A l'approche des vailleuses, l'altération est aussi souvent plus prononcée, d'une part parce que les vailleuses sont souvent callées sur fracture et que leur creusement induit des fissures de décompression (force de traction) de part et d'autre de la vailleuse. Ces secteurs altérés sont bien visibles au niveau des différentes vailleuses présentes sur le terrain d'étude (Ault Bourg, premier val, deuxième val, bois de Cise). Cela se traduit par une cohésion plus faible des matériaux constituant la falaise, et donc une probabilité d'occurrence plus élevée d'éboulements ou de glissements dans le cas des zones les plus altérées.



Illustration 38 : Exemple de racine d'altération ayant provoqué un recul important en tête de falaise en 2013 (secteur deuxième val, photo mars 2014)

f) Des arrivées d'eau continentale

L'arrivée d'eau continentale (écoulements de surface, karstique et eau de nappe) indique à la fois la présence d'une zone de faiblesse, et d'une zone où la dissolution est plus importante. Ces zones apparaissent donc comme potentiellement plus susceptibles à l'érosion.

Par ailleurs, les eaux continentales comprennent les eaux pluviales et usées. Plusieurs cas de mauvaise gestion ont été identifiés et ont pour conséquence de fragiliser la falaise.

Les eaux usées notamment peuvent provoquer des phénomènes de dissolutions, par une forte concentration en CO₂ et par les produits chimiques (détertrants par exemple) qu'elles sont susceptibles de contenir.

Un exemple remarquable a pu être observé lors de la réalisation de cette étude au niveau du bois de Cise, où une mauvaise gestion d'eaux usées acides a considérablement altéré la falaise, provoquant un recul de plus d'un mètre au droit de la sortie d'eau et altérant considérablement plusieurs centaines de m² de falaise (illustration 39).



Illustration 39 : Comparaison de photos du sud de la valleuse du Bois de Cise en juin 2012 (gauche) et en mars 2014 (droite) : Altération très marquée due à un rejet d'eau usée acide.

D'une manière plus générale, la falaise au droit des zones urbanisées est localement très altérée, sans doute en relation avec des phénomènes d'infiltration concentrée. Ainsi des observations de craie très altérée ont pu être faites à plusieurs endroits des portions coiffées par la « casquette ». Par ailleurs, aucune information n'est disponible sur l'état d'altération de la craie au niveau de l'esplanade du casino, alors que plusieurs arrivées d'eau sont visibles dans la platier sur cette zone.



Illustration 40 : Exemple de craie altérée sous la partie la plus au sud de la casquette (mars 2014)

L'observation de ces différents facteurs, permet d'identifier la susceptibilité de la falaise à être touchée par tel ou tel phénomène.

L'ensemble de ces données, ajoutées au retour d'expérience sur la typologie des éboulements observés en contexte similaire a permis de définir une typologie des phénomènes.

3.6.2. Typologie des phénomènes d'éboulement majeur

Afin de détecter les zones susceptibles de provoquer des phénomènes de plus ou moins grande intensité, il était important de réaliser le travail de classification ci-après. Il est basé sur les différences de mécanismes, de volumes, d'occurrences observées entre les phénomènes rencontrés le long du littoral Picard et Haut-Normand admettant un contexte lithologique équivalent à celui de la zone d'étude.

Il faut noter que les éboulements peuvent être des événements combinés et que des phénomènes mobilisant des volumes importants surviennent parfois après des événements précurseurs de plus petite ampleur. Par ailleurs, l'occurrence d'un phénomène de grande ampleur (supérieur à 1000 m³) n'est pas garante de l'absence de récurrence d'un phénomène similaire à court terme, même si cela réduit sa probabilité d'occurrence. La « préparation » de la falaise à un phénomène d'éboulement pouvait se faire très rapidement et on citera la zone de la rue des Vikings à Criel-sur-Mer où une portion de falaise a été impactée six fois depuis 2000 par des phénomènes dépassant 1000 m³ (Dewez *et al.*, 2013).

Pour chaque phénomène identifié, un recul unitaire maximum, correspondant à la zone de péril imminent a été associé.

a) Eboulement lié à la néoformation de sous-cavages

Il s'agit d'éboulements ayant une probabilité d'occurrence élevée. Il s'agit du schéma le plus « classique » d'éboulement majeur pour les lithologies telles que celles présentes à Ault.

Lorsque l'érosion agit sur le pied d'une falaise, des sous-cavages se forment, les plus prégnants étant calés sur fracture. Au bout d'un certain temps, la falaise n'est plus soutenue que par quelques piliers. Plus les piliers sont étroits, moins ils supportent le poids de la falaise, ce qui aboutit à la rupture.

Les fractures dues à ce type d'éboulements montrent souvent le même schéma de formation : un cisaillement à la base puis traction jusqu'en haut de la falaise, le tout menant à la rupture. Le cisaillement induit que la tête de falaise recule davantage que le point le plus profond du sous-cavage (illustration 41).

L'érosion en pied préparant l'éboulement peut se faire très rapidement, notamment en cas de combinaison entre une fracturation récurrente et des bancs friables en pied (cas de la zone d'étude).

Pour ce type d'éboulement, le recul unitaire maximum est de l'ordre de 10 m.

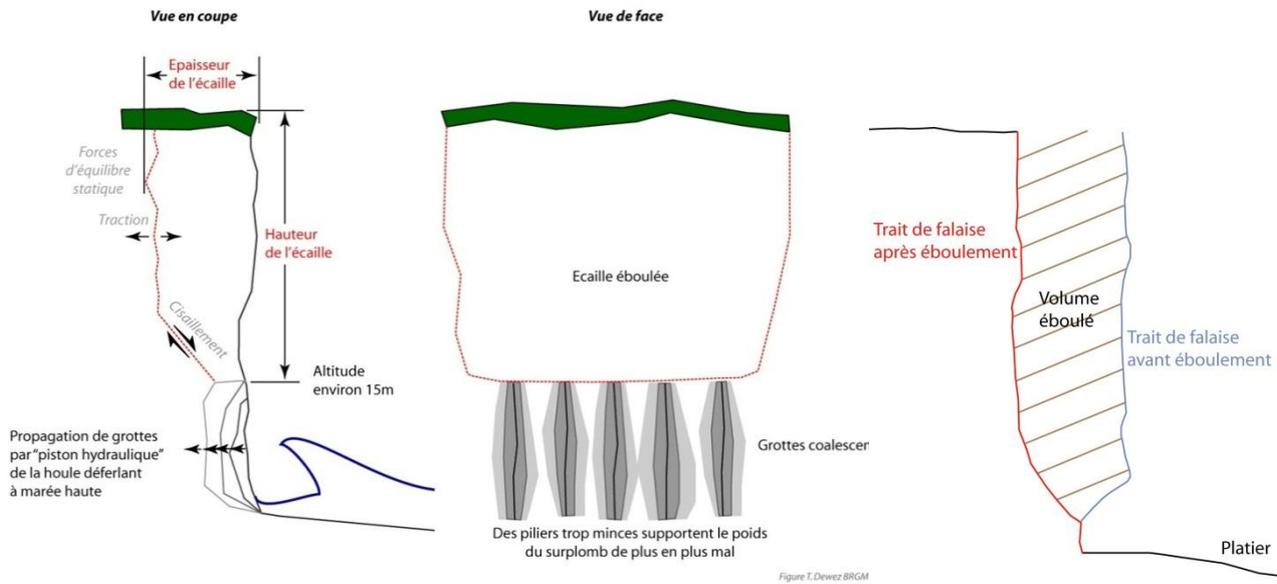
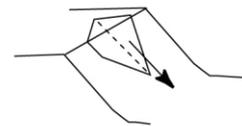


Illustration 41 : Schéma d'évolution d'une falaise vide érodée par néoformation de sous-cavages

b) Eboulements délimités par la fracturation

Il s'agit d'éboulement de moyenne à grande ampleur. La rupture est déterminée par des plans de discontinuités structurales préexistantes (joints, masterjoints, failles). Les ruptures en dièdre sont celles rencontrées le plus souvent mais il existe également les ruptures planes moins fréquentes. Pour qu'il y ait rupture, les fractures doivent être favorablement orientées et inclinées vers le pied de falaise.



La zone d'étude est fortement prédisposée à ce type de phénomène, comme le montre l'analyse de la fracturation. Le recul unitaire en cas d'occurrence associé est là aussi estimé à 10 m (selon la configuration des discontinuités structurales).

L'exemple ci-après (illustration 42) montre une portion de falaise située au sud du Tréport en 2010 et en 2013. Avant que l'éboulement ne se produise, il est possible de distinguer deux fractures. Elles constitueront par la suite des plans de faiblesse préférentiels lors de la rupture du massif rocheux.

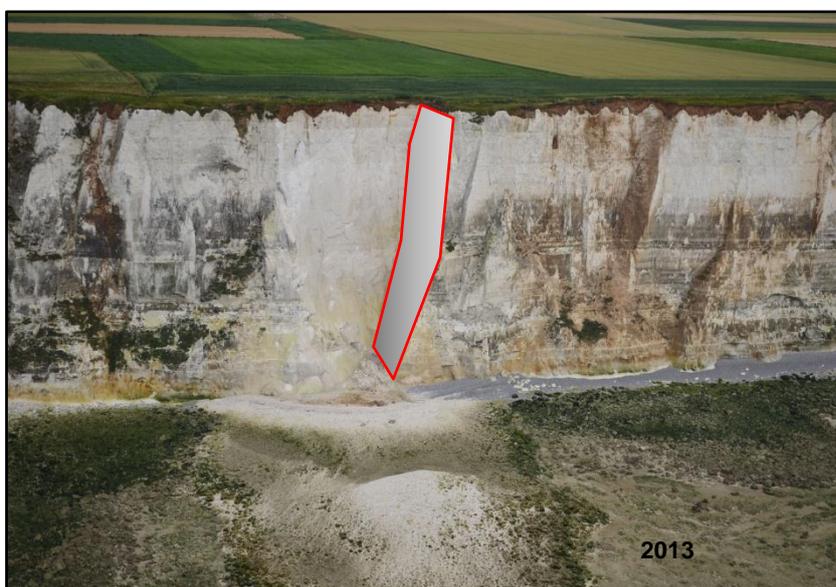
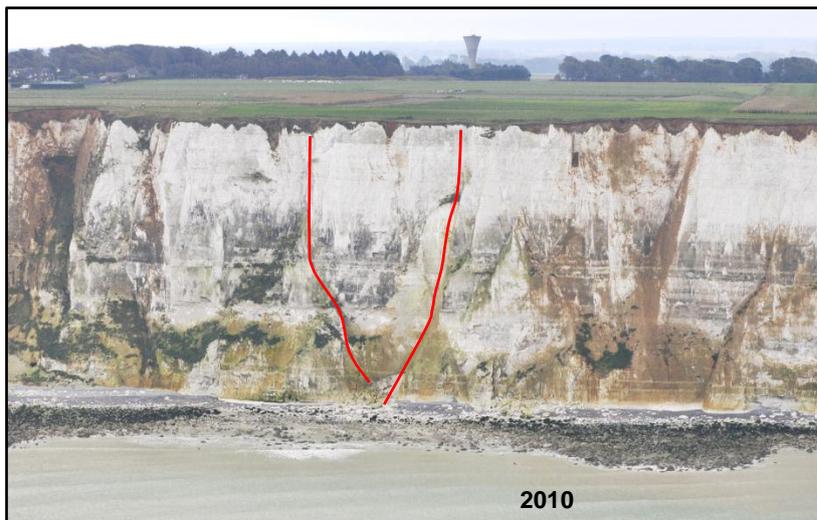


Illustration 42 : Vue d'une falaise marquée par un éboulement délimité par la fracturation, avant et après le phénomène

c) Eboulements liés au détachement d'écailles

Parmi les signes d'instabilités visibles sur la falaise, on trouve fréquemment des écailles de plus ou moins grand volume, délimités sur la falaise. Ces dernières sont souvent désolidarisées du reste du massif crayeux par une fracture parallèle à la falaise engendrée soit par la tectonique, soit par un éboulement précédent, soit par la décompression, soit par la présence de sous-cavages, soit par l'action de facteurs extérieurs (gel/dégel), soit par combinaison de ces différents facteurs. L'écaille instable est alors destinée à se détacher de la paroi sous l'action de la gravité. Deux types de ruptures sont alors possibles par basculement (toppling) ou par rupture en pied.

Le recul maximum en cas d'occurrence est estimé à environ 5 m pour ce type de cas sur la zone d'étude. Il existe toutefois des cas rares, comme à Saint-Jouin-Bruneval (76) le 15 juillet 2013 où ce type de rupture par basculement a entraîné un recul de plus de 10 m et mobilisé près de 30 000 m³ (montage vidéo visible au lien suivant :

http://www.youtube.com/watch?v=b_zAAPLEWFQ). Le contexte géologique particulier ne permet toutefois pas d'occurrence d'évènement aussi important sur le secteur d'étude.

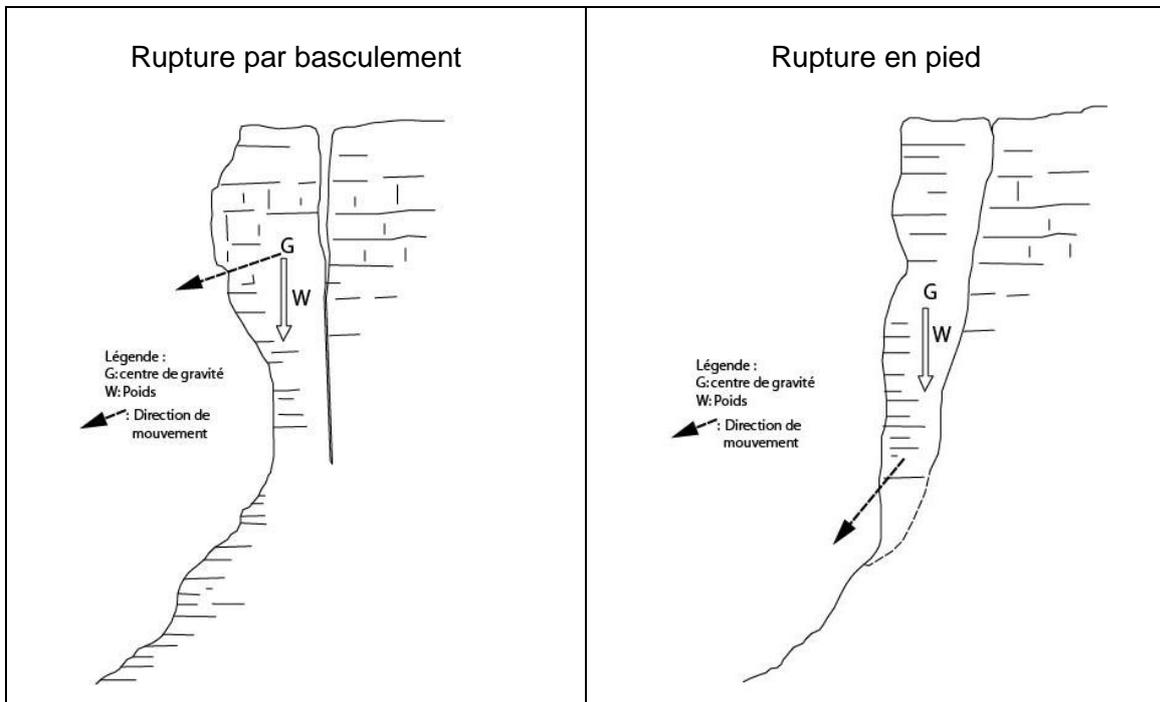


Illustration 43 : Représentation schématique des mécanismes de rupture d'écailles (d'après LCPC)

Sur la zone d'étude, l'écaille la plus visible se situe directement au nord de la valleuse du Bois de Cise (illustration 43).



Illustration 44 : Ecaille désolidarisée du versant, nord Bois de Cise (2012)

d) Eboulements complexes

On qualifie d'éboulements complexes :

- Les éboulements composés (double dièdre par exemple...). Ils sont peu fréquents mais représentent en cas d'occurrence des volumes très importants ;
- Les éboulements s'étant produits malgré l'absence d'indices de prédisposition.

L'exemple le plus important de ce type d'éboulement sur les communes voisines s'est produit à Criel-sur-Mer en 2008 (illustrations 45 et 46). Il est délimité par une succession de fractures selon deux orientations : F1 – N130, 75°NE ; F2 – N030, 75°W (illustration 45-2)

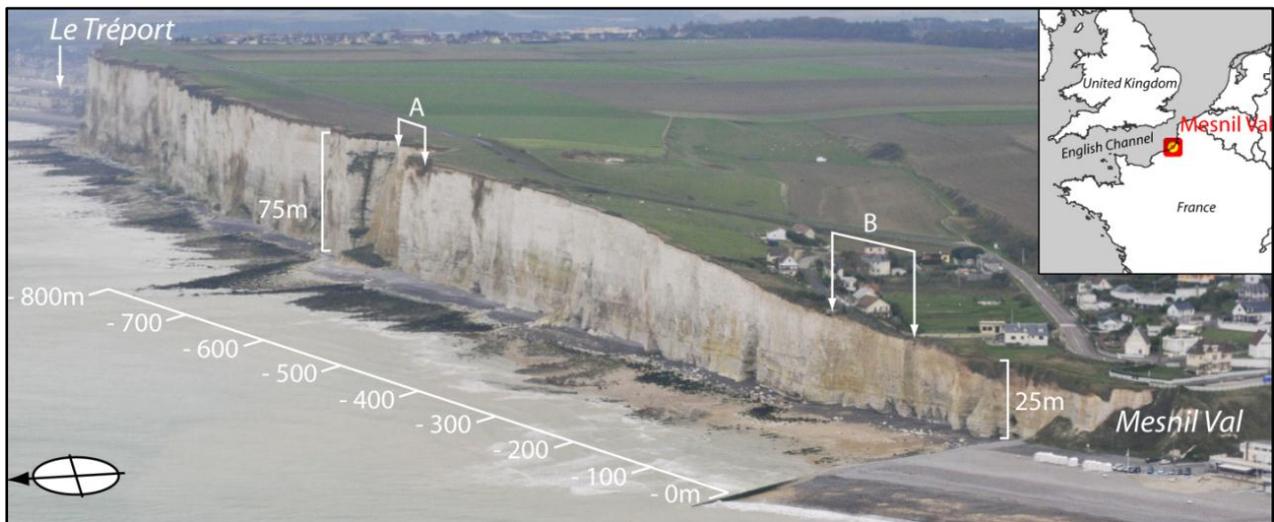


Illustration 45 : Situation du phénomène de 2008 à Criel-sur-Mer

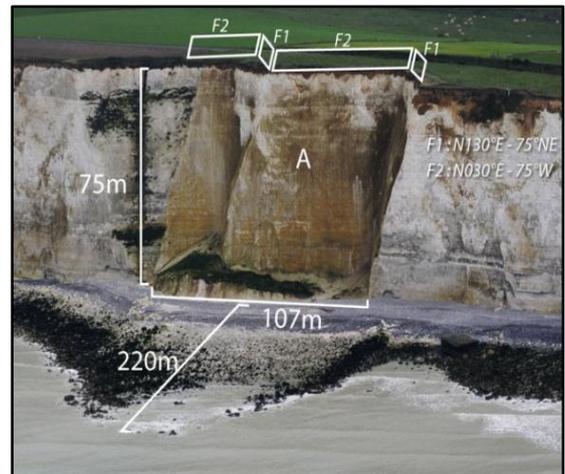


Illustration 46 : Mise en évidence de la fracturation complexe à l'origine de l'éboulement de Mesnil-val en 2008

Plus proche de la zone faisant l'objet de cette étude, à seulement 500 m au sud du bois de Cise s'est produit un éboulement similaire en 2012. Là aussi, on retrouve une prédisposition complexe, avec les fractures successives favorisant les dièdres, en pied desquelles se trouvaient des sous-cavages marqués (illustration 47).



Illustration 47 : Prises de vue aériennes obliques de 2009 et 2013 mettant en évidence l'occurrence d'un éboulement majeur lié à une fracturation complexe, commune de Mers-les-Bains

Ce type d'éboulement, en cas d'occurrence est susceptible de mobiliser de très gros volumes et de provoquer des reculs importants (20 m pour Criel-sur-Mer, 2007 ; 14 m pour Mers-les-Bains, 2012). Le recul unitaire en cas d'occurrence pour les zones identifiées comme présentant cette prédisposition est estimé à environ 20 m.

Plusieurs zones apparaissent comme prédisposées à ce type de phénomène sur le territoire de l'étude. Un cas remarquable, déjà évoqué lors du paragraphe 3.2.2 concernant la fracturation, est identifié directement au sud de la valleuse du Bois de Cise (illustration 48).



Illustration 48 : exemple de zone identifiée comme predisposée à l'occurrence d'éboulement complexe

e) Autres phénomènes considérés

- **Erosion diffuse**

Il s'agit d'une érosion régulière, difficilement observable, qui découle de la chute très régulière d'éléments de très petite taille (du cailloutis à quelques blocs). La comparaison de la falaise à deux dates différentes permet d'identifier les volumes perdus, sans toutefois qu'un événement en particulier ait été observé.

Les travaux de recherches effectuées depuis le début des années 2000 sur le site de Criel-sur-Mer (site admettant une lithologie équivalente à Ault), ont permis de définir une loi statistique de l'occurrence d'évènement d'un volume donné par an et par km linéaire de falaise. Ces travaux montrent que sur un km de linéaire de falaise, il se produit en une année environ 10 évènements supérieurs à 100 m³, 65 évènements mobilisant au moins 1 m³, près de 800 évènements mobilisant au moins 10 litres et plus de 2500 évènements mobilisant au moins 1 litre (Dewez *et al.*, 2013), ce qui en d'autres termes, signifie qu'il tombe en moyenne de l'ordre de 7 éléments supérieurs à un litre par jour et par kilomètre de falaise.

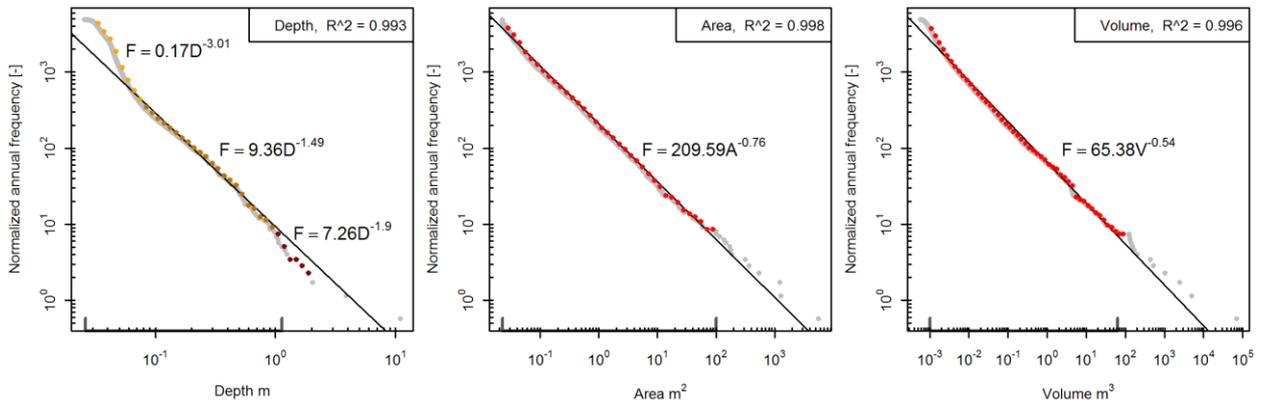


Illustration 49 : lois statistiques représentant les occurrences et caractéristiques d'éboulements et chutes de blocs par an et par km linéaire de falaise. Exemple de Criel-sur-Mer (76) (Dewez et al. 2013)

Les reculs correspondant à cette érosion « diffuse », hors éboulement majeur (considérant qu'un éboulement majeur est supérieur à 1000 m³), sont estimés entre 5 et 10 cm/an.

- **Chute de blocs isolés**

Ce phénomène rejoint le paragraphe précédent, puisqu'il s'agit d'une forme d'érosion diffuse.

Il est toutefois nécessaire de souligner qu'au-delà des éboulements majeurs et d'une érosion diffuse, relativement homogène, exprimée en moyenne par an, il existe partout en pied de falaise un aléa fort de chute de blocs isolés. Les lois statistiques présentées au paragraphe précédent montrent qu'il se produit 65 occurrences de chutes de blocs supérieurs au m³ par an et par km linéaire de falaise vive. Rappelons ici qu'un bloc d'un m³ a une masse d'environ 2 tonnes et un poids en cas de chute de la partie supérieure de la falaise qui peut être très important (environ 20 000 N (N = newton)). Pour une pierre d'un litre, pesant environ 2 kg, le poids en cas de chute de la partie supérieure de la falaise sera de l'ordre de 20 N).

Dans le cas des falaises non directement soumises à l'impact de la houle (falaise « morte »), l'occurrence de ce type de type phénomène est non quantifiée mais moins importante que pour les falaises vives (érosion plus faible, butée de pied, végétation...). Toutefois, en fonction de la fracturation et l'altération, l'aléa de chute de blocs peut être important. C'est le cas pour la partie de falaise protégée en pied au niveau du Bourg d'Ault, et notamment au niveau du secteur « rue de Paris ».

Il s'agit surtout ici d'un aléa pour les enjeux en pied de falaise, donc dans le cas présent, les promeneurs. C'est aléa est fort sur l'ensemble du secteur d'étude.

- **Eboulements / Glissements de craie altérée**

Certains affleurements (Bois de Cise et Ault Bourg notamment) sont constitués de craie altérée. Cette craie, plus fragile, ne peut créer de phénomènes majeurs. Ces pans de falaise sont donc régulièrement sujets à des glissements ou éboulements de petite taille. Ce phénomène est repérable par la présence de cône d'éboulis caractérisés par une faible emprise sur le platier et constitués d'éléments de petite taille (illustration 50).

- **Glissement de formations superficielles**

Des formations superficielles, meubles, peuvent être présentes sur la partie supérieure de la falaise. Il peut s'agir de dépôts de versants sur les versants des valleuses, ou le plus souvent

de formations argileuses issues de l'altération chimique de la formation crayeuse. Ces formations, avec l'absence de butée de pied liée à la verticalité de la falaise et en cas de présence d'eau, sont fortement soumises au risque de glissement de terrain. Un exemple remarquable a eu lieu durant la réalisation de cette étude dans la vallée du deuxième val, entre Ault et le Bois de Cise (cf illustration 38). Les reculs induits sont estimés entre 3 et 5 m pour ce type d'instabilité.



Illustration 50 : Photo permettant de montrer une craie altérée et ses résidus d'érosion diffuse en pied (probable cryoclastie), ainsi que l'impact d'actions anthropiques non maîtrisées (sud Bois de Cise, 2013)

f) Facteurs anthropiques

Comme vu précédemment, les facteurs anthropiques peuvent causer une évolution rapide de la falaise, notamment en cas de mauvaise gestion des eaux (illustration 50).

Il faut noter que ce zonage reste appliqué aux estimations de recul à plus long terme. Ce qui signifie que les zonages à 10, 30, 50 et 100 ans ne correspondent pas à l'estimation de la situation du trait de côte à ces horizons, mais à l'estimation de la limite de la zone jugée à risque à ces différents termes.

3.7. ESTIMATION DES VITESSES DE REcul

Comme indiqué précédemment, il n'est pas pertinent sur ce territoire d'appliquer au futur les vitesses de recul moyennes mesurées par le passé, notamment du fait de l'anthropisation du trait de côte, mais aussi du fait d'une modification constatées des dynamiques impactant l'érosion.

Aussi, compte tenu :

- des observations réalisées sur la falaise (lithologie, fracturation, altération...),
- des phénomènes d'érosion brutale ou régulière décrits dans le paragraphe précédent,
- de l'évolution de la réserve sédimentaire, et de l'absence de protection possible du pied de falaise par un cordon de galets,
- de la probable évolution climatique décrite dans les rapports du GIEC, impliquant une augmentation des événements climatiques intenses et une remontée des niveaux marins, soit deux éléments favorisant l'érosion des falaises,

il a été estimé que les vitesses de recul observées et mesurées entre 2000 et 2014 correspondaient aux dynamiques d'érosion actuelles et à venir de la falaise, au moins pour les zones non protégées.

Pour les zones protégées par des éléments de protection, l'estimation des vitesses de reculs a été évaluée selon 4 scénarii :

- Etat actuel : maintien des éléments de protection avec des réparations succinctes ;
- Sc1 : impliquant un entretien et un renforcement des éléments de protection ;
- Sc 2 : impliquant l'abandon des éléments de protection ;
- Sc 3 : impliquant la déconstruction des éléments de protection.

L'estimation des dynamiques impactant le recul du trait de côte nous permet d'estimer les reculs à horizon 10 et 30 ans. Au-delà, compte-tenu de la multiplicité des facteurs, les connaissances actuelles ne permettent pas d'être précis sur l'estimation du recul à long terme.

Toutefois, le guide de réalisation des PPRn implique, dans le cadre d'un outil de gestion de la bande littorale à long terme, de définir une estimation du recul à horizon 100 ans.

Pour ce faire, il a été décidé de retenir les vitesses de recul estimées à horizon 30 ans, pour le scénario 2, c'est-à-dire impliquant l'abandon des éléments de protection.

4. Résultats

4.1. IDENTIFICATION DE L'ALEA FORT A TRES COURT TERME (ZONAGE PERIL IMMINENT)

Il s'agissait ici de définir le phénomène unitaire majeur pouvant se produire à très court terme à chaque endroit considéré de la zone d'étude. Dans cette zone, la probabilité d'occurrence d'un événement à très court terme est importante. C'est pourquoi, il est recommandé d'y proscrire toute activité humaine.

Comme défini précédemment, une typologie des phénomènes possibles a été établie. Le recul sur ce type de phénomène, a permis de définir un recul maximum unitaire à considérer pour chaque type de phénomène.

L'ensemble des observations et mesures réalisées sur la falaise (lithologie, fracturation, sous-cavage, arrivées d'eau...) permet d'attribuer à chaque zone de falaise une typologie possible d'évènement susceptible de se produire à très court terme, et donc ainsi un recul unitaire à prendre en compte (compris entre 3 et 20 m selon la typologie des phénomènes). Ce recul est à considérer comme une « zone de péril à court terme ». Cette zone de sécurité, dans laquelle il est recommandé de ne pratiquer aucune activité humaine, devra être continuellement appliquée en fonction du recul du trait de côte.

Les observations et mesures réalisées montrent que sur certaines zones, plusieurs phénomènes admettant des reculs maximum différents sont susceptibles de se produire à court terme. Dans ce cas, la zone de recul maximum correspond au recul du phénomène considéré le plus important.

Le zonage de péril imminent est très variable selon les zones, puisque variant de l'inexistant sur les parties Ault nord ou Woignarue à 20 m dans plusieurs zones des secteurs « premier val », « deuxième val » ou Bois de Cise sud, la falaise étant susceptible au phénomène d'éboulements complexes.

Deux cas particuliers sont à noter :

L'esplanade du casino : un zonage de péril imminent a été identifié en cas de chute du mur de protection. En l'absence de diagnostic du mur de protection, et de l'état de la roche à l'arrière du mur, ce zonage reste hypothétique. Il conviendrait de réaliser un diagnostic complet afin de savoir si le mur est susceptible de céder à court terme, ainsi que de l'état d'altération de la craie à l'arrière afin de déterminer si elle est susceptible de glisser.

La casquette : elle ne présente pas de risque de chute à très court terme. Toutefois, un risque est possible à horizon 10 ans. C'est pourquoi, un recul unitaire estimé selon le même principe que le zonage imminent a été appliqué à une partie des zones « casquette nord » et casquette sud », mais à horizon 10 ans. Il s'agit d'un zonage de 10 m, correspondant à l'emprise de l'aménagement.

Concernant les enjeux, il n'y a pas actuellement de bâtiment situé à l'intérieur du zonage de péril grave et imminent, hormis le casino, si on considère un péril imminent au niveau du mur de protection de la falaise (à diagnostiquer). Il y a toutefois deux secteurs au niveau desquels des bâtiments se situent en limite (1m) de la zone : secteur « Bois de Cise » (Villa Lumen) et secteur « rue de Paris ». On constate par ailleurs qu'une partie du parking situé au niveau du secteur « rue de la Montagne » se trouve dans ce zonage.

4.2. ESTIMATION DES VITESSES DE REcul A COURT ET MOYEN TERME

Comme expliqué précédemment, l'estimation des vitesses de recul ne peut être définie en fonction des moyennes identifiées au cours du dernier siècle.

Il apparaît en effet :

- Une modification récente des dynamiques, et notamment des dynamiques sédimentaires impactant l'érosion du pied de falaise ;
- Une probable évolution climatique à horizon 100 ans, influant sur plusieurs facteurs responsables du recul (houle, climat notamment) ;
- Que les secteurs urbanisés, très présents sur la zone d'étude, sont protégés par des aménagements depuis le XIXe siècle, ce qui rend certaines mesures de recul incohérentes avec les dynamiques observées ces 15 dernières années.

C'est pourquoi l'estimation des vitesses de recul proposée est définie à partir :

- des observations et mesures précises rendues possibles ces dernières années par l'évolution et la multiplication des techniques de mesures et d'observations ;
- d'une analyse précise des différents facteurs jouant un rôle dans le recul du trait de côte.

Des estimations précises peuvent ainsi être détaillées à horizon 10 ans (court terme) et 30 ans (moyen terme).

4.2.1. Cas des zones non protégées

Compte tenu des différents facteurs analysés, et notamment du facteur « dynamique littorale », il a été estimé que les mesures et observations réalisées depuis 2000 étaient valables à long terme.

Deux cas particuliers ont toutefois été pris en compte :

a) Secteur Bel-Air

Le secteur Bel-Air a connu une récurrence d'éboulements majeurs durant les années 2000 (notamment 2009 et 2010). Du fait de sa faible longueur (250 m de linéaire de falaise), les forts reculs induits par ces éboulements impactent la moyenne de recul sur une chronique relativement courte (13 ans). Cette particularité nous amène à réduire les vitesses estimées par rapport aux vitesses mesurées ces dernières années. Les observations réalisées sur la fracturation, la lithologie, l'altération ou le pied de falaise sont comparables à ce qui a pu être observé sur le secteur « deuxième-val ». La vitesse de recul estimée à long terme sera donc de 0,55 m/an et non 0,7 m/an, comme observé ces dernières années.

b) Secteur Bois de Cise nord

Le secteur Bois de Cise nord subit l'impact des épis situés en amont dérive littorale. Les mesures montrent un recul ces dernières années de l'ordre de 0,6 m/an. En considérant une dégradation de plus en plus prononcée des épis du Bois de Cise à moyen terme, il est probable

que ces vitesses de recul diminuent légèrement. C'est pourquoi les vitesses de recul estimées à long terme ont été légèrement réduites.

4.2.2. Cas des zones protégées

La particularité de la ville d'Ault par rapport à la plupart des communes situées en haut de falaise est sa densité urbaine à proximité de son sommet.

Aussi, le recul des falaises étant un phénomène qu'a toujours connu la commune depuis son urbanisation, de nombreux éléments de lutte contre le recul du trait de côte ont été construits au fil du temps. Il apparaît aujourd'hui des zones qui ont été protégées au moins depuis le XIXe siècle.

La principale conséquence au niveau de l'estimation des vitesses de recul est que certaines zones n'ont jamais été soumises à des phénomènes d'érosion « naturels » depuis que le recul est mesuré.

Il est donc extrêmement compliqué sur ces zones d'identifier le recul probable à moyen terme. D'autant qu'il est impossible de définir si de nouveaux éléments de protection seront construits à l'avenir ou quel sera l'état de vieillissement des éléments existants.

C'est pourquoi, en plus de l'évolution actuellement constatée, à la demande des services de l'Etat, le BRGM a estimé pour les zones protégées, en plus de l'estimation issues des dynamiques et aménagements actuels, trois scénarii de recul en fonction des différents niveaux de protection suivants :

- Protection actuelle entretenue et renforcée ;
- Protection actuelle non entretenue (abandon) ;
- Destruction des protections actuelles.

Etat actuel (léger entretien de quelques éléments de protection)

Il s'agit ici d'une extrapolation à partir des dynamiques et décisions anthropiques observées depuis le début des années 2000. On prend donc en compte ici des aménagements de lutte contre l'érosion vieillissants, partiellement entretenus (maintien de l'esplanade du casino, enrochements partiels, vieillissement des épis et de la casquette,...)

Le tableau ci-après (illustration 50) fait la synthèse des vitesses estimées à court et moyen terme par secteur. Comme vu plus haut, des corrections ont dû être apportées pour quelques secteurs afin de correspondre à l'analyse des dynamiques réalisée durant l'étude.

En comparant le zonage estimé et les enjeux (nombre de polygones de bâti de la BDtopo de l'IGN), les enjeux impactés à court et moyen terme sont :

- péril imminent : 0 bâti,
- à 10 ans : 6 bâtis (5 Ault, 1 Bois de Cise),
- à 30 ans : 18 bâtis (15 Ault, 3 Bois de Cise).

Par ailleurs, la route de Saint-Valery au niveau du secteur « rue de la Montagne », ainsi que la rue des Bessaints, secteur « Bel-Air », sont potentiellement impactées à court terme

Secteur	Zone	Recul 1946-2000 (m/an)	Recul 2000-2014 (m/an)	Evènement majeur (Aléa fort à très court terme)	Etat actuel (Réparations succinctes)			
					Zonage 10 ans		Zonage 30 ans	
					Estimation vitesse recul (m/an)	Zonage (en m)	Estimation vitesse recul (m/an)	Zonage (en m)
Ault Bourg	Ault nord	-	-	0 à 1	0	0 à 1	0,1	2 à 3
	Casquette nord	0,1	-	10 *1	0	0	0,1	12
	Rue de Paris	0,1	0,1	4 à 5	0,1	5 à 6	0,1	7 à 8
	Casquette sud	0,2	-	10* *1	0	0	0,1	12
	Rue de la Montagne	0,15	0,35	10	0,35	13,5	0,4	21,5
	Espanade du Casino	-	-	5 *2	0	0	0	0
	Bel Air	0,3	0,7	10	0,55	15,5	0,55	26,5
Entre Ault et Bois de	Premier val	0,25	0,5	10 à 20	0,5	15 à 25	0,5	25 à 35
	Deuxième val	0,25	0,55	10 à 20	0,55	15,5 à 25,5	0,55	26,5 à 36,5
Bois de Cise	Bois de Cise nord	0,4	0,6	10 à 15	0,6	16 à 21	0,5	26 à 31
	Bois de Cise épis	0,2 *3	0,2	3 à 10	0,4	7 à 14	0,4	15 à 22
	Bois de Cise sud	0,2	0,4	10 à 20	0,4	14 à 24	0,4	22 à 32
*1 : En cas de chute de la casquette. Ici , aléa à court terme (10 ans) en cas d'absence d'entretien								
*2 : En cas d'absence d'entretien et de rupture du mur de soutènement								
*3 : Recul moyen de la tête de falaise. Recul plus important constaté de la partie basse, auparavant fortement avancée par rapport à la tête de falaise								

Illustration 51 : Estimations des vitesses de recul et du zonage correspondant par extrapolation des dynamiques actuelles

Scenario 1 : protection actuelle entretenue et renforcée

On considère ici :

- Un entretien régulier de tous les éléments existants (digue, casquette, esplanade du casino, enrochements...);
- Une réparation des éléments défectueux, et notamment de l'ensemble des épis construits après la seconde guerre mondiale, tous en état de dégradation avancée à l'heure actuelle ;
- Une lutte contre le sous-cavage de la casquette ;
- Une gestion des eaux à l'échelle du versant visant à diminuer les phénomènes d'érosion et d'altération à proximité des éléments de protection ;
- Une protection par enrochement de la bande non protégée située entre l'esplanade du casino et la limite sud-est de la zone d'enrochements située sous la casquette.

Les vitesses estimées sont présentées en illustration 52.

En fonction de ce scénario, il est possible d'identifier des particularités par zone :

- **Ault nord (limite nord de la casquette jusqu'en limite nord de la zone d'étude)**

On considère ici un recul nul à faible.

Il reste des phénomènes possibles de chutes de blocs ou de glissements de versant de faible intensité sur la partie supérieure du versant ou sur le versant de Woignarue. On considèrera donc ici un aléa faible de mouvement de versant.

					Scénario 1 : entretien et renforcement			
					Zonage 10 ans		Zonage 30 ans	
Secteur	Zone	Recul 1946-2000 (m/an)	Recul 2000-2014 (m/an)	Evènement majeur (Aléa fort à très court)	Estimation vitesse recul (m/an)	Zonage (en m)	Estimation vitesse recul (m/an)	Zonage (en m)
Ault Bourg	Ault nord	-	-	0 à 1	0	0 à 1	0	0 à 1
	Casquette nord	0,1	-	10* ^{*1}	0	0	0	0
	Rue de Paris	0,1	0,1	4 à 5	0,1	5 à 6	0,1	7 à 8
	Casquette sud	0,2	-	10* ^{*1}	0	0	0	0
	Rue de la Montagne	0,15	0,35	10	0,25	12,5	0,1	14,5
	Espanade du Casino	-	-	5* ^{*2}	0	0	0	0
	Bel Air	0,3	0,7	10	0,55	15,5	0,55	26,5
Entre Ault et Bois de	Premier val	0,25	0,5	10 à 20	0,5	15 à 25	0,5	25 à 35
	Deuxième val	0,25	0,55	10 à 20	0,55	15,5 à 25,5	0,55	26,5 à 35,5
Bois de Cise	Bois de Cise nord	0,4	0,6	10 à 15	0,6	16 à 21	0,6	28 à 33
	Bois de Cise épis	0,2* ^{*3}	0,2	3 à 10	0,2	5 à 12	0,2	9 à 16
	Bois de Cise sud	0,2	0,4	10 à 20	0,4	14 à 24	0,4	22 à 32
*1 : En cas de chute de la casquette. Ici , aléa à court terme (10 ans) en cas d'absence d'entretien								
*2 : En cas d'absence d'entretien et de rupture du mur de soutènement								
*3 : Recul moyen de la tête de falaise. Recul plus important constaté de la partie basse, auparavant fortement avancée par rapport à la tête de falaise								

Illustration 52 : Estimation des vitesses de recul et du zonage associé en fonction du scénario n°1

- **Casquette (secteurs « casquette nord » et « casquette sud »)**

On considère ici un recul nul à faible (quelques cm/an) à long terme.

Toutefois, bien que la falaise soit considérée comme falaise morte, elle reste soumise aux aléas d'éboulement et de chute de blocs inhérents à toute falaise.

La falaise apparait en effet comme fortement fracturée et altérée. On distingue plusieurs écaïlles instables, ainsi que des traces d'éboulements récents (quelques dizaines de m³) tout au long de cette zone.

En cas d'entretien régulier et de renforcement ci-besoin, on ne considère plus ici la casquette comme susceptible de chuter.

On considèrera par ailleurs une forte probabilité d'occurrence d'éboulement et de chute de blocs susceptible d'impacter le chemin de promenade situé en pied de falaise.

- **Rue de Paris**

En considérant ce scénario d'entretien ou de renforcement des éléments de protection, l'évolution de la falaise sur ce secteur est celui de toute falaise morte. On peut estimer un recul assez lent, jusqu'à obtention d'un équilibre du versant (versant réglé), le recul maximum à long terme correspondant dans ce cas grossièrement à la hauteur de la falaise.

On notera ici la présence d'un zonage de péril grave et imminent sur 4 à 5 m, les processus continentaux pouvant générer des éboulements conséquents.

- **Rue de la montagne**

La zone s'étend au niveau de la rue de Saint-Valery, entre l'esplanade du casino et la rue du moulin.

La mise en place d'un enrochement à cet endroit permettrait de réduire la probabilité d'occurrence de phénomènes à long terme, et donc les vitesses moyennes de recul. On considèrera donc pour cette zone des vitesses de recul de l'ordre de 10 cm/an à long terme.

Toutefois, les phénomènes existants (écailles désolidarisées, sous-cavages profonds) ainsi que la fracturation et l'état d'altération de la falaise à cet endroit ne permettent pas de réduire le zonage de risque imminent. On considèrera donc ici une zone de 10 m à l'arrière de la tête de falaise comme étant soumise à un aléa fort de recul à court terme.

- **Esplanade du casino**

On considèrera pour cette zone un recul nul.

Il convient toutefois de noter que l'état de la craie à l'arrière du mur recouvrant l'ensemble du trait de falaise n'est pas connu. En cas d'altération prononcée et/ou de rétention d'eau à l'arrière du mur, deux phénomènes impactant sont possibles :

- Une instabilité de versant générant la destruction du mur sous l'effet de pressions trop importantes ;
- Des phénomènes de tassement à l'arrière de l'aménagement lié à l'altération de la craie pouvant impacter les enjeux.

En l'absence de reconnaissance de l'état de la craie, et en l'absence de diagnostic de stabilité du mur, il est donc impossible de se prononcer sur l'éventuelle occurrence d'un phénomène de versant à court terme à cet endroit.

- **Bois de Cise**

En cas de réfection des quatre épis existants au Bois de Cise, le recul moyen devrait être comparable aux vitesses mesurées depuis la seconde guerre mondiale. Toutefois, les données recueillies concernant la dynamique sédimentaire et la très faible recharge possible en galets, ne permettent pas d'assurer un remplissage des casiers formés par les épis à long terme. Les courants dominants étant obliques, des épis jouant pleinement leur rôle assureraient toutefois une baisse de l'impact de la houle au niveau du pied de falaise.

On considèrera donc pour cette zone des reculs moyens de 20 cm/an.

Les épis ne changeant en rien l'état de stabilité actuel de la falaise, on considèrera un aléa fort de recul à très court terme entre le premier et le dernier épi du bois de Cise.

Enfin, il faut noter que la réfection ou un éventuel agrandissement de l'épi le plus au nord du Bois de Cise pourrait entraîner une légère augmentation des vitesses de recul sur quelques dizaines à quelques centaines de mètres au nord. Il s'agit d'un phénomène couramment observé sur l'ensemble de la côte à falaise Normand-Picarde probablement dû aux actions conjointes d'une modification locale des courants de houle impactant la falaise et d'une absence totale de dépôt de sédiments en pied de falaise pouvant réduire l'impact de la houle.

En comparant le zonage estimé et les enjeux (nombre de polygone de bâti de la BDtopo de l'IGN), les enjeux impactés sont :

- péril imminent : 0 bâti,
- à 10 ans : 4 bâtis (3 Ault, 1 Bois de Cise),
- à 30 ans : 8 bâtis (5 Ault, 3 Bois de Cise).

Par ailleurs, la route de Saint-Valery au niveau du secteur « rue de la Montagne », ainsi que la rue des Bessaints, secteur « Bel-Air », sont potentiellement impactées à court terme.

Scenario 2 : protection actuelle peu ou pas entretenue (abandon)

Il s'agit ici du cas se rapprochant le plus de l'état actuel.

Les protections existantes exerceraient encore un rôle de protection, au moins partiel à court et à moyen terme et se réduisant au fil du temps. Il convient donc de considérer des vitesses de recul croissantes en fonction du temps. Toutefois, étant donné l'absence de recul sur ce type de phénomène, il est impossible d'être précis quant à l'évolution des éléments de protection, et donc des vitesses de recul à moyen et long terme dans un tel contexte.

Pour les protections parallèles à la falaise (digue, enrochement, mur...), l'action érosive prendra probablement plusieurs dizaines d'années avant de les détruire et venir attaquer la falaise. Il se peut toutefois que des brèches se forment et permettent des érosions localisées de la falaise.

					Scénario 2 : abandon			
					Zonage 10 ans		Zonage 30 ans	
Secteur	Zone	Recul 1946-2000 (m/an)	Recul 2000-2014 (m/an)	Evènement majeur (Aléa fort à très court terme)	Estimation vitesse recul (m/an)	Zonage (en m)	Estimation vitesse recul (m/an)	Zonage (en m)
Ault Bourg	Ault nord	-	-	0 à 1	0,1	1 à 2	0,2	5 à 6
	Casquette nord	0,1	-	10 *1	0	10	0,1	12
	Rue de Paris	0,1	0,1	4 à 5	0,1	5 à 6	0,2	9 à 10
	Casquette sud	0,2	-	10* *1	0	10	0,2	14
	Rue de la Montagne	0,15	0,35	10	0,35	13,5	0,4	21,5
	Espanade du Casino	-	-	5 *2	0	0	0,1	8
	Bel Air	0,3	0,7	10	0,55	15,5	0,55	26,5
Entre Ault et Bois de	Premier val	0,25	0,5	10 à 20	0,5	15 à 25	0,5	25 à 35
	Deuxième val	0,25	0,55	10 à 20	0,55	15,5 à 25,5	0,55	26,5 à 36,5
Bois de Cise	Bois de Cise nord	0,4	0,6	10 à 15	0,6	16 à 21	0,5	26 à 31
	Bois de Cise épis	0,2 *3	0,2	3 à 10	0,4	7 à 14	0,4	15 à 22
	Bois de Cise sud	0,2	0,4	10 à 20	0,4	14 à 24	0,4	22 à 32
*1 : En cas de chute de la casquette. Ici , aléa à court terme (10 ans) en cas d'absence d'entretien								
*2 : En cas d'absence d'entretien et de rupture du mur de soutènement								
*3 : Recul moyen de la tête de falaise. Recul plus important constaté de la partie basse, auparavant fortement avancée par rapport à la tête de falaise								

Illustration 53 : Estimation des vitesses de recul et du zonage associé selon de scénario n°2

- **Ault nord**

Pour cette partie, on ne peut pas parler de falaise, puisque le coteau, assez éloigné du trait de côte et de plus en plus en direction du NE, admet une forme de versant réglé.

Comme indiqué précédemment, l'action érosive prendra probablement longtemps pour détruire les éléments de protection existants. A l'exception d'éventuels risques de submersion, non pris en compte dans cette étude, il n'y a pas de risque fort à court terme pour les enjeux identifiés sur cette zone.

- **Casquette**

Là encore, le temps de destruction de la digue par l'érosion côtière sera probablement important. Le pied de falaise restera donc protégé, au moins à court terme.

On observe toutefois des indices d'instabilités au niveau de la falaise. Il convient donc de considérer ici des instabilités de versant susceptibles d'impacter la falaise.

Il est donc possible à court terme, et a fortiori à moyen terme, de constater des instabilités significatives au niveau de la casquette, même si un diagnostic précis de sa stabilité serait nécessaire.

C'est pourquoi un zonage de 10 m, correspondant au recul en cas de chute de la casquette a été appliqué à court terme.

- **Esplanade du Casino**

Il s'agit de la protection la plus importante de la zone d'étude. Son démantèlement en cas d'abandon sera donc probablement très long. On ne considère donc pas dans ce cas de recul à court terme, et un recul très faible à moyen terme.

Comme évoqué précédemment, en l'absence de diagnostic du mur de protection et de l'état de la falaise qu'il protège, un périmètre de péril imminent de 5 m est appliqué, correspondant au potentiel recul en cas de chute du mur.

- **Bois de Cise**

Il faut considérer ici une poursuite du démantèlement des 4 épis présents au pied de la valleuse du Bois de Cise. On peut considérer, à la vue de l'observation des dynamiques actuelles, une augmentation des vitesses de recul dès le court terme.

Concernant le nord des épis, comme évoqué précédemment, leur destruction entrainerait un probable léger ralentissement des vitesses de recul sur le secteur « Bois de Cise nord » à moyen terme.

En comparant le zonage estimé et les enjeux (nombre de polygones de bâti de la BDtopo de l'IGN), les enjeux impactés sont :

- péril imminent : 0 bâti,
- à 10 ans : 8 bâtis (7 Ault, 1 Bois de Cise),
- à 30 ans : 20 bâtis (16 Ault, 4 Bois de Cise).

Par ailleurs, la route de Saint-Valery au niveau du secteur « rue de la Montagne » et « casquette sud », le Bd M. Couillet, secteur « casquette nord » ainsi que la rue des Bessaints, secteur « Bel-Air », sont potentiellement impactés à court terme.

Scenario 3 : aucune protection

On considère ici l'absence d'éléments de protection, ce qui nécessiterait leur destruction ou leur déconstruction. Une telle opération n'est pas actuellement programmée et prendrait beaucoup de temps. Aussi, il n'est pas pertinent d'identifier un recul à court terme pour ce scénario (les 3 secteurs estimés prennent en compte une éventuelle destruction des épis).

Deux zonages ont par contre été définis pour les zones à casquette en fonction d'un démantèlement étudié ou d'un abandon de la casquette.

Il est estimé pour ce scénario des vitesses de recul à moyen terme relativement homogènes et importantes (de l'ordre de 0,4 à 0,5 m/an) sur l'ensemble des zones considérées.

		Scénario 3 : aucune protection											
						Zonage 10 ans				Zonage 30 ans			
Secteur	Zone	Recul 1946-2000 (m/an)	Recul 2000-2014 (m/an)	Evènement majeur (Aléa fort à très court terme)	Estimation vitesse recul (m/an)	Zonage (en m)	Estimation vitesse recul (m/an)	Zonage 1 (en m)	Zonage 2 (en m)				
Ault Bourg	Ault nord	-	-	0 à 1	0	0 à 1	0,5	16	16				
	Casquette nord	0,1	-	10* ^{*1}	0	0	0,5	25	18				
	Rue de Paris	0,1	0,1	4 à 5	0,1	5 à 6	0,4	18	18				
	Casquette sud	0,2	-	10* ^{*1}	0	0	0,5	25	19				
	Rue de la Montagne	0,15	0,35	10	0,4	14	0,4	22	22				
	Espanade du Casino	-	-	5* ^{*2}	0	0	0,5	25	25				
	Bel Air	0,3	0,7	10	0,55	15,5	0,55	26,5	26,5				
Entre Ault et Bois de	Premier val	0,25	0,5	10 à 20	0,5	15 à 25	0,5	25 à 35	25 à 35				
	Deuxième val	0,25	0,55	10 à 20	0,55	15,5 à 25,5	0,55	26,5 à 36,5	26,5 à 36,5				
Bois de Cise	Bois de Cise nord	0,4	0,6	10 à 15	0,5	15 à 20	0,5	25 à 30	25 à 30				
	Bois de Cise épis	0,2 ^{*3}	0,2	3 à 10	0,6	9 à 16	0,5	19 à 26	19 à 26				
	Bois de Cise sud	0,2	0,4	10 à 20	0,4	14 à 24	0,4	22 à 32	22 à 32				
*1		: En cas de chute de la casquette. Ici, aléa à court terme (10 ans) en cas d'absence d'entretien											
*2		: En cas d'absence d'entretien et de rupture du mur de soutènement											
*3		: Recul moyen de la tête de falaise. Recul plus important constaté de la partie basse, auparavant fortement avancée par rapport à la tête de falaise											
		Scénario 3, estimation 30 ans : zonage 1 : casquette laissée à l'abandon : zonage 2 : casquette démontée au préalable											

Illustration 54 : Estimation des vitesses de recul et du zonage associé selon de scénario n°3

En comparant le zonage estimé et les enjeux (nombre de polygones de bâti de la BDtopo de l'IGN), les enjeux impactés sont :

- péril imminent : 0 bâti,
- à 30 ans : 31 bâtis (27 Ault, 4 Bois de Cise).

4.3. ESTIMATION DES VITESSES DE REcul A LONG TERME

Le guide de réalisation des PPR littoraux produit par la DGPR, implique la définition d'un zonage à horizon 100 ans (long terme).

Les connaissances actuelles, notamment en ce qui concerne l'impact du changement climatique ou l'évolution des dynamiques littorales, ne permettent pas d'être précis dans l'estimation d'un tel zonage.

Par ailleurs, il n'est pas possible de prévoir l'impact des actions humaines, qui, nous l'avons vu, peuvent jouer un rôle important dans la diminution ou l'accélération du recul du trait de côte.

Le zonage proposé est par conséquent basé sur le scénario impliquant un abandon des éléments de protection à long terme.

Aussi, les vitesses estimées à moyen terme pour ce scénario ont été extrapolées à horizon 100 ans, ce qui permet de définir une estimation de zonage.

					Scénario 2 : abandon					
					Zonage 10 ans		Zonage 30 ans		Zonage 100 ans	
Secteur	Zone	Recul 1946-2000 (m/an)	Recul 2000-2014 (m/an)	Evènement majeur (Aléa fort à très court terme)	Estimation vitesse recul (m/an)	Zonage (en m)	Estimation vitesse recul (m/an)	Zonage (en m)	Estimation vitesse recul (m/an)	Zonage (en m)
Ault Bourg	Ault nord	-	-	0 à 1	0,1	1 à 2	0,2	5 à 6	0,5	40
	Casquette nord	0,1	-	10 *1	0	10	0,1	12	0,5	47
	Rue de Paris	0,1	0,1	4 à 5	0,1	5 à 6	0,2	9 à 10	0,4	38
	Casquette sud	0,2	-	10* *1	0	10	0,2	14	0,5	49
	Rue de la Montagne	0,15	0,35	10	0,35	13,5	0,4	21,5	0,4	49,5
	Espanade du Casino	-	-	5 *2	0	0	0,1	8	0,5	43
	Bel Air	0,3	0,7	10	0,55	15,5	0,55	26,5	0,55	65
Entre Ault et Bois de	Premier val	0,25	0,5	10 à 20	0,5	15 à 25	0,5	25 à 35	0,5	60 à 70
	Deuxième val	0,25	0,55	10 à 20	0,55	15,5 à 25,5	0,55	26,5 à 36,5	0,55	65 à 75
Bois de Cise	Bois de Cise nord	0,4	0,6	10 à 15	0,6	16 à 21	0,5	26 à 31	0,5	61 à 66
	Bois de Cise épis	0,2 *3	0,2	3 à 10	0,4	7 à 14	0,4	15 à 22	0,5	50 à 57
	Bois de Cise sud	0,2	0,4	10 à 20	0,4	14 à 24	0,4	22 à 32	0,4	50 à 60
*1 : En cas de chute de la casquette. Ici , aléa à court terme (10 ans) en cas d'absence d'entretien										
*2 : En cas d'absence d'entretien et de rupture du mur de soutènement										
*3 : Recul moyen de la tête de falaise. Recul plus important constaté de la partie basse, auparavant fortement avancée par rapport à la tête de falaise										

Illustration 55 : Estimation des vitesses de recul et du zonage associé à horizon 100 ans, en partant d'une hypothèse d'abandon des éléments de protection

4.4. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

Les zonages identifiés font l'objet d'un SIG complet, décliné sous forme de cartes en format papier ou image numérique (Annexes hors texte).

Les visualisations graphiques ont été reportées sur le fond orthophoto de 2011, qui couvre l'ensemble du territoire de l'étude et admet une précision de l'ordre du mètre.

Sur chacune des cartes produites, on retrouve ;

- Le trait de côte observé à fin 2013,
- Le zonage de péril imminent sous forme de polygone hachuré en rouge,
- Le zonage à court terme (fonction des différents scénarii), sous forme de polygone hachuré en orange,
- Le zonage à moyen terme (fonction des différents scénarii), sous forme de polygone hachuré en jaune.

L'estimation de la zone potentiellement impactée par le recul du trait de côte à horizon 100 ans et présentée par une polygone verte.

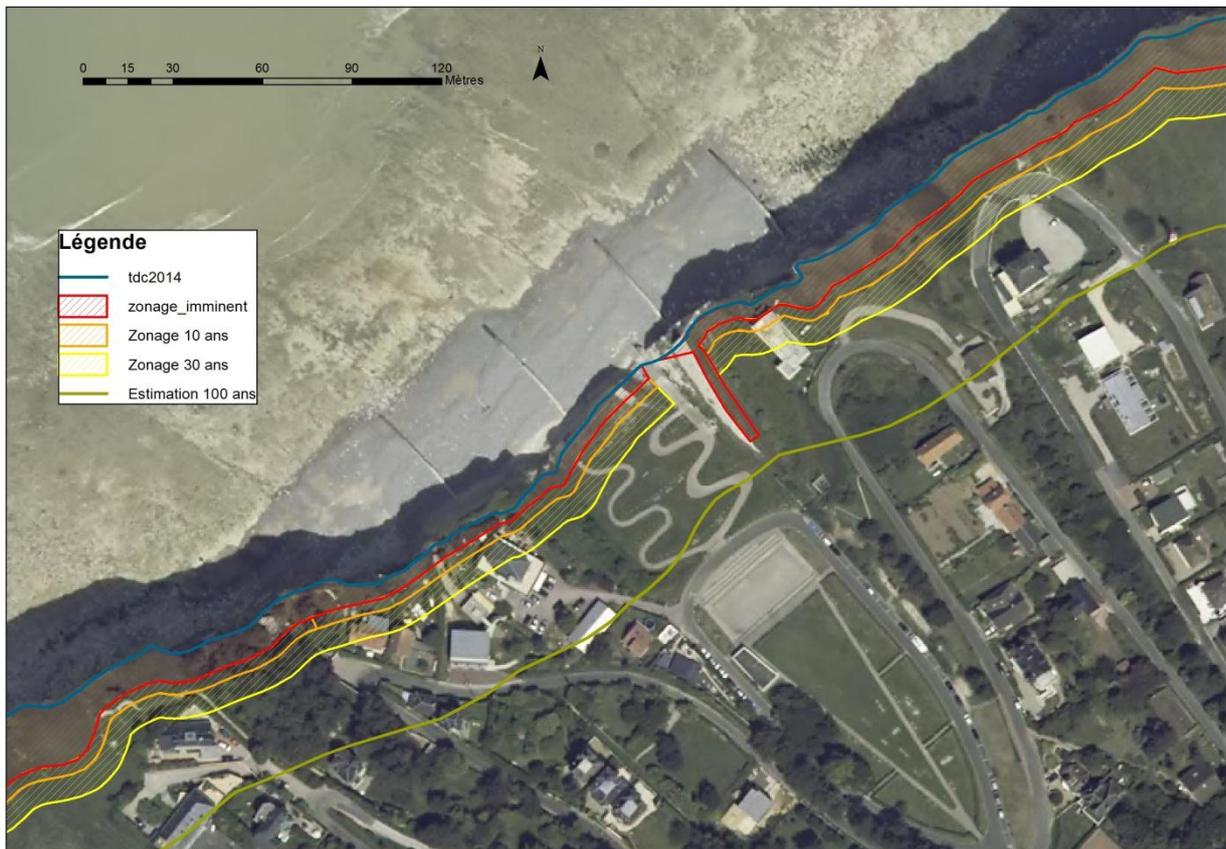


Illustration 56 : Exemple de présentation graphique de l'aléa recul du trait de côte (ici recul fonction des dynamiques actuelles)

5. Conclusions

Le littoral Aultois est fortement urbanisé. Marqué depuis plusieurs siècles par le phénomène d'érosion des falaises, les habitants locaux ont toujours été sensibilisés au recul de celles-ci. Aussi, depuis le XVIII^e siècle, des aménagements visant à réduire l'érosion ont été construits. Ils ont été détruits et reconstruits à plusieurs reprises.

Après la seconde guerre mondiale, puis dans les années 80, des ouvrages de protection très lourds ont été construits. Les dynamiques d'érosion parviennent toutefois toujours à impacter la falaise et provoquer un recul. Les ouvrages apparaissent d'ailleurs aujourd'hui comme fortement dégradés.

Devant ces dynamiques d'érosion très marquées, les services de l'Etat ont souhaité se doter d'un outil d'aide à la décision concernant la gestion du territoire à long terme. Aussi, un premier PPR « falaises » a été approuvé en 2001. L'estimation du recul du trait de côte, respectant les doctrines et en phase avec les connaissances de l'époque s'est rapidement avérée sous-évaluée par endroits, avec un trait de côte estimé à horizon 2100 parfois atteint ou dépassé dès 2010.

En conséquence, les services de l'Etat ont demandé au BRGM en 2012 une révision de l'aléa de recul du trait de côte, objet de cette présente étude.

Pour ce faire, le BRGM s'est appuyé sur les nombreuses données existantes, et a pu acquérir pour l'occasion des données de haute précision, facilitant l'étude des dynamiques responsables de l'érosion.

Les facteurs intervenant dans la mise en place des chutes de blocs et d'éboulement de falaise ont été analysés. Les dynamiques passées et actuelles de recul ont été définies ; les caractéristiques intrinsèques à la falaise (lithologie, fracturation...) ont été détaillées ; les dynamiques littorales et sédimentaires et leur évolution ont été analysées.

De plus, les impacts anthropiques passés ou récents ont été pris en compte. Il est notamment apparu que les éléments de protection (perré, épis,...), s'ils jouent un rôle de défense contre l'érosion, au moins à court terme, peuvent aussi avoir des impacts négatifs (interruption du régime de transit des galets,...) et nécessitent un entretien lourd et régulier. L'éventuelle mise en place de nouveaux aménagements littoraux nécessite une étude d'impact sur les conséquences des ouvrages à implanter à long terme sur l'objet à protéger mais aussi sur les éventuelles modifications des dynamiques d'érosion de la falaise de part et d'autre de ceux-ci.

La prise en compte des différents facteurs, et surtout des dynamiques d'érosion par tronçon du littoral permet d'estimer avec précision les vitesses de recul du trait de falaise, au moins sur les 30 prochaines années, et par extrapolation à horizon de 100 ans. Les tracés résultant du travail sous système d'information géographique (SIG) ont été reportés sur le fond orthophotographique de 2011 produit par l'IGN.

Au final, il a aussi pu être proposé un zonage de péril imminent en haut de falaise, à l'intérieur duquel il est recommandé de proscrire toute activité humaine. Les résultats indiquent que si aucun bâtiment ne se trouve actuellement en situation de péril grave et imminent, c'est tout de même le cas de quelques enjeux (parkings ou jardins par exemple).

Selon les scénarii d'aménagements identifiés, plusieurs bâtiments seront en situation à risque dès l'horizon de 10 ans (4 à 8 bâtiments) et encore plus à horizon de 30 ans (8 à 31 bâtiments).

Toutefois, il faut garder en mémoire que si cette étude prend en compte de nombreux facteurs, ce qui lui confère une certaine précision, les dynamiques de recul dépendent fortement de certains évènements, notamment climatiques ou anthropiques. A titre d'exemple, des successions de tempêtes et fortes houles comme celles de l'hiver 2013-2014 peuvent fortement endommager le pied de falaise, accélérant le recul de la falaise. A contrario, des périodes plus calmes comme la période 2010-2013 peuvent amener à réduire les vitesses d'érosion.

Par la suite, une actualisation périodique de cette cartographie des zonages d'aléas est nécessaire afin qu'elle reste un outil d'aide à la décision pour les autorités publiques. Il est recommandé qu'un suivi régulier et homogène de l'évolution du recul de la falaise soit mise en place selon la méthodologie décrite dans cette étude.

6. Bibliographie

- Andrews C., Williams R.B.G. (2000) – Limpet erosion of chalk shore platforms in southeast England. In *Earth Surface Processes and Landforms* n°25, pp. 1371-1381.
- Augry C., Clabaut P., Bourillet J-F., Dreves L. (1993) – Carte morpho-sédimentaire du domaine côtier entre Dieppe et Le Tréport (Seine-Maritime). Notice explicative, EDF-IFREMER-ESTRAN, 48 p.
- Augry C. (coord.), Clabaut P., Costa S., Gourmelon F., Latteux B. (2004) – Evolution morpho-sédimentaire du domaine littoral marin de la Seine-Maritime. IFREMER, Conseil général de la Seine-Maritime, EDF. Ed. Ifremer. Bilans et Perspectives, 159 p.
- Broquet P., Beun N., Dupuis C. et al. (1984) – Carte géologique de la France au 1/50 000, feuille n°32 (Saint-Valéry-sur-Somme-Eu). Ed. BRGM.
- Costa S. (2007) – L'érosion côtière : l'exemple du littoral Haut-Normand. Association pour la sauvegarde du patrimoine Veulais.
- Costa S. (2000) – Réactualisation des connaissances concernant la dynamique du littoral Haut-Normand et Picard (entre le cap d'Antifer et la baie d'Authie). CPIBP-Article 7. Université de Caen.
- Costa S. (1999) – Sédimentologie des plages de galets des côtes françaises de la Manche : application à la défense contre la mer. *Revue de géographie de Lyon*. Vol. 74 n°1, pp 35-43.
- Costa S. (1997) – Dynamique littorale et risques naturels : l'impact des aménagements, des variations du niveau marin et des modifications climatiques entre la baie de Seine et la baie de Somme. Thèse de doctorat. Université de Paris I. 376 p.
- Costa S., Delahaye D. (2002) – Pérennité des plages de galets de l'espace Rives-Manche (beach Erosion of the Rives manche). Rapport final. Préfecture de Haute-Normandie. Programme Européen Interreg II.
- Costa S., Freire-Diaz S., Di-Nocerra L. (2001) – Le littoral Haut-Normand et Picard : une gestion concertée. *Annales de géographie*, n°618, pp 117-135.
- Costa S., Gourmelon F., Augry C., Clabaut P., Latteux B. (2005) – Apport de l'approche systémique et pluridisciplinaire dans l'étude du domaine littoral marin de la Seine-Maritime. *Noréis*, n°196, 2005/3, pp 91-108.
- CREOCEAN (2001) – PPR « érosion littorale » de la commune d'Ault. Dossier 99077. 60 p.
- Dallery F. (1955) – Les rivages de la Somme, autrefois, aujourd'hui et demain. Mémoire de la société d'émulation historique et littéraire d'Abbeville. Ed. A&J Picard et Cie. Paris. 307 p.
- Dewez T., Rohmer J., Regard V., Cnudde C. (2013) – Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser survey : case study from Mesnil-Val (Normandy, northern France). *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°65.

Dolique F. (1991) – L'évolution du littoral entre Dieppe et Le Hourdel (1939-1989). Amiens : Université de Picardie Jules Vernes. Mémoire de maîtrise. 143 p.

Duperret A., Mortimore R. N., Pomerol B., Genter A., Martinez A. (2002) – L'instabilité des falaises de la Manche en Haute-Normandie. Analyse couplée de la lithostratigraphie, de la fracturation et des effondrements. Bulletin d'information des géologues du Bassin de Paris n°39, pp 5-26.

Duperret A., Taibi S., Mortimore R.N., Daineault M. (2005) – Effect of groundwater and sea weathering cycles on the strength of chalk rock from unstable coastal cliffs of NW France : Engineering Geology, v.78, n°3-4, p. 321.

Flahaut R. , Detourbe S. (2014) – Criel-sur-mer. Evaluation de l'aléa éboulement et du recul de la falaise. Rapport CEREMA. Affaire n°14138.

Hascoet M. (1988) – Evolution du littoral Picard. Photo-géomorphologie. In Colloques Mer et Littoral : couple à risque, Biarritz, septembre 1987, délégation aux risques majeurs, pp 465-477.

Henaff A., Costa S., Lageat Y., Plessis E. (2000) – Le recul des falaises crayeuses de Haute-Normandie : détermination des processus d'érosion et quantification des rythmes d'évolution. In colloque Géomorphologie et risques naturels, 19-21 octobre 2000.

Larsonneur C., Vaslet D., Auffret J-P. (1978) – Les sédiments superficiels de la Manche. Carte au 1/500 000, CNEXO-BRGM.

Lasseur E. (2007) – La craie du Bassin de Paris (Cénomaniens-Campaniens, Crétacé supérieur). Sédimentologie de faciès, stratigraphie séquentielle et géométrie 3D. Thèse de doctorat de l'Université de Rennes 1.

Latteux B. (2001) – Synthèse sur les problématiques et enjeux d'évolution du littoral Haut-Normand et Picard. Chapitre 1 : milieu physique. 101 p.

LCHF-BRGM (1987) – Etude du littoral Haut-Normand entre Le Havre et Le Tréport. Rapport général. 98 p.

Martinez A., Duperret A., Genter A. (2001) – Projet ROCC – Etude de la fracturation des falaises cotières crayeuses de Haute-Normandie, de Picardie (France) et de l'est Sussex (Grande-Bretagne).

Morel V. (1997) – De la géomorphologie à la gestion des accumulations de galets littoraux du bassin de la Manche et de ses abords ; études de cas (Bretagne, Haute-Normandie, Picardie, Sud Angleterre) et réflexions générales. Thèse de géographie de l'Université de Brest. 286 p.

Mortimore R. N. (1986) – Stratigraphy of the Upper Cretaceous white chalk of Sussex. Proceedings of the geologists association n°97, pp 97-139.

Mortimore R. N. & Duperret A. (2004) – Coastal Chalk Cliff Instability. Geological Society, London. Engineering Geology Special Publications n°20.

Pannet P., Colin S. (2009) – Révision du schéma des carrières, cartographie de la ressource disponible, département de la Somme. Rapport final. BRGM/RP-57879-FR.

Pannet P., Vincent C. (2012) – Avis du BRGM sur la stabilité de la falaise au Bois de Cise. Commune d'Ault (80). BRGM/RP-61228-FR.

Quinif Y., Vandycke S., Vergari A. (1997) – Chronologie et causalité entre tectonique et karstification – l'exemple des paléokarsts créacés du Hainaut (Belgique). BSGF, 168, 4, 463-472.

Regard V., Dewez T., Cnudde C., Hourizadeh N. (2013) – Coastal chalk platform erosion modulated by step erosion and debris shielding : exemple from Normandy and Picardy (northern France) In : Conley D.C., Masselink G., Russel P.E., O'Hare T.J. (eds.), Proceedings 12th international coastal system (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special issue n°65 ; pp. 1692-1697, ISSN 0749-0208.

SOGREAH (1999) – Situation littorale d'Ault-Onival ; étude de la restauration des plages du littoral. Rapport général. 76 p.

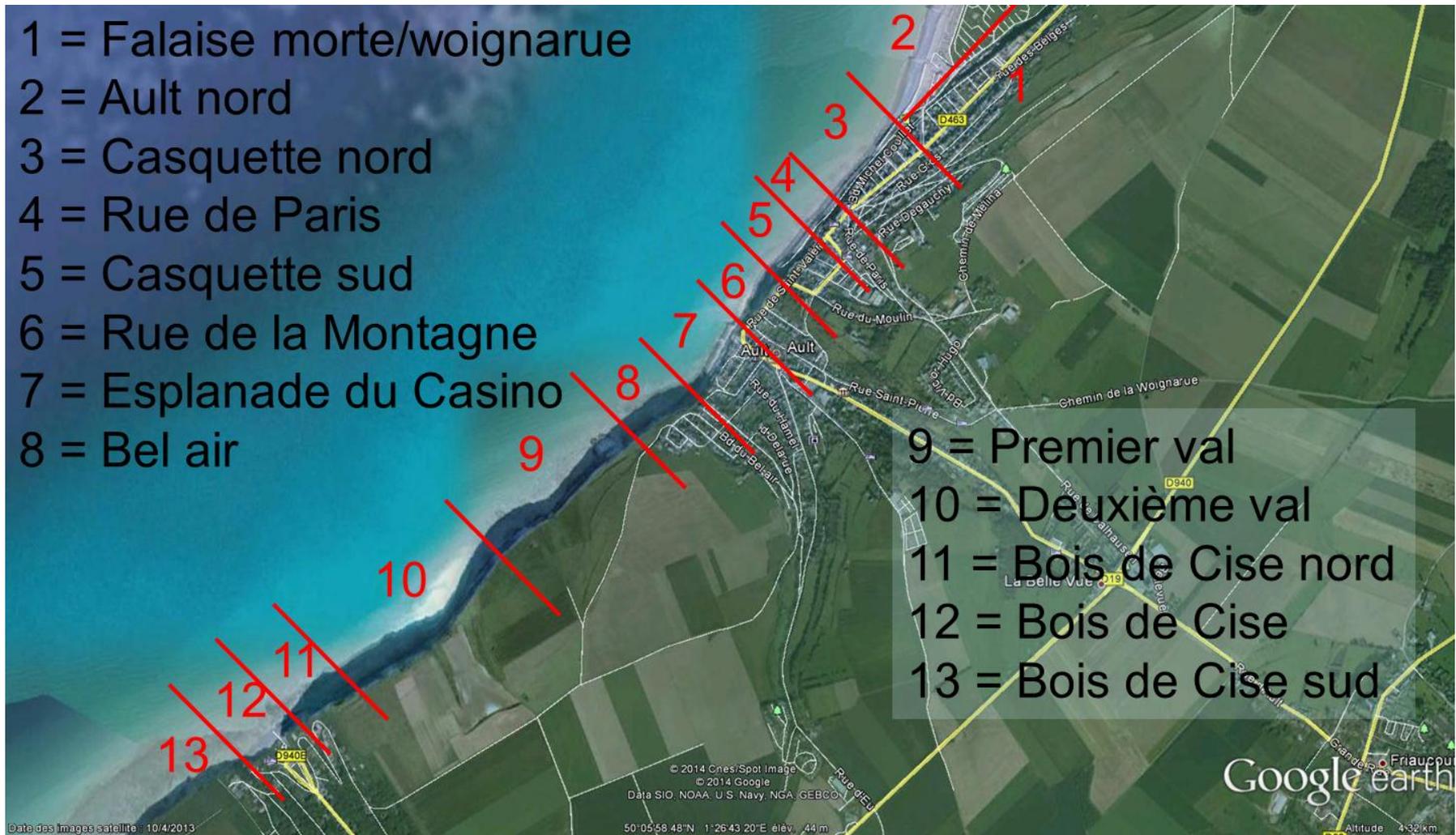
Touré B. (2012) – Dynamique du trait de côte : Actualisation des vitesses d'évolution du trait de côte et première réflexions sur les rythmes d'évolution. Cas du littoral Normand-Picard. Rapport de stage. ROLNP.

Vandycke S. (1992) - Tectonique cassante et paléo-contraintes dans les formations créacées du Nord-Ouest européen. Implications géodynamiques. Mem. Sc. Terre 92-02. UPMC, Paris, 179p., 97 fig., 12 tab., 30 pl. photo.

Watremez P., Baltassat J.M., Caudron M., Equilbey E., Genter A., Gentier S., Laville P., Lebert F., Brossard J., Duperret A., Taïbi S., Mortimore R.N., Popo D.J., Stewart J. (2001) – Projet ROCC. Rapport de synthèse. BRGM/RP-51381-FR.

Annexe 1

Carte des différents secteurs d'étude



Aléa éboulement de falaise et recul du trait de côte à Ault (80)

Annexe 2

Caractéristiques des craies rencontrées sur la zone d'étude

a) Lewes Nodular Chalk

Constitue la partie inférieure de la falaise à Ault. En laboratoire, la matrice crayeuse présente un comportement fragile. Les caractéristiques physiques et mécaniques sont (tests issus d'échantillonnages réalisés au Bois de Cise - ROCC, 2001 ; Ferhah, 2002 ; Senfaute et al., 2005) :

- Porosité >40% ;
- Masse volumique sèche de l'ordre de $1,5 \text{ t/m}^3$;
- Résistance à la compression simple (teneur en eau nulle) < 4MPa (très faible) ;
- Résistance à la compression simple (à saturation) = 2 MPa ;
- Modules tangents de déformation élastiques (teneur en eau nulle) <1000 MPa ;
- Résistance au cisaillement (teneur en eau nulle) : $C_{uu} = 1030 \text{ kPa}$; $\rho_{uu} = 33^\circ$;

b) Seaford Chalk

La base de la Seaford Chalk constitue la partie supérieure de la falaise à Ault. Elle présente des caractéristiques mécaniques inférieures à la craie de Lewes :

- Porosité de l'ordre de 45% (à Mesnil-Val) ;
- Masse volumique sèche de l'ordre de $1,4 \text{ t/m}^3$;
- Résistance à la compression simple (teneur en eau nulle) < 3,5 MPa (très faible) ;
- Résistance à la compression simple (à saturation) = 1,8 MPa ;
- Modules tangents de déformation élastiques (teneur en eau nulle) <1000 MPa ;
- Résistance au cisaillement (teneur en eau nulle) : $C_{uu} = 950 \text{ kPa}$; $\rho_{uu} = 30^\circ$

Caractéristiques mécaniques faibles qui décroissent avec l'augmentation de la teneur en eau, ainsi qu'avec l'altération du matériau.

Annexe 3

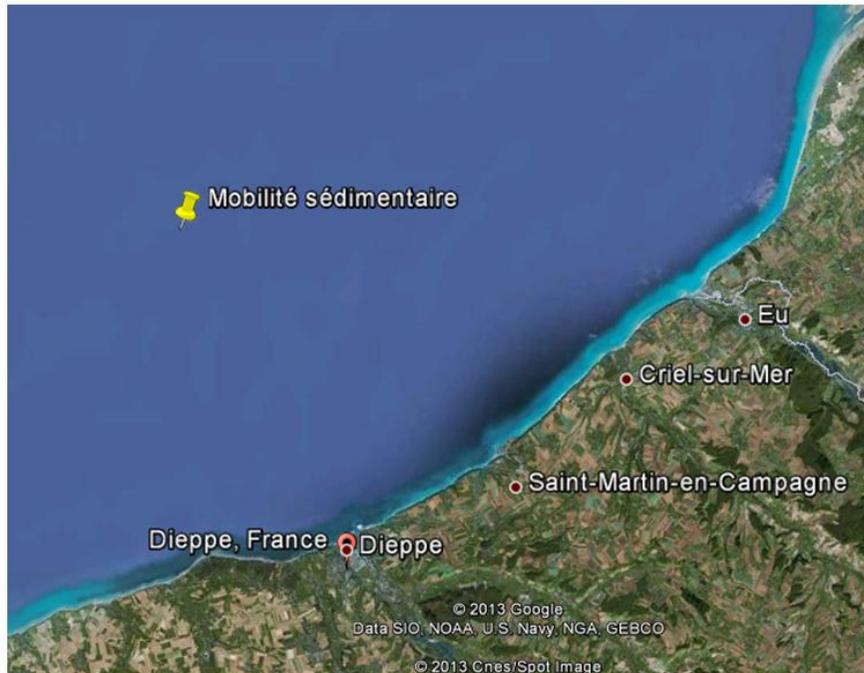
Modélisation de la potentialité de mobilisation des réserves sédimentaires sous-marines profondes



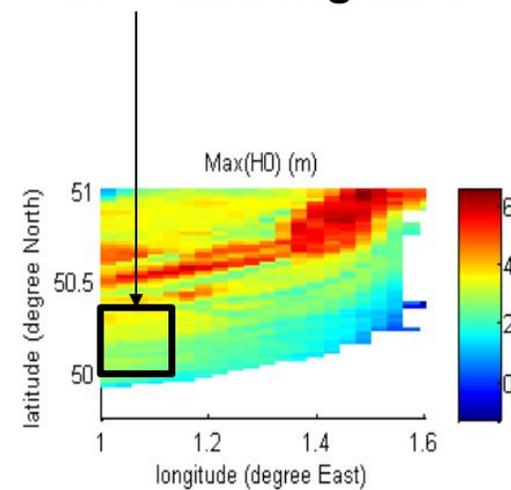
Question posée

> Mobilité sédimentaire

- Est-ce que l'évènement Johanna (10 mars 2008) a pu mettre en mouvement des sédiments de 5 à 20 cm de diamètre, au large de Dieppe, par 20 m de fond ?



Est-ce que galets de 5 cm bougent ?



> 2

Méthode (1/2)

- > Basée sur la courbe Shields (contrainte adimensionnée=f(taille de grain adimensionnée))

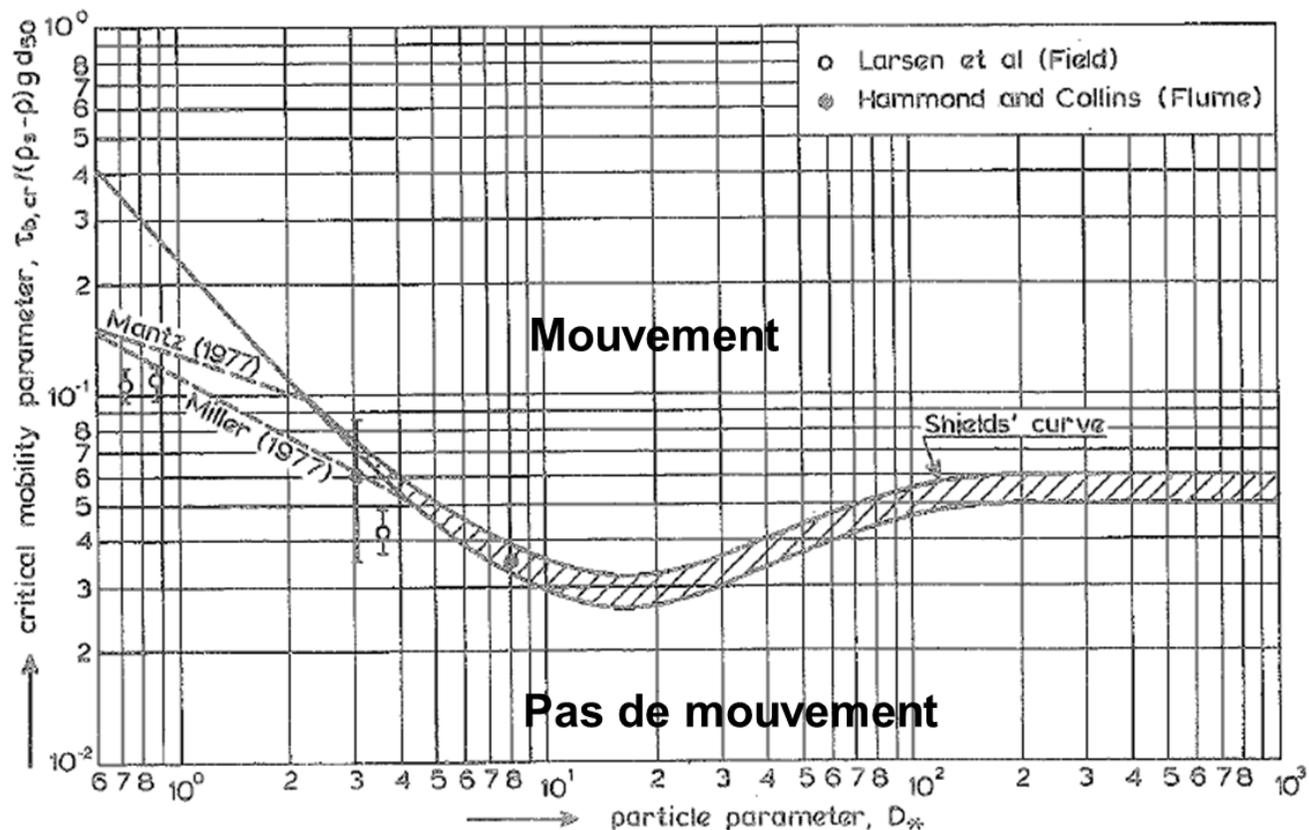


Figure 4.3.2 Initiation of motion for combined currents and waves over a plane bed, $\theta = f(D_*)$

Source : van Rijn (1989)

> 3

Méthode (2/2)

- > Calcul de la contrainte critique de mise en mouvement sous l'action des vagues et des courants
- > **En première approche**, on se place dans les conditions les plus favorables à la mise en mouvements, en se concentrant sur la capacité de mis en mouvement par les courants et hauteurs de vagues maximaux
- > Méthode :
 - Extraction de maximas de courants et hauteur de vagues à partir de données spatio-temporelles de vagues et courants pendant Johanna (période analysée : 09/03/2008-11/03/2008)
 - Calcul de la contrainte induite sur le fond (T), du nombre de Shields (T adimensionné) et comparaison avec le nombre de Shields critique pour la taille de grain étudiée
 - Intégration spatiale

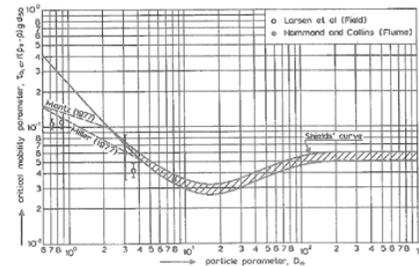
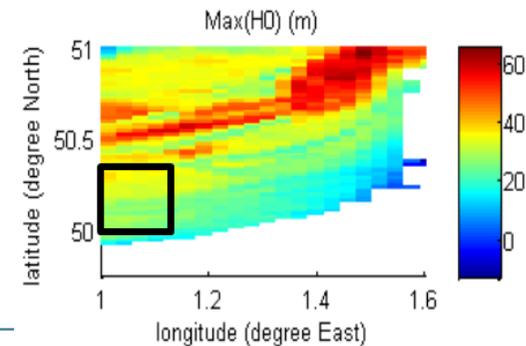


Figure 4.3.2 Initiation of motion for combined currents and waves over a plane bed, $\theta = f(D_s)$



> 4

Données hydrodynamiques pendant Johanna

> Courants et hauteurs d'eau

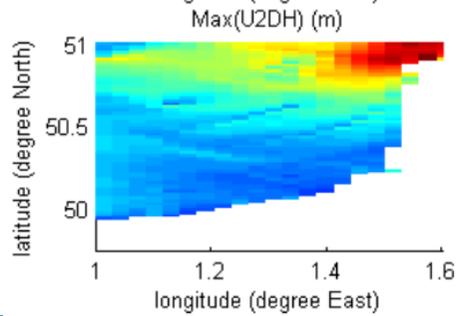
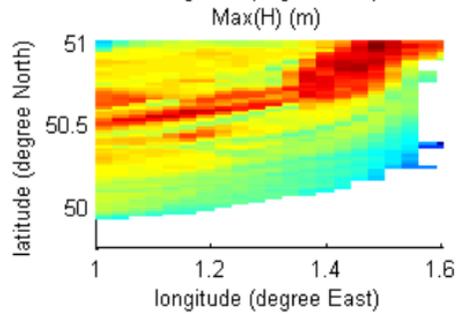
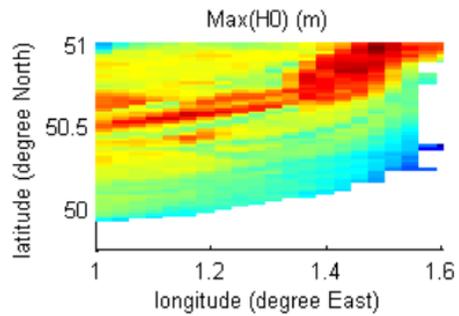
- Source : BRGM
- Données horaires
- Résolution spatiale : 2 km
- Type : modélisation hydrodynamique 2DH
- Configuration MARS développée par le BRGM pour le système previmer (projet PREVIMER-Surcotes). Rapports BRGM.
- Variables utilisées : U2DH (courant intégré sur la verticale), H (hauteur d'eau totale incluant variations de niveau d'eau), H0 (bathymétrie / niveau moyen)

> Vagues

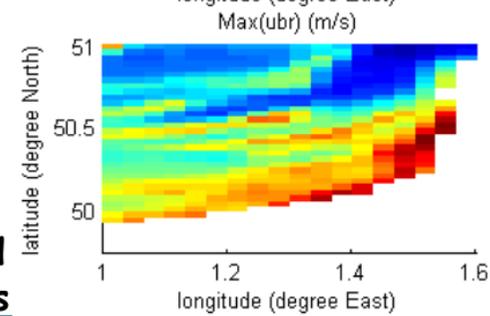
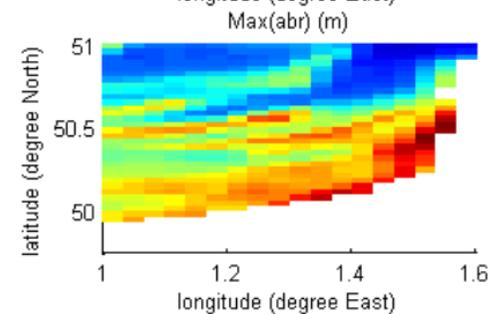
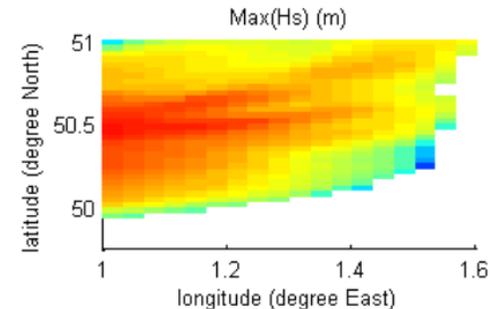
- Source : projet iowaga
(<ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/wavewatch3/pub/HINDCAST/NOR GAS>)
- Données tri-horaires
- Résolution spatiale : 0.033°
- Type : modélisation spectrale
- Modèle WW3 (Rascle and Arduin, 2013)
- Variables utilisées : Hs (hauteur significative des vagues), Abr (excursion tidale rms), Ubr (vitesse orbitale rms)

Résultats : maximaux hydrodynamiques

Courants et hauteurs d'eau



Vagues



↙ ↘
Contrainte au fond
Nombre de Shields

Résultats : mobilité sédimentaire

> Dg=5 cm

- Shields max sur zone < Shields critique (0.055)

> Dg=20 cm

- Shields max sur zone < Shields critique (0.055)

> Très peu probable que l'évènement Johanna ait pu mettre en mouvement grains de 5 cm de diamètre ou plus

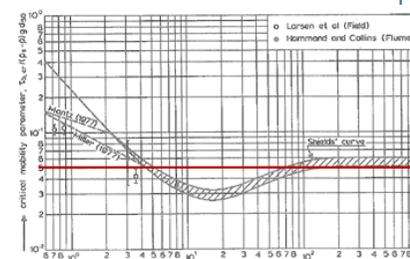
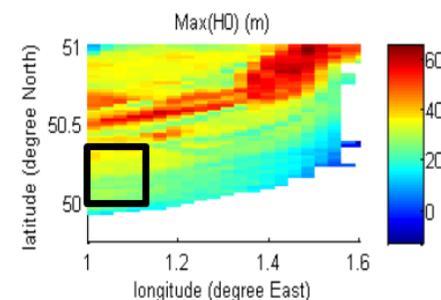


Figure 4.3.2 Initiation of motion for combined currents and waves over a plane bed, $\theta = f(\theta_c)$

Annexe 4

Synthèse des campagnes de construction d'ouvrages de lutte contre l'érosion

Période	Année	Aménagements
XVIII ^e s	-	Apparition des premiers épis
	1767	Construction de trois épis (2 à Ault , 1 à Cayeux)
XIX ^e s	-	Poursuite des constructions et consolidations d'épis sur le littoral
	1898	au Bois de Cise : Falaise creusée artificiellement pour la descente à la mer (mise en place d'escaliers et de rampes)
	fin du XIX ^e s	Construction du brise-lames du Casino d'Ault (d'abord en chêne puis en béton)
XX ^e s	1924	Construction à Ault, d'épis pleins en bois.
	Années 30 ?	Construction d'un perré protégeant les vestiges du pied de falaise au niveau de la vailleuse du Bois de Cise
	1934	Au bois de Cise: construction de trois épis en charpente
	1937	Ault : Construction de six nouveaux épis
	1938	Ault : Construction de trois nouveaux épis
	1939	Ault : un épi en construction qui restera inachevé suite à la déclaration de guerre
	Pendant la 2 ^{nde} guerre mondiale	Détérioration des aménagements déjà construits jusque-là.
	1947	Reconstruction de plusieurs épis abîmés
	années 50	figure 13 du PPR d'Ault , F. DALLERY 1955
	1952	Au Bois De Cise : remplacement des épis détruits par quatre épis en maçonnerie
	1969	Réalisation d'épis en palplanches d'Ault à Onival
	1974	Secteur d'Onival Sud : construction d'épis Bois sur socle en béton
	1977	Devant l'esplanade du Casino d'Ault: mise en place de béton et enrochements
	1981-1983	Réalisation de la digue sur 500m de la plage d'Onival à la plage d'Ault <i>Concernant la digue : Le choix a été porté sur les enrochements, procédé acceptant plus facilement les déformations du fait des tempêtes et plus aisément réparable. Les enrochements sont disposés sur 3 files reposant sur du remblai crayeux de 8m de haut. La première file est constituée de blocs de 15 à 80kg, la deuxième de blocs de 300 à 800kg et la troisième de blocs de 5 à 8t.</i>
	1985-1986	Réalisation du "balcon sur la mer" (aussi appelée "casquette") sur 500m <i>Concernant la casquette : l'objectif était de recréer un cheminement piétonnier et réhabiliter la rue ST Valéry et le boulevard de la Mer. La casquette est supportée par des poutres de béton perpendiculaires à la ligne de crête, en partie suspendues dans le vide supportées par des piliers ancrés dans une couche de craie solide.</i>
XX ^e s	Années 2000	Mise en place de plusieurs enrochements pour protéger le pied des aménagements à Ault 2009 : Mise en place d'un enrochement au NE de l'esplanade du casino suite à un éboulement majeur ayant impacté la falaise

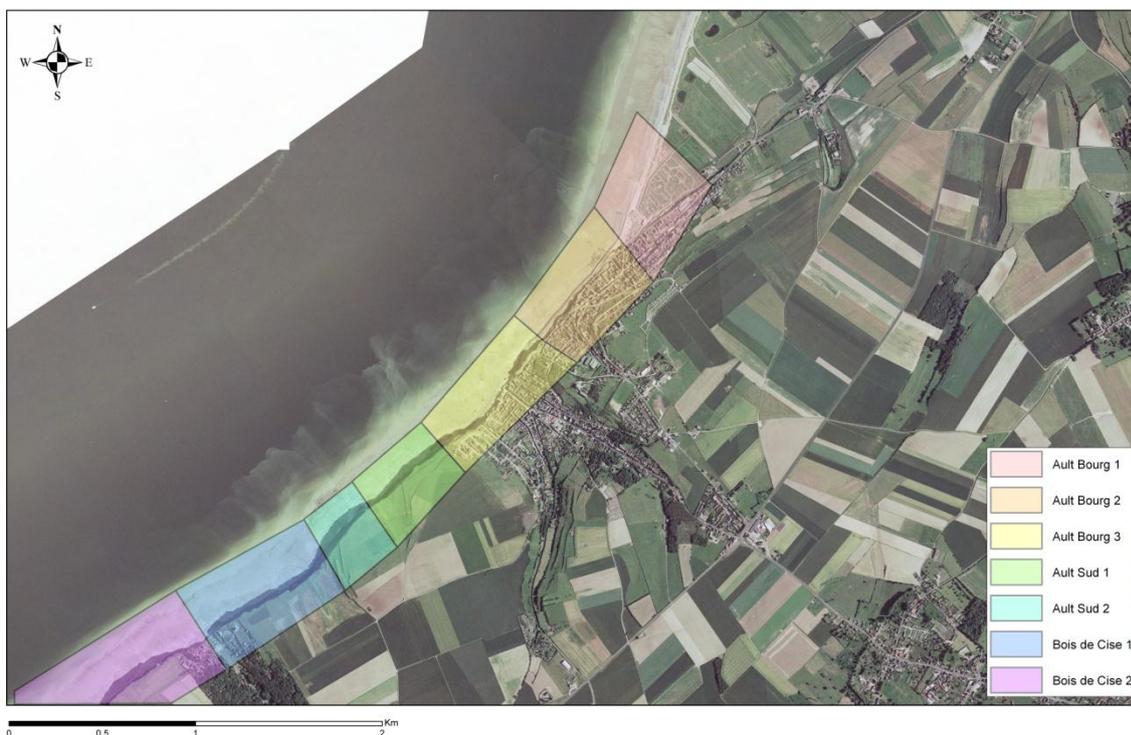
Aléa éboulement de falaise et recul du trait de côte à Ault (80)

Annexe 5

Synthèse des observations de terrain réalisées sur les ouvrages de protection

En lien avec le SIG des ouvrages de protection, en annexe hors texte

Carte de délimitation d'Ault et du Bois de Cise, par secteurs



Cinq secteurs sont concernés par la présence d'ouvrages de protection. Il s'agit d'Ault Bourg 1, 2, et 3, et du Bois de Cise 1 et 2.

Secteur BdC2	Nom de l'ouvrage	Type	Etat
Bois de Cise 2	BdC2-1	épi maritime maçonné	Béton très érodé Une partie détruite au bout de l'épi.
	BdC2-2	épi maritime maçonné	Béton très érodé. Une partie de l'épi est complètement détruite (environ ¼ de sa surface), l'eau peut donc circuler librement à travers Epi qui ne remplit plus entièrement sa fonction.

Secteur BdC1	Nom de l'ouvrage	Type	Etat
Bois de Cise 1	BdC 1-1	épi maritime maçonnerie	Béton complètement érodé. Epi qui se disloque.
	BdC 1-2	épi maritime maçonnerie	Béton qui s'érode mais épi qui semble en bon état.

Secteur AB3	Nom de l'ouvrage	Type	Etat
Ault bourg 3	AB3-1	Epi béton et palplanches	Epi fortement dégradé Une partie de l'épi en rochers bétonnés est démolie.
	AB3-2	Epi béton, plate-forme en béton, gros rochers et blocs béton	Protection en enrochement vétuste Epi et maçonnerie dégradés.
	AB3-3	épi en palplanches et semelle béton	Vestiges, épi presque entièrement démolie. A proximité : vestiges d'un épi en bois, reste quelques pieux.
	AB3-4	mur béton et pierres lisses	Mur en bon état apparent mais présence de quelques fissures par endroit.
	AB3-5	plate-forme béton, mur parabolique en béton, enrochements	Mur parabolique en béton très dégradé. Protection en enrochements vétustes. Présence d'anciennes marches en béton ainsi que d'une ancienne pataugeoire et d'un ancien bassin, équipements à l'abandon/vétustes.

Secteur AB2	Nom de l'ouvrage	Type	Etat
Ault Bourg 2	AB2-1	épi	<i>N'existe plus !</i>
	AB2-2	épi fer et béton, semelle en béton et palplanches	En ruine, reste une petite partie en fer.
	AB2-3	épi	<i>N'existe plus !</i>
	AB2-4	épi fer et béton	Ruine totale, reste quelques éléments en bois et palplanche.
	AB2-5	épi fer et béton	Ruine totale. Reste quelques vestiges en béton Reste quelques vestiges de supports en bois d'un ancien épi.
	AB2-6	épi fer et béton	Epi fortement endommagé, reste quelques morceaux.
	AB2-7	épi en fer et béton	Epi en totale ruine.
	AB2-8	enrochement naturel, gros rochers	Nombreux désordres (principalement des effondrements) sur la partie supérieure de l'ouvrage, qui occupent parfois toute la largeur de la promenade.
	AB2-9	enrochements (renforcement « provisoire » suite à l'effondrement de la promenade. Auparavant, palplanches recouvertes de galets, et béton)	Promenade interrompue suite à un effondrement. Renforcement en enrochement sensé être provisoire... Présence de palplanches rouillées.
	AB2-9bis	mur en béton et pierres lisses	Maçonnerie dégradée (mur qui s'érode, fissures dans le mur, béton qui part par morceaux). Fondations apparentes Présence de palplanches rouillées. Escaliers et perré maçonnés totalement effondrés.
AB2-10	enrochement (gros rochers)		

Secteur AB1	Nom de l'ouvrage	Type	Etat
Ault Bourg 1	AB1-1	mur en béton et pierres lisses, une partie en parabole	Quelques fissures par endroit (principalement sous les évacuations d'eau). Déchaussement de certaines pierres. Certaines évacuations d'eau sont bouchées par des galets ou autres corps étrangers. Bon état apparent mais entretien à prévoir.
	AB1-2	mur en béton et pierres lisses, mur en parabole	Quelques fissures par endroit. Déchaussement de certaines pierres. Certaines évacuations d'eau sont bouchées par des galets ou autres corps étrangers. Bon état apparent mais entretien à prévoir.

Secteur AB2 & AB3	Nom de l'ouvrage	Type	Etat
	Casquette	dalle en béton ancrée sur la tête de falaise	Fissures sous la dalle de béton par endroit. Fissures sur la dalle de béton, au niveau du trottoir et de la route. Sous-cavage de la falaise sous la dalle de béton par endroit.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Direction régionale Picardie
7, rue Anne Frank
80136 – Rivery – France
Tél. : 03 22 91 42 47