



Document public

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Rapport final

BRGM/RP-73933-FR

Version 2 du 18 mars 2025

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

Collectif

Vérificateur : Nom : Colas Bastien Fonction : Ingénieur Géotechnicien Date : 12/03/2025	Approbateur : Nom : Pannet Pierre Fonction : Directeur Adjoint des Actions Territoriales Date : 18/03/2025
Signature : 	
Signature : 	

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

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la règlementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : Littoral, recul, trait de côte, falaise, mouvement de terrain, érosion, loi climat et résilience, Bouches-du-Rhône

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

Collectif 2025. Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône. Rapport final V2. BRGM/RP-73933-FR, 121 p., 105 Fig., 9 An., 15 Tab.

© BRGM, 2025, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-09/03/2023

Synthèse

A la demande de la Direction Départementale des Territoires de la Mer des Bouches-du-Rhône (DDTM 13), le BRGM a réalisé la cartographie des zones de recul potentiel des falaises du département, à l'échelle du 1/10 000^{ème} aux échéances de +30 et +100 ans exprimés par la Loi Climat et Résilience. En accord avec la DDTM 13, l'analyse menée concerne uniquement les côtes de « falaises rocheuses » (réparties sur neuf communes) qui représentent un linéaire de 158,6 km sur les 300 km du littoral départemental.

Les approches méthodologiques s'appuient sur les réflexions en cours du groupe de travail national MEZAR (Méthode d'Evaluation du Zonage de l'Aléa Recul) initié par le Ministère de l'Ecologie (DGPR). Ce groupe de travail rassemble les opérateurs publics de l'Etat œuvrant sur la thématique et est piloté par le BRGM.

Les travaux de la présente étude sont articulés en deux parties :

- Partie 1 : collecte, synthèse des données en vue de : i) cartographier le trait de côte de référence (à partir duquel les projections des traits de côte futurs sont réalisées) ; ii) définir la typologie des falaises du département ; iii) constituer une base de données événementielles de recul ; iv) recenser les ouvrages de protection de la côte ; v) décrire l'impact des agents météo-marins sur les phénomènes de recul.
- Partie 2 : production des cartes d'aléa recul à +30 et +100 ans à partir de : i) la définition de recul unitaire dépendant des lithologies rencontrées, des morphologies de falaises et des données événementielles ou de la présence d'ouvrages de protection notamment ; ii) la sectorisation du linéaire de falaises en tronçons homogènes ; iii) la proposition par tronçon de scénarios de recul (localisé ou diffus, unique ou résultant d'une reproduction d'évènements dépendant en particulier de l'influence du changement climatique).

Les résultats des analyses sont : i) une carte informative des phénomènes, restituée à l'échelle du 1 :25 000^{ème} rassemblant les données sources et les réalisations de la partie 1 ; ii) une carte d'aléa de recul à l'échelle du 1 :10 000^{ème} pour les deux échéances de +30 et +100 ans.

Ce travail a reposé sur l'observation détaillée sur le terrain d'une côte rocheuse très diversifiée et sur la valorisation de différents jeux de données numériques précis (photographies, orthophotographies, MNT). Les éléments valorisés ont permis la constitution d'une base de données de plus de 450 points spatialisant des estimations de recul d'évènements passés ou de constats prospectifs, le recensement d'une centaine d'ouvrages supplémentaires sur les 809 ouvrages de protection et la définition d'une typologie des falaises en 15 morphotypes. Ces données permettent in fine d'objectiver les analyses cartographiques réalisées.

A l'horizon +30 ans environ 20 km de côte sont concernés par un recul inférieur à 5 m tandis que près de 85 km sont concernés par un recul supérieur à 5 m. A l'horizon +100 ans, la tendance globale n'est pas significativement différente (90 km affectés par un recul supérieur à 5 m, dont près de 5 km affectés par un recul supérieur à 10 m). La distribution des résultats est figurée également par commune.

Il est important de rappeler que la démarche est conduite à l'échelle départementale et que les projections réalisées sont valides à l'échelle du 1 :10 000^{ème}. Les données et les projections produites dans le cadre de l'étude constituent le socle de connaissance essentiel valorisable pour l'établissement des cartographies locales d'exposition au recul du trait de côte rocheux.

Sommaire

1. Introduction et contexte	14
1.1. Contexte.....	14
1.2. Historique des connaissances	14
1.3. Principes méthodologiques pour l'évaluation du recul des falaises.....	16
2. Données utilisées et campagne de terrain	20
3. Contexte géologique.....	22
4. Contexte géomorphologique.....	25
5. Contexte climatique et scénarios d'élévation du niveau de la mer à +30 ans et +100 ans	32
5.1. Eustatisme et mouvements verticaux du sol.....	33
<i>5.1.1. Données de projection du niveau de la mer</i>	<i>33</i>
<i>5.1.2. Analyse des mouvements locaux du sol.....</i>	<i>34</i>
<i>5.1.3. Proposition de valeurs régionales pour l'élévation du niveau de la mer</i>	<i>35</i>
<i>5.1.4. Altitude du niveau moyen de la mer et projections</i>	<i>36</i>
5.2. Etats de mer.....	36
5.3. Marée.....	43
5.4. Vents.....	44
5.5. Conditions météorologiques	45
6. Typologie des côtes rocheuses des Bouches-du-Rhône	47
6.1. Eléments de cadrage	47
<i>6.1.1. Côtes rocheuses ou falaises littorales : classification ou typologie</i>	<i>47</i>
<i>6.1.2. Fonctionnement de l'érosion au niveau des falaises littorales</i>	<i>50</i>
<i>6.1.3. Forçages météo-marins</i>	<i>53</i>
<i>6.1.4. Les différents types d'érosion et mouvements de terrain</i>	<i>54</i>
6.2. Typologie des côtes des Bouches-du-Rhône	55
6.3. Sectorisation du linéaire de falaises	70
7. Définition et cartographie du trait de référence (TdR).....	73
7.1. Zones non couvertes par l'étude	73
7.2. Zones rocheuses à falaise unique	73
7.3. Zones rocheuses à escarpements multiples.....	74
7.4. Outils d'aide à la cartographie du TdR mis en oeuvre	76
8. Aménagements et ouvrages.....	79
8.1. Inventaire des ouvrages	79
8.2. Littoral « très artificialisé »	80
9. Données disponibles pour évaluer le recul.....	81
9.1. Evènements des cartes postales et cartes marines anciennes.....	81
<i>9.1.1. Cartes postales anciennes</i>	<i>81</i>
<i>9.1.2. Cartes marines anciennes</i>	<i>87</i>
9.2. Datations d'évènements gravitaires séculaires à holocènes	93
<i>9.2.1. Evènements gravitaires séculaires</i>	<i>93</i>
<i>9.2.2. Evènements gravitaires holocènes</i>	<i>94</i>
9.3. Base de données Reculs et observations (BDRO)	97
9.4. Analyse et critique des valeurs de reculs attribuées	101

10. Carte informative.....	103
11. Projections de recul aux échéances +30 et +100 ans.....	104
11.1. Adaptation des recommandations nationales au littoral rocheux des Bouches-du-Rhône	104
11.2. Definition du recul	106
11.3. Définitions des tronçons de falaise homogènes et affectation des valeurs de recul	108
<i>11.3.1. Affectation des valeurs de recul unitaire.....</i>	<i>108</i>
<i>11.3.2. Cas particulier de scénarios en cascade : recul de terrain meuble en tête</i>	<i>110</i>
11.4. Détermination du nombre de cycles érosifs par tronçon	111
<i>11.4.1. Echéance +30 ans</i>	<i>111</i>
<i>11.4.2. Echéance +100 ans</i>	<i>112</i>
11.5. Prise en compte des ouvrages	113
11.6. Cartes de Projection du recul à +30 et +100 ans.....	114
<i>11.6.1. Considérations cartographiques globales.....</i>	<i>114</i>
<i>11.6.2. Notion de zone exposée.....</i>	<i>117</i>
<i>11.6.3. Rendu cartographique.....</i>	<i>120</i>
11.7. Identification et prise en compte des incertitudes	121
11.8. Synthèse des résultats	123
12. Conclusion	125
13. Bibliographie & Webographie	126
14. Annexe 1 : cartes informatives	130
15. Annexe 2 : cartes de recul.....	131
16. Annexe 3 : Description des campagnes de terrain.....	132
17. Annexe 4 : Analyse de la stabilité des falaises par stéréogramme	137
18. Annexe 5 : Définitions et outils pour la cartographie du trait de référence pour les falaises. Implémentation pour les falaises des Bouches du Rhône	140
19. Annexe 6 : Extrapolation de valeurs de recul à partir de volumes	153
20. Annexe 7 : Table attributaire associée à la Base de donnée Reculs et Observations (BDRO).....	154
21. Annexe 8 : Tableaux de synthèse des croisements de la BDRO et des typologie de falaise par caisson géologique	155
22. Annexe 9: Scénarios et reculs unitaires retenus par tronçons homogènes.....	176

Liste des figures

Figure 1 : Topographie et bathymétrie de la zone d'étude : entre les deux flèches blanches (Est du département des Bouches-du-Rhône ; Bathymétrie ©SHOM, Topographie MNT25m ©IGN)	15
Figure 2: Gauche : schéma conceptuel d'une falaise affectée par un événement de recul initial pouvant se produire en tout point du linéaire. L'activité de recul est considérée comme identique le long du trait rouge et correspond à la probabilité de réalisation de l'événement de recul. Droite : Enchainement spatio-temporel envisagé à partir de l'événement de recul initial avec 2 autres événements de recul permettant de doubler le recul total. L'activité de recul résultante dépend des probabilités de chacun des événements et également de la probabilité que ces événements se produisent de façon contiguë.	17
Figure 3 : Principes méthodologiques utilisés pour la cartographie de l'aléa de recul des falaises côtières.....	19
Figure 4 : Localisation de la zone d'étude (entre les flèches rouges) sur un extrait de la carte géologique au million de la France, sur la zone d'étude (®BRGM : https://infoterre.brgm.fr/formulaire/telechargement-carte-geologique-metropolitaine-11-000-000) et coupe géologique simplifiée avec topographie exagérée (Fonds : mnt25m ©IGN, Bathymétrie ©GEBCO).....	24
Figure 5 : En haut, microfalaises (escarpements) miocènes (Bottiaï, Port-de-Bouc) et en bas, falaises de poudingues et limons rouges crétacés (Collège Frédéric Mistral, Port-de-Bouc)(©BRGM, 2023)	25
Figure 6 : En haut, platier rocheux avec dépôts de sables et graviers, et laisses de haute-mer (Fort-de-Bouc, Martigues) ; en bas, platier rocheux balayé par la mer (Phare de Cap Couronne, Martigues) (©BRGM, 2023)	27
Figure 7 : En haut, falaise à multi-lithologies miocènes avec des marnes tendres dans la limite d'action des vagues ; en bas, même type de falaise mais avec un niveau important de marnes (1/3 de la hauteur environ) créant des glissements et des surplombs (©BRGM, 2023)	27
Figure 8 : En haut, falaise verticale de sédiments détritiques oligocènes (poudingues et limons argileux rouges, à l'est de Barqueroute) ; En bas, séries marno-limoneuses rouges oligocènes en érosion marine active (sous le promontoire de la chapelle du Rouet) (©BRGM, 2023)	28
Figure 9 : En haut, Vue ©GoogleEarth des calanques d'Ensùès-la-Redonne (Île de l'Erevine) et Le Rove (Presqu'île du Moulon) (Image©2024Airbus) et en bas, panorama au niveau de la calanque de Niolon (Le Rove) (©BRGM, 2023)	29
Figure 10 : En haut à gauche, falaise de poudingues et limons rouges oligocènes du Pharo ; En haut, à droite, poudingues bréchiques et limons plus ou moins argileux rouges de la Pointe Rouge et en bas, panorama de la plage adossée à la falaise de Würm, de l'anse de sablettes et la Pointe de Montredon (©BRGM, 2023)	30
Figure 11 : En haut, la falaise des Lombards ; en bas, la falaise du Cap Canaille (©BRGM, 2023)	31
Figure 12 : En haut à gauche, falaise du Bec de l'aigle versant coté baie de La-Ciotat ; en haut à droite, carte postale ancienne (©Delcampe.net) du Bec de l'aigle et en bas, falaise du Liouquet très marneuse (©BRGM, 2023)	32
Figure 13 : Panorama du massif des Calanques au cap Canaille et de l'Île Calseraigne (Images ©GoogleEarth)	32
Figure 14 : Projection du niveau de la mer pour les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 du GIEC pour les marégraphes de Marseille (a) et Toulon (b). Source : https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool	34

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Figure 15 : Houlographes du réseau Candhis du secteur d'étude (fond topographie et bathymétrie du département des Bouches-du-Rhône ; bathymétrie ©SHOM, topographie MNT25m ©IGN)	37
Figure 16 : Localisation du houlographe de Port-de-Bouc (bouée Candhis n°01302 ; Source : https://candhis.cerema.fr/)	38
Figure 17 : Analyses statistiques des états de mer mesurés au niveau du houlographe de Port-de-Bouc (bouée Candhis n°01302 ; Source : https://candhis.cerema.fr/)	39
Figure 18 : Localisation du houlographe de Marseille (bouée Candhis n°01304 ; Source : https://candhis.cerema.fr/)	39
Figure 19 : Rose des houles : direction de provenance au pic (bouée Candhis n°01304 ; Source : https://candhis.cerema.fr/)	40
Figure 20 : Analyses statistiques des états de mer mesurés au houlographe de Marseille (bouée Candhis n°01304 ; Source : https://candhis.cerema.fr/)	40
Figure 21 : Tempête du 02/12/2005, 20h00 enregistrée (bouée Candhis n°01304 ; Source : https://candhis.cerema.fr/)	41
Figure 22 : Localisation du houlographe du Planier (bouée Candhis n°01305 ; Source : https://candhis.cerema.fr/)	41
Figure 23 : Rose des houles : direction de provenance au pic (bouée Candhis n°01305 ; Source : https://candhis.cerema.fr/)	42
Figure 24 : Analyses statistiques des états de mer mesurés au houlographe du Planier (bouée Candhis n°01305 ; Source : https://candhis.cerema.fr/)	42
Figure 25 : Tempête du 04/11/2023, 20h30 enregistrée (bouée Candhis n°01305 ; Source : https://candhis.cerema.fr/)	43
Figure 26 : Stations ©Windfinder avec des statistiques de directions de vents (fond topographie et bathymétrie du département des Bouches-du-Rhône ; Bathymétrie ©SHOM, Topographie MNT25m ©IGN)	44
Figure 27 : Statistique des vents à la station Cap Couronne (©Windfinder)	44
Figure 28 : Statistique des vents à la station Marseille-Corniche (©Windfinder)	45
Figure 29 : Statistique des vents à la station Bec de l'Aigle (©Windfinder)	45
Figure 30 : Températures et précipitations à la station Météo-France de Marignane (Alt. 9m), normales et moyennes 1991-2020	46
Figure 31 : Records de températures, de rafales de vents dans les Bouches-du-Rhône 01/01/1991 au 01/01/2022 (sources : Météociel et Météo-France)	46
Figure 32 : Matrice des profils de falaises littorales actives attendues selon l'homogénéité en termes d'érodabilité et l'efficacité relative de l'érosion marine (M) par rapport à l'érosion subaérienne (SA). Les lignes diagonales indiquent les lits résistants (Emery et Kuhn, 1982)	48
Figure 33 : Les trois morphologies principales de falaises d'après Sunamura (1992) : (a) le Type-A avec un platier ou une plateforme inclinée, (b) le Type-B avec un platier ou plateforme horizontal ou sub-horizontal et (c) la falaise plongeante.	49
Figure 34 : Typologie du profil des falaises (modifié de Nunes et al., 2009). a, b, c, d- Lithologie homogène. e, f - Lithologies hétérogènes. g - Formation d'une encoche en pied de falaise appelée aussi "notch".	50

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Figure 35 : Vitesse d'érosion moyenne sur des falaises verticales de Carry-le-Rouet, avec des taux d'érosion dépassant 10 mm/an en pied et 5 mm/an en tête (Giuliano (2015) dans Marçot et al., 2014)	51
Figure 36 : Modèles conceptuels de diminution de la résistance mécanique d'un massif rocheux, jusqu'à la rupture (en haut) ; Modèles conceptuels du recul des falaises dans le temps. (Extraits de Giuliano et al., 2016)	52
Figure 37 : Schéma conceptuel des différents processus d'altération et d'érosion affectant les falaises littorales soumises aux forçages subaériens et marins (Giuliano, 2015)	53
Figure 38 : Les différents types de mouvements de terrain et d'érosion sur les falaises côtières (Marçot, 2014)	54
Figure 39 : Typologie 1 type « Caro » : Platiers et micro-escarpements (<1,5 m)	57
Figure 40 : Typologie 2 type « Les Goudes » Côtes rocheuses à profil réglé (<45°).....	57
Figure 41 : Typologie 3 type « Legré-Mante » (T3), intitulée : Versants et talus meubles anthropiques	58
Figure 42 : Typologie 4 type « Calanques 1 » (T4), intitulée : Falaises à profil subvertical (avec surplombs locaux), à lithologie unique	59
Figure 43 : Typologie 5 type « Carry-le-Rouet » (T5), intitulée : Falaises à profil subvertical (avec surplombs locaux), à lithologie(s) multiple(s) et bancs épais.....	60
Figure 44 : La typologie 5bis type « La Tasse » (T5bis), intitulée : Falaises à profil subvertical (avec surplombs locaux), à lithologie(s) multiple(s) dont niveau meuble très épais	61
Figure 45 : Typologie 5ter type « Le Liouquet – La-Ciotat » (T5ter), intitulée : Falaises à profil subvertical (avec surplombs locaux), à lithologie(s) multiple(s) et bancs fins.....	62
Figure 46 : Typologie 6 type « Calanques 2 » (T6), intitulée : Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie unique, indifférencié	63
Figure 47 : Typologie 7 type « Brigantin » (T7), intitulée : Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie unique, aval-pendage	64
Figure 48 : Typologie 8 type « Anthénor » (T8), intitulée : Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie unique, pendage vertical.....	65
Figure 49 : Typologie 9 type « Le Rove – Voie ferrée » (T9), intitulée : Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie meuble en tête, indifférencié	66
Figure 50 : Typologie 10 type « Corbières » (T10), intitulée : Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie meuble en tête, aval-pendage	67
Figure 51 : Typologie 11 type « Lombard » (T11), intitulée : Falaises mixtes à lithologie meuble en pied, (< hm)	68
Figure 52 : Typologie 11bis type « Cap Canaille » (T11bis), intitulée : Falaises mixtes à lithologie meuble en pied (> hm).....	69
Figure 53 : Typologie 12 type « Marseilleveyre » (T12), intitulée : Falaises mixtes à lithologie meuble en tête.....	70
Figure 54 : Typologie de la côte et des falaises littorales des Bouches-du-Rhône spatialisée	71
Figure 55 : Représentation schématique de la rupture de pente identifiée comme la tête de versant dans 2 configurations distinctes : a) le cas d'un versant exclusivement rocheux où la tête de versant est confondue avec la tête d'escarpement, b) le cas d'un versant constitué	

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

d'une partie rocheuse en pied et de matériaux meubles en tête, où la tête de versant est située en amont de la tête d'escarpement (Adapté des travaux du GT MEZAR).....	74
Figure 56 : Exemple d'une configuration de versant rocheux avec de multiples têtes d'escarpement (Adapté des travaux du GT MEZAR).....	74
Figure 57 : Configurations de versants avec multiples escarpements conduisant à des choix différents de la tête d'escarpement considérée comme trait de référence (TdR)	75
Figure 58 : Schéma d'un versant à escarpements multiples et de l'influence décroissante des processus marins d'aval en amont.	76
Figure 59 : DORRA, exemple de calculs intermédiaires pour une zone de départ en chute de bloc	77
Figure 60 : Exemple de falaise aménagée pour limiter les phénomènes érosifs sur la commune de Sausset-les-Pins (photos : DDTM13, 2020).....	79
Figure 61 : Ouvrages recensés sur l'ensemble de la zone d'étude	80
Figure 62 : A gauche, photographie 2023 de la plage fixée des ours ; A droite, carte postale de 1964 du même endroit (www.delcampe.net).....	82
Figure 63 : En haut à gauche, Carte postale de 1968 de l'aménagement du Cap d'Aiguade ; En haut, à gauche, Cap Aiguade aménagé avec des remblais post 1968 (1970) et en bas, prise de vue aérienne de la DDTM13/SMEE d'avril 2020.	82
Figure 64 : En haut, photographie de 2023 de la côte Ouest de la plage du Verdon (à la Couronne, Martigues) et en bas, même photographie sur une carte postale d'avant la seconde guerre mondiale.	83
Figure 65 : A gauche, carte postale ancienne (la couleur sépia pourrait correspondre à la période des années 30 début quarante), au niveau la plage du four à chaux et à droite, photographie de 2023.....	84
Figure 66 : En haut, photographie de 2023 ; en bas, Carte postale de 1905 (au moins).....	84
Figure 67 : En haut, carte postale fin 19 ^{ème} de la falaise des Lombards, au milieu carte postale d'au moins 1971 (date du courrier) du même endroit et en bas panorama de 2023.	85
Figure 68 : Cartes postales anciennes toujours de la falaise des Lombards (en haut, fin 19 ^{ème} , trois gros blocs bien distincts, en bas, âge indéterminé, détail d'un des gros bloc).....	86
Figure 69 : En haut, carte postale du pied du versant de Cap Canaille d'au moins 1989 et en bas, panorama de 2023.....	87
Figure 70 : Comparaison entre le mnt RGE Altı à 1 m ©IGN et la carte marine citée ci-dessus et ci-dessous de 1840 (localisation sur la Figure 72).....	88
Figure 71 : comparaison entre le mnt RGE Altı à 1 m ©IGN et la carte marine citée ci-dessus et ci-dessous de 1841. Haut : Calanque de Sugiton ; Milieu : Port de Carro ; Bas : Anse du Rouet (localisation sur la Figure 73)	90
Figure 72 : Plan des environs de La-Ciotat, de Cassis et de Port-Miou, (Littoral du département des Bouches-du-Rhône), levé en 1840 et dressé en 1842 (source : Gallica).....	91
Figure 73 : Carte particulière des côtes de France, Provence (Département des Bouches-du-Rhône), partie comprise entre le Bec de l'Aigle et le Cap Couronne, levé en 1841 (source : Gallica)	92
Figure 74 : Evénements érosifs interprétés sur la période 1924-2011 et corrélés avec les observations de terrain : a - Erosion du glissement du Cap Canaille (1924-1998) ; c – Massif de la Nerthe : Erosion dans l'Anse de la Madrague (1998-2011) (Ensùès-la-Redonne) (d'après Giuliano, 2015)	93

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Figure 75 : Falaise du Cap Canaille, avec la localisation des échantillons pour datation et des profils verticaux analysés (Recorbet et al., 2010)	94
Figure 76 : Schéma interprétatif en coupe et carte des évènements gravitaires au niveau du versant du Cap Canaille et stratégie d'échantillonnages pour datation ^{10}Be et ^{36}Cl (Recorbet et al., 2010)	95
Figure 77 : Report des âges CRE mesurés sur les blocs tombés de la falaise de Cap Canaille, le long de celle-ci pour chaque échantillon (Recorbet et al., 2010)	95
Figure 78 : Photographies de la morphologie de la tête de falaise du Cap Canaille et des dièdres associés : a – Vue de dessus de traces de dièdres tombés métriques et pluri-métriques ; b – Vue de profil de surplombs ; c – Vue de dessus de dièdre métrique de 1 à 2 m ³ en place et d – Vue de dessus de la flexure de la stratification d'un dièdre pluri-métrique.	96
Figure 79 : Localisation des trois secteurs étudiés a- Secteur de la Couronne (Commune de Martigues) ; b- Secteur des Tamaris (décrit ici) ; c et d - Secteur de Sausset-les-Pins et Carry-le-Rouet (Giuliano, 2015)	96
Figure 80 : Présentation de la campagne d'échantillonnage du secteur des Tamaris (section A'B' complétée par un profil vertical sur un escarpement fraîchement érodé, section C'B' correspondant au profil recoupant les différentes surfaces à dater. a- Carte topographique et photographies illustrant les surfaces étudiées. b- Coupes géologiques avec repositionnement des échantillons étudiés) (Guiliano, 2014)	97
Figure 81 : Répartition des points d'observation en fonction de leurs sources	98
Figure 82 : Répartition des observations contenues dans la base de donnée constituée par nature et synthèse des informations correspondantes en termes de recul.....	100
Figure 83 : Histogramme de répartition des reculs par classe de largeur	101
Figure 84 : Exemple d'une des planches de l'atlas de cartes informatives fournies en Annexe 1. Chaque planche permet de visualiser la géologie et la morphologie des falaises, la position du Trait de Référence, la présence d'ouvrages de protection, ainsi que les points d'observation et les événements gravitaires historiques. L'encart en bas à gauche permet de localiser la position de la planche cartographique le long du linéaire côtier (rectangle rouge). A noter que cette planche est montrée à titre illustratif, l'échelle au 1/25000 n'est pas respectée dans cette représentation. La légende des cartes est présentée en Annexe 1.....	103
Figure 85 : Schéma conceptuel du cycle d'érosion appliqué à un escarpement rocheux....	104
Figure 86 : Représentation schématique de la potentialité que deux évènements affectent successivement le même escarpement.....	105
Figure 87 : Représentation schématique du recul de la tête d'escarpement lié à un (a) ou plusieurs éboulements (b), soit, respectivement, l'observation du recul unitaire ou cumulé de la tête d'escarpement (Adapté des travaux du GT MEZAR)	107
Figure 88 : Schéma de principe sur les évènements rocheux entraînant du recul en tête de falaise. Ces phénomènes sont considérés comme diffus à l'échelle du linéaire de falaise dans un objectif de cartographie de l'aléa	108
Figure 89 : Configuration ponctuelle très défavorable avec compartiment massif sous-cavé, fracturé par l'arrière (La Ciotat – Photo : DDTM13, 2020).....	110
Figure 90 : Schéma de principe pour l'estimation des reculs susceptibles d'affecter les formations meubles en tête de falaise	111
Figure 91 : Voie ferrée de la Côte Bleue au Rove (Photo : DDTM13).....	113
Figure 92 : Route de la Corniche à Marseille (Photo : DDTM 13)	114

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Figure 93 : Exemples d'escarpements discontinus (Photo : DDTM 13)	115
Figure 94 : Exemple de sectorisation du littoral justifiant les exclusions du cadre de l'étude entre la Pointe Rouge et la madrague de Montredon à Marseille (Photo : DDTM13).....	116
Figure 95 : Exemple de sectorisation du littoral justifiant les exclusions du cadre de l'étude au niveau de la corniche de Marseille (Photo : DDTM 13)	117
Figure 96 : Schéma de principe permettant d'illustrer la signification des figurés des cartes de projection du recul pour une configuration de versant avec un seul escarpement	118
Figure 97 : Schéma de principe explicitant les figurés des cartes de projection du recul pour une configuration de versant avec escarpements multiples et TdR déconnecté des processus marins	119
Figure 98 : Projection du zonage proposé sur le prolongement d'une falaise littorale dans la zone portuaire de Carry-le-Rouet (Photo : DDTM 13).....	119
Figure 99 : Exemple d'une des planches de l'atlas de cartes de projection du recul fournies en Annexe 2. Chaque planche permet de visualiser la position du Trait de Référence, les types de linéaire exclus de l'étude, la projection du recul aux échéances +30 ans et + 100 ans, ainsi que, la position des ouvrages pérennes et les versants exposés en aval du TdR. L'encart en bas à gauche permet de localiser la position de la planche cartographique le long du linéaire côtier (rectangle rouge). A noter que cette planche est montrée à titre illustratif, l'échelle au 1/10000 n'est pas respectée dans cette représentation. La légende des cartes est présentée en Annexe 2	120
Figure 100 : Légende accompagnant la carte d'exposition au recul des falaises	121
Figure 96 : Eléments anthropiques impliqués dans les mouvements gravitaires : a – Eléments plastiques dans un glissement marneux ; b – Tirants dans le vide et c – Tête de falaise glissée et éléments plastiques dans les marnes glissées.	132
Figure 97 : Partie Ouest de la zone d'étude, Carte des relevés de terrain : Lmax mesurées lors de la campagne de terrain 2023, coupes schématiques de falaises et analyses des stéréogrammes de stabilité (Fonds : mnt 25m ©IGN, Bathymétrie ©GEBCO et Carte géologique au million ©BRGM)	135
Figure 98 : Partie Ouest de la zone d'étude, Carte des relevés de terrain : Lmax mesurées lors de la campagne de terrain 2023, coupes schématiques de falaises et analyses des stéréogrammes de stabilité (Fonds : mnt 25m ©IGN, Bathymétrie ©GEBCO et Carte géologique au million ©BRGM)	136
Figure 99: A gauche - Représentation stéréographique des orientations et pendages des discontinuités moyennes principales, du front de taille considéré (arc de cercle en gris foncé) et de l'angle de frottement interne moyen (arc de cercle en gris clair), pour l'évaluation de l'aléa « rupture » (Pannet et al., 2012) ; A droite – même chose, les intersections des discontinuités dans la zone critique en rouge (définie par l'angle de frottement interne et l'orientation du front/versant rocheux) montre un versant ou front avec des instabilités de fait avec un potentiel de glissement ou chute de bloc dans la direction de la flèche rouge.....	137
Figure 100 : Ordres de grandeur des angles de frottement sur des discontinuités préexistantes (joints de stratification ou fracture ; Synthèse JM Schroëtter non publié)	139
Figure 101: Principes d'utilisation de la suite d'outils HISTOFIT et DORRA développés par le BRGM	141
Figure 102 : Distribution de pente (SAD = slope angle distribution) de MNT 1m (zone pilote de la vallée alpine des Diablerets) et GDMU de la topographie (Loye, 2009) (A indique l'angle de pente seuil au-dessus duquel les pentes appartiennent majoritairement aux falaises et sont donc considérées comme une zone source potentielle de chutes de blocs. B indique le mode	

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

des fortes pentes du GDMU. Les deux unités de falaises représentent deux familles de parois rocheuses nues lithologiquement distinctes)	141
Figure 103 : Paramétrage des lois gaussiennes normales représentant chaque morphologie de terrain (GDMU).....	142
Figure 104 : Exemple de distribution de pente (SAD = slope angle distribution) de MNT et GDMUs. Les seuils A, B et C représentent respectivement la proportion de pentes de falaises supérieure à 90/50/10% par rapport à l'ensemble des pentes. Le seuil de pente théorique obtenu par la formule de l'INRAE est reporté en bleu clair sur le graphique.	143
Figure 105 : Résultats de l'analyse SAD effectuée sur un MNT de 6 résolutions différentes (Loye et al., 2009)	144
Figure 106 : Résultats de l'analyse SAD effectuée sur un MNT 1 m et 25 m (Loye et al., 2009)	144
Figure 107 : interface utilisateur de DORRA (Detection Of Rockfall Release Area) pour sa version du 11/07/2022	145
Figure 108 : Sélection des zones de départ sur le raster des Pentes avec DORRA en fonction des seuils de pente déterminés avec HISTOFIT.....	146
Figure 109 : illustration des étapes d'utilisation des outils HISTOFIT et DORRA pour les falaises littorales des Bouches du Rhône	150
Figure 110 : Exemple de sorties DORRA pour l'un des secteurs à falaises littorales des Bouches du Rhône.....	152

Liste des tableaux

Tableau 1 : Elévation du niveau de la mer en m aux horizons 2052 et 2122.	33
Tableau 2 : Elévations du niveau de la mer (en m) projeté à Marseille et Toulon pour le scénario GIEC SSP2-4.5 aux échéances 2054 et 2124. Les valeurs médianes sont fournies (Q50) ainsi que l'intervalle des incertitudes (Q17-Q83)	35
Tableau 3 : Elévations du niveau de la mer (en m) projeté à Marseille et Toulon pour le scénario GIEC SSP5-8.5 aux échéances 2054 et 2124. Les valeurs médianes sont fournies (Q50) ainsi que l'intervalle des incertitudes (Q17-Q83).....	35
Tableau 4 : Altitudes des niveaux marins de référence (Niveau Moyen et Plus Haute Mer Astronomiques) pour le secteur d'étude des Bouches-du-Rhône aux échéances +30 et +100 ans, selon 2 scénarios d'élévation du niveau des mers	36
Tableau 5 : Typologie de la côte et des falaises littorales des Bouches-du-Rhône	72
Tableau 6 : Indicateurs les plus utilisés pour l'aide à la cartographie du TdR issus des sorties fournies par l'outil DORRA	78
Tableau 7 : Synthèse des modalités d'évaluation des reculs	99
Tableau 8 : Valeurs caractéristiques associés aux différentes séries de reculs évalués	101
Tableau 9 : synthèses des problématiques adressées et des réponses apportées pour la projection de recul aux horizons 30 et 100 ans.....	106
Tableau 10 : Valeurs de Recul unitaires retenus (extrait de l'Annexe 9)	109
Tableau 11 : Gestion des incertitudes associées à la cartographie	122
Tableau 12 : Synthèse départementale	123

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral
des Bouches-du-Rhône

Tableau 13 : Synthèse par commune	124
Tableau 14 : Structure des observations et lexique utilisé lors de la campagne de terrain de 2023	133
Tableau 15 : liste des caissons géologiques utilisés pour cette étude	149

1. Introduction et contexte

1.1. CONTEXTE

La loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 dite « Loi Climat et Résilience » (LCR) a introduit l'établissement de cartes locales d'exposition au recul du trait de côte sur le territoire des communes devant ou souhaitant adapter leur stratégie locale d'aménagement au recul du trait de côte.

Selon l'existence ou non de Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) dédiés et le choix des collectivités, ces communes doivent intégrer, dans le document graphique du plan local d'urbanisme, la zone exposée au recul du trait de côte à l'horizon de 30 ans et celle exposée au recul du trait de côte à un horizon compris entre 30 et 100 ans.

La loi indique que « les communes dont l'action en matière d'urbanisme et la politique d'aménagement doivent être adaptées aux phénomènes hydrosédimentaires entraînant l'érosion du littoral sont identifiées dans une liste fixée par décret. Cette liste est élaborée en tenant compte de la particulière vulnérabilité de leur territoire au recul du trait de côte, déterminée en fonction de l'état des connaissances scientifiques résultant notamment de l'indicateur national de l'érosion littorale et de la connaissance des biens et activités exposés à ce phénomène. »

Si les textes ne désignent pas spécifiquement les phénomènes gravitaires à l'œuvre sur les côtes rocheuses, la loi intègre pleinement le cas des falaises.

Dans le but d'apporter des éléments de connaissance favorisant les cartographies locales des communes engagées dans la démarche, la Direction Départementale des Territoires de la Mer des Bouches-du-Rhône (DDTM 13), a demandé à la direction régionale de Provence-Alpes-Côte-d'Azur (PACA) du BRGM la mise en place d'un partenariat de Recherche et Développement (R&D) pour cartographier les zones de recul potentiel des falaises du département, à l'échelle du 1/10 000^{ème} aux échéances compatibles avec la loi.

Pour des raisons méthodologiques et de priorisation de cette étude, comme convenu avec la DDTM 13, l'analyse réalisée ne concerne que les côtes à falaises rocheuses, représentant un linéaire de 158,6 km sur un total de 300 km que représente le littoral du Département.

1.2. HISTORIQUE DES CONNAISSANCES

Le littoral des Bouches-du-Rhône représente un linéaire d'environ 180 km auquel s'ajoutent 41 km de littoral insulaire (des îles du Frioul à l'Île-Verte), et 78 km de littoral le long de l'Etang de Berre. Ce littoral est composé à 70% de côtes basses d'accumulation (sables et galets), à rocheuses (inférieures ou égales à 2 m NGF de hauteur), et à 30% de côtes rocheuses constituées de falaises de plus grandes dimensions (Figure 1).

Une grande partie de ce littoral est « anthropisée » avec la présence de deux des plus grands ports français : les ports de Marseille et Fos-sur-Mer.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

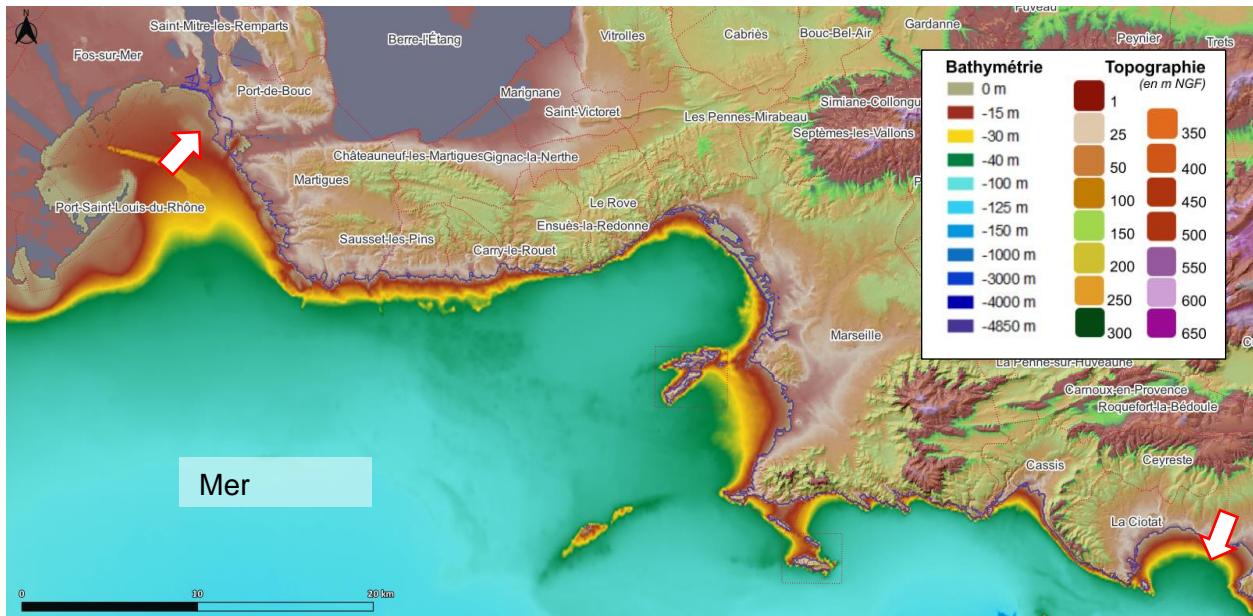


Figure 1 : Topographie et bathymétrie de la zone d'étude : entre les deux flèches blanches (Est du département des Bouches-du-Rhône ; Bathymétrie ©SHOM, Topographie MNT25m ©IGN)

La présente étude à des travaux débutés en 2004, dans le cadre desquels le BRGM a notamment produit une cartographie d'aléa « instabilités de falaises » à l'échelle du 1/100 000 (validité 1/50 000) sur l'ensemble du littoral de la région PACA (Etang de Berre et des îles habitées inclus).

En 2014, à la demande de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Bouches-du-Rhône, le BRGM a réalisé une seconde cartographie de l'aléa « instabilité des falaises » à une échelle en accord avec les documents d'urbanisme pour répondre aux besoins des communes, soit une échelle de restitution au 1 :10 000^e. Cette étude contenait :

- Des inventaires des événements historiques, des études géotechniques et des arrêtés municipaux restitués selon des fiches descriptives par secteur homogène de littoral en termes d'instabilités et de morphologie ;
- Une cartographie d'aléa (au 1 :10 000) réalisée à partir de missions de terrain, compilant les facteurs de prédisposition permanents aux instabilités gravitaires dans les falaises, à partir de plusieurs critères : lithologie, état de la fracturation, circulation d'eau, morphologie de la falaise, hauteur, volumes mobilisables, etc.

Cette seconde cartographie soulignait un aléa « instabilité des falaises » de « fort à très fort » sur 4,45 km² soit 1%, 18% en « fort », 7% en « moyen à fort », 34% en « moyen », 19% en « faible à moyen », 19% en « faible », et 2% en aléa « nul à faible ». De plus, cette seconde cartographie avait fait l'objet d'un Porter-à-connaissance auprès des 12 communes concernées.

En complément, le BRGM a également piloté en 2014 un projet de recherche qui a permis de mieux caractériser le fonctionnement des mécanismes d'érosion des falaises côtières à différentes échelles temporelles, et de mesurer des taux d'érosion moyens sur le littoral des Bouches-du-Rhône (Projet VALSE).

Les études menées jusqu'alors nécessitent d'être complétées afin d'atteindre les objectifs de la loi. Il s'agit notamment de définir et caractériser un trait de référence (TdR) pour la côte rocheuse, puis de cartographier les projections de ses évolutions aux échéances +30 et +100

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

ans, en fonction des différents scénarios climatiques du Groupe d'Expert International sur le Climat (GIEC).

1.3. PRINCIPES METHODOLOGIQUES POUR L'EVALUATION DU RECOL DES FALAISES

Le fonctionnement de certains types de falaises apparaît particulièrement complexe, par opposition aux tendances marquées et linéaires que l'on peut notamment observer sur les côtes meubles. Cela rend impossible le déroulé d'une approche méthodologique dite « classique », basée entre autres sur la prise en compte d'un taux d'évolution (T_x) et l'estimation des effets potentiels d'une remontée du niveau de la mer type « Loi de Bruun » ou modélisation (BRGM-Cerema, 2022).

Les Recommandations nationales pour l'élaboration des cartes locales d'exposition au recul du trait de côte invitent à appréhender ces modalités de fonctionnement complexes via une approche « experte », basée notamment sur la prise en compte des « reculs événementiels majeurs » et en procédant à un « travail de classification des côtes du territoire ».

Les principes mis en œuvre dans le cadre de cette étude s'inscrivent dans cette approche, qui à défaut d'être clairement définie méthodologiquement dans les Recommandations, fait l'objet de réflexion au sein du groupe de travail MEZAR¹. Ce Groupe de Travail a pour objectif un cadrage des méthodes de caractérisation de l'aléa recul en tête d'escarpement rocheux, en contexte littoral ou continental.

A l'échelle des temps géologiques (plusieurs milliers d'années), le recul de la tête de falaise apparaît comme un processus régulier, de l'ordre du millimètre au centimètre par an en moyenne. Dans le cadre d'une cartographie d'aléa pour planifier l'urbanisation d'un secteur, le recul de la tête de falaise important à considérer est celui qui se produit par à coup lors d'éboulements majeurs affectant la tête de falaise (« recul événementiel majeur »). Le recul induit par ces événements est donc brutal et très localisé, avec souvent un recul maximum de l'ordre du mètre à plusieurs dizaines de mètres.

On ne sait pas à l'avance où vont se produire ces événements. L'approche proposée dans cette étude s'adapte à cette réalité et considère qu'un événement caractéristique peut se produire à n'importe quel endroit le long de la tête de falaise caractérisée comme homogène du point de vue géomorphologique. On parle d'aléa « diffus » (

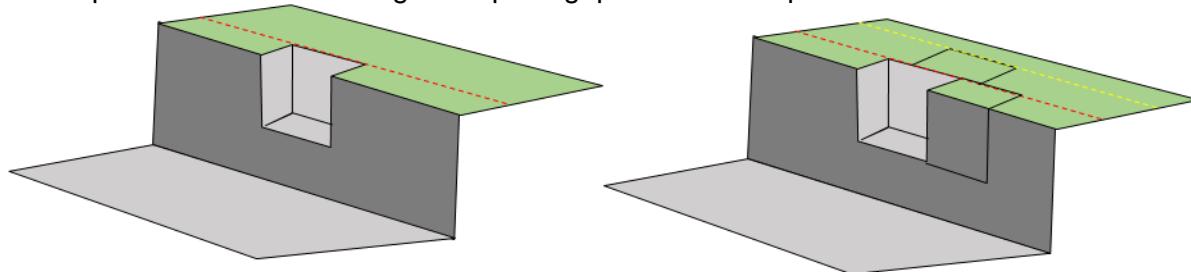
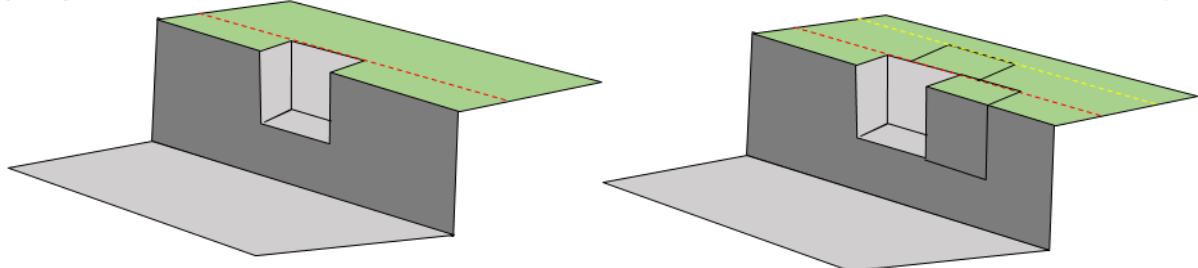


Figure 2). Plusieurs étapes préalables apparaissent nécessaires :

¹ Groupe de travail (GT) MEZAR (Méthode d'Evaluation du Zonage de l'Aléa Recul) sous l'égide de la DGPR (ministère de l'Ecologie) et piloté techniquement par le BRGM. Les travaux de ce GT doivent aboutir à des recommandations techniques pour la caractérisation de l'aléa recul de la tête d'escarpement rocheux.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

- Sectoriser les zones de falaises de façon homogène d'un point de vue géomorphologique ;
- Définir les caractéristiques des événements de recul redoutés selon les contextes ;
- Evaluer la possibilité de répétition des événements au même endroit durant la période prospective



- Figure 2).

Cette approche de caractérisation d'un aléa diffus le long de chaque tronçon est adaptée en l'absence de connaissance extrêmement précise à l'échelle de chaque compartiment rocheux susceptible de s'ébouler. Cependant, si un phénomène déterminé, d'ampleur dépassant celle du phénomène diffus considéré, est identifié localement, il est pris en compte dans l'analyse. On parle alors d'aléa « localisé ».

L'influence des ouvrages et du changement climatique sur la capacité à accélérer ou ralentir le processus de recul est étudié. Cette influence impacte notamment la durée du cycle érosif² affectant les falaises. L'objectif est d'estimer le cumul d'événements envisageable (dépendant du nombre de cycles érosifs au final) en chaque point du linéaire de falaises sur la période prospective considérée.

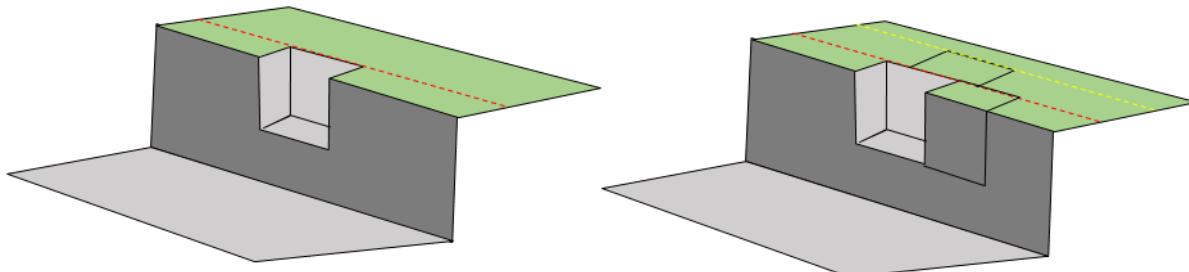


Figure 2: Gauche : schéma conceptuel d'une falaise affectée par un événement de recul initial pouvant se produire en tout point du linéaire. L'activité de recul est considérée comme identique le long du trait rouge et correspond à la probabilité de réalisation de l'événement de recul. Droite : Enchainement spatio-temporel envisagé à partir de l'événement de recul initial avec 2 autres événements de recul permettant de doubler le recul total. L'activité de recul résultante dépend des probabilités de chacun des événements et également de la probabilité que ces événements se produisent de façon contiguë.

Le logigramme en Figure 3 présente les différentes étapes de la méthode adoptée.

² On décrit comme cycle érosif le processus global aboutissant au phénomène de recul : i) une phase préparatoire avec une diminution progressive de la résistance de la roche ; ii) une phase d'éboulement ou de détachement définissant le recul sur un cycle. Le recul total sur une période déterminée est fonction notamment de la phase préparatoire (post-événement) à un éboulement (délai entre deux événements successifs en un même endroit in fine).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

La 1^{ère} partie du travail consiste à synthétiser et mettre en forme de manière exploitable les connaissances existantes sur la côte rocheuse. Cette collecte de données est complétée par des levés de terrain. Plus spécifiquement, les étapes à effectuer pour cette 1^{ère} partie sont :

- 1) La cartographie du Trait de Référence (TdR à partir duquel les projections des traits de côte futurs sont réalisées). La digitalisation est réalisée principalement en valorisant les données topographiques (Modèles Numériques de Terrain), combinées aux levés de terrain, aux photographies aériennes obliques et aux orthophotos.
- 2) La division du linéaire de falaise côtière en tronçons homogènes d'un point de vue géomorphologique en valorisant les connaissances préexistantes combinées aux levés de terrain, aux photographies aériennes obliques et aux orthophotos.
- 3) La constitution d'une base de données de recul passés et potentiels, à partir de la connaissance des événements historiques et d'observations de terrain.
- 4) Le recensement et la description des ouvrages de protection de la côte à partir de la base de données nationale du Cerema, complétée par les levés de terrain, l'interprétation des photographies aériennes obliques et des orthophotos.
- 5) La description du contexte climatique du secteur d'étude (agents météo-marins) et de leurs potentiels impacts sur le vieillissement des falaises. Ainsi que la description des scénarios d'élévation du niveau de la mer à +30 et +100 ans en fonction des projections du GIEC, ajusté avec les composantes locales de mouvements du sol.

Les informations collectées lors de cette 1^{ère} phase de travail sont ensuite synthétisées dans une carte informative (voir Annexe 1).

La 2^{ème} partie du travail consiste essentiellement à valoriser les informations collectées dans l'objectif de produire la carte d'exposition au recul des falaises côtières. Plus spécifiquement, les étapes à effectuer pour cette 2^{ème} partie sont :

- 6) Le croisement des informations issues de la Base de données de recul avec la sectorisation du linéaire de falaise en tronçons homogènes. In fine, l'expert retient une valeur de recul unitaire par secteur homogène. Cette valeur correspond à un scénario de rupture défini par son mécanisme de rupture, ses dimensions et son activité.
- 7) La définition de scénarios d'enchaînements spatio-temporels de reculs unitaires sur les périodes de référence +30 ans et + 100 ans, modulés pour prendre en compte l'influence éventuelle des ouvrages protection et du changement climatique sur la durée du cycle d'érosion.

Les résultats de cette 2^{ème} phase de travail sont ensuite synthétisés dans une carte d'aléa de recul (Annexe 2).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

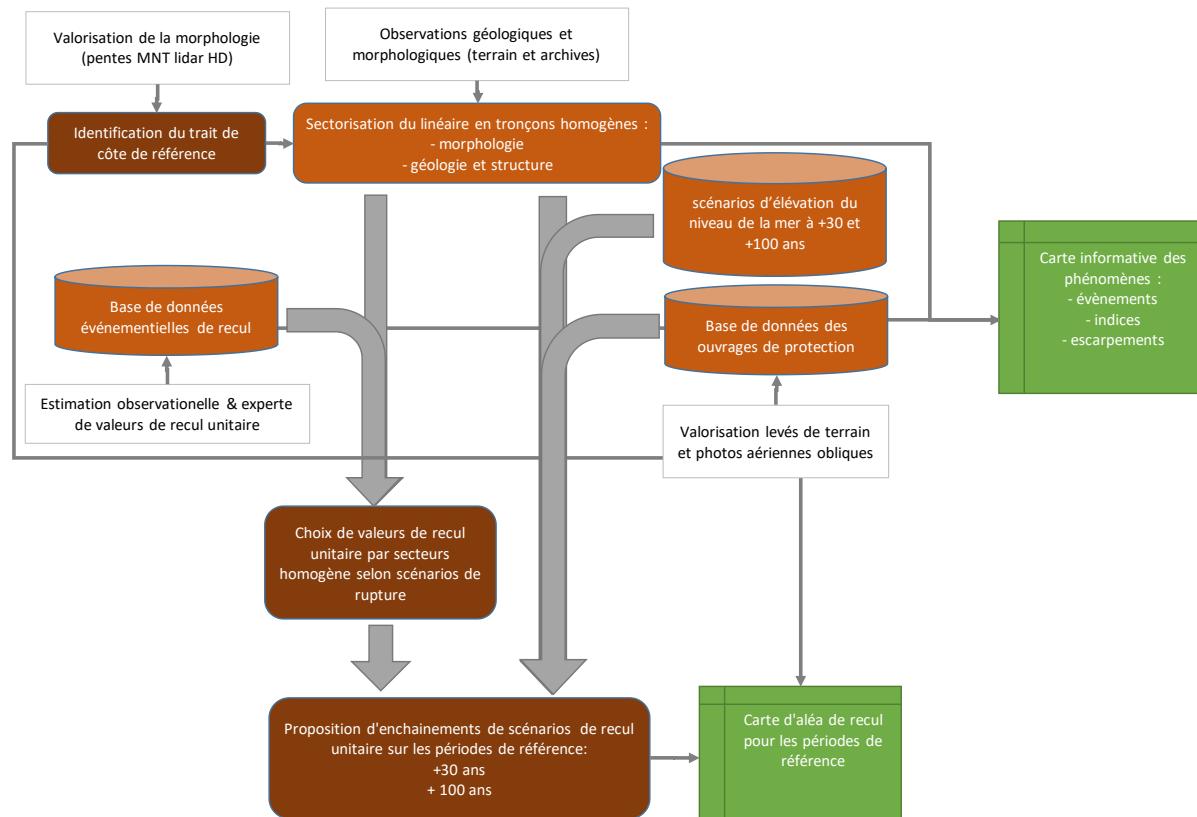


Figure 3 : Principes méthodologiques utilisés pour la cartographie de l'aléa de recul des falaises côtières

2. Données utilisées et campagne de terrain

Les différentes données utilisées pour la réalisation de cette étude sont :

- Le Modèle Numérique de Terrain (MNT, représentation en x, y et z de la topographie) du littoral, réalisé par ©IGN (Institut Géographique National). Le RGE ALTI® décrit la forme et l'altitude normale de la surface du sol, avec pour objectif la constitution d'un modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 1 mètre. La précision du MNT est portée à 20 centimètres EMQ dans les zones inondables ou littorales. Ce RGE ALTI® est mis à jour à partir des levés obtenus par LIDAR aéroporté ou par corrélation d'images aériennes (<https://geoservices.ign.fr/rgealit>).
- L'Orthophotographie aérienne 2020 et 2023 (©IGN), correspond à une orthophotographie en couleur d'une résolution native de 10 cm, à partir de prises de vues aériennes des territoires disponibles, en 2020 et 2023. La Base de données sur (<https://data.geopf.fr/wms-r/wms?VERSION=1.3.0>). Elle est découpée en dalles de 1,4 km par 1 km.
- La Bd Charm-50, mise à disposition en avril 2017, est la base de données géoréférencées des cartes géologiques à 1/50 000 vectorisées et harmonisées, contenant 6 couches d'informations détaillées et renseignées (format shape « .shp »). L'utilisation et la réutilisation de ces données doivent être conformes aux conditions d'utilisation des données du BRGM (<https://infoterre.brgm.fr/formulaire/telechargement-cartes-geologiques-departementales-150-000-bd-charm-50>).
- Une base de données de prises de vue aériennes du 19 septembre 2020, acquises avec une période de temps moyenne de deux années, acquises par la Direction Départementale des Territoires et de la Mer, service des Bouches-du-Rhône (13), Service Mer, Eau et Environnement (SMEE).
- La base de données national mouvement de terrain (BDMVT ; <https://www.georisques.gouv.fr>), complétée par la consultation des communes concernées et d'observations de terrain (voir le chapitre 5).
- Les vues en relief sur site ©GoogleEarth.
- Le portail de IGN, Remonter le temps (<https://remonterletemps.ign.fr>).
- La Base de données sur les ouvrages de protection du littoral métropolitain (<https://www.cerema.fr/fr/actualites/cartographie-ouvrages-amenagements-littoraux-realisee-cerema>).
- Et enfin les études du BRGM réalisées sur les falaises des Bouches-du-Rhône :
 - Marçot, Nathalie ; Ferradou, Louis ; Schroëtter, Jean-Michel (2024) - Diagnostic d'instabilités sur le sentier du Lézard à Carry-le-Rouet. Rapport final. BRGM/RP73326-FR, 60 p. 20 ill., 2 ann.
 - Marçot, Nathalie (2023) - Rapport d'expertise sur l'éboulement du 17 mai 2023 quartier Barqueroute au 11 allée de la Falaise à Carry-le-Rouet. Rapport final. BRGM/RP-72786-FR, 38 p., 23 ill., 1 ann.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

- Equilbey, Edouard ; Marçot, Nathalie (2019) - Aléa chute de blocs rocheux du flanc Est de la calanque de Port-Miou à Cassis (13). Rapport final. BRGM/RP-69141-FR, 57 p., 1 CD.
- Marçot, Nathalie ; Mathon, Christian (2012) - Rapport d'expertise : Commune du Rove (13). Evénement chute de blocs du 21 mai 2012. Avis du BRGM. BRGM/RP61172-FR, 31 p.
- Marçot, Nathalie ; Stépanian, Alexis (2014) - Expertise d'une falaise vis-à-vis du risque d'érosion en cas de démolition de deux cabanons sur le Domaine Public Maritime (DPM), calanque de Sormiou (Marseille, 13). BRGM/RP-63591-FR, 19 p., 3 ann.
- Rouadjia.A. ; Marçot, Nathalie ; Claeys, C. (2012) - Projet VALSE (Vulnérabilité et Adaptation pour Les Sociétés face aux Erosions de falaises côtières en région PACA). Le risque à l'épreuve des sciences sociales Rapport de stage d'Anna Rouadjia. BRGM/RP-61435-FR, 68 p., 4 ann.
- Marçot, Nathalie ; Dewez, Thomas ; Giuliano, J. ; Claeys, C. ; Lebourg, T. ; Godard, Vincent ; Prémaillon, Mélody ; Fissier, L. ; Rouadia, A. ; Tepongning Megnifo, H. ; Mathon, Christian ; Stépanian, Alexis (2016) - Projet VALSE : Vulnérabilité et Adaptation pour Les Sociétés face aux Erosions de falaises côtières en région Provence Alpes Côte d'Azur. Synthèse des travaux menés dans le cadre du projet de recherche VALSE. Synthèse de l'opération acquisition scan Laser sur le littoral de Carry-le Rouet. Rapport final. BRGM/RP64069-FR, 123 p., 20 ann., 1 CD.
- Marçot, Nathalie ; Azibi, L. ; Boucher, E. (2008) - Prise en compte de la problématique des risques liés aux falaises côtières dans l'aménagement du territoire en Provence Alpes Côte d'Azur Année 3 : Etude de segments représentatifs, propositions d'aménagement et établissement d'une méthodologie pour réduire la vulnérabilité à l'échelle d'une commune. BRGM/RP-56090-FR, 132 p.
- Marçot, Nathalie (2005) - Prise en compte de la problématique des risques liés aux falaises côtières dans l'aménagement du territoire en Provence-Alpes Côte d'Azur. Année 2 : Complément - Qualification de l'aléa instabilités de falaises sur le littoral de l'étang de Berre et des îles habitées de la Région PACA. BRGM/RP-53951-FR, 97 p. 9 fig., 16 phf.
- Marçot, Nathalie ; Azibi, L. (2007) - Prise en compte de la problématique des risques liés aux falaises côtières dans l'aménagement du territoire. Année 3 : Etude de segments représentatifs, propositions d'aménagement et établissement d'une méthodologie de gestion de risque communale. Rapport d'avancement. BRGM/RP-55945-FR, 56 p. 3 ann.

Une enquête auprès des communes a également été menée dans l'objectif de compléter le recensement des événements gravitaires historiques. Les retours partiels ont permis de cibler les zones à parcourir pendant les campagnes de terrain.

Des campagnes de terrain ont été menées afin de définir la typologie des falaises rocheuses, d'identifier, dans la mesure du possible, les agents d'érosion marins et continentaux et de caractériser les mouvements gravitaires. Ainsi 4 missions ont été effectuées entre avril 2023 et janvier 2024, couvrant un linéaire côtier d'environ 95 km.

3. Contexte géologique

La géologie du département des Bouches-du-Rhône est à la croisée de **quatre périodes tectoniques majeures** de la Méditerranée occidentale.

Après la pénéplénotion de la chaîne hercynienne, s'ouvre l'océan Téthys (**phase d'extension**) et le dépôt des séries sédimentaires triasiques d'épaisseurs pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres, constituées de calcaires et de dolomies du Trias moyen. Elles sont surmontées des niveaux évaporitiques au Trias supérieur, couches qui faciliteront plus tard les déformations pyrénéo-alpines.

L'augmentation de l'espace disponible par approfondissement du domaine marin lié à l'extension et l'aminçissement du Sud de la plaque européenne (en des systèmes de failles normales Nord/Est – Sud/Ouest), va voir se déposer les séries carbonatées du Jurassique et du Crétacé inférieur, où les variations eustatiques dans le bassin, vont produire des alternances de marnes et de calcaires.

A la fin du Crétacé inférieur, le régime tectonique jusqu'alors en extension, s'inverse et l'émergence de l'isthme durancien entraîne l'arrêt de la sédimentation. Une **phase de tectonique compressive** fait suite et produit ce qui fut historiquement nommé « le continent sud-provençal ». Cette phase tectonique dite « pyrénéo-provençale », à partir du Turonien, voit se créer deux chaînes de montagne : les Alpes à l'Est et les Pyrénées à l'Ouest. L'océan Téthys est en train de se refermer, conséquence de l'ouverture de l'Atlantique nord et de la remontée vers le nord des plaques Ibérique et Africaine. En Provence occidentale, c'est une série de chevauchements et de failles inverses à vergence nord qui affectent les séries mésozoïques dont les plus beaux exemples sont : le Mont Ventoux, la Montagne de Lure ou encore les massifs de la Nerthe ou de l'Etoile.

A l'Eocène moyen, la compression est à un paroxysme, les couches évaporitiques du Trias supérieur, constituent un niveau de décollement régional (couche savon) qui facilitera la mise en place des chevauchements et des nappes de la couverture sédimentaire, orientés Est-Ouest, jusqu'à l'Eocène supérieur.

Alors que les Alpes et les Pyrénées restent des chaînes en compression, l'Ouest de l'Europe (du Sud de l'Allemagne, en Alsace (graben du Rhin) jusqu'en Méditerranée) va être affectée par **une nouvelle phase tectonique extensive** et magmatique (volcanisme de Villeneuve-Loubet par exemple etc.) à l'Oligocène (fini Stampien). Une série de bassins sédimentaires (bassin de Marseille, etc.) plus modestes vont se mettre en place orientés Nord-Est/Sud-Ouest. Ces bassins sont la conséquence de la rotation du bloc corso-sarde et de l'ouverture du golfe du Lion (avec la disparition d'une partie chaîne pyrénéenne entre Cerbère et le Var).

Après cet interlude extensif, la convergence reprend au Miocène, en lien avec l'accélération de la vitesse d'ouverture de l'Atlantique Sud où la plaque Afrique va provoquer une surrection dans le domaine provençal. Cette phase alpine est marquée par la fermeture de Gibraltar qui coupe la communication marine entre les eaux océaniques et la Méditerranée. La Méditerranée privée d'apport d'eaux va s'assécher, son niveau va chuter de plus de 1 000 m (1 900 m est évoqué), c'est ce qui va être nommé « **la crise messinienne** ». Avec un tel dénivelé, les cours d'eau vont se surimposer et créer des canyons profonds pour rejoindre le niveau de base avant une remise en eau rapide (la crise messinienne n'aurait duré que quelques centaines de milliers d'années).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Le haut de la Figure 4 expose la géologie départementale extraite à partir de la carte nationale au 1 :1 000 000. La coupe schématique (même figure, en bas) qui suit, l'exagération de la topographie et sa relation avec la géologie (simplifiée), montre les variations importantes d'altitude le long du littoral du département depuis les platiers rocheux de Port-de-Bouc jusqu'au massif des Calanques.

En règle générale, il est possible d'associer des reliefs à des périodes géologiques mais une même formation peut présenter des variations morphologiques importantes, illustrant une histoire géologique récente complexe.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

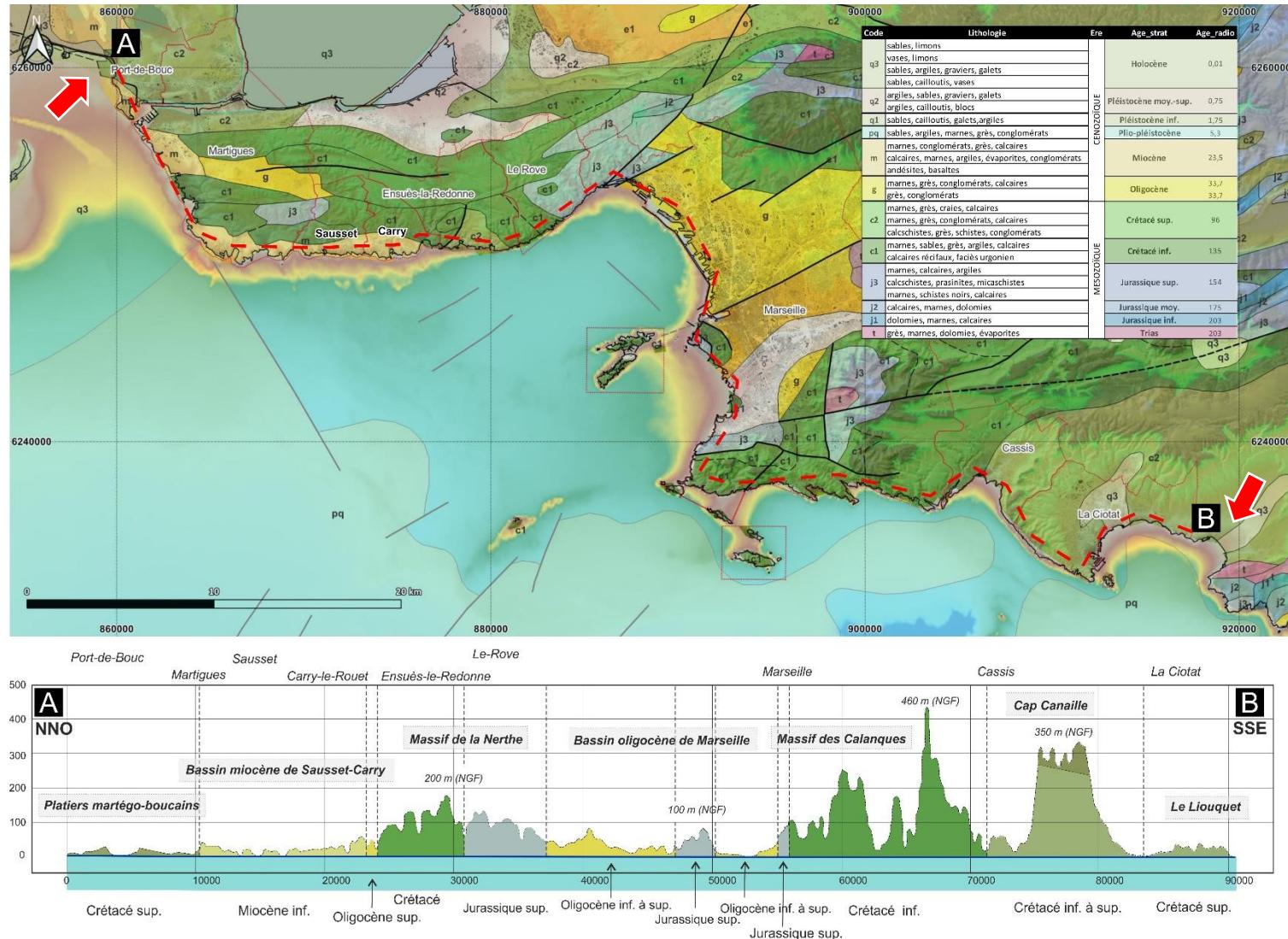


Figure 4 : Localisation de la zone d'étude (entre les flèches rouges) sur un extrait de la carte géologique au million de la France, sur la zone d'étude (®BRGM : <https://infoterre.brgm.fr/formulaire/telechargement-carte-geologique-metropolitaine-11-000-000>) et coupe géologique simplifiée avec topographie exagérée (Fonds : mnt25m ©IGN, Bathymétrie ©GEBCO).

4. Contexte géomorphologique

D'ouest en est, la géomorphologie du littoral est fortement contrastée. De l'embouchure du Petit-Rhône jusqu'à approximativement la commune de Fos-sur-Mer, le littoral correspond à des côtes basses d'accumulation : flèche à pointe libre, cordon dunaire, marais maritime du delta du Rhône (la Camargue) et du système fluviatile rhodano-durancien de la plaine de Crau, d'âge plio-quaternaire.

La côte rocheuse des Bouches-du-Rhône, s'élève progressivement à partir de la commune de Port de Bouc. (Figure 13 et flèches rouges de la Figure 4).

Le littoral est composé de platiers rocheux, de microfalaises et de falaises pluri-métriques sur les communes de Port-de-Bouc et Martigues. Les microfalaises calcaires de Bottai montrent des sous-cavages locaux, et lorsqu'elles présentent un faible pendage, elles sont soumises à l'action des vagues, et montrent des dalles décapées par la mer (Figure 5).

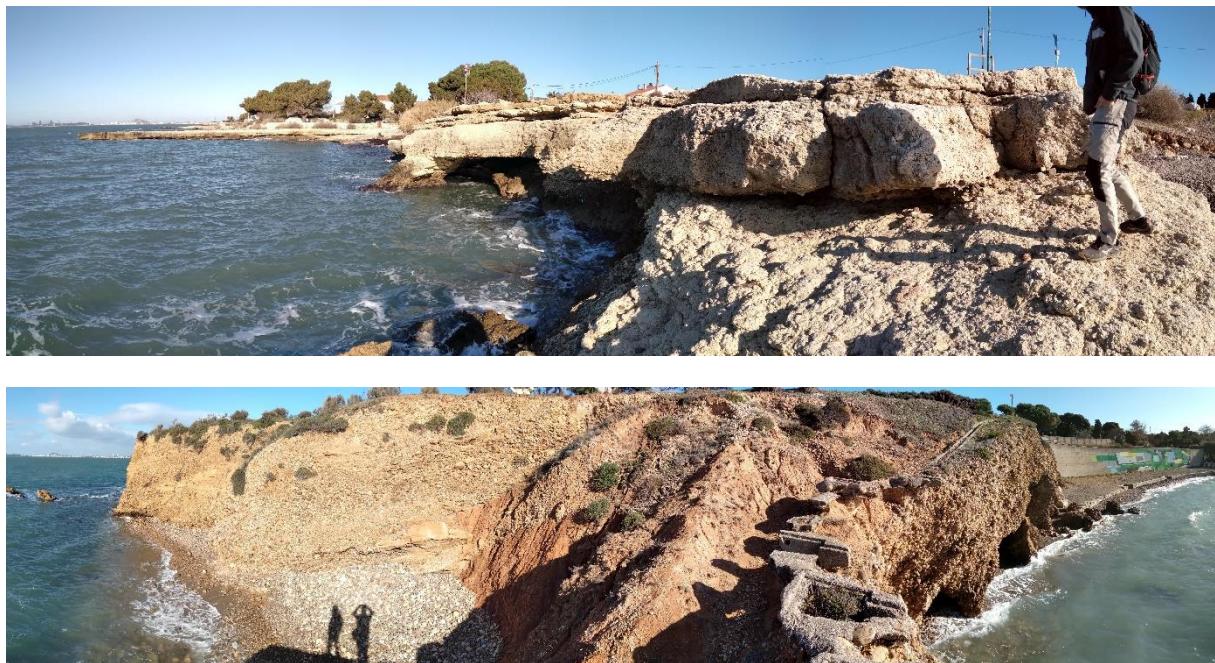


Figure 5 : En haut, microfalaises (escarpements) miocènes (Bottai, Port-de-Bouc) et en bas, falaises de poudingues et limons rouges crétacés (Collège Frédéric Mistral, Port-de-Bouc) (©BRGM, 2023)

Plus au sud, au niveau du Collège Frédéric Mistral (commune de Port-de-Bouc), la nature des roches et l'altitude de la falaise changent, passant à des poudingues interstratifiés avec des limons argileux rouges (d'âge crétacé supérieur) où l'action de la mer continue de créer des sous-cavages locaux, accompagnés de traces d'érosion subaériennes (ravinements) en tête de falaises (Figure 5).

Une côte basse rocheuse crétacée se poursuit et affleure depuis le Fort-de-Bouc jusqu'à la Couronne (Martigues), où les platiers rocheux sont tantôt recouverts d'un faible film de sédiments marins actuels composés de sables et graviers, voire de galets (souvent anguleux), tantôt décapés par la mer (Figure 6).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône



Figure 6 : En haut, platier rocheux avec dépôts de sables et graviers, et laisses de haute-mer (Fort-de-Bouc, Martigues) ; en bas, platier rocheux balayé par la mer (Phare de Cap Couronne, Martigues) (©BRGM, 2023)

Depuis Caro (sur la commune de Martigues) et en prolongeant vers l'est vers Sausset-les-Pins et Carry-le-Rouet, les falaises de 5 à 40 m maximum d'altitude (Côte bleue), sont composées d'une alternance de calcarénites (calcaires coquilliers) et de marnes limoneuses d'âge miocène.



Figure 7 : En haut, falaise à multi-lithologies miocènes avec des marnes tendres dans la limite d'action des vagues ; en bas, même type de falaise mais avec un niveau important de marnes (1/3 de la hauteur environ) créant des glissements et des surplombs (©BRGM, 2023)

Cette alternance de lithologies meubles et plus résistantes à l'érosion, crée des sous-cavages et surplombs plus ou moins importants en fonction :

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

- De la position de la couche meuble par rapport au niveau de la mer,
- De l'épaisseur de la couche meuble (Figure 7).

A l'extrême est du littoral de la commune de Carry-le-Rouet, les falaises sont constituées d'une alternance de séries détritiques continentales (poudingues et limons argileux rouges du Rouet, à l'est de Barqueroute). A l'est du Port du Rouet, les séries rouges oligocènes sont plus marneuses et situées dans la limite d'action des vagues, en proie à une érosion marine très active (Figure 8).

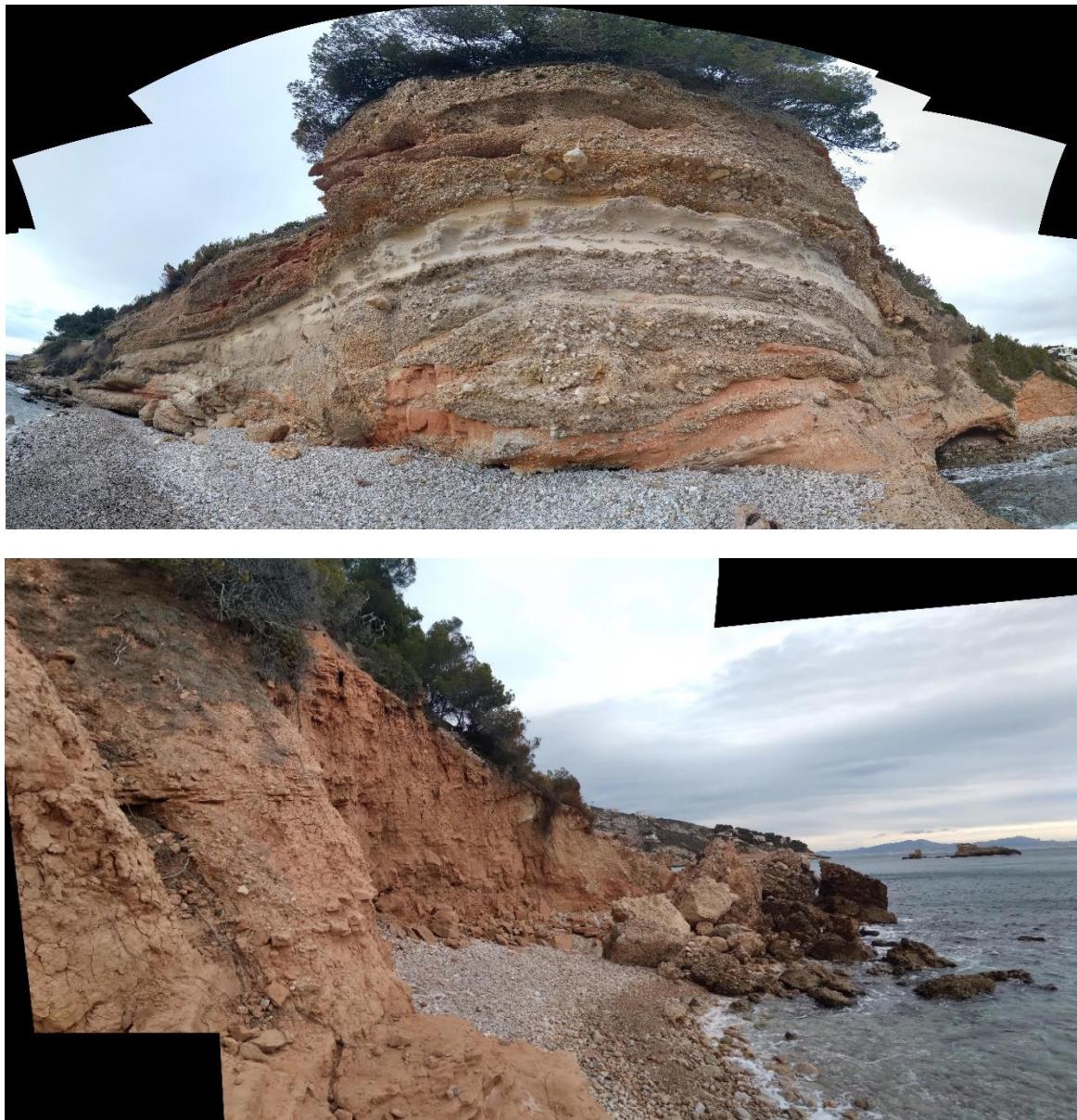


Figure 8 : En haut, falaise verticale de sédiments détritiques oligocènes (poudingues et limons argileux rouges, à l'est de Barqueroute) ; En bas, séries marno-limoneuses rouges oligocènes en érosion marine active (sous le promontoire de la chapelle du Rouet) (©BRGM, 2023)

A l'Est du Port d'Ensuès et jusqu'à l'Estaque (commune de Marseille), hormis quelques passages de brèches et sédiments massifs oligo-miocènes, la côte rocheuse prend un caractère plus massif avec la présence des calcaires de l'Urgonien (Crétacé inférieur) et du Jurassique supérieur.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Le massif calcaire jurassique supérieur à crétacé de la Nerthe au niveau des communes d'Ensuès-la-Redonne et Le Rove, culmine autour des 200 m NGF dans un système complexe de multi-escarpements rocheux, chahuté par le passage de la voie ferrée Marseille-Fos, dont les déblais ont été déposés à flanc de versant, créant par endroits des désordres (Figure 9).

Malgré un caractère massif des calcaires, d'importants sous-cavages sont observables au niveau de la mer (Figure 9 en bas).



Figure 9 : En haut, Vue ©GoogleEarth des calanques d'Ensuès-la-Redonne (Île de l'Erevine) et Le Rove (Presqu'île du Moulon) (Image©2024Airbus) et en bas, panorama au niveau de la calanque de Niolon (Le Rove) (©BRGM, 2023)

Une bonne partie de la commune de Marseille se situe dans le bassin d'âge oligocène composé d'une alternance de conglomérats (poudingues), limons et argiles rouges, entrecoupés par le retour de calcaires massifs du Jurassique supérieur et Crétacé (Secteurs d'Endoume et de la Corniche).

Comme sur Carry-le-Rouet, les sédiments oligocènes forment des falaises de 5 à 15 m de hauteur, rouges caractéristiques observables au niveau du Pharo. Les falaises au sud de la Pointe Rouge sont, d'après la carte géologique du BRGM, au 1/50 000, plus jeunes, d'âge quaternaire et notées comme étant des cônes de déjection wurmiens.

Cependant, les falaises du Pharo comme celles du sud de la Pointe Rouge, présentent des niveaux meubles de limons plus ou moins argileux rouges, qui créent des sous-cavages pouvant aboutir à des effondrements (Figure 10).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

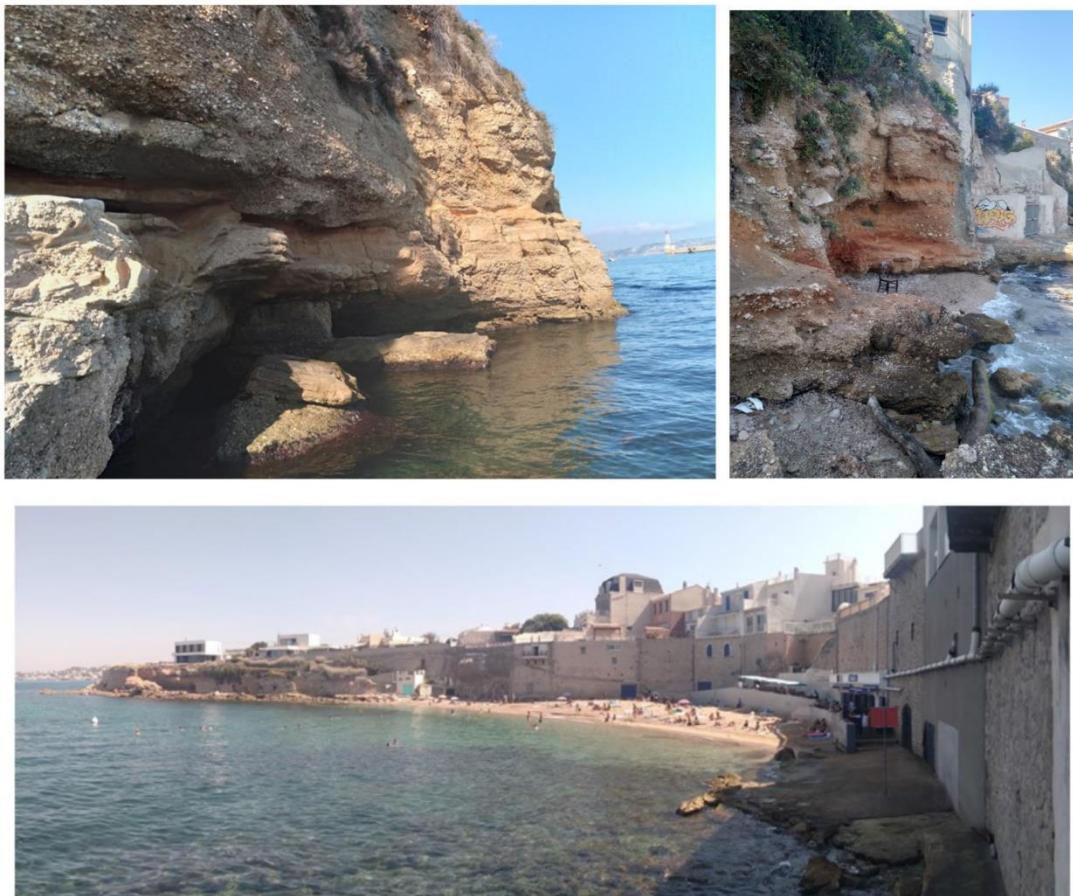


Figure 10 : En haut à gauche, falaise de poudingues et limons rouges oligocènes du Pharo ; En haut à droite, poudingues bréchiques et limons plus ou moins argileux rouges de la Pointe Rouge et en bas, panorama de la plage adossée à la falaise de Würm, de l'anse de sablettes et la Pointe de Montredon (©BRGM, 2023)

Après le Mont-Rose, les calcaires massifs du Crétacé inférieur et du jurassique supérieur, arment le littoral, créant des versants avec des pentes des plus variées.

Du multi-escarpements aux platiers en passage par des versants réglés (avec des pentes inférieures ou égales à 45°) jusqu'à la commune de Cassis. La Figure 13 montre l'ensemble des variations morphologiques du massif des Calanques, depuis la côte de l'île de Calsereigne ou Plane à platiers rocheux et à microfalaises et falaises aux versants abruptes.

La commune de Cassis termine le massif des Calanques où débutent des versants très différents d'un point de vue géologique. Des niveaux de marnes grises du Crétacé inférieur à supérieur, offrent des versants de 45° à plus, soumis à l'érosion subaérienne comme marine, coiffés par des crêtes de carbonates, telles que la falaise des Lombards (40 m NGF) ou encore sa très grande sœur : la falaise du Cap Canaille et ses 400 m NGF.



Figure 11 : En haut, la falaise des Lombards ; en bas, la falaise du Cap Canaille (©BRGM, 2023)

Cette falaise se prolonge jusqu'aux poudingues massifs et très résistant du Bec de l'Aigle (100 m NGF) derrière lequel s'ouvre la baie de La Ciotat.

Après un platier rocheux, le fond de cette baie est constitué de falaises de calcaires marneux en alternance avec des niveaux marneux plus épais. Leurs hauteurs varient de 5 à 10 m NGF jusqu'à 40 m et forment un plateau où se situe la corniche et le quartier du Liouquet (Figure 12).



Figure 12 : En haut à gauche, falaise du Bec de l'aigle versant coté baie de La-Ciotat ; en haut à droite, carte postale ancienne (©Delcampe.net) du Bec de l'aigle et en bas, falaise du Liouquet très marneuse (©BRGM, 2023)

La Figure 13 montre les variations morphologiques pour un même type de roche, où les calcaires de l'Urgonien (des calanques) peuvent présenter à la fois des versants à multi-escarpements, des falaises verticales ou des platiers rocheux (comme l'Île Calseraigne ou Plane).



Figure 13 : Panorama du massif des Calanques au cap Canaille et de l'Île Calseraigne (Images ©GoogleEarth)

Ces grands contrastes morphologiques et géologiques, à l'échelle du département, nécessitent de réaliser une classification typologique qui permette de définir leurs comportements à l'égard des processus d'érosion, et de définir des linéaires homogènes, afin d'en évaluer le recul potentiel.

5. Contexte climatique et scénarios d'élévation du niveau de la mer à +30 ans et +100 ans

Les agents météo-marins sont responsables de sollicitations mécaniques ou chimiques déterminant l'évolution du littoral. Un rapide exposé des caractéristiques des principaux agents dynamiques présents sur le littoral des Bouches-du-Rhône est proposé dans ce chapitre.

5.1. EUSTATISME ET MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

5.1.1. Données de projection du niveau de la mer

Ce paragraphe a pour objet de présenter les scénarios de projection de niveau de la mer local aux échéances +30 et +100 ans, pour la zone d'étude des Bouches-du-Rhône.

Le document de recommandations pour les projections de recul du trait de côte à l'échelle nationale (BRGM-CEREMA, 2022) propose des valeurs minimales d'élévation du niveau de la mer pour les deux échéances concernées, sur la base de l'année de référence 2022 (Tableau 1).

	médian	sécuritaire
+ 30 ans (2052)	0.20	0.20
+ 100 ans (2122)	0.60	1.00

Tableau 1 : Elévation du niveau de la mer en m aux horizons 2052 et 2122.

Valeurs minimales à prendre en compte pour les projections de recul du trait de côte Source : Collectif BRGM-CEREMA, 2022.

Cependant, ces données de projections locales du niveau de la mer, disponibles à l'échelle nationale, doivent être ajustées à la zone d'étude. Ces valeurs nationales sont déclinées à l'échelle de la façade méditerranéenne française et présentées dans le Tableau 1.

Le secteur d'étude est situé entre les marégraphes de Marseille et de Toulon qui sont utilisés par le GIEC pour produire des projections du niveau de la mer (IPCC AR6 Sea Level Projections, Garner et al., 2021).

Ces données du GIEC sont mises à disposition via la plateforme (Figure 14 <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

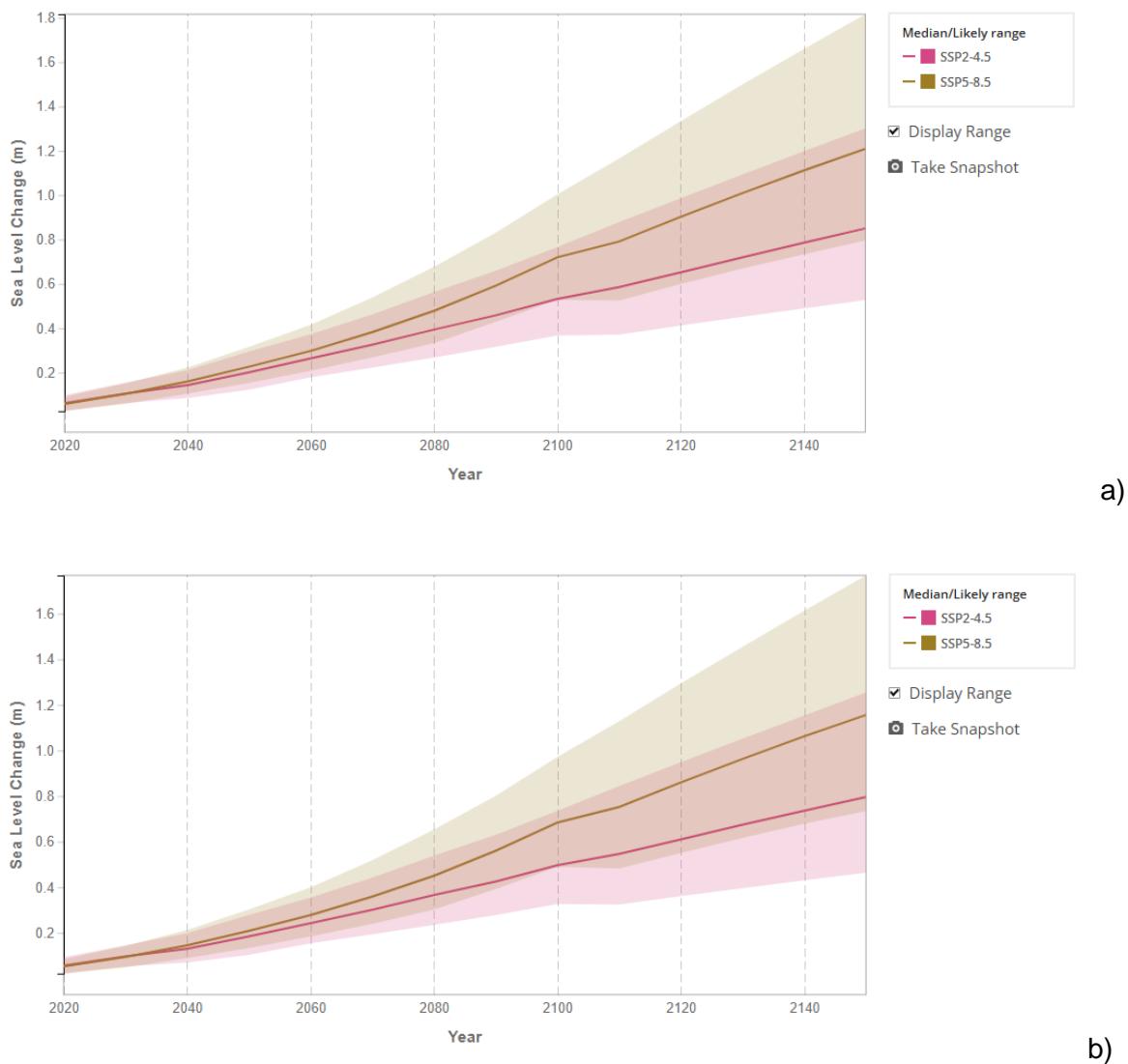


Figure 14 : Projection du niveau de la mer pour les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 du GIEC pour les marégraphes de Marseille (a) et Toulon (b). Source : <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>.

5.1.2. Analyse des mouvements locaux du sol

Les données du GIEC détaillent les différentes composantes prises en compte pour les projections et l'évaluation de leurs incertitudes (Kopp et al., 2023). Parmi ces composantes, il est recommandé d'effectuer une analyse locale des valeurs de mouvements verticaux du sol.

- Pour Marseille, le GIEC estime un mouvement de surrection de 1 mm par an entre 2050 et 2100 et de 2 mm en 2150.
- Pour Toulon, le GIEC estime un mouvement de surrection de 2 mm par an entre 2050, 5mm en 2100 et de 8 mm en 2150.

Ces valeurs de mouvements locaux du sol utilisées par Kopp et al. (2023) atténuent légèrement la montée du niveau de la mer sur la zone d'étude. Or ces valeurs de surrections ne sont pas confirmées par des données locales du réseau GNSS ou par une étude spécifique qui montrerait de telles tendances lors des prochaines décennies.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

La récente étude de Vecchio et al. (2023) montre au contraire une tendance du secteur à la subsidence. La connaissance de la tectonique du bassin oligocène de Marseille, confirme cette tendance à la subsidence pour le bassin de Marseille. Cependant le suivi de l'IGN au niveau du marégraphe de Marseille montrerait que son substratum rocheux est resté stable (https://geodesie.ign.fr/index.php?page=maregraphe_de_marseille).

En l'absence d'études et de données complémentaires et spécifiques au secteur, le BRGM recommande de ne pas utiliser les composantes de mouvements locaux du sol fournies par le GIEC pour les projections de niveau de la mer aux marégraphes de Marseille et Toulon.

L'intégration de ces composantes réduisent par effet « surrection » l'estimation de la montée du niveau de la mer, ce qui augmentent l'incertitude finale sur la projection.

5.1.3. Proposition de valeurs régionales pour l'élévation du niveau de la mer

Les valeurs de projection de l'élévation du niveau de la mer préconisées localement sont celles cartographiées sur le site « sealevelrise » (Tableau 2 & Tableau 3; <https://sealevelrise.brgrm.fr/sea-level-scenarios/>).

SSP2-4.5	Marseille			Toulon		
	SLR (m)	Q17	Q50	Q83	Q17	Q50
2054	0,17	0,25	0,35	0,18	0,26	0,36
2124	0,48	0,73	1,09	0,50	0,76	1,12

Tableau 2 : Elévations du niveau de la mer (en m) projeté à Marseille et Toulon pour le scénario GIEC SSP2-4.5 aux échéances 2054 et 2124. Les valeurs médianes sont fournies (Q50) ainsi que l'intervalle des incertitudes (Q17-Q83)

SSP5-8.5	Marseille			Toulon		
	SLR (m)	Q17	Q50	Q83	Q17	Q50
2054	0,20	0,28	0,38	0,21	0,29	0,39
2124	0,68	1,00	1,46	0,71	1,04	1,50

Tableau 3 : Elévations du niveau de la mer (en m) projeté à Marseille et Toulon pour le scénario GIEC SSP5-8.5 aux échéances 2054 et 2124. Les valeurs médianes sont fournies (Q50) ainsi que l'intervalle des incertitudes (Q17-Q83)

Ces projections montrent des valeurs plus fortes de quelques centimètres pour Toulon que pour Marseille. De plus, les valeurs médianes sont systématiquement supérieures aux recommandations générales (Tableau 3) de quelques centimètres.

Pour travailler sur l'effet de la montée du niveau de la mer sur les côtes rocheuses des Bouches-du-Rhône dans le cadre de cette étude, les valeurs choisies sont les médianes projetées pour le port de Toulon :

- Scénario médian : 0,26 m en 2054 et 0,76 m en 2124
- Scénario sécuritaire : 0,29 m en 2054 et 1,04 m en 2124

5.1.4. Altitude du niveau moyen de la mer et projections

Les cotes du zéro hydrographique et des niveaux caractéristiques de la marée sont fournies dans l'ouvrage de référence du SHOM (RAM, 2022).

Selon ce document, l'altitude du niveau moyen de la mer de Toulon (0,167 m IGN69) est supérieure de quelque mm à celle de Marseille (0,161 m), ce qui valide bien le choix sécuritaire de Toulon comme port de référence pour l'étude des niveaux de la mer.

L'altitude du niveau des plus hautes mers astronomiques (PHMA) qui marque l'altitude de référence du trait de côte est de 0,387 m (IGN69).

Le niveau moyen de la mer référencé dans le document RAM correspond à une valeur qui apparaît représentative de la période de référence utilisée pour les projections de niveau de la mer du GIEC (par rapport à la période 1995-2014). Les valeurs de projections du niveau de la mer du GIEC peuvent donc être référencées par rapport aux altitudes du document RAM (2022) (Tableau 4).

Scénario	médian		sécuritaire		
	Altitude (IGN69)	NM	PHMA	NM	PHMA
30 ans (2054)	0,43		0,65	0,45	0,67
100 ans (2124)	0,93		1,15	1,20	1,42

Tableau 4 : Altitudes des niveaux marins de référence (Niveau Moyen et Plus Haute Mer Astronomiques) pour le secteur d'étude des Bouches-du-Rhône aux échéances +30 et +100 ans, selon 2 scénarios d'élévation du niveau des mers

Les incertitudes sur les scénarios de montée du niveau de la mer ont été estimées par le GIEC. L'intervalle vraisemblable, défini entre les valeurs Q17 et Q83 (voir Tableau 2 et Tableau 3), peut représenter 10 cm d'élévation supplémentaires à 30 ans et entre 36 et 46 cm supplémentaires à l'échéance +100 ans.

En fonction des types de côtes étudiées, des effets de seuils sont à envisager pour l'étude de la position de PHMA entre la valeur médiane (Q50) du scénario médian (+1,15m IGN69, Tableau 4) et la borne supérieure de l'intervalle vraisemblable du scénario sécuritaire (+1.89m IGN69).

5.2. ETATS DE MER

Candhis (<https://candhis.cerema.fr>, géré par le Cerema) correspond à l'observatoire côtier national de mesure des états de mer, qui émet un catalogue des fiches synthétiques de mesure des états de mer pour les houlographes qui sont suivis par l'observatoire.

Trois houlographes sont pertinents pour suivre les états de mer, du secteur des côtes rocheuses des Bouches-du-Rhône. Il s'agit des houlographes de Port-de-Bouc (01302), de Marseille (01304) et du Planier (01305) (Figure 15).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

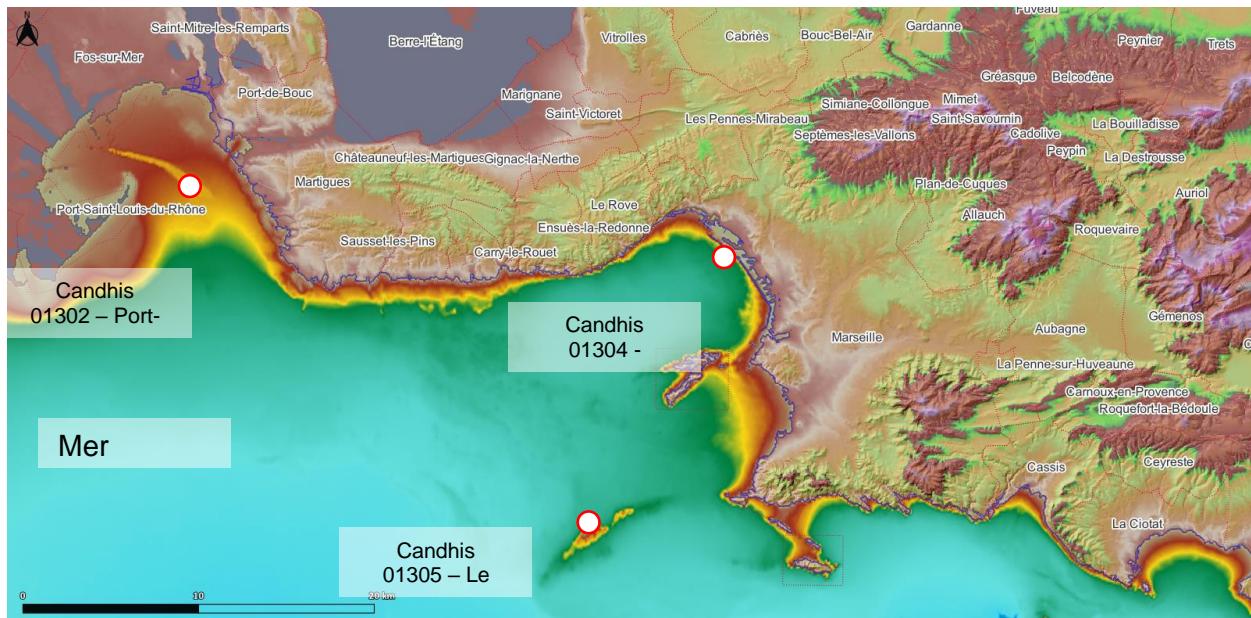


Figure 15 : Houlographes du réseau Candhis du secteur d'étude (fond topographie et bathymétrie du département des Bouches-du-Rhône ; bathymétrie ©SHOM, topographie MNT25m ©IGN)

Les fiches synthétiques par houlographe réunissent une analyse des observations des états de mer, avec la climatologie moyenne, l'analyse des extrêmes et un zoom sur les tempêtes. Les observations utilisées sont disponibles depuis le 1^{er} juillet 2024.

Cette connaissance du régime des états de mer au large et à la côte est importante dans de nombreux domaines et pour ce qui concerne cette étude pour :

- Les risques littoraux,
- L'étude de l'évolution du climat et de son impact sur le littoral,
- La morphodynamique côtière et le suivi du trait de côte.

Les données produites par les houlographes sont issues d'une analyse vague à vague contenant :

- H1/3 : hauteur significative, valeur moyenne du tiers supérieur des hauteurs des vagues observées sur une durée de 30 minutes.
- H1/10 : valeur moyenne du dixième supérieur des hauteurs des vagues observées sur une durée de 30 minutes.
- Hmax : hauteur de la plus grande vague observée sur une période de 30 minutes.
- Tavd : période moyenne des vagues observées sur une durée de 30 minutes définies par passage au niveau moyen par valeurs décroissantes.
- TH1/3 : période significative, définie par la valeur moyenne des périodes du tiers supérieur des plus grandes vagues observées sur une durée de 30 minutes.
- TH1/10 : valeur moyenne des périodes du dixième supérieur des plus grandes vagues observées sur une durée de 30 minutes.
- THmax : période de la vague de la plus grande hauteur observée sur une durée de 30 minutes.

Et l'analyse spectrale contenant :

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

- Hm0 : estimation de la hauteur significative des vagues à partir du moment d'ordre zéro de la densité spectrale.
- T02 : période moyenne calculée en prenant la racine carrée du rapport du moment d'ordre zéro sur le moment d'ordre deux de la densité spectrale.
- TE : période d'énergie définie par le rapport du moment d'ordre moins un sur le moment d'ordre zéro de la densité spectrale.
- Tp : période correspondant au maximum de la densité spectrale.
- Dirp : direction moyenne de provenance des vagues au pic du spectre d'énergie.
- L'angle est compté positivement, suivant le sens des aiguilles d'une montre, entre le nord géographique et la direction de provenance des vagues.
- Etalp : largeur directionnelle, caractérise l'étalement directionnel de l'énergie autour de la direction moyenne au pic (fonction de répartition angulaire de l'énergie associée à la fréquence de pic du spectre d'énergie).

Le houlographe de Port-de-Bouc fournit une série temporelle courte, sur 6 mois de juillet à décembre 2002. Il est situé à l'entrée du Golfe de Fos-sur-Mer, à 1,6 mille de la côte (moins de 3 km), où la profondeur est de 20 mètres (Figure 16).

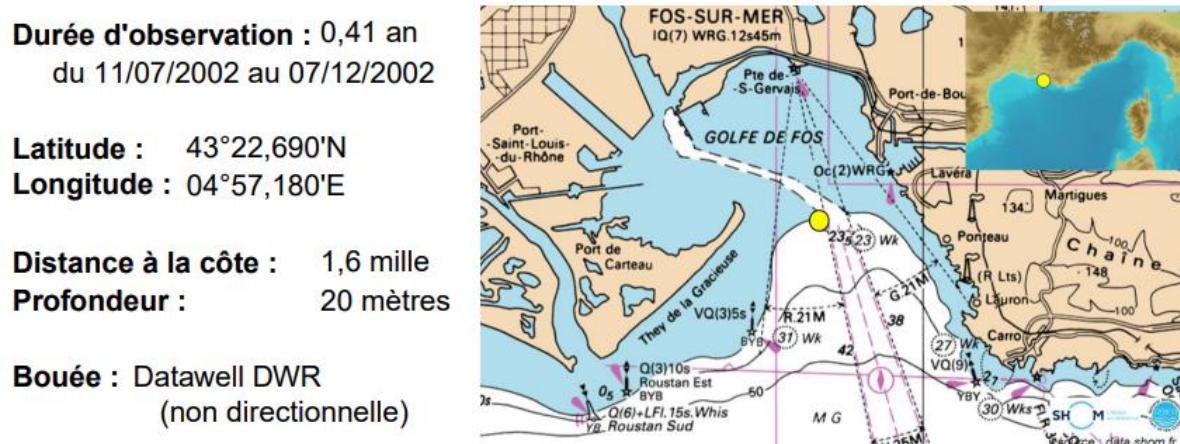


Figure 16 : Localisation du houlographe de Port-de-Bouc (bouée Candhis n°01302 ; Source : <https://candhis.cerema.fr/>)

Il ne fournit pas d'incidences des houles. Sur cette brève période, 85 % des vagues ont une hauteur significative (H_{m0} , moment d'ordre 0 de la densité spectrale des hauteurs des vagues) inférieure à 1,16 m et 50 % inférieure à 1,11 m, pour des périodes comprises majoritairement entre 0,43 et 1,24 s.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

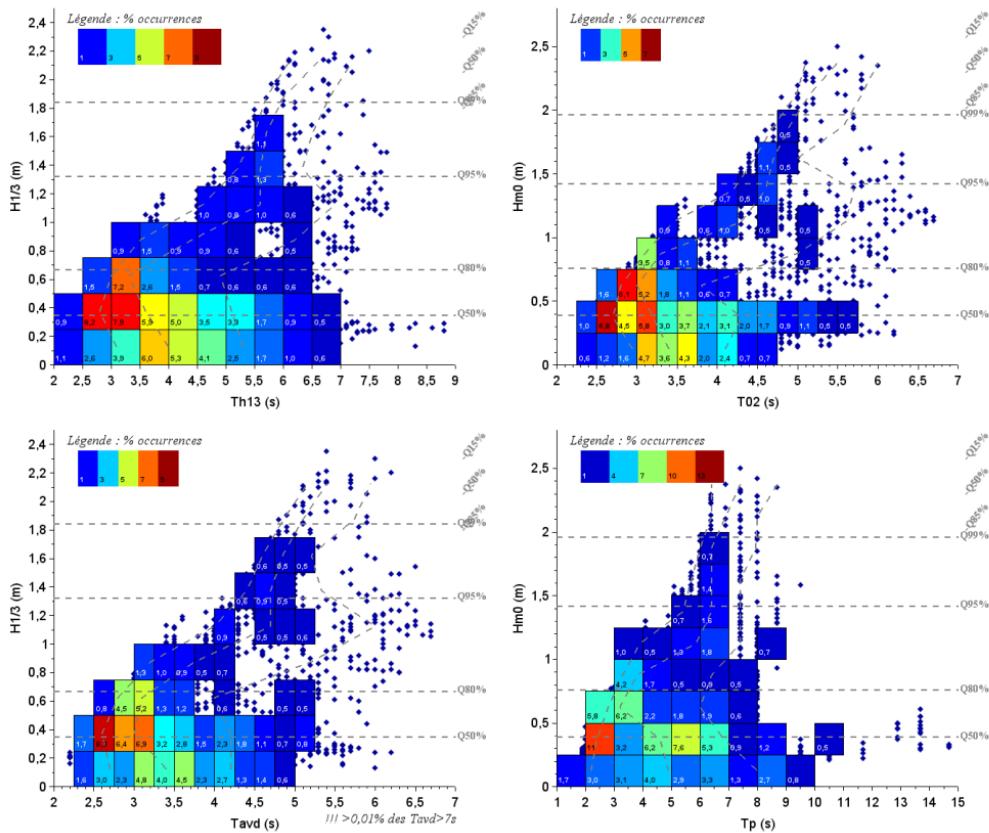


Figure 17 : Analyses statistiques des états de mer mesurés au niveau du houlographe de Port-de-Bouc (bouée Candhis n°01302 ; Source : <https://candhis.cerema.fr/>)

Un évènement extrême est enregistré le 21/11/2002, 16h00, avec une Hmax de 4,47 m pour une période THmax de 6,5 s.

Le houlographe de Marseille fournit une série temporelle plus longue, entre novembre 2004 et avril 2008 (de 3,5 ans) mais avec seulement deux mois d'enregistrés en 2006 (janvier et février). Il est situé sur le brise-lame du port de Marseille, à 0,3 milles de la côte (moins de 0,6 km), où la profondeur est de 42 mètres (Figure 16 et Figure 18).

Durée d'observation : 2,08 ans
du 18/11/2004 au 28/04/2008

Latitude : 43°19,800'N
Longitude : 05°20,200'E

Distance à la côte : 0,3 mille
Profondeur : 42 mètres

Bouée : Datawell DWR MKIII
(directionnelle)

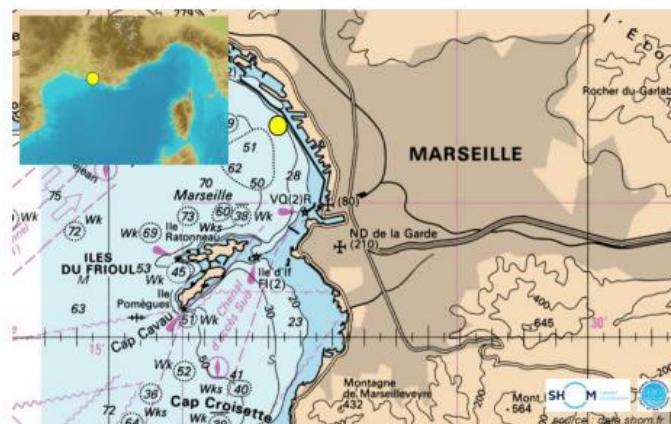


Figure 18 : Localisation du houlographe de Marseille (bouée Candhis n°01304 ; Source : <https://candhis.cerema.fr/>)

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Le houlographe de Marseille fait état d'une climatologie moyenne des houles avec des incidences ouest-sud-ouest, ouest et sud-ouest en très grand majorité, dont 85 % des vagues ont une hauteur significative (H_{m0} , moment d'ordre 0 de la densité spectrale des hauteurs des vagues) inférieure à 1,13 m et 50 % inférieure à 1,09 m, pour des périodes comprises majoritairement entre 0,6 et 3,32 s (Figure 19 et Figure 20).

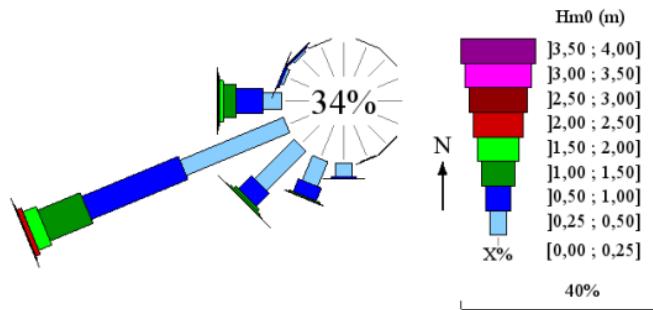


Figure 19 : Rose des houles : direction de provenance au pic (bouée Candhis n°01304 ; Source : <https://candhis.cerema.fr/>)

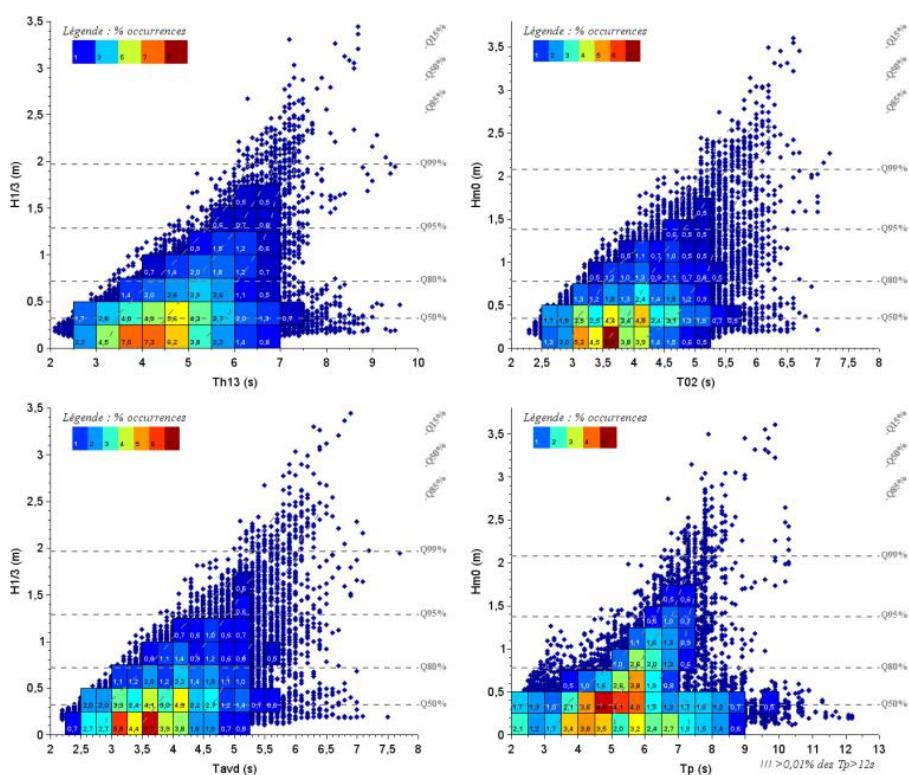


Figure 20 : Analyses statistiques des états de mer mesurés au houlographe de Marseille (bouée Candhis n°01304 ; Source : <https://candhis.cerema.fr/>)

Parmi les événements extrêmes enregistrés au niveau de cet houlographe, celui du 02/12/2005, 20h00, avait une H_{max} de 5,21 m pour une période T_{Hmax} de 9 s.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

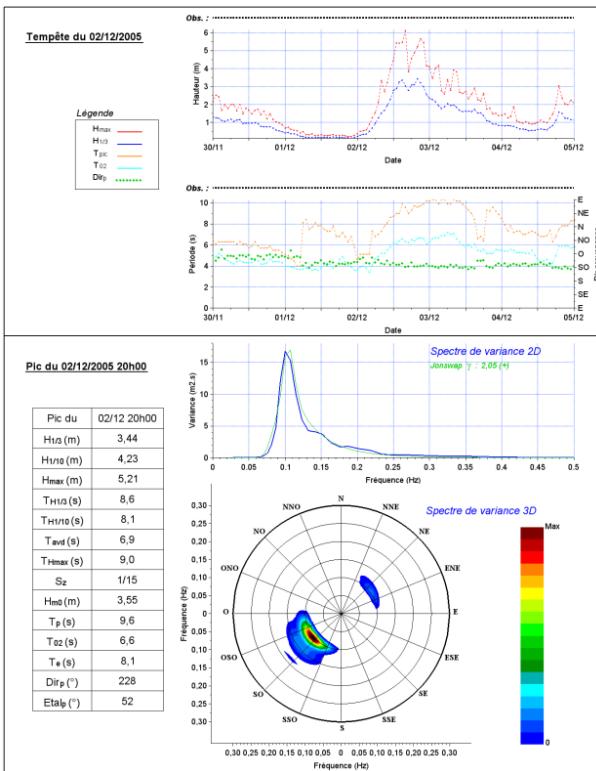


Figure 21 : Tempête du 02/12/2005, 20h00 enregistrée (bouée Candhis n°01304 ; Source : <https://candhis.cerema.fr/>)

Enfin, le houlographe du phare du Planier fournit la série temporelle la plus longue, entre janvier 2011 et décembre 2021 (presque 10 ans) avec deux trous dans la série de mesures : l'un des trois premiers mois de 2016 et l'autre de six mois de juin à novembre inclus de 2018. Il est situé en pleine mer au phare du Planier, à 4,6 milles de la côte (8,5 km), où la profondeur est de 70 mètres (Figure 16 et Figure 22).

Durée d'observation : 11,84 ans
du 18/01/2011 au 30/06/2024

Latitude : 43°12,500'N

Longitude : 05°13,800'E

Distance à la côte : 4,6 milles

Profondeur : 70 mètres

Bouée : Datawell DWR MKIII
(directionnelle)

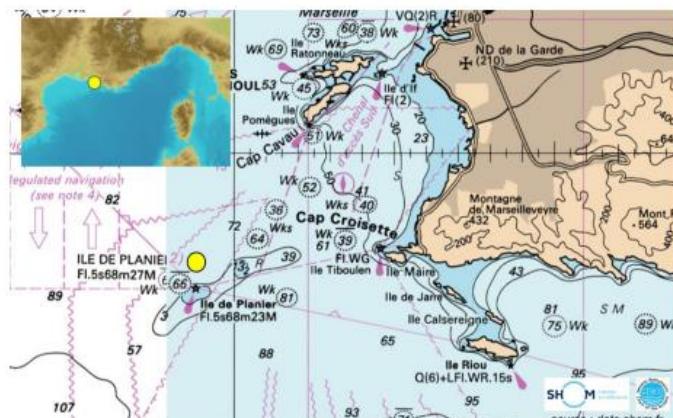


Figure 22 : Localisation du houlographe du Planier (bouée Candhis n°01305 ; Source : <https://candhis.cerema.fr/>)

Le houlographe du Planier fait état d'une climatologie moyenne des houles avec des incidences ouest, ouest-sud-ouest, ouest, sud-ouest à sud mais aussi sud-est en très grand majorité, dont 85 % des vagues ont une hauteur significative (H_{m0} , moment d'ordre 0 de la densité spectrale des hauteurs des vagues) inférieure à 1,13 m et 50 % inférieure à 1,09 m,

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

pour des périodes comprises majoritairement entre 0,61 et 6,91 s (Figure 19, Figure 23 et Figure 24).

Il est intéressant de noter que cet houlographe enregistre des houles avec des incidences venant du nord-ouest, certainement des vagues de vents liés au « Mistral » et donc qu'il est situé dans un secteur où le fetch est assez important.

Il est tout aussi intéressant de noter qu'il enregistre des houles avec des incidences venant du sud-est, liées aux dépressions qui accompagnent le « vent marin ».

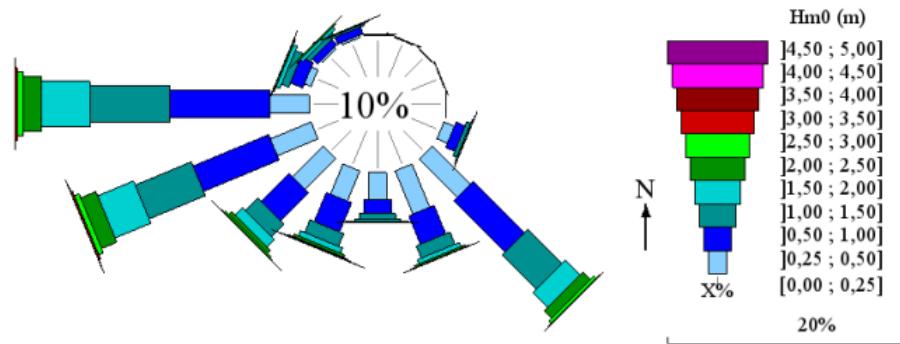


Figure 23 : Rose des houles : direction de provenance au pic (bouée Candhis n°01305 ; Source : <https://candhis.cerema.fr/>)

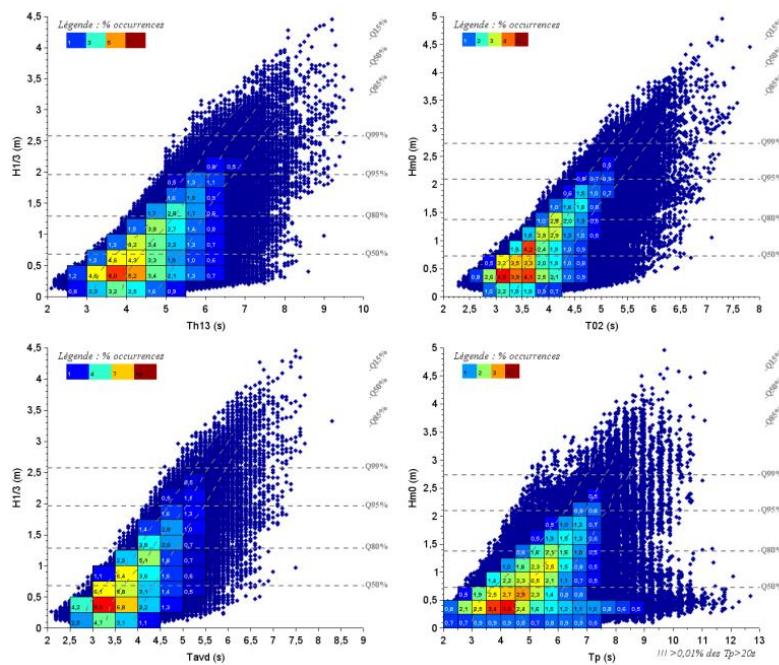


Figure 24 : Analyses statistiques des états de mer mesurés au houlographe du Planier (bouée Candhis n°01305 ; Source : <https://candhis.cerema.fr/>)

Parmi les événements extrêmes enregistrés au niveau de cet houlographe, celui du 04/11/2023, 20h30, avait une H_{max} de 7,20 m pour une période TH_{max} de 8,8 s (Figure 25).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

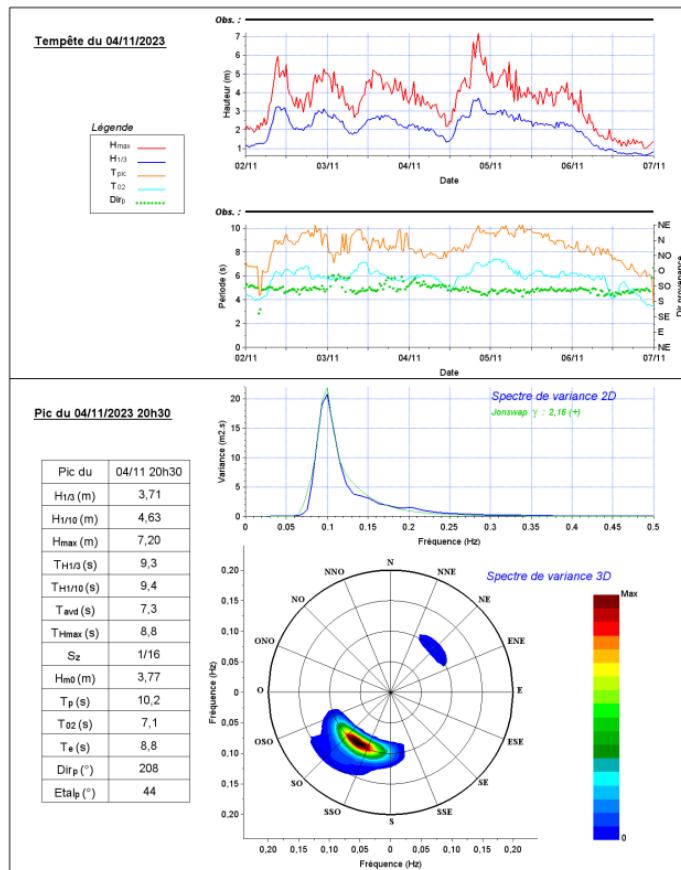


Figure 25 : Tempête du 04/11/2023, 20h30 enregistrée (bouée Candhis n°01305 ; Source : <https://candhis.cerema.fr/>)

5.3. MAREE

Les côtes du sud de la France continentale et les côtes corse sont couvertes par une unique zone de marée. La zone de marée est limitée par les eaux territoriales franco-italiennes (à l'Est, et au Sud aux abords de la Sardaigne) et franco-espagnoles (à l'Ouest). Le port de référence : Toulon (observatoire permanent de marée).

La marée est de type semi-diurne à inégalité diurne. Le secteur d'étude contient deux marégraphes secondaires : celui de Marseille et de Fos-sur-Mer (en fond de golfe du même nom) (SHOM, 2022).

La marée astronomique est faible en Méditerranée, où le marnage maximal mesuré est de (SHOM, 2022) :

- 0,43 m à Marseille,
- 0,47 m à Toulon.

Si les courants de marée sont relativement faibles en Méditerranée pour le secteur d'étude, les dizaines de centimètres de marnage exposent les pieds de falaises. Si ceux-ci sont de surcroit, prédisposés à l'érosion, la marée pourra avoir une action sur la morphologie côtière en :

- Augmentant le temps d'action des processus hydrodynamiques en pieds de falaises ;
- Déblayant les matériaux meubles tombés ou par déflation de ceux-ci sur les parois pour entretenir le processus d'érosion.

5.4. VENTS

Les vents le long du littoral peuvent avoir des directions légèrement différentes depuis la station Cap Couronne à l'ouest, à celle du Bec de l'aigle à l'est, en passant par celle de Marseille-Corniche (Figure 26).



Figure 26 : Stations ©Windfinder avec des statistiques de directions de vents (fond topographie et bathymétrie du département des Bouches-du-Rhône ; Bathymétrie ©SHOM, Topographie MNT25m ©IGN)

A la station de Cap Couronne (Figure 26 ; Commune de Martigues), les vents ont pour statistiques annuelles une orientation moyenne sur la période de décembre 2011 à juin 2022, nord-ouest pour des vitesses moyennes de 12 noeuds. Cette direction occupe 40% de l'année, avec une vitesse comprise entre 7 et 22 noeuds. Le reste de l'année, les vents sont autour de 1 à 7 noeuds. Les vitesses des vents forcent de janvier à mai et d'octobre à décembre, avec des moyennes de 22 à 24 noeuds. La seconde orientation des vents est Est-Sud-Est (Figure 27).

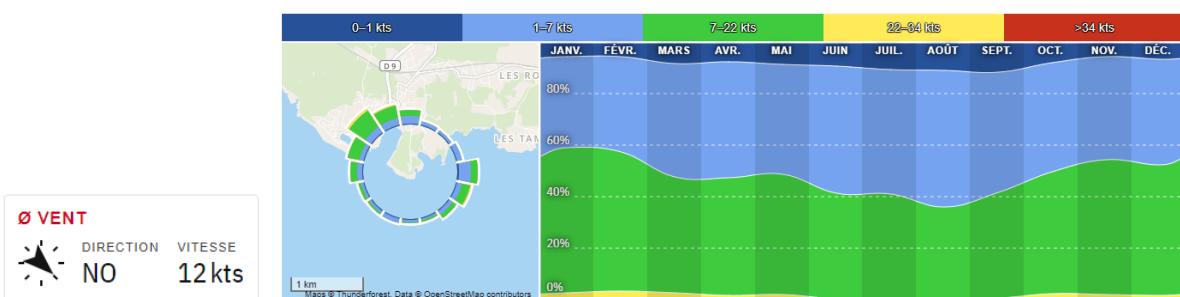


Figure 27 : Statistique des vents à la station Cap Couronne (©Windfinder)

A la station Marseille-Corniche (Figure 26), les vents ont pour statistiques annuelles, une orientation moyenne sur la période d'avril 2012 à octobre 2024, comme pour Cap Couronne, Nord-Ouest pour des vitesses moyennes de 6 noeuds. Cette direction occupe moins de 20%

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

de l'année, avec une vitesse comprise entre 7 et 22 nœuds. Le reste de l'année, les vents sont autour de 1 à 7 nœuds. La seconde orientation est plutôt Sud-Est (Figure 28).

Les vitesses des vents forcissent de janvier à mai et d'octobre à décembre, avec des moyennes de 22 à 24 nœuds.

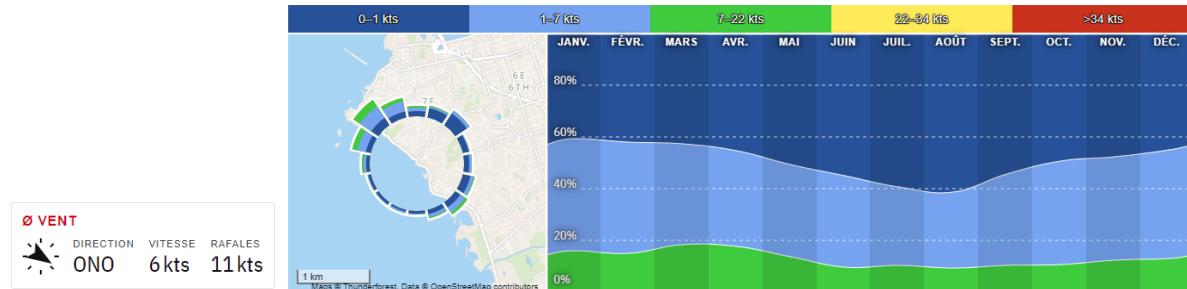


Figure 28 : Statistique des vents à la station Marseille-Corniche (©Windfinder)

A la station du Bec de l'Aigle (Figure 26), les vents ont pour statistiques annuelles, une orientation moyenne sur la période de décembre 2011 à juin 2022, ouest à nord-nord-ouest pour des vitesses moyennes de 13 nœuds.

La direction nord-ouest occupe 10% de l'année, avec une vitesse comprise entre 22 à 34 nœuds. 55% de l'année, les vents sont autour de 22 à 24 nœuds, et le reste de l'année entre 7 et 22 nœuds. Une seconde orientation est aussi enregistrée est-nord-est (Figure 29).

Les vitesses des vents forcissent de janvier à mai et de septembre à décembre, avec des moyennes de 22 à 24 nœuds.

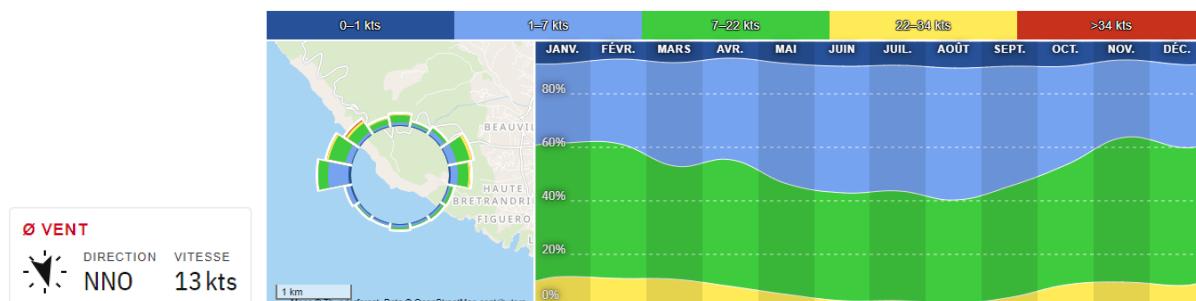


Figure 29 : Statistique des vents à la station Bec de l'Aigle (©Windfinder)

5.5. CONDITIONS METEOROLOGIQUES

Le climat des Bouches-du-Rhône est un climat méditerranéen avec des étés très chauds (entre 19 et 31°C) et secs et des hivers frais (entre 4 et 12°C) sur la période de 1991 – 2020 (Figure 30).

Les températures sont plus froides à l'intérieur du département avec parfois de la neige sur les reliefs au-dessus de 600 mètres. Les températures peuvent avoir une amplitude annuelle importante de 27°C entre janvier et juillet, sur la période 1991-2020 (Figure 30).

Le nombre de jours avec gelée augmente dès que l'on s'éloigne du littoral, et il gèle plus souvent à Aix-en-Provence (58 jours par an) qu'à Rouen ou Paris.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Les précipitations sont assez faibles avec 70 à 80 jours de pluie par an en moyenne mais des pluies intenses et sous forme d'averses brutales à l'automne et sur les reliefs, pour des moyennes pouvant atteindre 500 mm/an à plus, avec 220 mm en moyenne pour septembre/octobre et novembre sur la période 1991-2020 (Figure 30).

Marseille compte moins de 85 jours de pluie par an. L'année 2007 a battu des records à Marignane, avec 272 mm et 48 jours de pluie. En 2008, il est tombé près de 900 mm à Aix-en-Provence en 60 jours soit 46 % de plus que la moyenne.

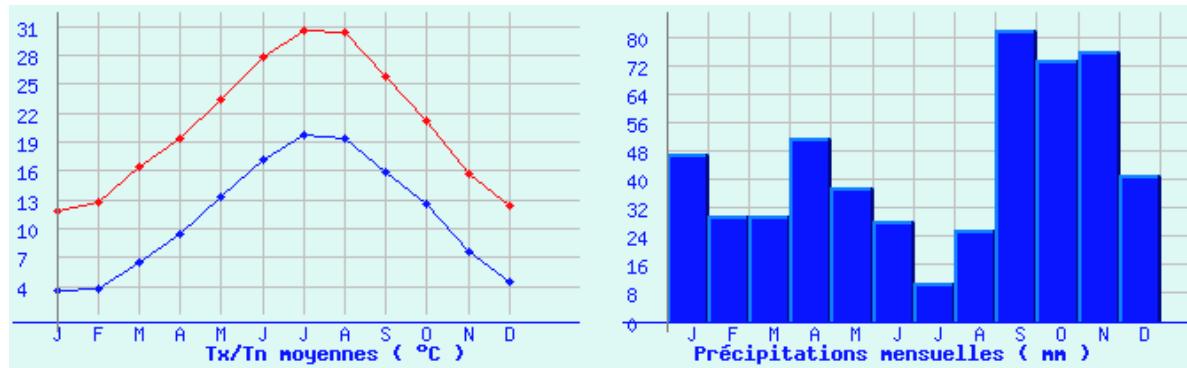


Figure 30 : Températures et précipitations à la station Météo-France de Marignane (Alt. 9m), normales et moyennes 1991-2020

Les vents sont eux aussi violents, notamment le Mistral (NS) et la Tramontane (WNW-ESE), qui soufflent près de 100 jours par an avec des pointes pouvant atteindre plus de 140 km/h (Figure 31).

La partie occidentale est plus ventée car proche de la vallée du Rhône et moins accidentée que la partie orientale.

Les littoraux de la Côte Bleue, des Calanques et de la Baie de la Ciotat sont moins arrosés (environ 600 mm/an) que le reste du département. La baie de la Ciotat est également plus douce en hiver, avec de rares gelées. Sur l'ensemble de la côte, l'amplitude annuelle est moins forte.

	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Année
Temp. max. (°C)	19.9 19/01/2007	22.5 17/02/2022	25.4 28/03/1989	29.6 24/04/1947	34.9 24/05/2009	39.6 28/06/2019	39.7 26/07/1983	39.2 13/08/1922	34.3 05/09/1949	30.4 02/10/1997	25.2 05/11/1924	20.7 30/12/2021	39.7 26/07/1983
Temp. min. (°C)	-12.4 07/01/1985	-16.8 12/02/1956	-10 07/03/1949	-2.4 05/04/1935	0 01/05/1960	5.4 09/06/1932	7.8 04/07/1948	8.1 29/08/1924	1 25/09/1931	-2.2 31/10/1941	-5.8 11/11/1921	-12.8 26/12/1940	-16.8 12/02/1956
Rafale (km/h)	129.6 11/01/1987	133.2 21/02/2002	129.6 27/03/1995	118.8 09/04/2005	129.6 05/05/2019	115.2 09/06/1994	111.6 19/07/1981	162 31/08/1994	136.8 22/09/1993	134.6 31/10/2018	131 13/11/2017	118.8 17/12/2005	162 31/08/1994
RR 24h (mm)	66.6 26/01/2018	80.6 11/02/1960	79.5 30/03/1948	65.7 27/04/1974	63.3 20/05/2012	54.7 08/06/1953	51.6 15/07/1987	85.6 23/08/1984	212.3 18/09/1932	161.3 02/10/1973	95.1 10/11/1923	68.2 01/12/2003	212.3 18/09/1932

Figure 31 : Records de températures, de rafales de vents dans les Bouches-du-Rhône 01/01/1991 au 01/01/2022 (sources : Météociel et Météo-France)

6. Typologie des côtes rocheuses des Bouches-du-Rhône

La classification typologique des côtes rocheuses du littoral des Bouches-du-Rhône permet de faire un état des lieux des morphologies, de leurs géologies au sens large et de leurs modes de réponses à l'érosion. Ce travail s'appuie largement sur les études existantes des falaises du département, produites en particulier par le BRGM, notamment :

- Des études d'appui aux politiques publiques (Marçot, 2006 ; Marçot, 2014 ; Marçot et al., 2016 (Projet VALSE) ; Marçot et Azibi, 2008),
- Des travaux de recherche (Giuliano, 2015 ; Recorbet et al., 2010).

Ce chapitre présente :

- Des éléments de cadrage : typologie décrite dans la littérature, rappel du fonctionnement de l'érosion des falaises et de l'influence des forçages météo-marins ;
- La proposition de classification des falaises littorales des Bouches-du-Rhône et la définition du périmètre de l'étude.

6.1. ELEMENTS DE CADRAGE

6.1.1. Côtes rocheuses ou falaises littorales : classification ou typologie

De nombreux auteurs se sont penché sur les typologies de falaises littorales. Les études référencées dans la littérature sont nombreuses. Deux études sont précurseurs et pertinentes car elles intègrent les problématiques de « l'érosion littorale ». Emery & Kuhn en 1982, suivi par Sunamura en 1983 puis en 1992, résument une bonne partie des différentes configurations (morphologies de falaises) et font le lien entre ces différentes configurations et l'érosion qui les affectent. Malgré le fait que des falaises soient en position littorale, l'érosion qui les affecte, sera de deux types :

- Soit continentale principalement,
- Soit marine,
- Soit encore avec des parts respectives entre continentale et marine.

Le terme de côtes rocheuses ou falaises, littorales désigne une paroi rocheuse soumise à l'action des vagues (Derrau, 1962 ; Garreau et al., 2010). Les paramètres descriptifs des falaises littorales sont :

- Soit morphologiques avec :
 - La hauteur,
 - La présence d'un ou plusieurs escarpements,
 - La pente.
- Soit géologique avec :
 - Le nombre de lithologies (type de roches) qui la composent,
 - La géométrie de ces roches (horizontales, verticales ou inclinées vers la mer ou à contre pendage),
 - La dureté de ces roches en fonction de la zone d'action des vagues,

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

- La proportion de roches dures ou meubles.

En 1982, Emery et Kuhn proposent une classification assez complète qui intègre la morphologie, la géologie (c'est-à-dire la résistance mécanique des roches) et leur associent les phénomènes érosifs marins et continentaux (Figure 32Figure 32).

- Le type A correspond à une falaise avec une géologie homogène, et où, moins la pente sera raide, plus il est considéré que la falaise est plutôt soumise à des facteurs d'évolution continentaux que marins. L'idée est de dire que plus la pente de la falaise est raide et plus la mer entretient cette morphologie.
- Le type B correspond à une géologie résistante en tête et une géologie plus meuble en pied. Le même constat peut être fait que pour le type A mais il est possible d'ajouter le phénomène de sous-cavages et de surplombs, typique de l'activité marine pour une pente abrupte.
- Le type C correspond à l'inverse du type B. La géologie est résistante en pied (dans la limite d'action des vagues). De la même façon, la pente générale de la falaise si elle est verticale, sera plutôt influencée par les agents marins et dans le sens inverse, par des agents subaériens.

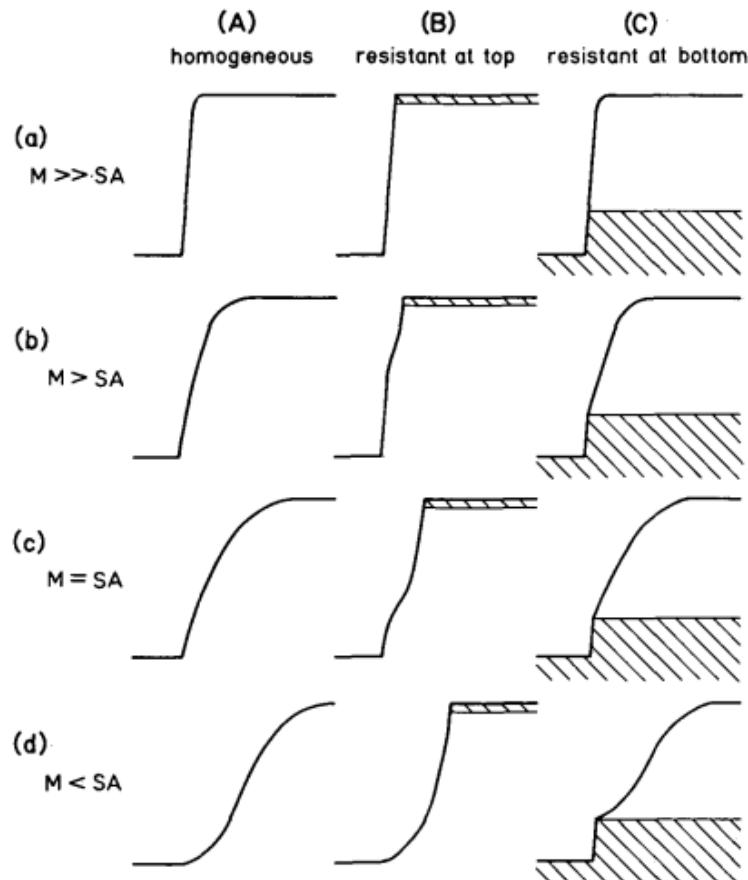


Figure 32 : Matrice des profils de falaises littorales actives attendues selon l'homogénéité en termes d'érodabilité et l'efficacité relative de l'érosion marine (M) par rapport à l'érosion subaérienne (SA). Les lignes diagonales indiquent les lits résistants (Emery et Kuhn, 1982)

Différents types de mouvements gravitaires peuvent être associés aux différentes configurations issues de cette typologie et la position altimétrique entre une lithologie meuble et résistante, ainsi que son inclinaison.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

L'autre typologie importante à cette période est celle de Sunamura (1983) et (1992). L'auteur propose une typologie de trois types de falaises littorales, fonction de l'existence ou pas :

- D'un platier incliné vers la mer en pied de falaise (type A),
- D'un platier horizontal (type B)
- Et enfin sans platier (type C) (Figure 33).

Cette typologie montre que la falaise doit être considérée avec la morphologie qui se situe en amont de l'assaut des vagues, qui ne vont pas avoir les mêmes caractéristiques morphologiques et le même pouvoir « érosif ».

En fonction de la bathymétrie (hauteur d'eau), avec un platier rocheux, les vagues vont perdre en pouvoir « érosif », en ayant plutôt une forme glissante, alors que sans platier rocheux, les vagues peuvent être déferlantes jusqu'à la côte.

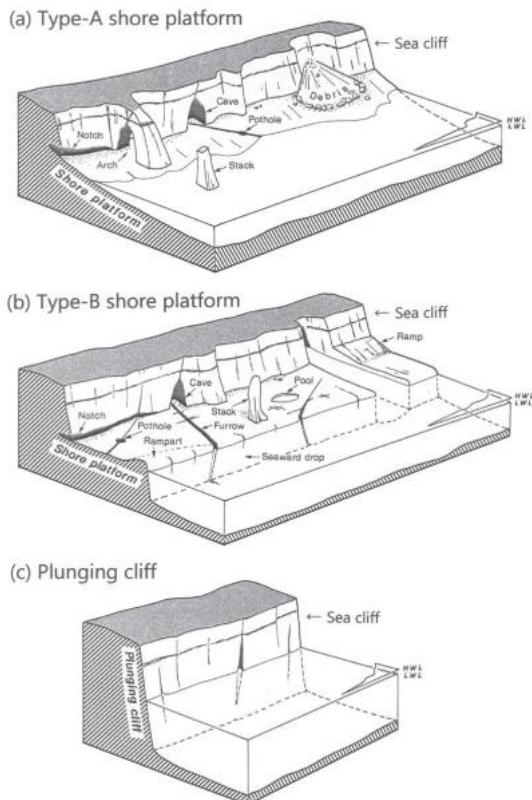


Figure 33 : Les trois morphologies principales de falaises d'après Sunamura (1992) : (a) le Type-A avec un platier ou une plateforme inclinée, (b) le Type-B avec un platier ou plateforme horizontal ou sub-horizontal et (c) la falaise plongeante.

Dans les années 2000, ces deux typologies phares ont été adaptées en fonction des besoins locaux, comme Nunes et al. (2009) par exemple qui introduit plus de complexité dans la structure interne des falaises (Figure 34). La paroi de la falaise est constituée de plusieurs rocheuses.

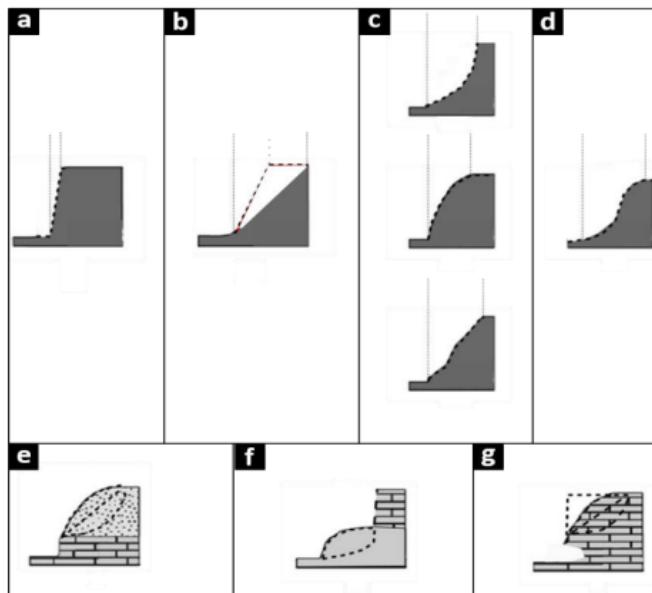


Figure 34 : Typologie du profil des falaises (modifié de Nunes et al., 2009). a, b, c, d - Lithologie homogène. e, f - Lithologies hétérogènes. g - Formation d'une encoche en pied de falaise appelée aussi "notch".

En ce qui concerne les phénomènes gravitaires qui sont associés à une falaise littorale, Prémaillon (2018) évoque le fait qu'il n'existe pas de pente minimale pour considérer un escarpement comme une falaise, mais pour engendrer une dynamique gravitaire (écoulement, chute de blocs, glissement de terrain etc.), la pente de la paroi doit être comprise entre 30° et 45° (équivalent à l'angle de frottement interne de la plupart des matériaux).

6.1.2. Fonctionnement de l'érosion au niveau des falaises littorales

Le fonctionnement de l'érosion au niveau des falaises littorales a été décrit schématiquement comme l'enchaînement d'un cycle en deux étapes :

- Une phase préparatoire à la dégradation,
- Une phase d'effondrement gravitaire (Figure 36).

Ce cycle est contrôlé par des forçages internes liés à :

- La résistance mécanique des matériaux en jeu,
- Le nombre et l'orientation des discontinuités (failles, fractures, schistosité, foliation etc.),
- La porosité liée aux lithologies en présence (grès, calcaire, granite, et leurs degrés d'altération etc.)

Le processus d'érosion est également contrôlé par les forçages externes tels que :

- Les hauteurs d'eau (niveau de mer),
- La pluie,
- Les vagues et la houle,
- Les variations de température,
- Le vent, etc.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

La répétition successive du cycle « d'érosion » ou « érosif » amène théoriquement les profils de pente vers l'équilibre (Emery et Khun, 1982 ; Nunes et al., 2009). La fréquence, l'intensité et la zone d'action des forçages et les morphologies des falaises, vont cependant apporter différents scénarios d'érosion tantôt focalisés en pied, en tête ou sur l'ensemble de la paroi.

Les profils de pentes des falaises sont en constante évolution et reflètent une érosion tantôt occasionnée par les processus subaériens, tantôt par les processus marins. Le recul global des falaises est régi par la combinaison des deux processus (interaction subaérienne et marine d'Emery et Khun, 1982 notamment ; Figure 35).

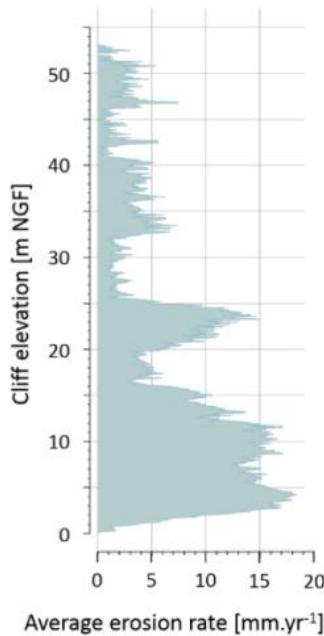


Figure 35 : Vitesse d'érosion moyenne sur des falaises verticales de Carry-le-Rouet, avec des taux d'érosion dépassant 10 mm/an en pied et 5 mm/an en tête (Giuliano (2015) dans Marçot et al., 2014)

L'étude de l'évolution des systèmes côtiers doit donc tenir compte de la dynamique spatiale et temporelle spécifique à chacun des segments du littoral. Par exemple les caps subissent généralement un forçage marin plus intense et concentrent plus d'érosion que les baies (Derrau, 1962 ; Sunamura, 1992).

Les occurrences d'érosion sont donc régies par un processus de type « stochastique » compte tenu de la complexité des variables naturelles (Lee et al., 2001 ; Rosser et al., 2007 ; Regard et al., 2013). Cet aspect justifie le recours aux études multi-temporelles puisque la magnitude du recul des falaises n'est pas continue dans le temps, mais décrit plutôt une succession épisodique et emboîtée de plusieurs cycles d'érosion (Lee et al., 2001). Les faibles reculs (tendance à court terme) peuvent être entrecoupés par des épisodes plus intenses (tendances à long terme).

L'observation doit donc être suffisamment longue afin de distinguer clairement les différentes tendances selon l'expression des phénomènes continus, saisonniers (échelle annuelle), historiques et plus catastrophiques (échelle séculaire à Quaternaire ; Figure 36).

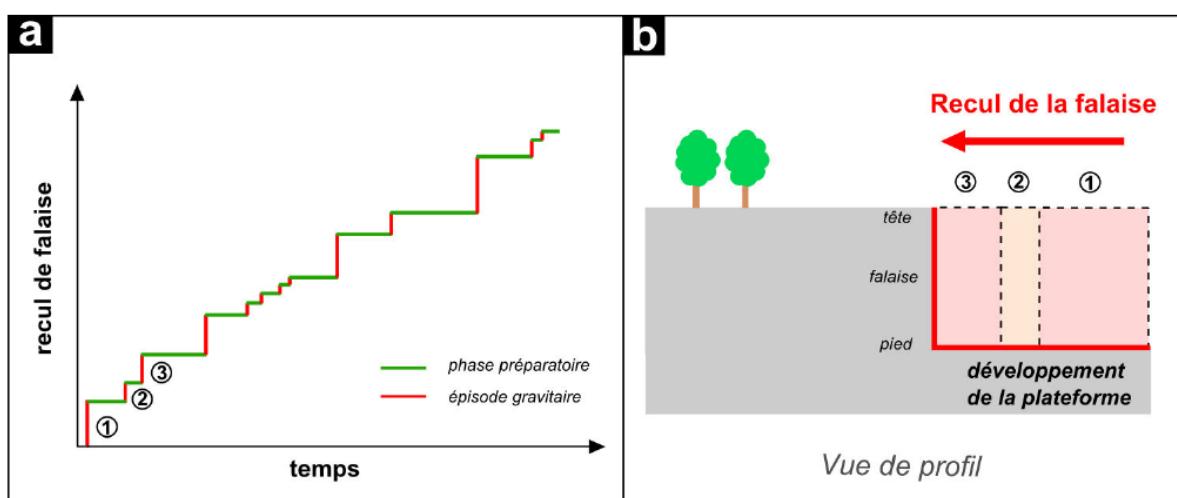
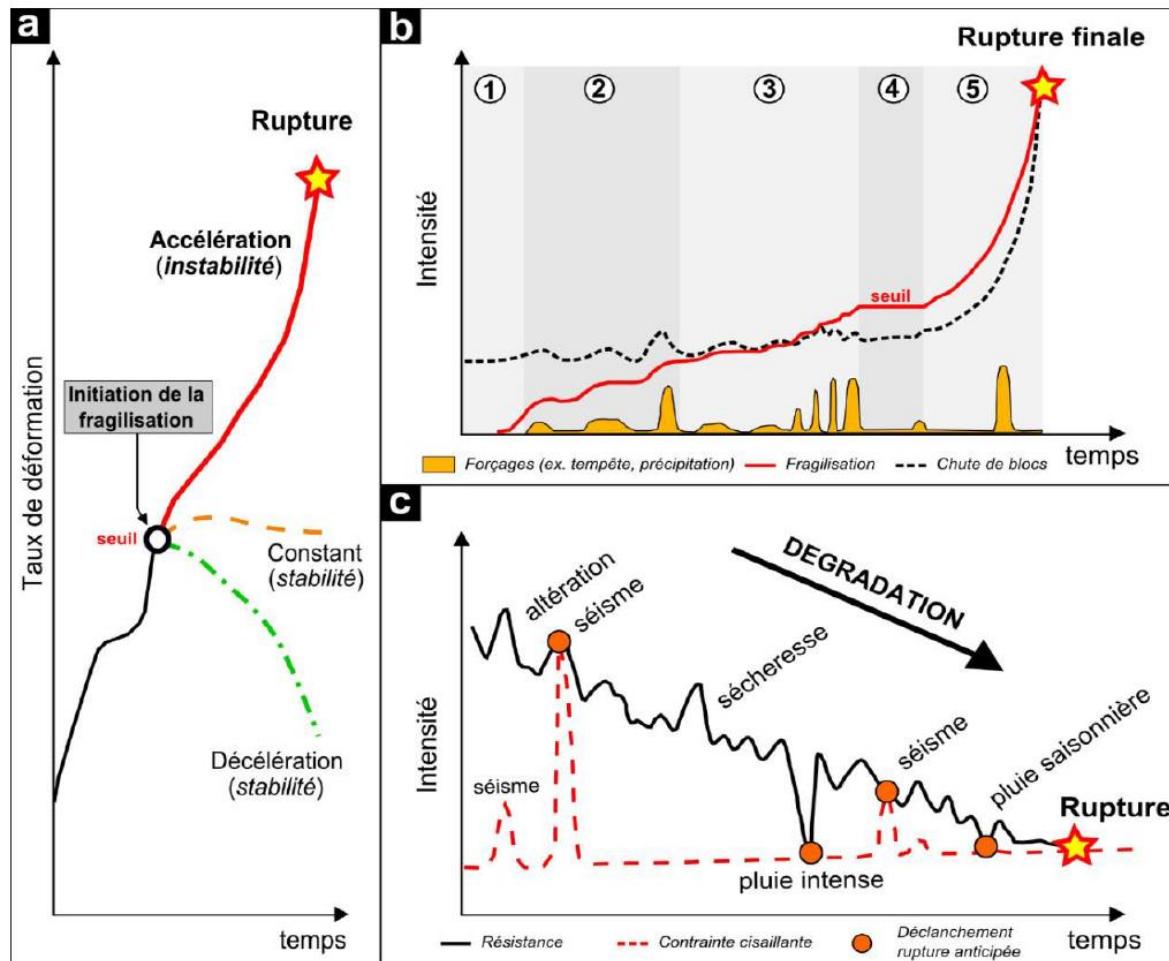


Figure 36 : Modèles conceptuels de diminution de la résistance mécanique d'un massif rocheux, jusqu'à la rupture (en haut) ; Modèles conceptuels du recul des falaises dans le temps. (Extraits de Giuliano et al., 2016)

6.1.3. Forçages météo-marins

Les falaises littorales sont soumises à des forçages météorologiques autant continentaux que marins qui vont induire des phénomènes participant à la diminution de leur résistance mécanique.

Ces forçages météo-marins sont (Figure 37) :

- Les hauteurs d'eau (marée, courant etc.),
- La pluie (pluviométrie continue ou locale, dépression),
- Les vagues et la houle (agitation/état de mer),
- Les variations de température (gel-dégel),
- Le vent, etc.

Les précipitations vont engendrer des phénomènes de dissolution, d'oxydation et d'augmentation de la pression interstitielle, l'eau s'infiltrant dans la porosité intrinsèque des matériaux. L'érosion éolienne va provoquer l'arrachement de particules sur le massif. Tandis que l'amplitude journalière des variations de température en hiver génère des phénomènes cryoclastiques (avec des cycles de gel/dégel dans les fractures) qui aggravent la fracturation dans le massif.

Les forçages marins vont entraîner des actions favorisant l'érosion et l'instabilité du massif comme l'humidification/séchage, l'haloclastie (érosion mécanique liée au sel) et la bio-érosion marine (érosion liée aux organismes vivants).

Enfin, l'impact hydromécanique, correspondant à l'action directe des vagues sur la falaise constitue un forçage important mais encore méconnu (Giuliano, 2015).

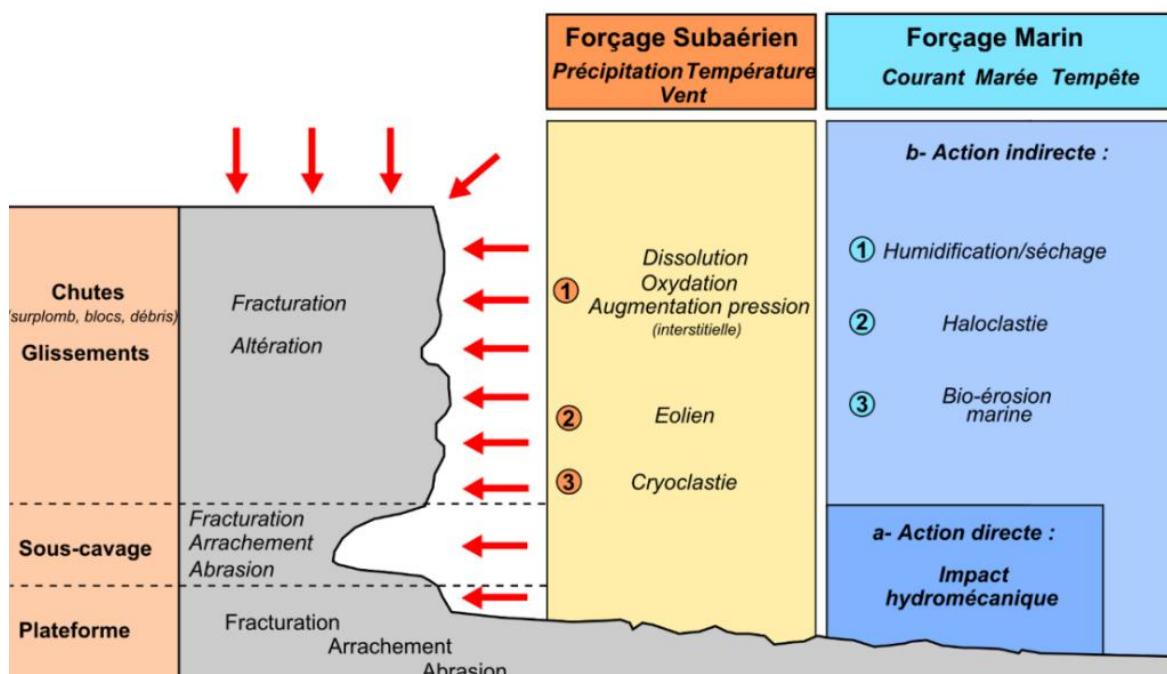


Figure 37 : Schéma conceptuel des différents processus d'altération et d'érosion affectant les falaises littorales soumises aux forçages subaériens et marins (Giuliano, 2015)

6.1.4. Les différents types d'érosion et mouvements de terrain

Un travail important des types de mouvements de terrain et processus d'érosion sur les falaises côtières des Bouches-du-Rhône a été réalisé par Marçot, 2014 (Figure 38).

Les mouvements gravitaires sont principalement :

- Des éboulements et chutes de blocs,
- Des glissements banc sur banc ;

Et sur des lithologies plus meubles :

- Des glissements de terrain
- Du ravinement.

L'érosion marine favorise les mouvements gravitaires notamment via trois phénomènes :

- Le sous-cavage (dû à l'action de la houle et qui creuse de façon progressive le pied de falaise),
- L'érosion différentielle (érosion sélective qui souligne les différences de résistance des roches),
- L'érosion de type « taffoni » (formation de cavité dans la paroi de la falaise liée à l'action du vent et des embruns).

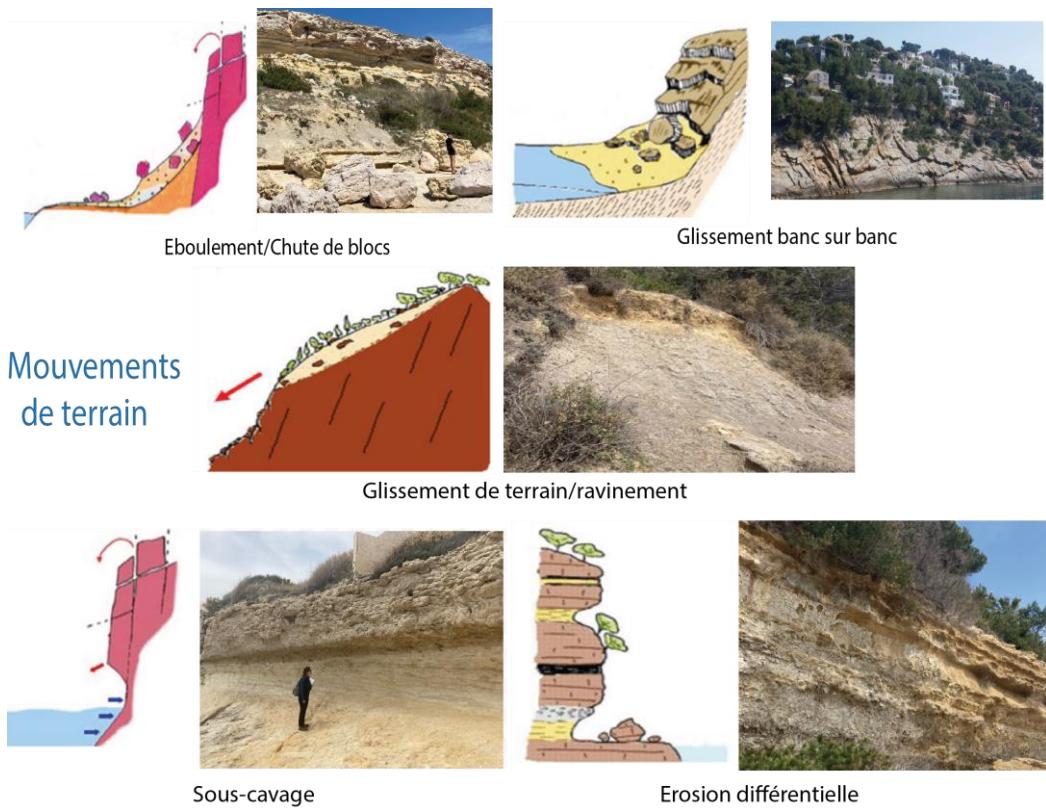


Figure 38 : Les différents types de mouvements de terrain et d'érosion sur les falaises côtières (Marçot, 2014)

6.2. TYPOLOGIE DES COTES DES BOUCHES-DU-RHONE

La complexité et la grande diversité géomorphologique des falaises littorales des Bouches-du-Rhône, exposées précédemment (§ 2.1), nécessite pour la suite de l'étude de réaliser une classification typologique de ces falaises en fonction :

- De la nature des roches qui les composent (calcaires, calcarénites, marnes, limons ou poudingues/conglomérats etc.),
- De la présence de contraste important entre des lithologies meubles et résistantes,
- De la morphologie et des profils de pente (verticale, réglée ou très faible).

Car à ces paramètres intrinsèques ou de prédisposition des falaises vont être associés :

- Des modes de rupture,
- Une typologie de mouvements gravitaires (chute de blocs, de dièdre, glissement rocheux ou meuble etc.),
- Et une intensité de recul ou « Recul unitaire » (cf. supra).

Ainsi pour chaque typologie, un ou plusieurs modes de rupture est défini sur la base des événements connus (de la BD MVT par exemple), des reconnaissances de terrain et de la bibliographie.

De plus, pour chaque type de falaise, un marqueur géomorphologique est défini pour faire office de **Trait de Référence** (TdR, cf § 7).

Remarque : pour cette étude le TdR est utilisé comme indicateur de référence en lieu et place de la notion de trait de côte utilisée dans d'autres études ou d'autres indicateurs tels que le pied de falaise, sommet de falaise, etc. Il est entendu que ce TdR est spécifique au contexte géologique, géomorphologique et dynamique du littoral étudié ici. Il définit le trait à partir duquel le recul est exprimé dans la cartographie.

La coupe géologique simplifiée de la Figure 4 montre clairement que la géologie n'est pas la seule clé pour la réalisation de classement typologique. En effet, les calcaires massifs tels que ceux de l'Urgonien ou du Tithonique, qui arment les collines des Calanques, peuvent présenter des morphologies de faible caractère comme des platiers rocheux ou des versants réglés mais constituent aussi les plus hauts reliefs littoraux.

Sur la centaine de kilomètres de littoral qui séparent le Golfe de Fos de La Ciotat (îles incluses), **15 types de côte ont été définis** : 12 types et sous-types de falaises sont distingués, ainsi que 2 types de côtes rocheuses « basses ». Les plages de poches, talus et versants meubles sont également distingués. La Camargue et sa morphologie deltaïque très distincte à l'Ouest du Golfe de Fos, ont été d'emblée exclus de la classification.

La typologie dérive de classements des morphologies falaises suivant 6 grandes catégories :

1. Morphologies **sans escarpements** :

- T1 : Platiers rocheux & micro-escarpements,
- T2 : Versant réglé ($< 45^\circ$)

2. Morphologies **meubles stricto sensu** :

- T3 : Plage, versant et talus meubles

3. Morphologies **verticales avec un escarpement** :

- T4 : Lithologie unique,
- T5 : Lithologie(s) multiple(s) et bancs épais
- T5bis : Lithologie(s) multiple(s) dont niveau meuble très épais
- T5Ter : Lithologie(s) multiple(s) et bancs fins

4. Morphologies **verticales avec multi-escarpement et lithologie unique**

- T6 : Lithologie unique
- T7 : Lithologie indifférenciée et aval-pendage
- T8 : Lithologie indifférenciée et pendage subvertical

5. Morphologies **verticales avec multi-escarpement et lithologie meuble en tête**

- T9 : Lithologie meuble en tête, indifférencié
- T10 : Lithologie meuble en tête, aval-pendage

6. Morphologies **mixtes**:

- T11 : Lithologie meuble en pied ($< hm$),
- T11bis : Lithologie meuble en pied ($> hm$),
- T12 : À lithologie meuble en tête.

Elles sont résumées et synthétisées dans la Figure 54, et elles sont détaillées dans les lignes qui suivent.

T1 – Platiers et micro-escarpements (<1,5 m). Morphotype « Caro »

Ce type de côte couvre 34.5 km du linéaire littoral. Sa composition géologique est secondaire face à la morphologie caractérisée par une pente nulle à négligeable ou la présence d'un escarpement inférieur à 1,5 m³. Ce type de littoral est essentiellement concerné par la submersion marine voire l'ennoiement et n'est pas considéré dans la présente étude.

³ Ce seuil est défini en considérant l'écart d'altitude attendu entre le niveau marin moyen et la PHMA à horizon 2100 selon le scénario sécuritaire

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

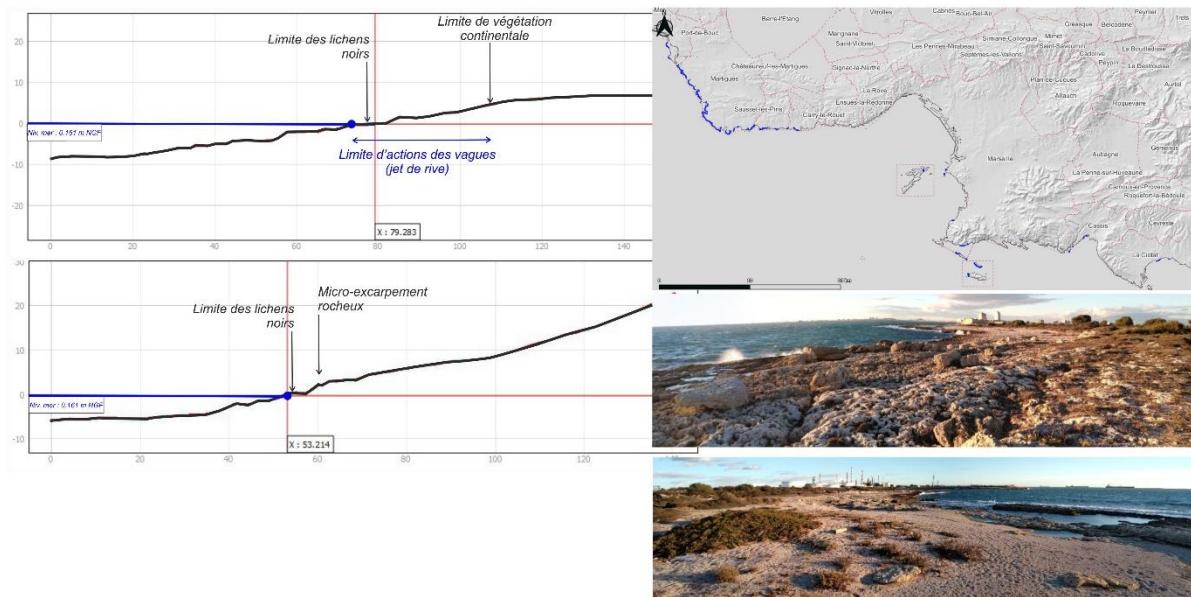


Figure 39 : Typologie 1 type « Caro » : Platiers et micro-escarpements (<1,5 m)

T2 – Côtes rocheuses à profil réglé (<45°). Morphotype « Les Goudes »

Ce type de côte couvre 29.6 km du linéaire littoral. La côte est caractérisée par une pente douce à modérée, globalement inférieure à 45°. Ces morphologies sont emblématiques du secteur de Martigues et notamment de la pointe de Carro.

Ce type de côte est concerné essentiellement par la submersion marine. L'absence d'escarpement rendent inexistant ou très peu probables (phénomènes micro-localisés) les départs rocheux générant un remodelage du profil, déjà à l'équilibre (Figure 40). Ce morphotype n'a donc pas été analysé dans le cadre de cette étude.

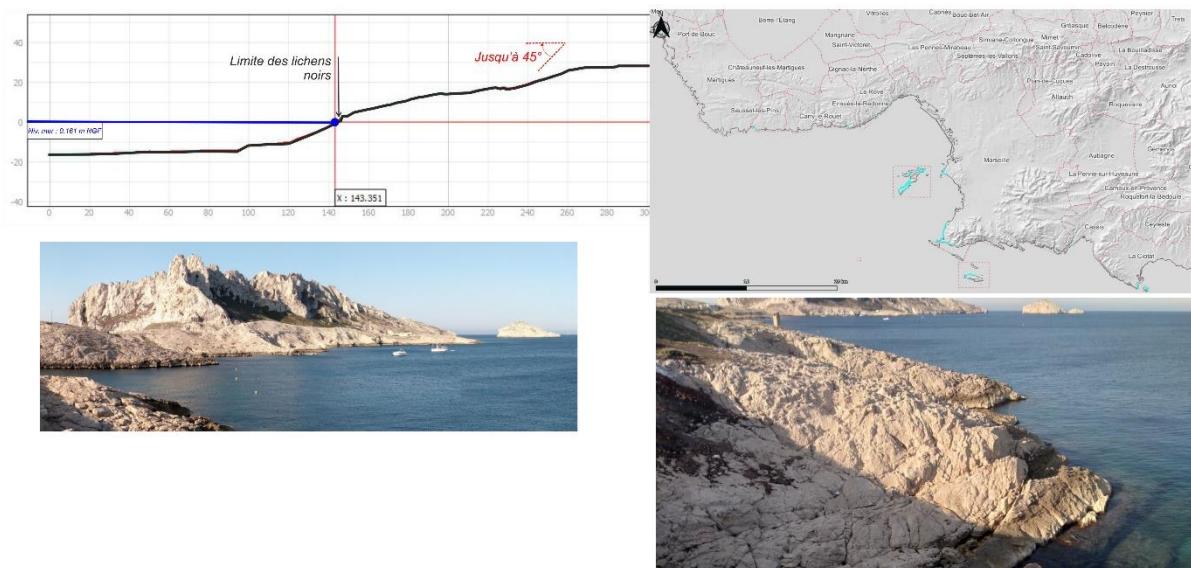


Figure 40 : Typologie 2 type « Les Goudes » : Côtes rocheuses à profil réglé (<45°)

T3 – Plages, versants et talus meubles anthropiques. Morphotype « Legré-Mante ou Plage du Prado »

Ce type de côte couvre 13 km du linéaire littoral (Camargue non comprise dans le calcul). Il correspond principalement aux secteurs de plages non adossées contre une falaise, mais également à des versants parfois abruptes composés de matériaux meubles souvent anthropiques, comme au niveau du crassier de l'ancienne usine Legré-Mante à Marseille.

Ce type de côte est sujet aux dynamiques hydrosédimentaires et à des processus érosifs très différents de la côte rocheuse. Il n'a pas été analysé dans le cadre de cette étude (Figure 41).

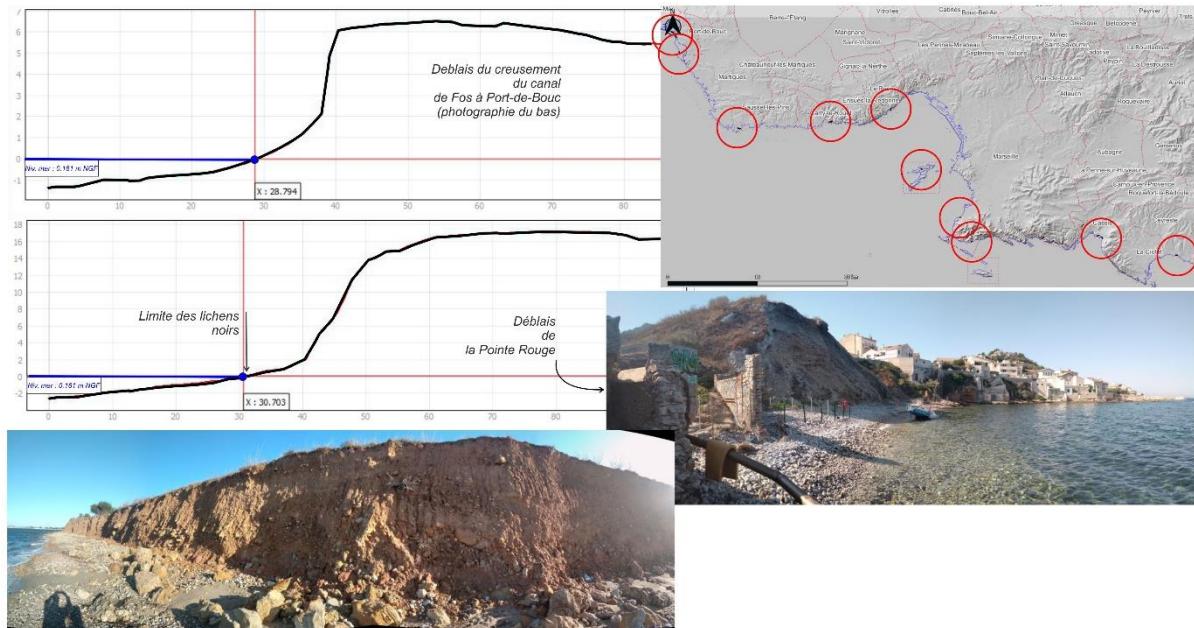


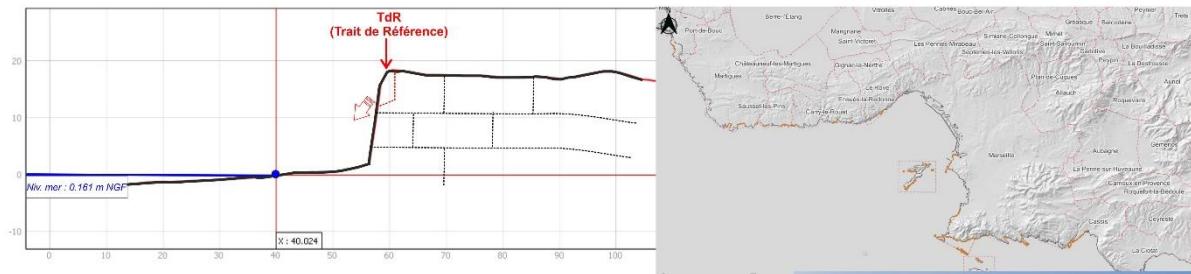
Figure 41 : Typologie 3 type « Legré-Mante » (T3), intitulée : Versants et talus meubles anthropiques

T4 – Falaises à profil subvertical (avec surplombs locaux), à lithologie unique. Morphotype « Port-Miou »

Ce type de falaise couvre 29.9 km du linéaire côtier. Il correspond à des versants globalement abrupts (sous-cavage et micro-variations du profil possibles) avec une seule lithologie, le plus souvent massive et résistante. On le retrouve notamment sur la presqu'île de Port-Miou à Cassis.

Ce type de falaise génère des chutes de blocs par différents mécanismes : glissement de dièdre, rupture de surplomb, rupture d'écaille, basculement de bloc ou encore rupture de pied de colonne (Figure 42).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône



La falaise est constituée d'une seule lithologie (un seul type de roche massive).
Peu importe la structure interne l'ensemble est massif et très résistant.



Figure 42 : Typologie 4 type « Calanques 1 » (T4), intitulée : Falaises à profil subvertical (avec surplombs locaux), à lithologie unique

T5 – Falaises à profil subvertical (avec surplombs locaux), à lithologie(s) multiple(s) et bancs épais. Morphotype « Carry-le-Rouet »

Ce type de falaise couvre 7.5 km du linéaire côtier. Il est emblématique des falaises de Carry-le-Rouet. Il correspond à des versants abrupts avec une alternance lithologique entre des niveaux résistants (souvent calcaires et calcarénites) et des niveaux plus sensibles à l'érosion (souvent des marnes d'épaisseur métrique).

Cette alternance entraîne des sous-cavages par érosion différentielle, favorisée par l'action des vagues au sein des niveaux plus tendres. Ce type de falaise produit donc des chutes de blocs principalement par rupture de surplomb (Figure 43).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

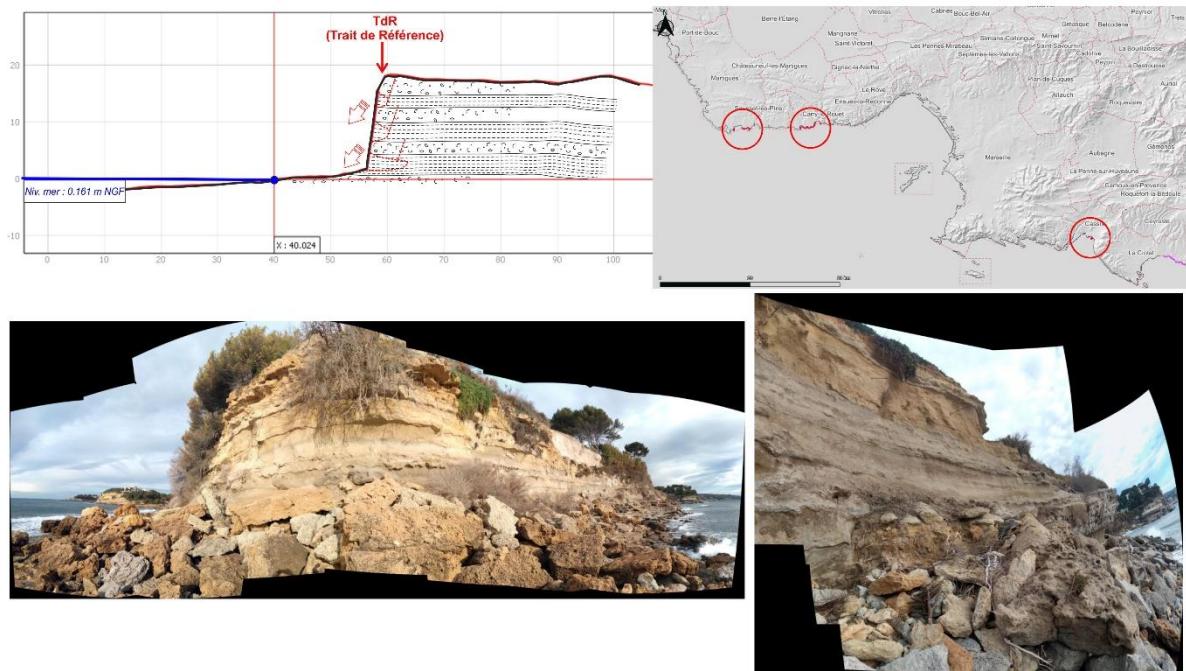


Figure 43 : Typologie 5 type « Carry-le-Rouet » (T5), intitulée : Falaises à profil subvertical (avec surplombs locaux), à lithologie(s) multiple(s) et bancs épais

T5bis – Falaises à profil subvertical (avec surplombs locaux), à lithologie(s) multiple(s) dont niveau meuble très épais. Morphotype « La Tasse »

Ce type de falaise ne couvre que 0,3 km du linéaire côtier et constitue une variante très localisée du morphotype T5 caractéristique du lieu-dit « La Tasse » à Carry-le-Rouet. Il correspond à des versants abrupts avec une alternance lithologique entre des niveaux résistants (calcaires/calcarénites) et un niveau de marnes plurimétrique (4 à 5 m à plus d'épaisseurs en moyenne).

Ce type de falaise produit des chutes de blocs principalement par rupture de surplomb liée à des mécanismes d'érosion différentielle (Figure 44). La présence de la surépaisseur locale du niveau de marnes est un facteur aggravant a fortiori dans un contexte de changement climatique. Sensibles à l'eau, les marnes peuvent être affectés par d'importants phénomènes de glissement et le sous-cavage des niveaux calcaires supérieurs résultant apparaît très marqués.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

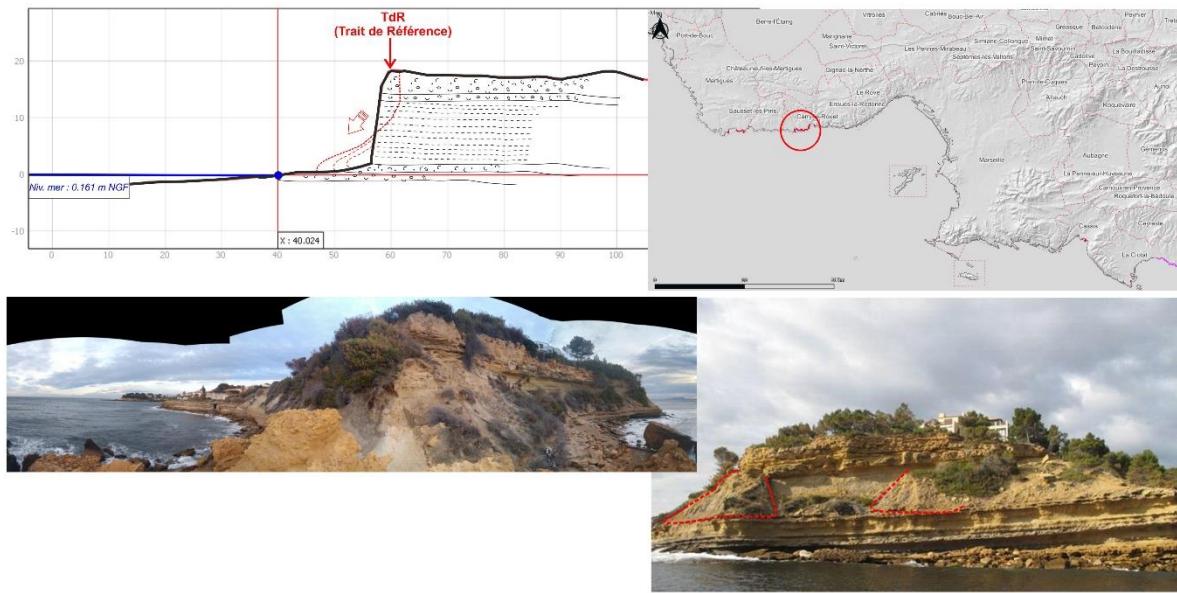


Figure 44 : La typologie 5bis type « La Tasse » (T5bis), intitulée : Falaises à profil subvertical (avec surplombs locaux), à lithologie(s) multiple(s) dont niveau meuble très épais

T5ter – Falaises à profil subvertical (avec surplombs locaux), à lithologie(s) multiple(s) et bancs fins. Morphotype « Le Liouquet – La-Ciotat »

Ce type de falaise couvre 2 km du linéaire côtier et constitue une autre variante du morphotype T5, essentiellement limitée à la commune de La Ciotat (secteur du Liouquet). Il correspond à des versants abrupts avec une alternance lithologique entre des niveaux résistants de calcaires marneux et des niveaux de marnes dont l'épaisseur reste globalement inframétrique (quelques décimètres en moyen).

Cette alternance entraîne des sous-cavages dans la limite d'action des vagues et elle est affectée par de nombreuses fractures tectoniques qui créent des pans de décompression, lorsqu'elles ont la même orientation que la paroi de la falaise.,

Ce type de falaise produit des chutes de blocs principalement par rupture de surplomb liée aux mécanismes d'érosion différentielle mais également des rupture d'écaillles liés à la fracturation subparallèle à la paroi (Figure 45).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

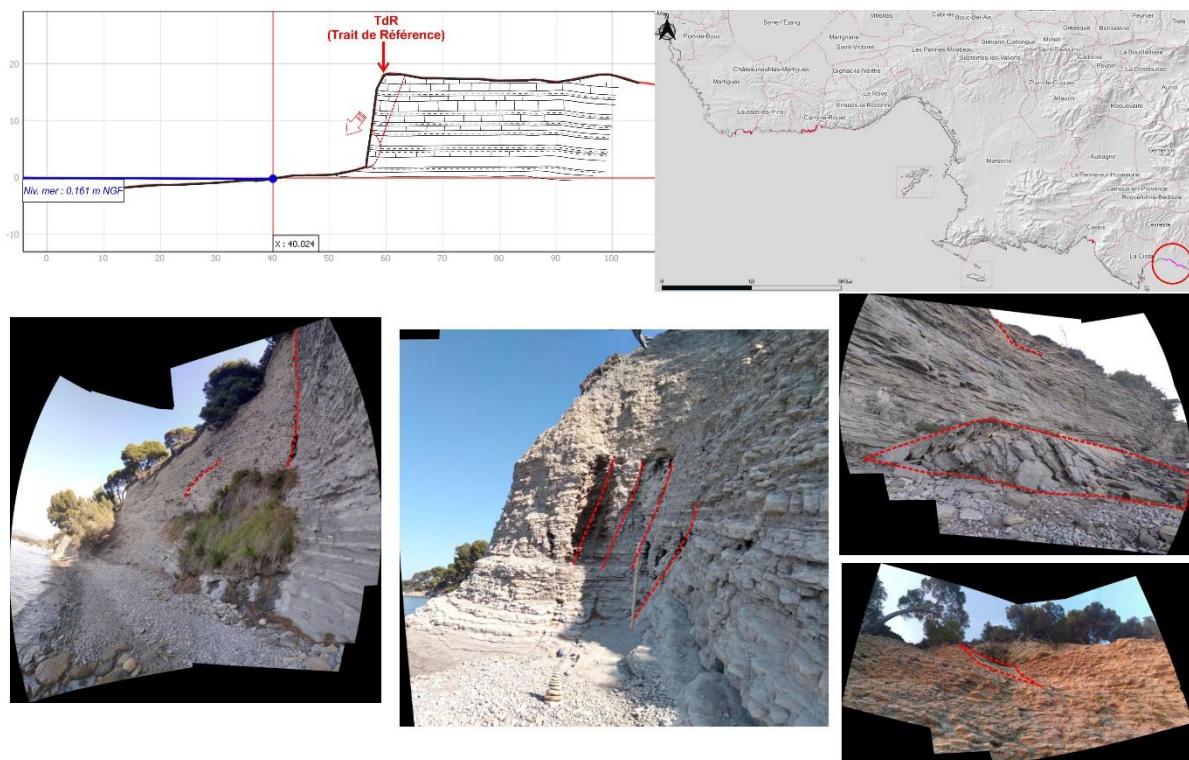


Figure 45 : Typologie 5ter type « Le Liouquet – La-Ciotat » (T5ter), intitulée : Falaises à profil subvertical (avec surplombs locaux), à lithologie(s) multiple(s) et bancs fins.

T6 – Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie unique, indifférencié. Morphotype « Calanques »

Ce type de falaise couvre 49,2 km du linéaire côtier. Il est caractéristiques des calanques de Marseille bien qu'il se retrouve dans de très nombreux autres secteurs et correspond à des versants marqués par plusieurs escarpements dans un seul grand type de lithologie.

Il est emblématique du massif des Calanques et parfois d'une extrême complexité morphologique. Sur une bonne partie du massif, les multi-escarpements sont liés à la stratification subhorizontale des couches calcaires mais ils peuvent être aussi le fruit de produits de l'érosion karstique, créant des reliefs caractéristiques ruiniformes.

Ce type de falaise produit des chutes de blocs associés à des modes de rupture très variés selon les configurations : glissement de dièdre, rupture de surplomb, rupture d'écaille, basculement de bloc ou encore rupture de pied de colonne (Figure 46).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

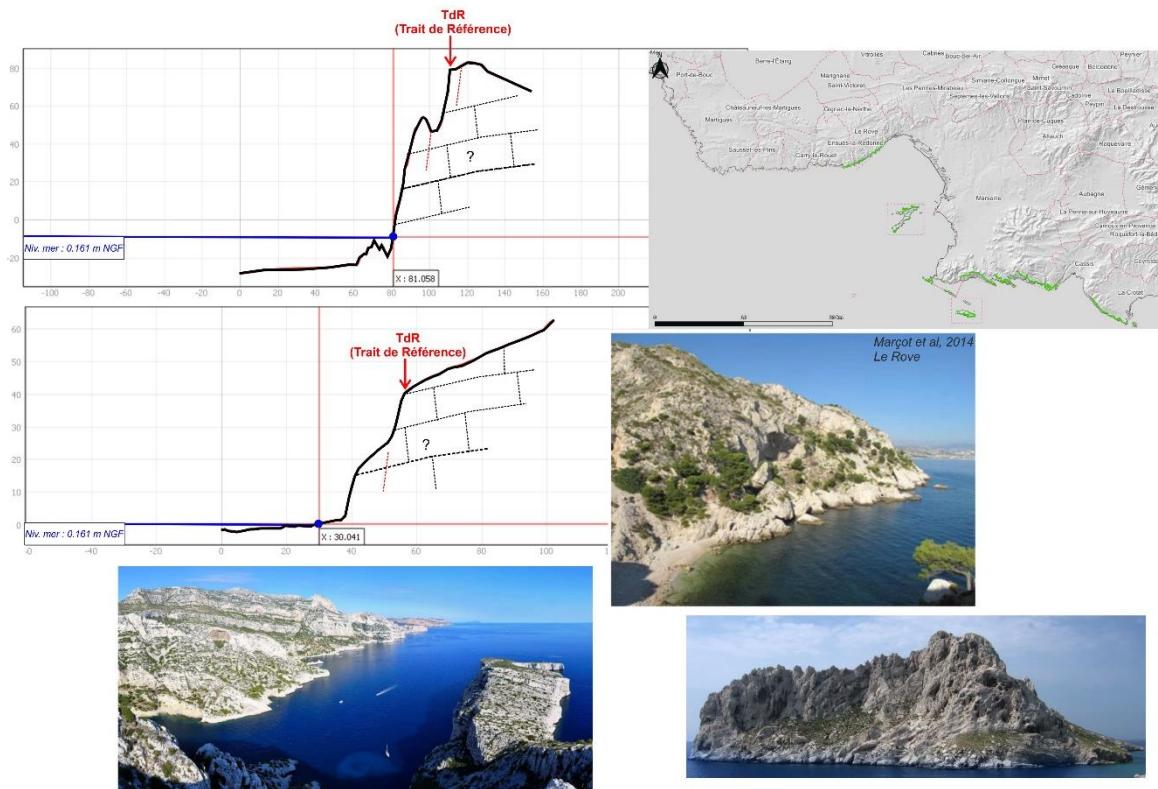


Figure 46 : Typologie 6 type « Calanques 2 » (T6), intitulée : Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie unique, indifférencié

T7 – Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie indifférenciée, aval-pendage. Morphotype « Brigantin »

Ce type de falaise couvre 2,7 km du linéaire côtier. Il correspond à des versants avec plusieurs escarpements, dans des lithologies peu changeantes, toujours inclinées vers la mer. Il se retrouve notamment sur la presqu’île de Brigantin au Frioul.

Ce type de falaise génère des chutes de blocs notamment associés à des mécanismes de glissement de dièdre, à des glissements banc sur banc ou à des ruptures de surplomb. (Figure 47).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

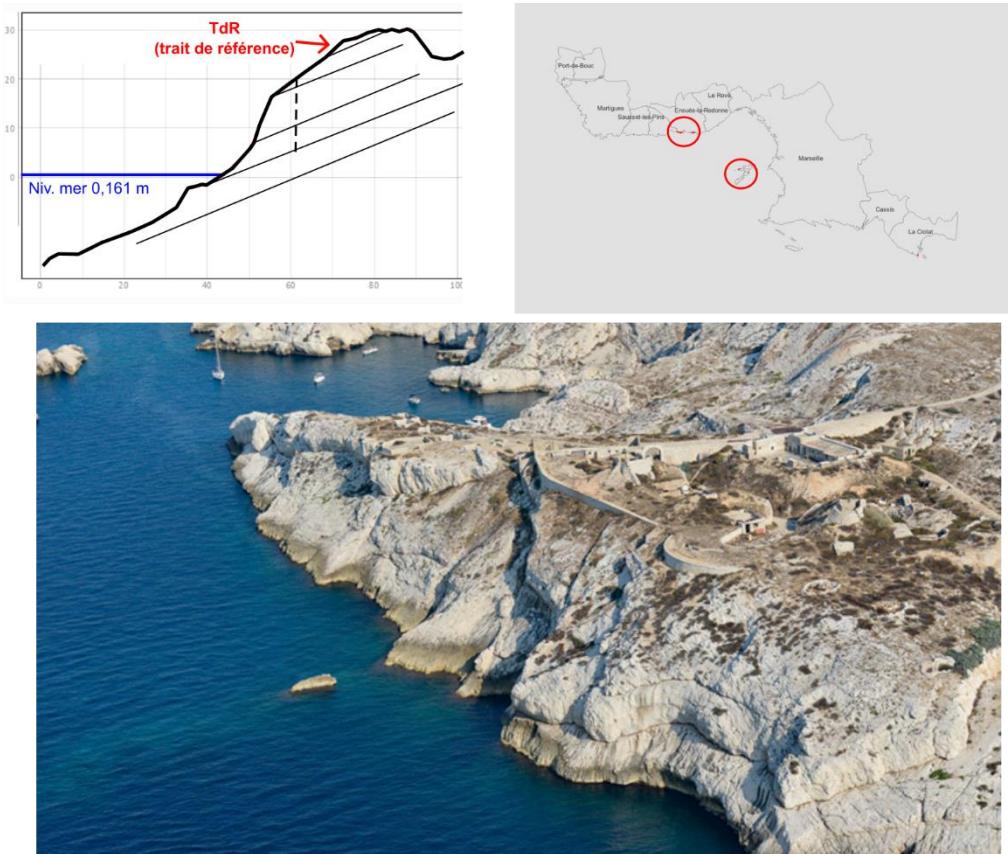


Figure 47 : Typologie 7 type « Brigantin » (T7), intitulée : Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie unique, aval-pendage

T8 – Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie indifférenciée, pendage vertical. Morphotype « Anthénors »

Ce type de falaise couvre 1,6 km du linéaire côtier. Il est caractéristique des falaises de la calanque des Anthénors à Ensue-la-Redonne et correspond à des versants avec plusieurs escarpements dans des alternances de calcaires et grès calcaieux et parfois à des marneuses, mais verticales à très fortement inclinées vers la mer.

Les bancs en alternance sont de 0,1 à 1 m d'épaisseur en moyenne. Le pied de falaises est par endroit parsemé de blocs à gros blocs, issus de l'intersection entre la stratification et un plan de fracture orienté vers la mer de 20 à 30° (dièdre).

Ce type de falaise génère des chutes de blocs notamment par basculement de bloc ou glissements banc sur banc. (Figure 48).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône



Figure 48 : Typologie 8 type « Anthénor » (T8), intitulée : Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie unique, pendage vertical

T9 – Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie meuble en tête, indifférencié. Morphotype « Le Rove – Voie ferrée »

Ce type de falaise couvre 2,8 km du linéaire côtier et constitue une variante du morphotype T6. La différence avec le type « Calanques », est la présence d'une formation géologique meuble en tête, souvent de nature anthropique. Il est caractéristique des falaises de la Côte Bleue entre Marseille et Ensuès, marquées par la présence d'une voie ferrée à laquelle sont associés des déblais de creusement déposés en tête d'escarpement.

Ce type de falaise produit des chutes de blocs associés à des modes de rupture très variés selon les configurations (glissement de dièdre, rupture de surplomb, rupture d'écaille, basculement de bloc ou encore rupture de pied de colonne). Un enchainement de phénomènes est possible lorsque la rupture des compartiments rocheux entraîne la déstabilisation des niveaux meubles supérieurs, engendrant des glissements de terrain (*Figure 49*).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

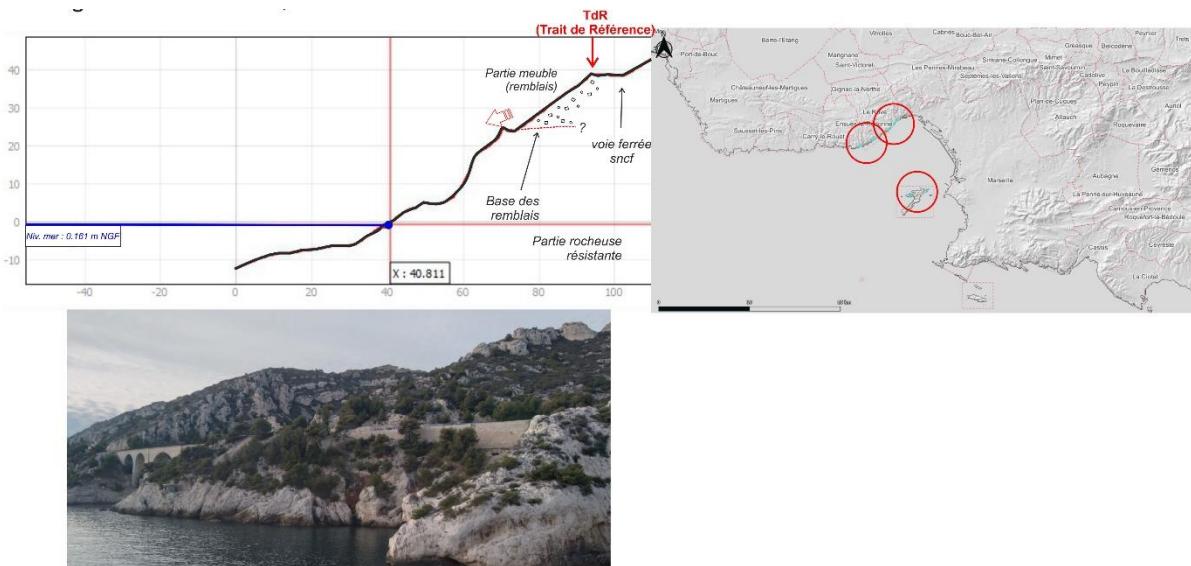


Figure 49 : Typologie 9 type « Le Rove – Voie ferrée » (T9), intitulée : Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie meuble en tête, indifférencié

T10 – Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie meuble en tête, aval-pendage. Morphotype « Corbières »

Ce type de falaise couvre 0.7 km du linéaire côtier et constitue une variante du morphotype T7. La différence avec le type « Brigantin », est la présence d'une formation géologique meuble en tête, souvent de nature anthropique (déblais du creusement de la voie ferrée Fos-Marseille par exemple). Il est caractéristique des falaises de Corbières à l'extrême Nord-Ouest de Marseille.

Ce type de falaise génère des chutes de blocs notamment associés à des mécanismes de glissement de dièdre, des glissements banc sur banc ou des ruptures de surplomb. Un enchaînement de phénomènes est possible lorsque la rupture des compartiments rocheux entraîne la déstabilisation des niveaux meubles supérieurs, engendrant des glissements de terrain (Figure 50).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

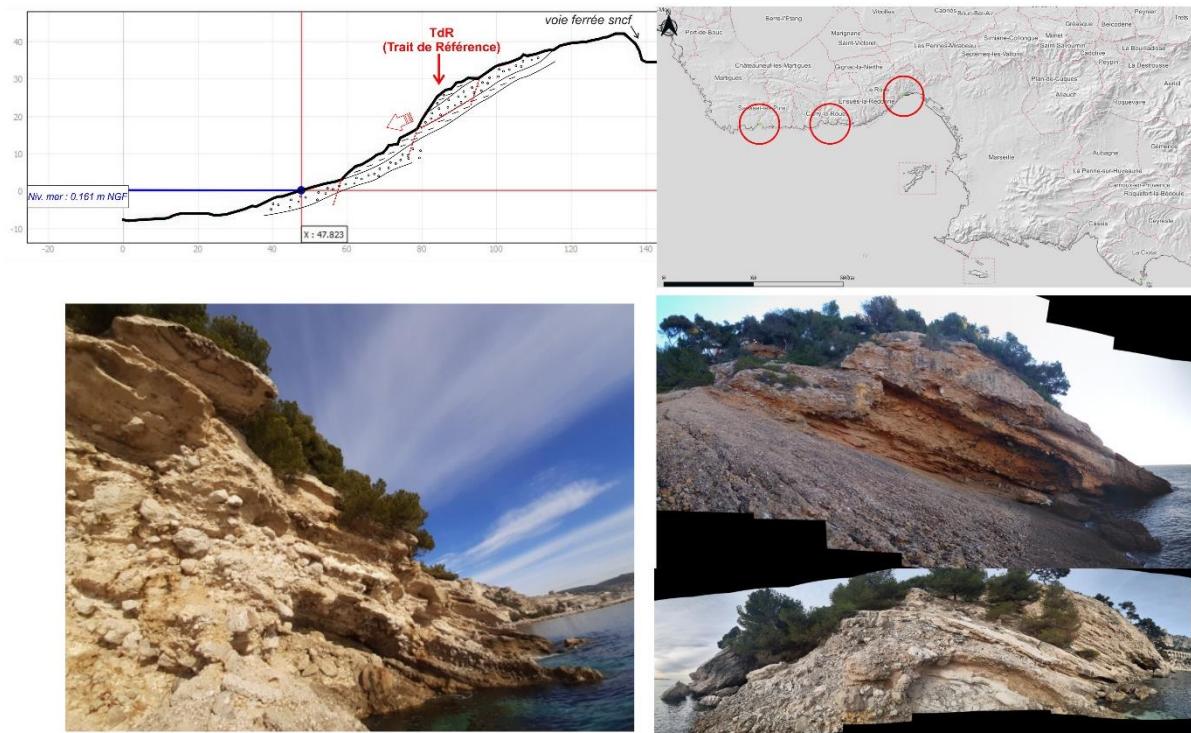


Figure 50 : Typologie 10 type « Corbières » (T10), intitulée : Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux), à lithologie meuble en tête, aval-pendage

T11 – Falaises mixtes à lithologie meuble en pied (< 100 m). Morphotype « Lombards »

Ce type de falaise couvre 2,7 km du linéaire côtier. Il est caractéristique de la falaise des Lombards à Cassis. Il correspond à des versants mixtes composés (Figure 51) :

- En pied, de formations meubles telles que des marnes, qui se réhydratent et fluent (glissements) sous l'action des agents météo-marins, générant une mise en surplomb des compartiments supérieurs ;
- En tête d'une barre rocheuse, produisant des blocs issus de l'intersection entre la stratification et les directions de fractures (dièdres), déstabilisés par le sous-cavage.

Ce type de versant est sujet aux chutes de blocs (ruptures de surplomb, rupture de pied de colonne et basculement) dans la partie indurée amont et aux glissements plans ou coulées marneuses dans la partie aval (Figure 51).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

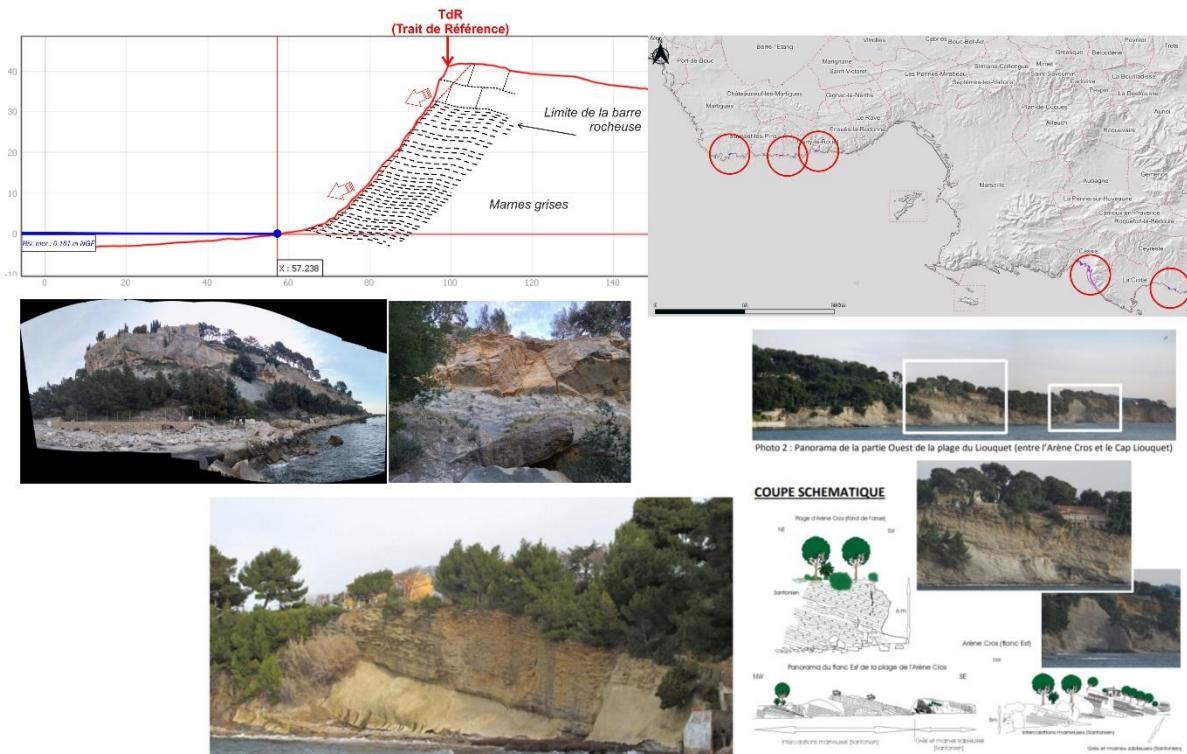


Figure 51 : Typologie 11 type « Lombard » (T11), intitulée : Falaises mixtes à lithologie meuble en pied, ($< hm$)

T11bis – Falaises mixtes à lithologie meuble en pied ($> 100 m$). Morphotype « Cap Canaille »

Ce type de falaise couvre 2,2 km du linéaire côtier et constitue une variante du morphotype T11. Il concerne les falaises du Cap Canaille marquée par une très grande hauteur ($> 400 m$).

Alors que la relation entre les phénomènes de fluage dans les formations meubles pouvait être liée à la production de blocs pour le T11, pour le T11bis le rapport homothétique d'un facteur 10 entre les deux morphotypes, fait que les fluages ne sont pas (ou rarement) corrélables avec les chutes de blocs.

L'autre particularité est la présence sur le flanc marneux aval d'un cône d'épandage des produits de la falaise et qui par contraste lithologique avec son substratum peut créer un ou plusieurs escarpements intermédiaires.

Ce type de versant est sujet aux chutes de blocs (ruptures de surplomb, d'écaille, rupture de pied de colonne et basculement) dans la partie indurée amont et aux glissements plans ou coulées marneuses dans la partie aval (Figure 52).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

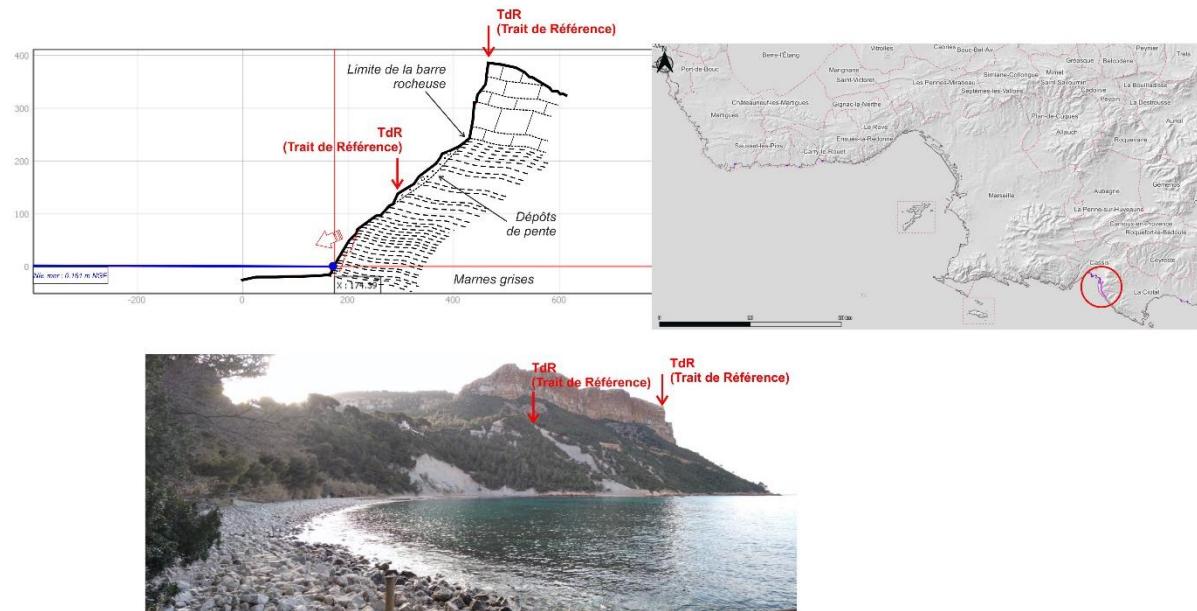


Figure 52 : Typologie 11bis type « Cap Canaille » (T11bis), intitulée : Falaises mixtes à lithologie meuble en pied ($> hm$)

T12 – Falaises mixtes à lithologie meuble en tête. Morphotype « Marseilleveyre »

Ce type de falaise couvre 2 km du linéaire côtier. Il correspond à des versants à lithologie et escarpement uniques, avec la présence de matériaux meubles en tête.

Il est caractéristique de la calanque Marseilleveyre. Souvent posées sur un substratum rocheux résistant. Les formations meubles sont tantôt anthropiques ou mixtes tantôt entièrement naturelles.

Ce type de falaise génère des chutes de blocs par différents mécanismes : glissement de dièdre, rupture de surplomb, rupture d'écaillle, basculement de bloc ou encore rupture de pied de colonne. Un enchainement de phénomènes est possible lorsque la rupture des compartiments rocheux entraîne la déstabilisation des niveaux meubles supérieurs, engendrant des glissements de terrain (Figure 53).

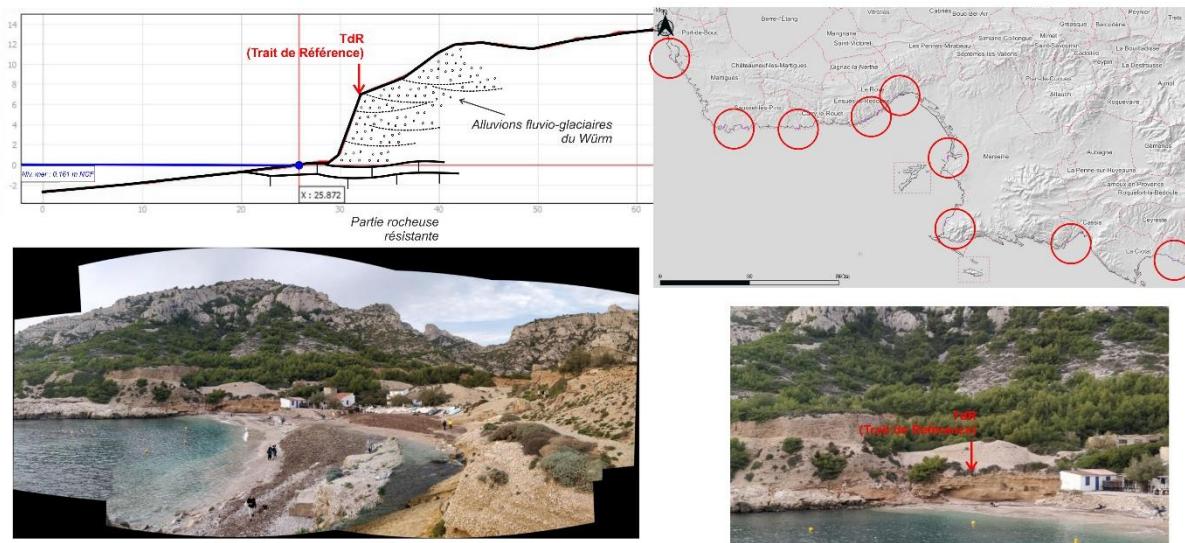


Figure 53 : Typologie 12 type « Marseilleveyre » (T12), intitulée : Falaises mixtes à lithologie meuble en tête

6.3. SECTORISATION DU LINEAIRE DE FALAISES

La carte de la Figure 54 présente spatialement les différents types de falaise, décrits par la typologie, sur le linéaire de la zone d'étude. Le Tableau 5 synthétise par type :

- La description géomorphologique ;
- Le secteur caractéristique associé au morphotype ;
- Les longueurs de linéaire associés ;
- Le mode de définition du Trait de Référence (TdR) retenu ;
- Les phénomènes littoraux caractéristiques redoutés ;
- La prise en compte du type défini pour la projection de recul dans le cadre de l'étude.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

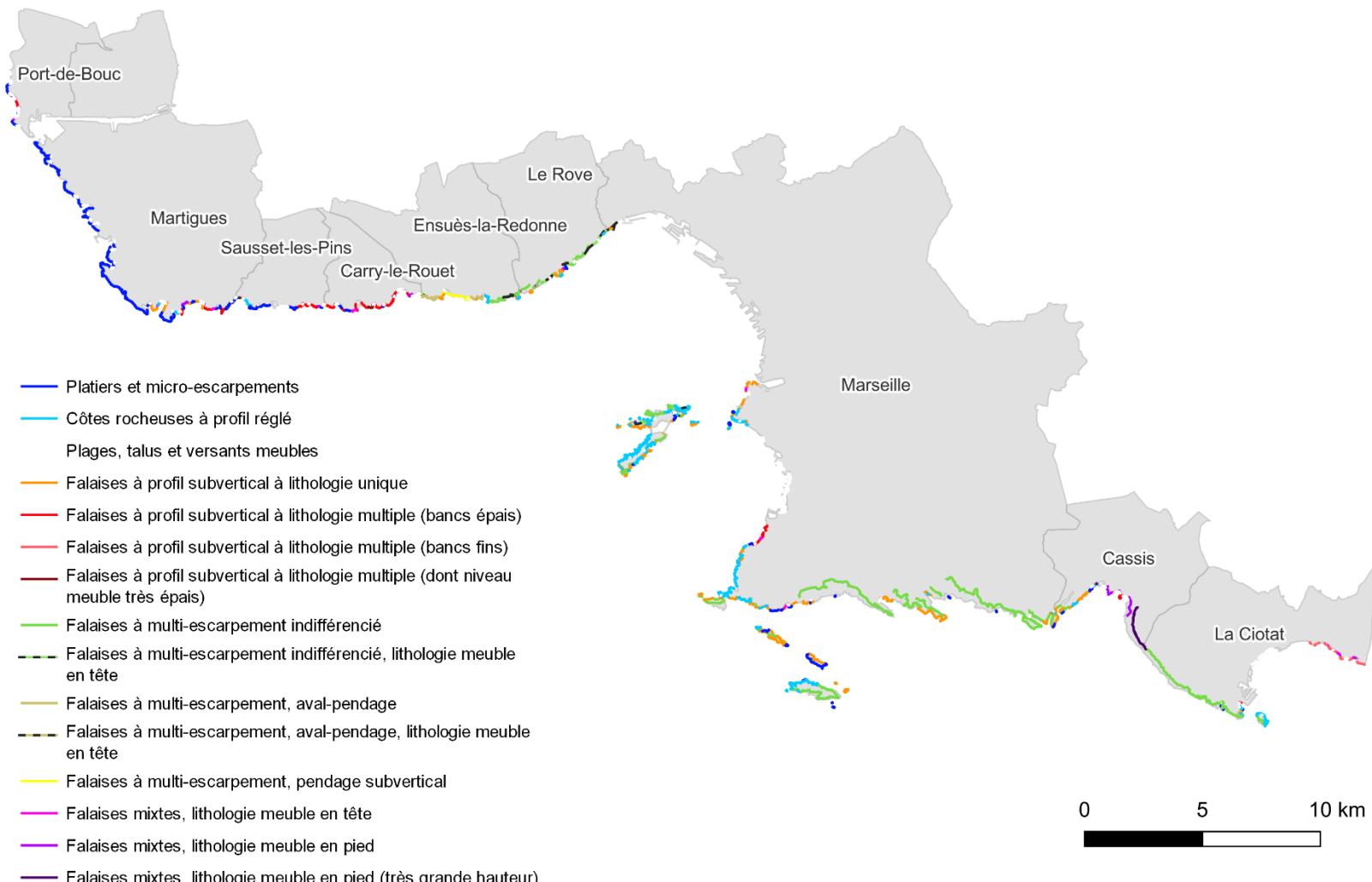


Figure 54 : Typologie de la côte et des falaises littorales des Bouches-du-Rhône spatialisée

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

	Nature de la côte	Morpho-type	Linéaire (km)	Trait de Référence	Phénomène	Dans cette étude
1	Platiers et micro-escarpements (<1,5 m)	<i>Carro</i>	34.5	/	Submersion / érosion marine	non
2	Côtes rocheuses à profil réglé (<45°)	<i>Les Goudes</i>	29.6	/	Submersion / érosion marine	non
3	Plages, talus et versants meubles (naturels ou anthropiques)	<i>Legré-Mante / Plages du Prado</i>	13	/	Erosion / Glissement	non
Falaises à profil subvertical (avec surplombs locaux)						
4	à lithologie unique	<i>Pointe Rouge</i>	29.9	Tête d'escarpement	CDB	oui
5	à lithologie(s) multiple(s) et bancs épais	<i>Carry-le-Rouet</i>	7.5	Tête d'escarpement	CDB	oui
5bis	à lithologie(s) multiple(s) et bancs fins	<i>La Ciotat</i>	0.3	Tête d'escarpement	CDB	oui
5ter	à lithologie(s) multiple(s) dont niveau meuble très épais	<i>La Tasse</i>	1.9	Tête d'escarpement	CDB + Glissement	oui
Falaises à multi-escarpement (avec surplomb locaux)						
à lithologie unique						
6	Indifférencié	<i>Calanques</i>	49.2	Tête du dernier escarpement dans la zone exposée	CDB	oui
7	Aval pendage	<i>Brigantin</i>	2.7	Tête du dernier escarpement dans la zone exposée	CDB	oui
8	Pendage subvertical	<i>Anthénors</i>	1.6	Tête du dernier escarpement dans la zone exposée	CDB	oui
à lithologie meuble en tête						
9	Indifférencié	<i>Le Rove - voie ferrée</i>	2.8	Crête des terrains meubles en tête du dernier escarpement	CDB	oui
10	Aval pendage	<i>Corbière</i>	0.7	Crête des terrains meubles en tête du dernier escarpement	CDB	oui
Falaises mixtes						
11	à lithologie meuble en pied (< hm)	<i>Lombards</i>	2.8	Tête d'escarpement	CDB + Glissement	oui
11bis	à lithologie meuble en pied (> hm)	<i>Cap Canaille</i>	2.2	Tête d'escarpement	CDB + Glissement	oui
12	à lithologie meuble en tête	<i>Marseilleveyre</i>	2	Crête des terrains meubles en tête du dernier escarpement	CDB + Glissement	oui

Tableau 5 : Typologie de la côte et des falaises littorales des Bouches-du-Rhône

7. Définition et cartographie du trait de référence (TdR)

La cartographie du Trait de Référence constitue une étape essentielle de l'analyse puisqu'elle définit la position à partir de laquelle les projections des reculs futurs sont réalisées. Sa localisation a donc une importance capitale dans la cartographie produite.

7.1. ZONES NON COUVERTES PAR L'ETUDE

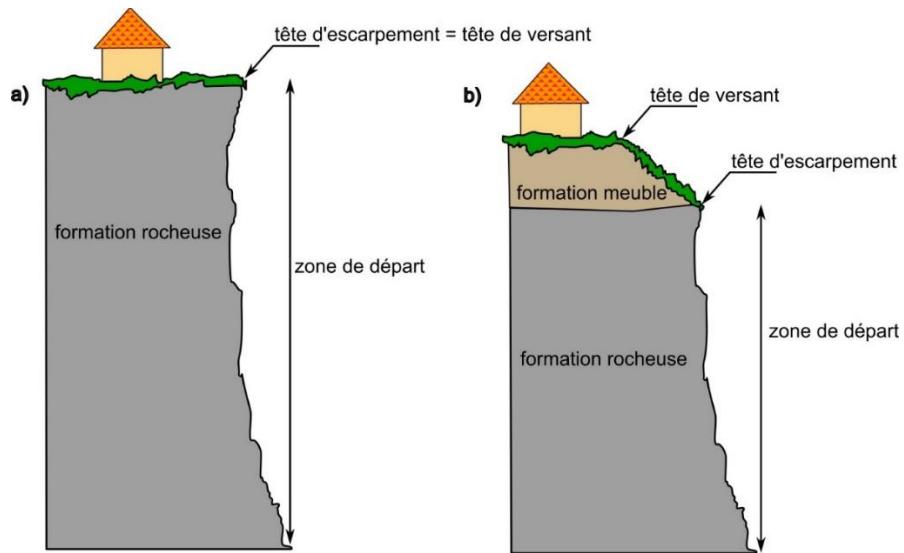
Les types T1, T2 et T3 (platiers et micros-escarpements ; côte rocheuse à profil réglé ; plages, talus et versants meubles) sont exclus de l'analyse dans la mesure où ils ne constituent pas des falaises et sont davantage soumis à des processus d'abrasion marine, de submersion et d'ennoiement ou à des processus d'érosion propres aux côtes d'accumulation.

Une représentation cartographique de ces linéaires est néanmoins matérialisée sur le niveau marin moyen (calculé au marégraphe de Marseille) à titre indicatif, afin d'identifier ces secteurs à enjeux (Figure 54). Le trait utilisé est choisi arbitrairement et ne constitue pas un Trait de Référence (TdR).

7.2. ZONES ROCHEUSES A FALAISE UNIQUE

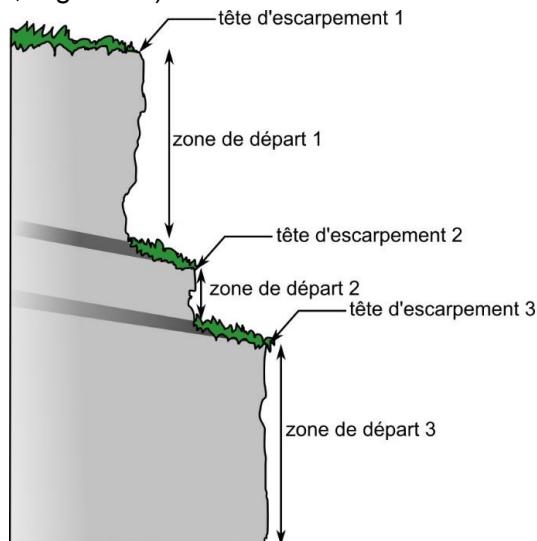
Pour les versants à escarpement unique, le TdR correspond :

- à la tête d'escarpement (Figure 55) pour un versant exclusivement rocheux ;
- à la tête de versant pour les cas où des formations meubles sont présentes en partie sommitale. La tête de versant correspond à la rupture de pente matérialisant la transition entre le versant (au moins partiellement rocheux) et le replat du plateau sus-jacent (Figure 55).



7.3. ZONES ROCHEUSES A ESCARPEMENTS MULTIPLES

Pour les versants comportant de multiples escarpements (ex. falaises des Calanques), le TdR correspond à la tête d'escarpement la plus amont dans le versant dont les distances planimétriques entre les têtes d'escarpements avales sont inférieures à 15 m et/ou pour lesquelles les pentes entre escarpements paraissent inadaptés à l'implantation d'enjeux (pente élevée par exemple, Figure 56).



A noter que ne sont pas considérées comme falaises côtières les versants pour lesquels la zone entre la limite terre-mer et le pied de falaise paraît aménageable. Ce critère est apprécié

à dire d'expert, en prenant en compte l'existence d'aménagements ou une largeur minimale d'une quinzaine de mètre 15 m aménageable (pente faible, propagation de blocs peut probable). A ce titre, ces falaises ne feront pas l'objet d'une cartographie d'exposition recul.

In fine, le dire d'expert prévaut pour le choix de la position finale du Trait de Référence. L'expert tranche également sur un possible fonctionnement indépendant entre des escarpements multiples.

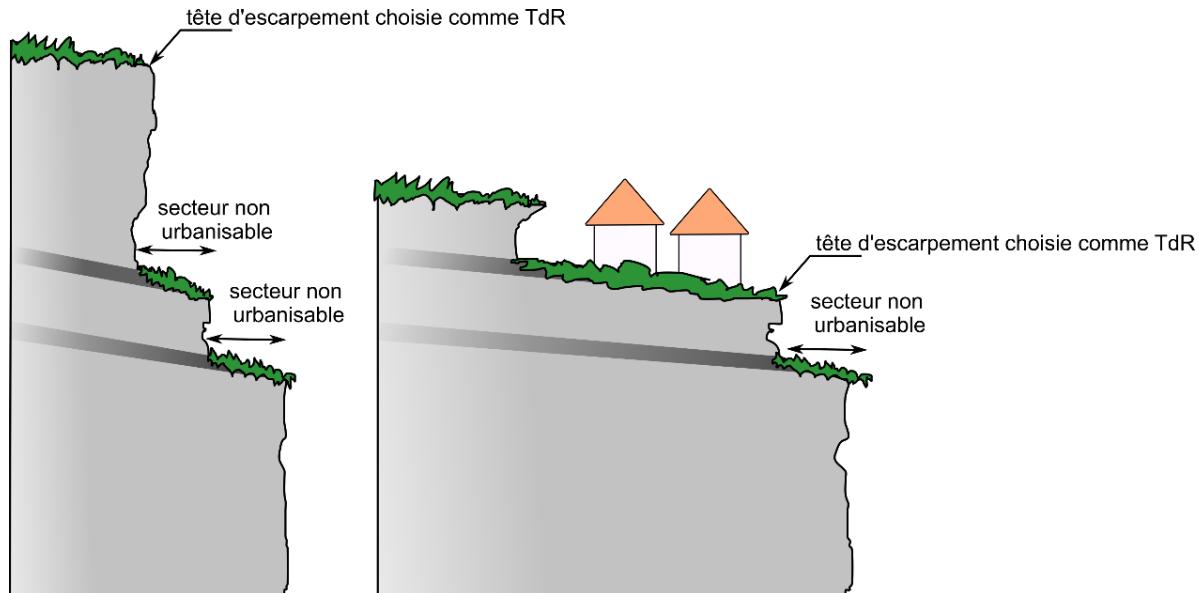


Figure 57 : Configurations de versants avec multiples escarpements conduisant à des choix différents de la tête d'escarpement considérée comme trait de référence (TdR)

Les terrains situés entre le TdR et la mer sont des terrains où l'aléa gravitaire est important. Ainsi, les escarpements intermédiaires dans un versant complexe sont également sujet au recul de la tête d'escarpement.

Pour les versants à escarpement multiples, les processus marins n'ont que peu ou pas d'influence sur le vieillissement de la falaise pour la partie amont. L'influence des processus marins est décroissante depuis le pied de versant vers la zone amont (Figure 58).

Cela n'implique pas nécessairement que les processus marins exercent une influence prépondérante sur le vieillissement de la falaise au niveau du pied de versant. En effet, d'autres facteurs contribuent également au vieillissement de l'ensemble de la falaise comme la pluie, le gel/dégel, les fuites d'eaux d'habitations en tête de falaise, les séismes, etc.

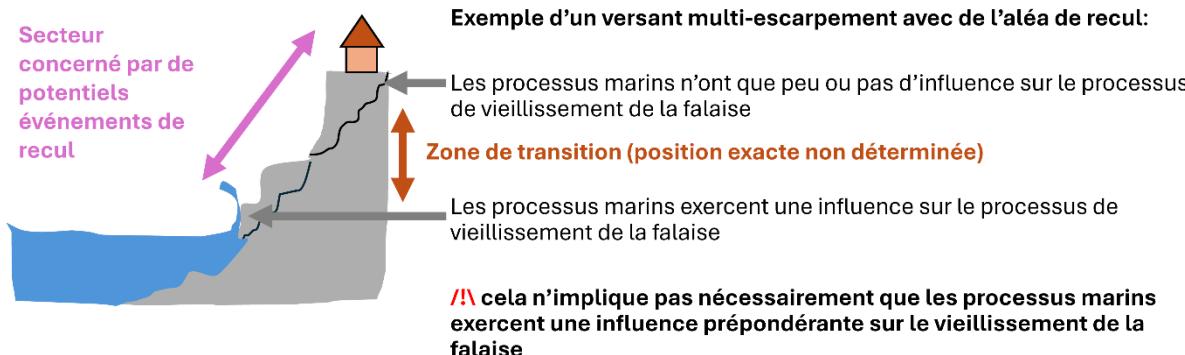


Figure 58 : Schéma d'un versant à escarpements multiples et de l'influence décroissante des processus marins d'aval en amont.

7.4. OUTILS D'AIDE A LA CARTOGRAPHIE DU TDR MIS EN OEUVRE

Pour mémoire, les définitions des termes escarpement, tête d'escarpement et tête de versant sont précisés en Annexe 5. La suite d'outils HISTOFIT et DORRA développés par le BRGM ont été valorisés comme aide à la cartographie du trait de référence dans le cadre de cette étude. Cette suite d'outils valorise les données topographiques sous forme de MNT et de sa dérivé (soit la carte des pentes) dans l'objectif :

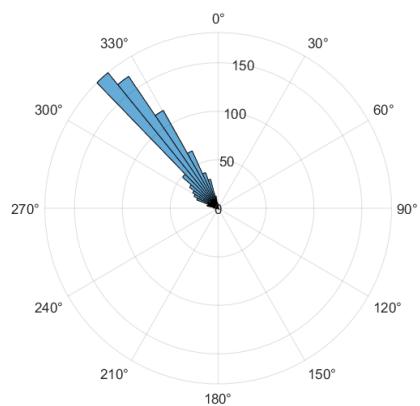
- D'identifier les seuils de pente propice à la présence de zones de départ de chutes de blocs (outil HISTOFIT) ;
- De spatialiser les zones de départ de proche en proche pour rendre compte de la continuité d'escarpements naturels en utilisant les seuils de pente préalablement déterminés (outil DORRA) ;
- D'identifier les têtes d'escarpements ou zones de départ (outil DORRA) ;
- D'estimer une série d'indicateurs pour chaque zone de départ dont la plupart sont calculés le long des profils de plus grande pente tirés depuis les têtes d'escarpements (soit une série de pixels contigus, voir Figure 59). Les indicateurs les plus utilisés pour cette étude sont résumés en Tableau 6. A noter que pour chaque profil, le pied d'escarpement est localisé au dernier point appartenant à l'escarpement (tel que défini à partir des seuils de pente).

L'expert exploite les sorties fournies par l'outil DORRA, combinées aux informations issues de sources variées (orthophotographies, photos aériennes obliques, levés de terrain, etc.) pour digitaliser le trait de référence.

La donnée principale utilisée pour réaliser cette digitalisation est le MNT 1m de l'IGN de 2022. Pour mémoire, l'IGN donne pour ce MNT une erreur de géoréférencement planimétrique de 0,5 m pour 95% des pixels en zone émergée et une erreur altimétrique de 0,2 m pour 95% des pixels en zone émergée (RGE ALTI® Version 2.0 – Descriptif de contenu – Septembre 2018).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Distribution des directions de plus grande pente pour les pixels amonts d'une zone de départ



Ensemble des profils topographiques tirés dans la direction de plus grand pente pour chaque pixel amont

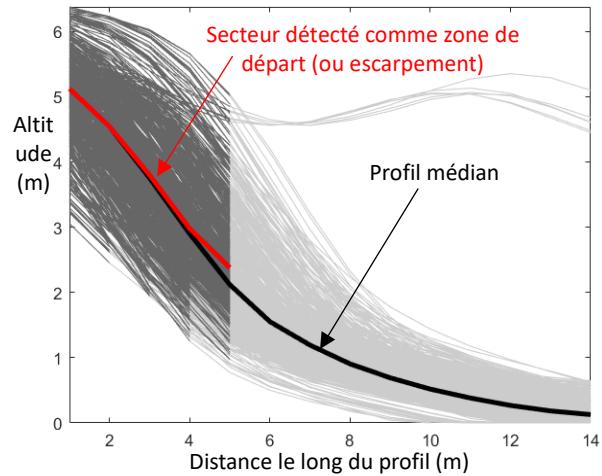


Figure 59 : DORRA, exemple de calculs intermédiaires pour une zone de départ en chute de bloc

L'Annexe 5 détaille le fonctionnement de cette suite d'outils et sur les étapes de préparation des données et le paramétrage des outils utilisés. Le Tableau 6 présente les indicateurs les plus utilisés pour l'aide à la cartographie du TdR issus des sorties fournies par l'outil DORRA.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Indicateur	Définition	Utilisation
Hauteur médiane de l'escarpement	La médiane des hauteurs d'escarpement calculées le long des profils de plus grande pente tirés depuis les têtes d'escarpements.	Possible choix d'une valeur de Ru en fonction de la hauteur d'escarpement
Altitude médiane de la tête d'escarpement	L'altitude médiane des hauteurs d'escarpement calculées le long des profils de plus grande pente tirés depuis les têtes d'escarpements	Détection des micro-falaises
Mesure de la distance entre têtes d'escarpements	Indique si la tête d'escarpement est à moins de 15 m de distance planimétrique d'un escarpement amont.	Identification des versants à multiples escarpement. Identification de la tête d'escarpement utilisable comme TdR
Distance du pied d'escarpement à la mer (soit le niveau 0 m NGF)	La distance médiane des pieds d'escarpement au niveau 0 m NGF le long des profils de plus grande pente tirés depuis les têtes d'escarpements.	Sélection des falaises considérées comme côtières
Distance du pied de versant à la mer (soit le niveau 0 m NGF)	<p>La distance médiane du dernier pied d'escarpement au niveau 0 m NGF le long des profils de plus grande pente tirés depuis les têtes d'escarpements.</p> <p>NB : cet indicateur est identique au précédent dans le cas de versants avec un seul escarpement, mais diffère pour les versants comportant de multiples escarpements.</p>	Sélection des versants à multiples escarpement considérés comme côtiers

Tableau 6 : Indicateurs les plus utilisés pour l'aide à la cartographie du TdR issus des sorties fournies par l'outil DORRA

8. Aménagements et ouvrages

8.1. INVENTAIRE DES OUVRAGES

Les falaises des Bouches-du-Rhône font l'objet d'un aménagement important qui témoigne d'une densification forte des enjeux en bord de mer mais également de dynamiques érosives. En effet, les ouvrages sont mis en place dans une optique de protection et de fixation du trait de côte (Figure 60).



Figure 60 : Exemple de falaise aménagée pour limiter les phénomènes érosifs sur la commune de Sausset-les-Pins (photos : DDTM13, 2020)

L'impact des ouvrages sur l'évolution morphologique de la côte meuble, notamment en termes de perturbation de l'équilibre hydro-sédimentaire est bien décrit dans la littérature scientifique. Sur les falaises, ces problématiques revêtent une moindre importance. Pour autant, la prise en compte de l'aménagement apparaît déterminante pour apprécier l'évolution des phénomènes gravitaires et estimer des trajectoires de recul.

Conformément aux recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte (Collectif BRGM/Cerema, 2022), un recensement de ces ouvrages a donc été effectué.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

La cartographie de ces ouvrages et aménagements littoraux (de métropole et d'outre-mer) dont les spécifications techniques datent d'août 2017 (Cerema, 2017), constitue la base de données de référence en la matière.

Les visites de terrain réalisées en 2023 et 2024 ainsi que la consultation des données photographiques héliportées de 2020 couvrant l'ensemble du département ont permis de compléter et d'enrichir cette base de données. Pour le département des Bouches-du-Rhône, **679** ouvrages étaient recensés dans la BD nationale. **130** ouvrages supplémentaires ont été ajoutés (Figure 61).

A partir de ces observations, l'ensemble des tronçons de falaise classifiés et digitalisés ont fait l'objet d'une distinction en fonction de leur caractère aménagé ou non. L'information est retranscrite dans la table attributaire.

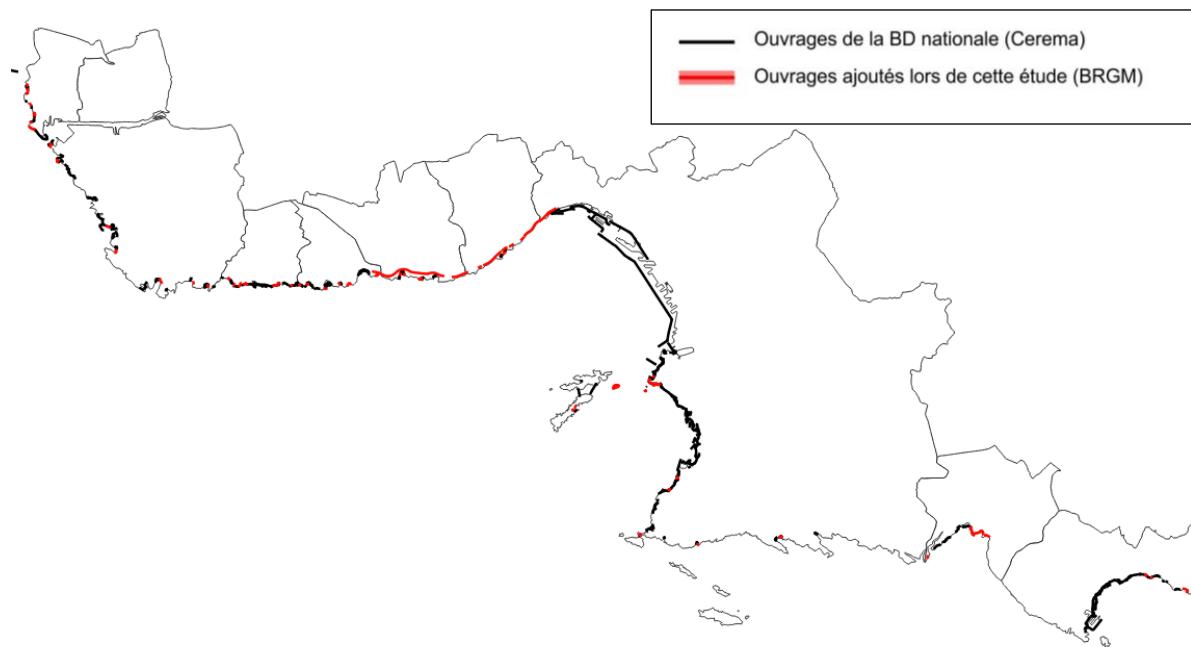


Figure 61 : Ouvrages recensés sur l'ensemble de la zone d'étude

8.2. LITTORAL « TRES ARTIFICIALISE »

Dans certaines situations, les aménagements masquent totalement l'affleurement du terrain naturel. Derrière l'ouvrage, généralement massif, il est difficile voire impossible de dire si la côte est rocheuse ou meuble (présence de remblais fréquente) et s'il existe un escarpement.

Dans ces contextes « très artificialisés », « il est difficile d'étudier la mobilité du littoral et il peut sembler complexe d'envisager un recul du trait de côte dans les prochaines décennies. Cet état ne doit pourtant pas empêcher les réflexions sur l'adaptation à la hausse du niveau marin causée par la modification du climat » (Recommandations Nationales, BRGM-CEREMA, 2022).

Il convient en effet de signaler que ces types de côte sont sujets aux phénomènes littoraux (submersion, chocs mécaniques liés à l'action des vagues) et méritent une attention particulière. Ils sont néanmoins exclus de la présente étude.

9. Données disponibles pour évaluer le recul

Afin de définir des scénarios de recul, une base de données compilant observations de terrain, données bibliographique, phénomènes historiques et valorisation de traitements cartographiques a été constituée. En parallèle de cet inventaire, des documents iconographiques anciens et des données bibliographiques ont été analysés afin de distinguer les phénomènes gravitaires récents et/ou probables sur les horizons temporels considérés, des phénomènes majeurs susceptibles de se produire sur des échelles de temps beaucoup plus longues.

9.1. EVENEMENTS DES CARTES POSTALES ET CARTES MARINES ANCIENNES

Les documents anciens tels que les cartes postales, même s'ils ne suffisent pas pour dater précisément un évènement gravitaire, permettent de réaliser que certains phénomènes sont particulièrement anciens ou que d'autres sont au contraire plus récents. Ce travail de comparaison entre le terrain aujourd'hui et dans le passé peut aussi se faire sur des documents cartographiques comme les cartes d'ingénieur du service hydrographique de la marine.

Les cartes postales anciennes ont été consultées à partir du site www.delcampe.net (site de vente en ligne) alors que les cartes marines anciennes proviennent soit la Gallica BnF, soit des archives du SHOM (<https://gallica.bnf.fr> & <https://diffusion.shom.fr/>).

9.1.1. Cartes postales anciennes

La détection de blocs ou de mouvements de terrain est envisageable sur les cartes postales anciennes si les objets recherchés contrastent avec leur environnement. La comparaison avec des images actuelles peut ainsi être faite et des âges ou périodes d'occurrence de l'évènement peuvent être estimés.

Quelques cartes postales pertinentes par commune sont présentées ci-dessous.

Commune de Port-de-Bouc :

Un exemple de comparaison entre une photographie de 2023 de la plage des Ours et une carte postale de 1964 (tarification de 0,25 c de franc), sur lesquelles il est possible d'observer deux cicatrices de ravinement (en blanc au niveau des flèches rouges). L'aménagement avait débuté par la plage puis c'est le massif dunaire en arrière qui a été fixé.

Il est aussi possible d'observer des blocs en pied de falaises déjà présents en 1964. Enfin, le sous-cavage qui est plus ou moins fixé par des blocs de béton blancs (Figure 62 à gauche, entre les flèches bleue et rouge) est aussi présent en 1964.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône



Figure 62 : A gauche, photographie 2023 de la plage fixée des ours ; A droite, carte postale de 1964 du même endroit (www.delcampe.net).

Une seconde comparaison est possible au niveau de l'aménagement du Cap Aiguade (Figure 63).



Figure 63 : En haut à gauche, Carte postale de 1968 de l'aménagement du Cap d'Aiguade ; En haut, à gauche, Cap Aiguade aménagé avec des remblais post 1968 (1970) et en bas, prise de vue aérienne de la DDTM13/SMEC d'avril 2020.

Sur la Figure 63 en haut à gauche, le Cap Aiguade est en train d'être réaménagé (car le site était occupé par une usine) autours de 1968.

Sur Figure 63 en haut à droite, le Cap Aiguade est réaménagé post 1968, des remblais ont été déposés sur la plateforme carbonatée miocène. Cette carte postale donne un instantané de l'exposition de la côte par rapport à l'orientation des vagues (la côte à droite de la carte postale est face à la pleine mer alors que celle face au lecteur est orientée vers le fond du golfe de Fos).

Commune de Martigues :

Sur la commune de Martigues, il est difficile d'assigner une date ou une décennie à certaines cartes postales, cependant certains indices suggèrent qu'elles pourraient dater d'avant la seconde guerre mondiale. Sur ces deux prises de vue de la plage du Verdon, les grosses dalles de carbonates miocènes sont visibles et déjà en basculées au début du XX^{ème} siècle (Figure 64).



Figure 64 : En haut, photographie de 2023 de la côte Ouest de la plage du Verdon (à la Couronne, Martigues) et en bas, même photographie sur une carte postale d'avant la seconde guerre mondiale.

Commune de Sausset-les-Pins :

Sur la commune de Sausset-les-Pins, une carte postale postérieure à l'aménagement de la corniche, illustre bien le platier rocheux incliné faiblement vers la mer et plutôt soumis à des submersion marine (Figure 65).



Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Figure 65 : A gauche, carte postale ancienne (la couleur sépia pourrait correspondre à la période des années 30 début quarante), au niveau la plage du four à chaux et à droite, photographie de 2023.

Commune de Carry-le-Rouet :

Sur Carry-le-Rouet, une carte postale d'au moins 1905 (date du timbre) du promontoire de la chapelle du Rouet, permet d'avoir une vue sans aucun aménagement (aucune habitation) du versant. La qualité des photographies et la présence de couvert végétal empêchent de pointer les blocs présents en 2023 et 1905.

Cependant, sur la photographie de 2023, l'extrême sud du promontoire présente, une pente plus abrupte que sur celle de 1905. Lors de notre passage sur le terrain, la base de cette pointe composée de limons rouges argileux de l'Oligocène était en érosion active (flèches rouges sur la Figure 66).

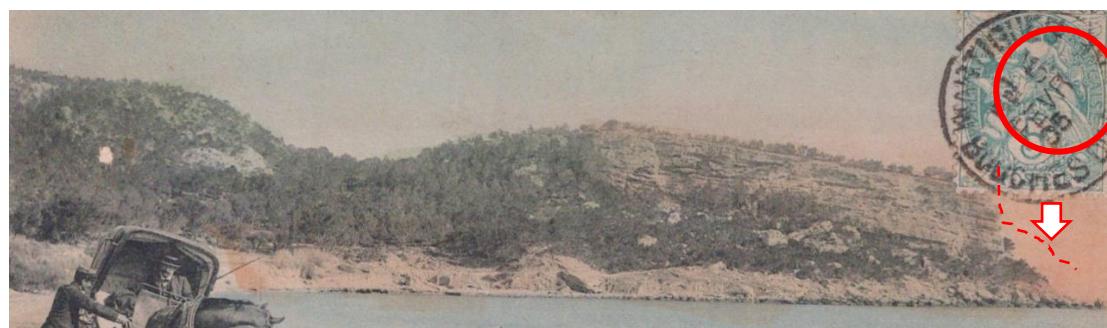
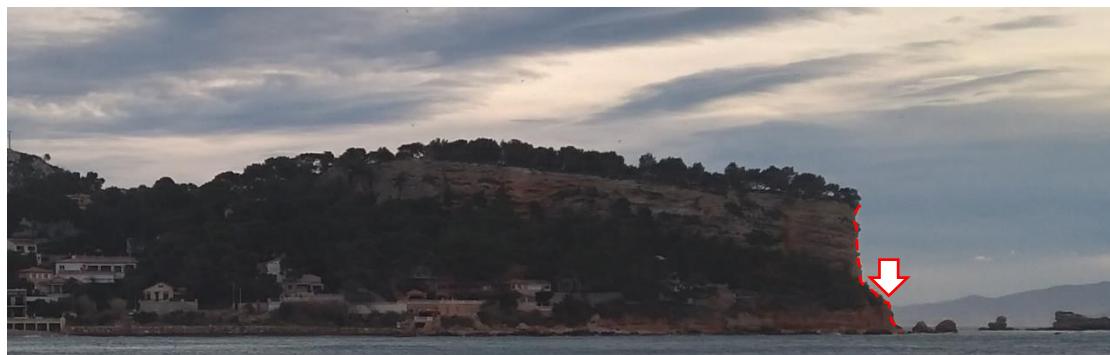


Figure 66 : En haut, photographie de 2023 ; en bas, Carte postale de 1905 (au moins)

Commune de Cassis :

Sur la commune de Cassis, quelques cartes postes sont pertinentes sur deux secteurs : celui de la falaise des Lombards (Figure 67 et Figure 68) et celui du pied du versant de Cap Canaille (Figure 69).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

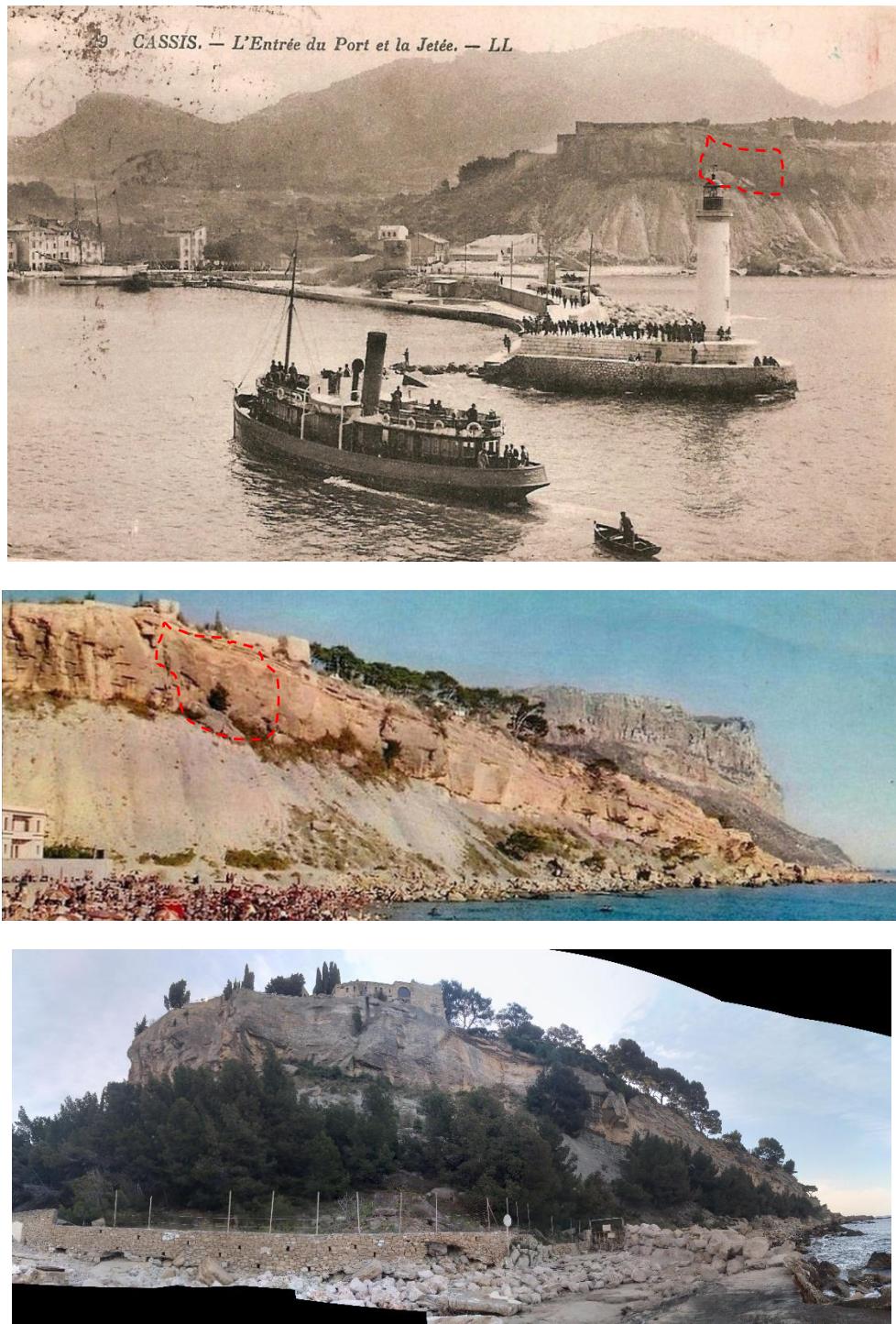


Figure 67 : En haut, carte postale fin 19^{ième} de la falaise des Lombards, au milieu carte postale d'au moins 1971 (date du courrier) du même endroit et en bas panorama de 2023.

Sur la carte postale de la fin du 19^{ième} (Figure 67 en haut), une chute de blocs massifs est visible depuis la falaise des Lombards. La cicatrice pourrait correspondre au polygone rouge (Figure 67 en haut). Sur la carte postale du dessous (Figure 67 au milieu), ces blocs semblent avoir été enlevés pour l'aménagement de la promenade en pied de falaise dans les années 70. Le réaménagement en pied tend à freiner l'action de la mer. Les glissements progressifs des marnes ont été continentalisés et plantés d'arbres méditerranéens (Figure 67 en bas).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Sur les deux cartes postales certainement fin 19^{ième} siècle (marine à voile dans le port sur la Figure 68 en haut), le pied de la falaise des Lombards est jalonné de trois gros blocs de plusieurs dizaines de mètres cubes, qui définissent des dièdres mesurés, observés et relevés sur le terrain.

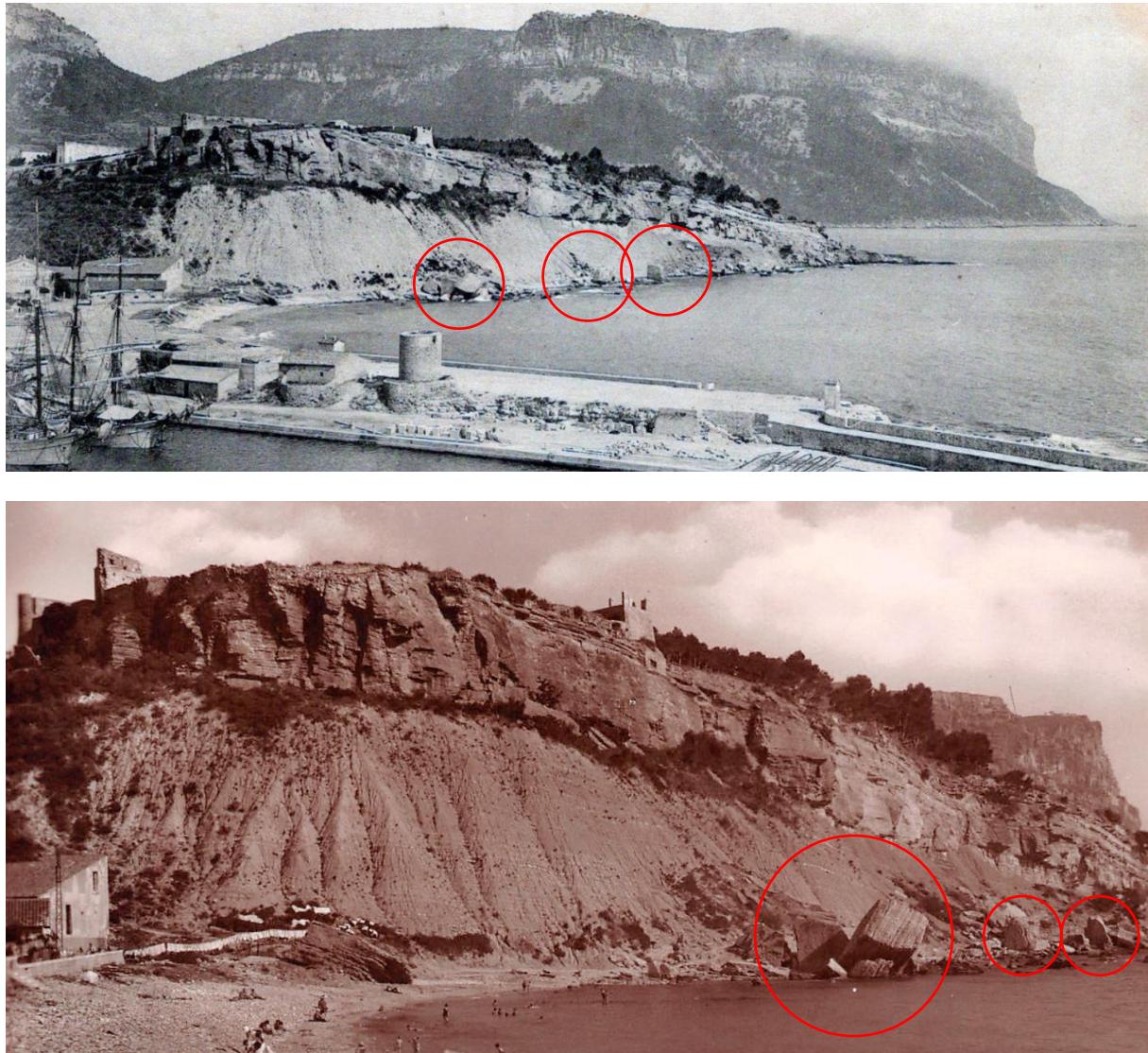


Figure 68 : Cartes postales anciennes toujours de la falaise des Lombards (en haut, fin 19^{ième}, trois gros blocs bien distincts, en bas, âge indéterminé, détail d'un des gros blocs)

Au pied du Cap Canaille, une carte postale d'au moins 1989 montre que certains gros blocs observés en 2023 étaient déjà présents à cette époque (Figure 69).



Figure 69 : En haut, carte postale du pied du versant de Cap Canaille d'au moins 1989 et en bas, panorama de 2023.

Cette revue de documents anciens permet de mieux contraindre les évènements en termes de dates et de les confronter à l'inventaire des mouvements de terrain et aux études des universitaires qui ont tenté de dater des blocs et des formes de reliefs (voir § ci-dessous : 5.3).

Certains très gros évènements peuvent en première approximation être liés à des évènements séculaires voire plus anciens.

9.1.2. Cartes marines anciennes

Deux cartes marines anciennes ont été utilisées :

- Plan des environs de La-Ciotat, de Cassis et de Port-Miou, (Littoral du département des Bouches-du-Rhône), levé en 1840 et dressé en 1842, sous la direction de M. Monnier, Ingénieur hydrographe 1^{ère} classe, Officier de la légion d'honneur, par MM. Le Bourguignon-Duperré et Bégaï, Ingénieurs hydrographes 1^{ère} classe, Chevaliers de la légion d'honneur et MM. Lieussou et Delamarche, Ingénieurs hydrographes 3^{ère} classe, publié par ordre du roi, sous le Ministère de M. le Baron de Mackau, vice-amiral, pair de France, secrétaire d'état au département de la Marine et des colonies, dépôt général de la Marine en 1843, révisée en 1872, par MM. Germain, Hatt et Bouillet, Ingénieurs hydrographes (Figure 72).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

- Carte particulière des côtes de France, Provence (Département des Bouches-du-Rhône), partie comprise entre le Bec de l'Aigle et le Cap Couronne, levé en 1841, sous la direction de M. Monnier, Ingénieur hydrographe 1^{ère} classe, Officier de la légion d'honneur, par MM. Le Bourguignon-Duperré et Bédat, Ingénieurs hydrographes 1^{ère} classe, Chevaliers de la légion d'honneur et M. Lieussou, Ingénieur hydrographe 2^{ème} classe, Chevaliers de la légion d'honneur, publié par du gouverneur de la république française, sous le Ministère de M. Verninac-Saint-Maur, Capitaine de vaisseau, secrétaire d'état au département de la Marine et des colonies, dépôt général de la Marine en 1848, révisée en 1872, par MM. Germain, Hatt et Bouillet, Ingénieurs hydrographes (Figure 73).

Le premier document est suffisamment précis pour observer des blocs (Figure 70).

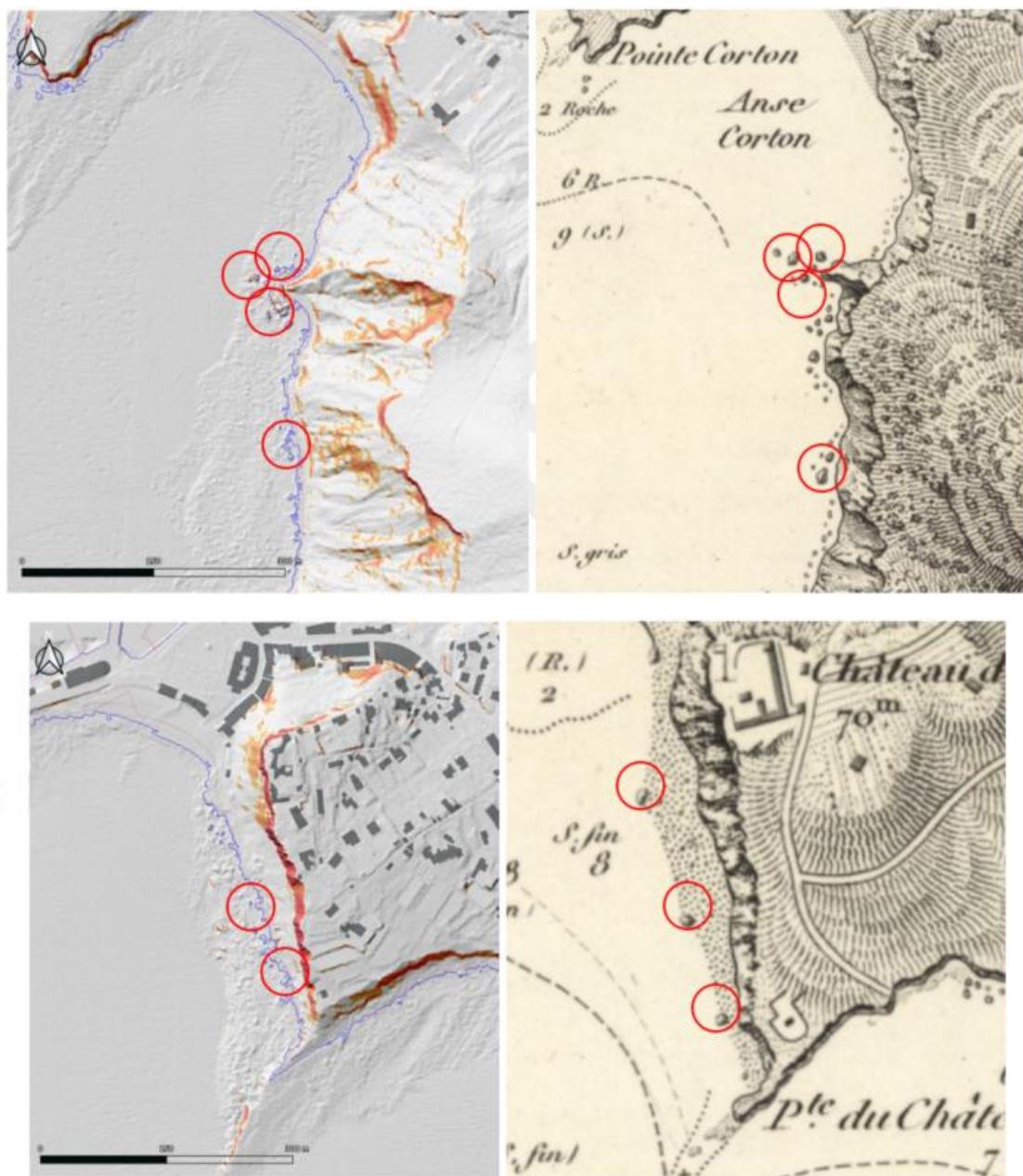


Figure 70 : Comparaison entre le mnt RGE Alti à 1 m ©IGN et la carte marine citée ci-dessus et ci-dessous de 1840 (localisation sur la Figure 72).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Sur la commune de Cassis, au pied du Cap Canaille, les très gros blocs observables sur le terrain et sur le Mnt à 1 m RGE Alti ©IGN, sont repérables aussi sur la carte marine de 1840 (Figure 70 en haut à droite et à gauche).

De la même façon, au niveau de la falaise des Lombards, les trois blocs principaux qui étaient observables sur les cartes postales anciennes de la fin du 19^{ème}, sont aussi observables sur la carte marine de 1840 et sur le Mnt à 1 m RGE Alti ©IGN.

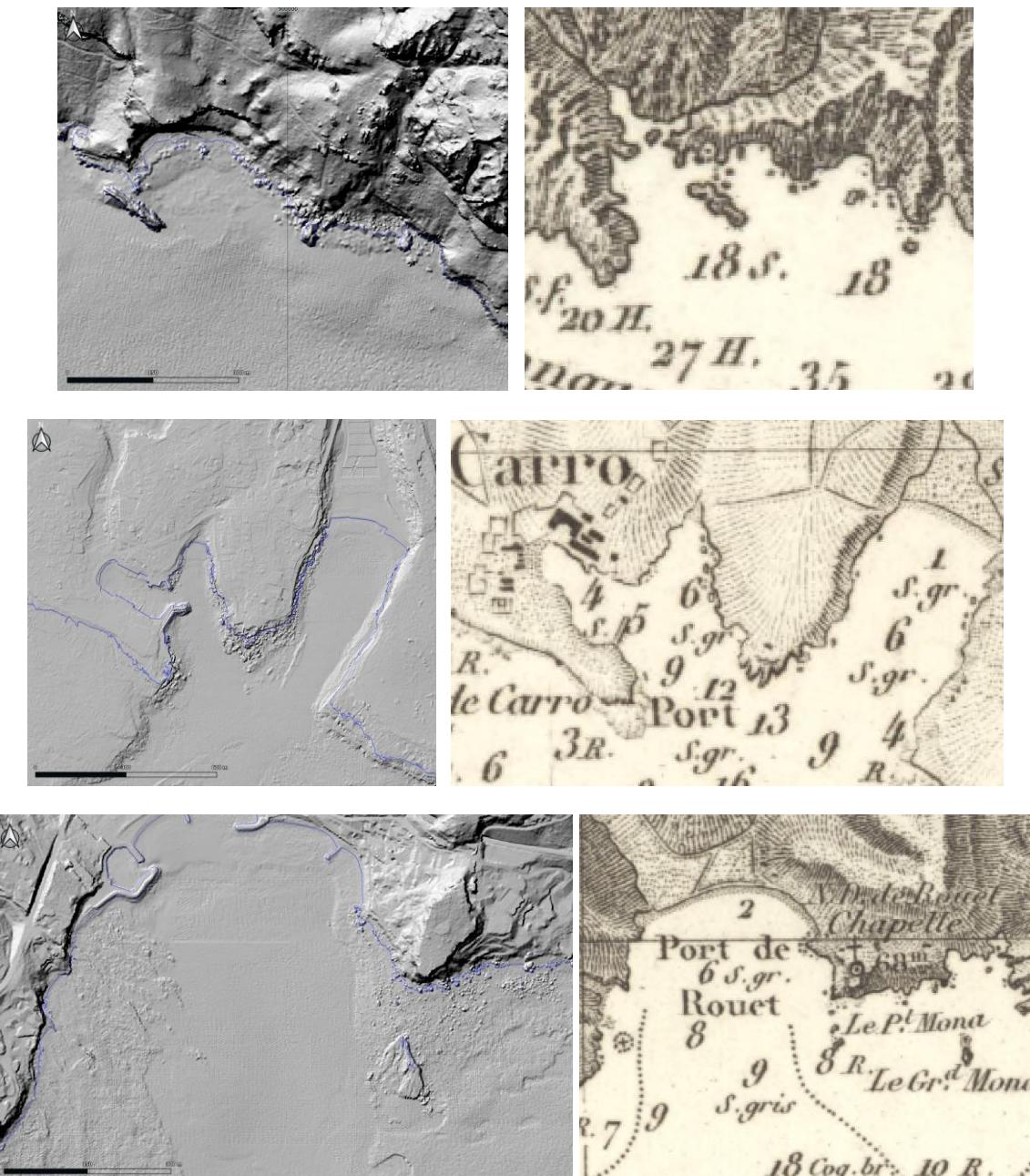
Sur la Figure 71 en haut, dans la calanque de Sugiton au niveau du Torpilleur (au sud sur la Figure 73), la zone de production de blocs est autant visible sur le Mnt à 1 m RGE Alti ©IGN que sur la carte marine de 1841.

Sur cette même figure, au milieu, dans le port de Carro (commune de Martigues), comme dans l'anse du Verdon, les gros blocs basculés qui étaient présents sur la carte postale ancienne sépia d'avant la seconde guerre mondiale, sont eux aussi présents sur le Mnt à 1 m RGE Alti ©IGN et sur la carte marine de 1841.

Enfin toujours sur la Figure 71 en bas, les blocs en provenance du promontoire de la chapelle du Rouet sont eux aussi visibles sur le Mnt à 1 m RGE Alti ©IGN et sur la carte marine de 1841.

Les comparaisons avec les cartes marines anciennes confirment les premières conclusions faites avec les cartes postales. Les évènements les plus importants semblent donc être des phénomènes anciens, dont il ne faut pas nécessairement tenir compte pour les scénarios envisagés sur les reculs des falaises et leurs projections aux échéances +30 et +100 ans.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône



Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

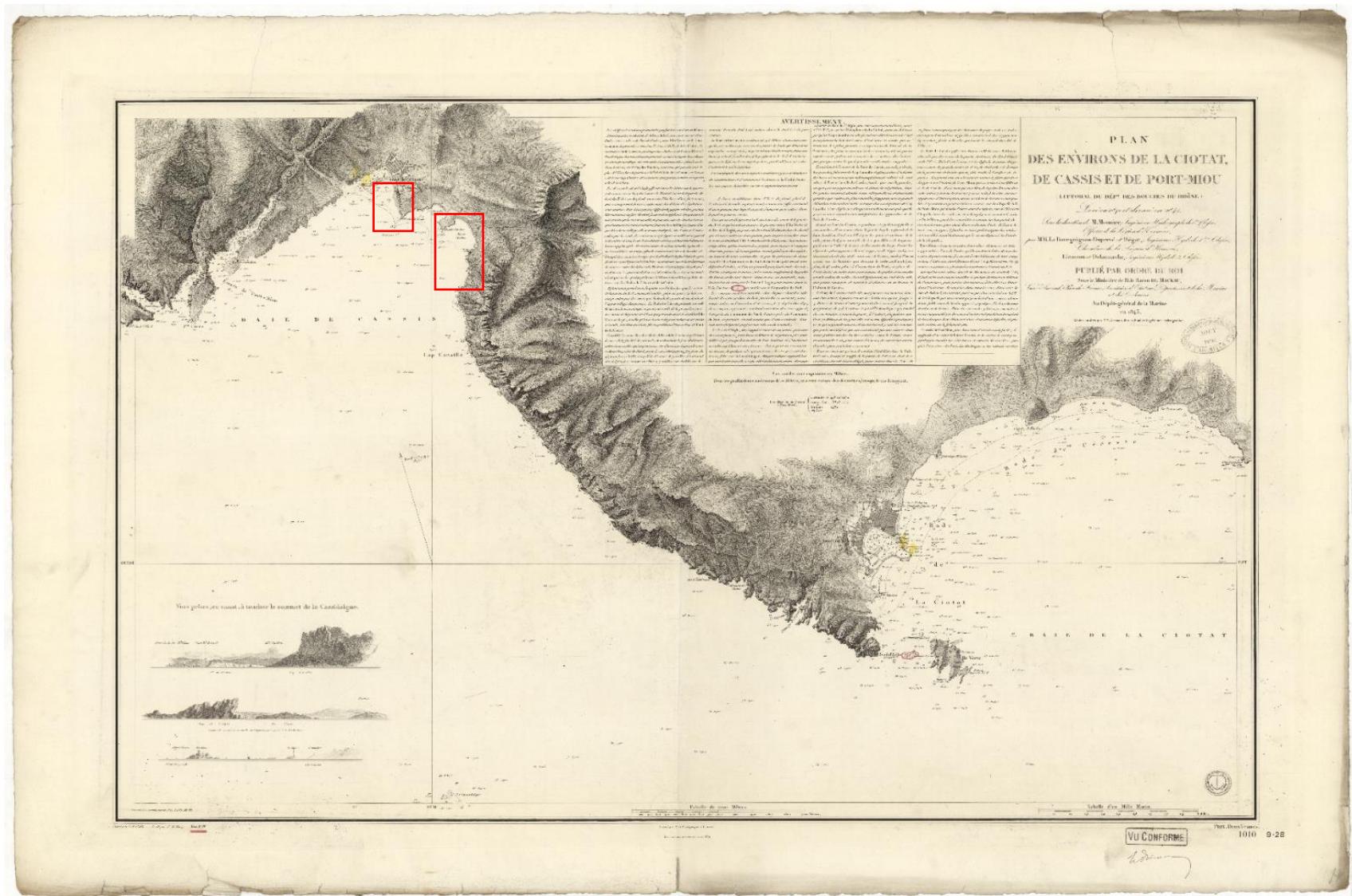


Figure 72 : Plan des environs de La-Ciotat, de Cassis et de Port-Miou, (Littoral du département des Bouches-du-Rhône), levé en 1840 et dressé en 1842 (source : Gallica)

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

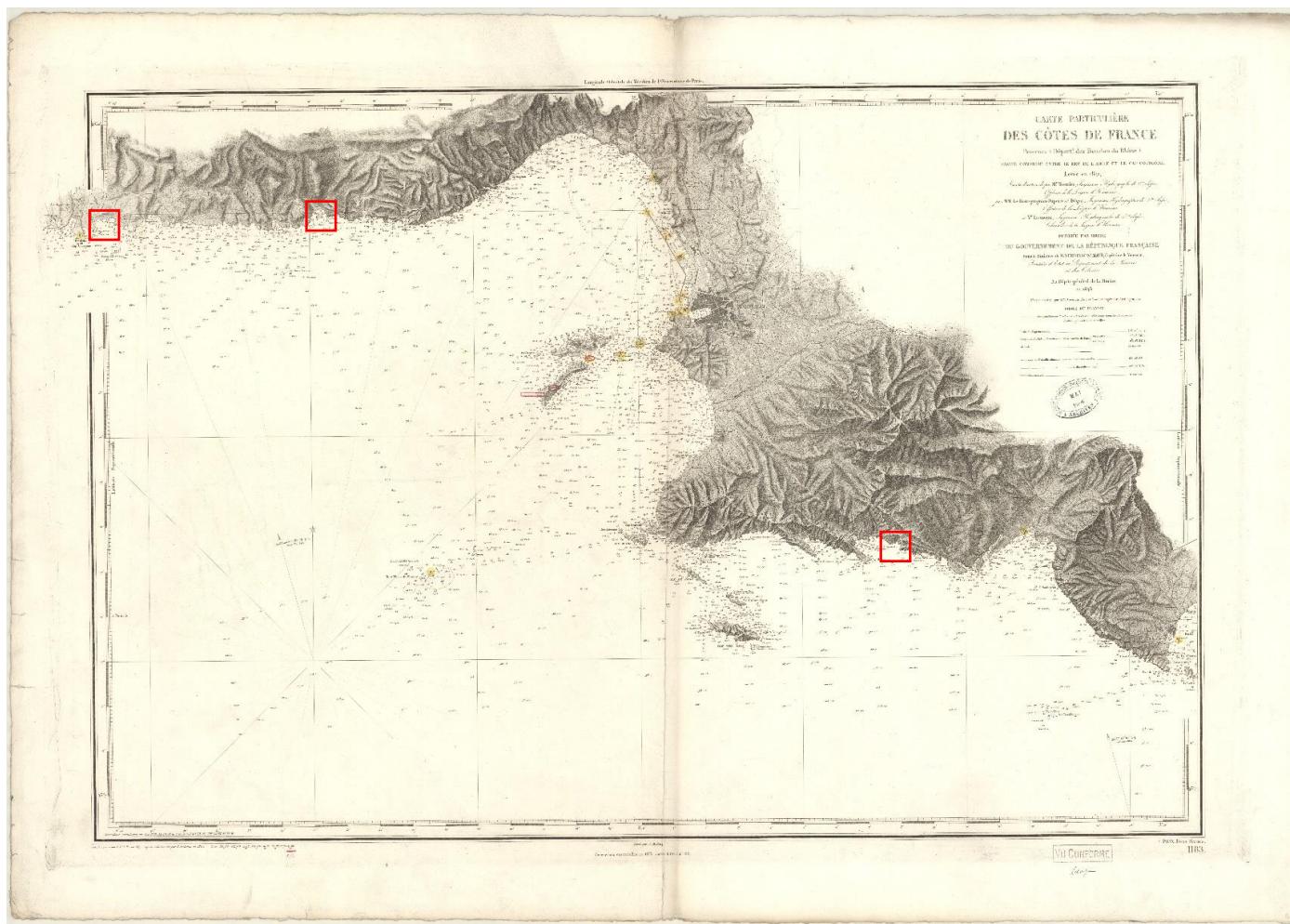


Figure 73 : Carte particulière des côtes de France, Provence (Département des Bouches-du-Rhône), partie comprise entre le Bec de l'Aigle et le Cap Couronne, levé en 1841
(source : Gallica)

9.2. DATATIONS D'ÉVÉNEMENTS GRAVITAIRES SECOLAIRES A HOLOCÈNES

9.2.1. Évènements gravitaires séculaires

A travers l'analyse diachronique d'images aériennes comparées sur les dates de la période 1924-2011, Giuliano (2014) avait identifié 46 événements sur le littoral de PACA.

Sur ces événements gravitaires, correspondant principalement à des glissements de terrain pour la période de 1924-1998 (soit 74 ans d'intervalle) et à des détachements de blocs rocheux pour la période de 1998-2011 (soit 13 ans d'intervalle), des taux d'érosion avaient été évalués.

Parmi ces événements deux secteurs se situent sur le littoral des Bouches-du-Rhône : l'un au niveau du Cap Canaille et le second au niveau de l'anse de la Madrague sur la commune de Ensuès-la-Redonne (Figure 74).

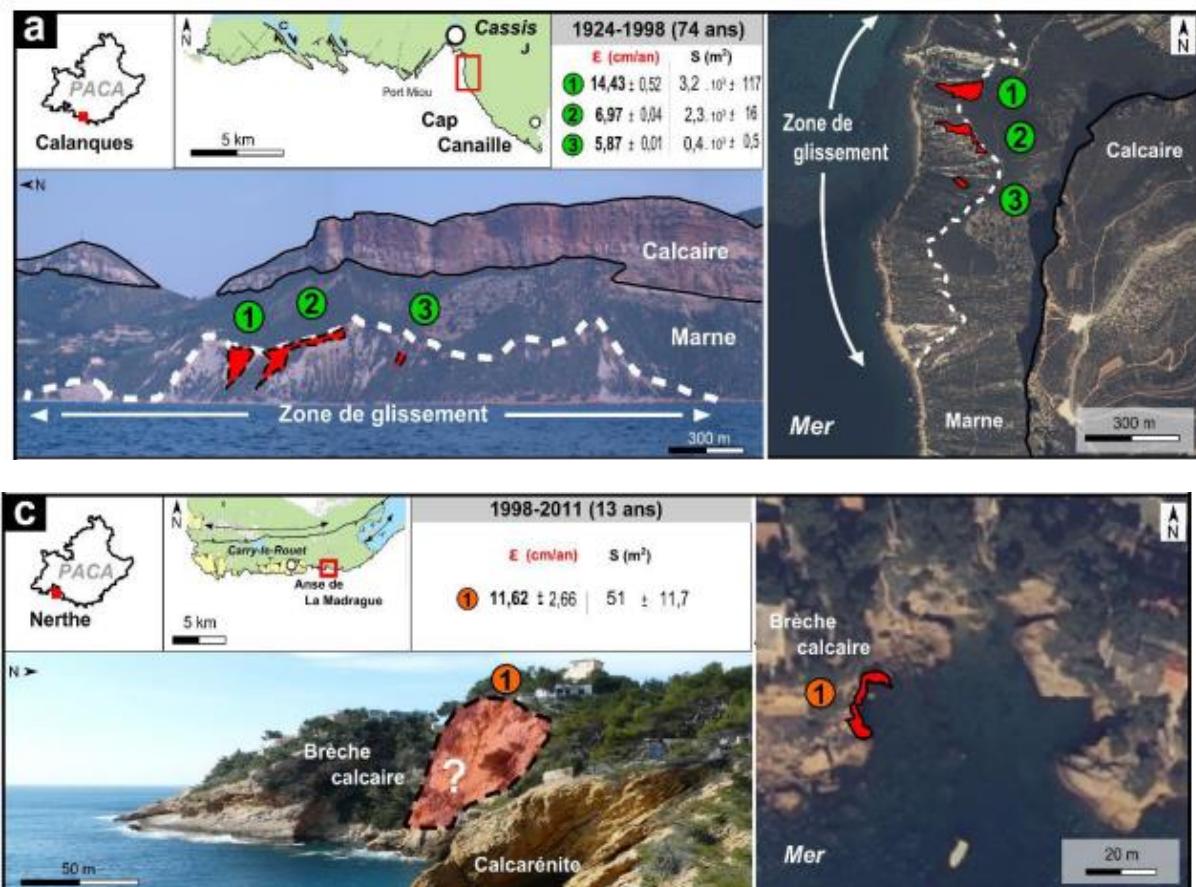


Figure 74 : Événements érosifs interprétés sur la période 1924-2011 et corrélés avec les observations de terrain : a - Erosion du glissement du Cap Canaille (1924-1998) ; c – Massif de la Nerthe : Erosion dans l'Anse de la Madrague (1998-2011) (Ensuès-la-Redonne) (d'après Giuliano, 2015)

Au Cap Canaille, Giuliano (2015) met en évidence sur la période de 1924-1998 (74 ans), que l'érosion se concentre en amont des niches d'arrachement des formations marneuses, pour des surfaces d'érosion comprises entre quelques mètres carrés à plusieurs milliers de mètres carrés. Il évalue le taux d'érosion de ce secteur entre **0,03/0,04 m/an à 0,14/0,15 m/an** et conclus à une érosion liée plutôt à une activité subaérienne.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Dans l'**anse de La Madrague (commune d'Ensues-la-Redonne, Massif de la Nerthe)**, sur la période de 1998-2011 (13 ans), l'érosion est caractérisée par des chutes de blocs. Les surfaces d'érosion sont comprises entre quelques mètres carrés et plusieurs dizaines voire centaines de mètres carrés, et permet d'évaluer le taux d'érosion à **0,11/0,13 m/an**. La proximité suggèrerait une action dominante marine.

Ces taux d'érosion évalués à partir d'une analyse diachronique sont des informations importantes pour travailler sur le recul potentiel des falaises des Bouches-du-Rhône. Les vitesses de recul peuvent être surévaluées sur des périodes relativement courtes et sous-évaluées sur des périodes trop importantes. Il apparaît important d'avoir des informations à différentes échelles de temps afin de ne pas émettre des vitesses de recul aberrantes.

9.2.2. Evénements gravitaires holocènes

Deux secteurs des Bouches-du-Rhône ont été investigués sur ces aspects : « datation du paysage littoral et de son évolution ». Il s'agit toujours du secteur du Cap Canaille, secteur emblématique avec ces falaises de plus de 400 m NGF sur la commune de Cassis et le secteur de Sausset-les-Pins et Martigues au niveau de Caro.

Sur Cap Canaille, une étude pluridisciplinaire a été réalisée par les équipes du CEREGE (Recorbet et al., 2010) sur la falaise côtière (commune de Cassis), avec pour contenu :

- des méthodes de datation CRE,
- et des analyses morphologiques.

Ces informations ont permis de mettre en évidence un recul de la falaise entre 3 500 et 12 000 ans, en relation avec la période de montée rapide du niveau de la mer.



Figure 75 : Falaise du Cap Canaille, avec la localisation des échantillons pour datation et des profils verticaux analysés (Recorbet et al., 2010)

L'étude montre des effondrements importants qui pourraient correspondre aux cicatrices identifiables aujourd'hui (Figure 75). Cette activité gravitaire importante de la falaise est tirée d'âges d'exposition au ^{10}Be de 33 échantillons collectés le long de cette cicatrice majeure, qui indiquent la survenue de deux événements d'effondrement majeurs autour de 3 500 et 6 700 ans.

Parmi les blocs effondrés échantillonés, les âges d'exposition au ^{10}Be et au ^{36}Cl donnent des âges compris entre 200 et 2 700 ans. Ces âges plus jeunes correspondent à l'enregistrement du dernier grand effondrement à 3 500 ans, biaisé vers des âges plus jeunes par l'érosion du matériau fin recouvrant les blocs et le fluage actif du talus.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

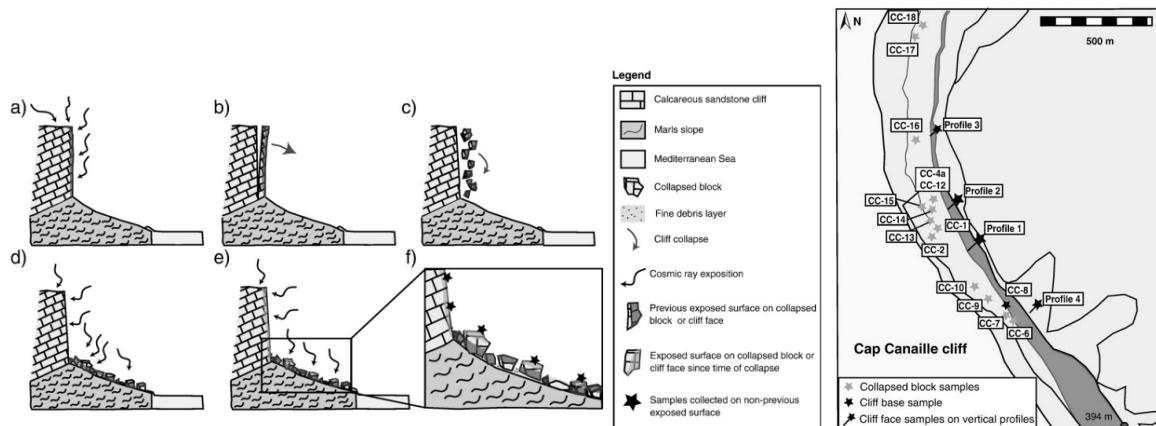


Figure 76 : Schéma interprétatif en coupe et carte des évènements gravitaires au niveau du versant du Cap Canaille et stratégie d'échantillonnage pour datation ^{10}Be et ^{36}Cl (Recorbet et al., 2010).

D'un point de vue méthodologique, l'âge de l'effondrement de la falaise est mieux limité par les âges d'exposition des échantillons prélevés directement dans la zone cicatrisée de la paroi de la falaise. Le volume estimé impliqué dans les derniers événements d'effondrement majeurs est de 7 106 m³, dont près de 6 106 m³ sont tombés dans la mer Méditerranée. Avec de tels volumes estimés et tombés dans la mer, l'étude du CEREGE évoque qu'un tel mouvement gravitaire aurait pu déclencher un tsunami local dans la baie de Cassis.

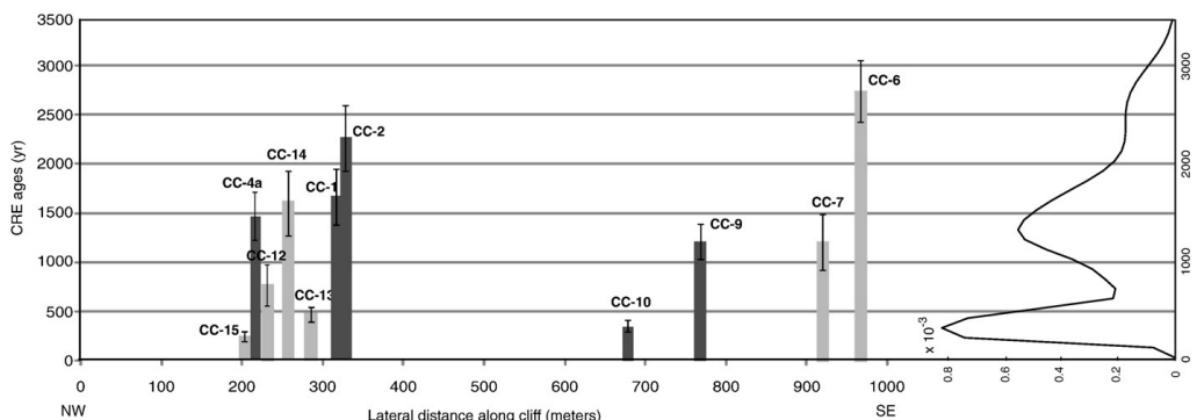


Figure 77 : Report des âges CRE mesurés sur les blocs tombés de la falaise de Cap Canaille, le long de celle-ci pour chaque échantillon (Recorbet et al., 2010)

L'étude évalue aussi la vitesse moyenne de retrait de la falaise qui pourrait être de l'ordre de **5 m tous les 1000 ans, soit 0,005 m/an**.

Si les auteurs évoquent le fait que la falaise ne montre pas de signes forts d'instabilité potentielle, nos observations de terrain (cette étude) montrent que des dièdres importants métriques à pluri-métriques, définis par au moins trois réseaux de fractures N085° 90, N140° 90 et N110° 90, sont présents et au sommet de l'un semblent affecter la stratification (Figure 78).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

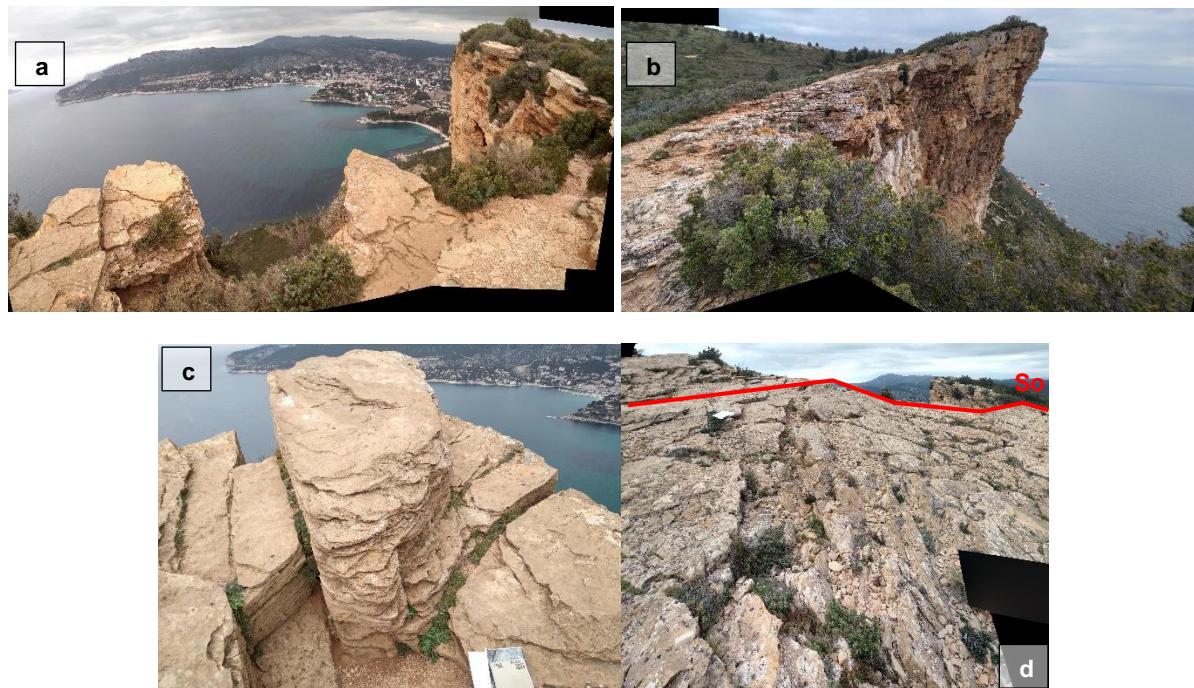


Figure 78 : Photographies de la morphologie de la tête de falaise du Cap Canaille et des dièdres associés : a – Vue de dessus de traces de dièdres tombés métriques et pluri-métriques ; b – Vue de profil de surplombs ; c – Vue de dessus de dièdre métrique de 1 à 2 m³ en place et d – Vue de dessus de la flexure de la stratification d'un dièdre pluri-métrique.

Le second secteur du littoral des Bouches-du-Rhône ayant été étudié pour essayer de dater les phénomènes d'érosion observées est situé à l'est de Caro à la limite des communes de Sausset-les-Pins et Martigues (Figure 80 ; Giuliano, 2015).

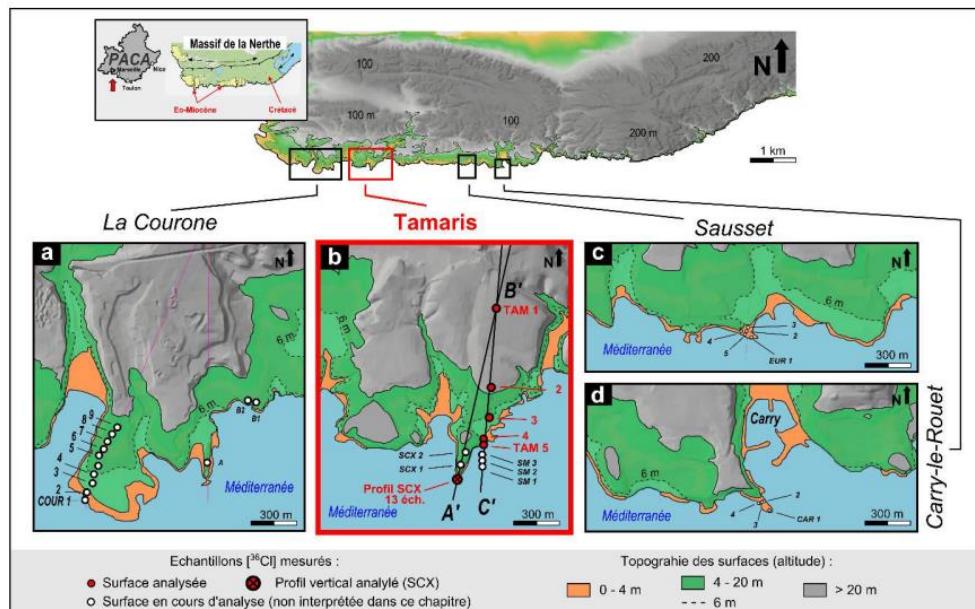


Figure 79 : Localisation des trois secteurs étudiés a- Secteur de la Couronne (Commune de Martigues) ; b- Secteur des Tamaris (décrit ici) ; c et d - Secteur de Sausset-les-Pins et Carry-le-Rouet (Giuliano, 2015)

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Les datations ont été réalisées par l'emploi du nucléide cosmogénique ^{36}Cl , afin de dater les platiers rocheux de ce secteur à travers un profil longitudinal orienté depuis le front de mer jusqu'à l'intérieur des terres et un profil vertical, longeant la paroi d'un escarpement fraîchement érodé depuis le sommet jusqu'au pied d'une falaise (Figure 80).

Le premier avait pour viser la datation des platiers alors que le second visait à tester si la paroi et sa dénudation verticale. Seuls les résultats du secteur b (La couronne) de la Figure 80, sont brièvement exposés et intéressent notre étude, les autres étant discutés dans la thèse de Giuliano (2015).

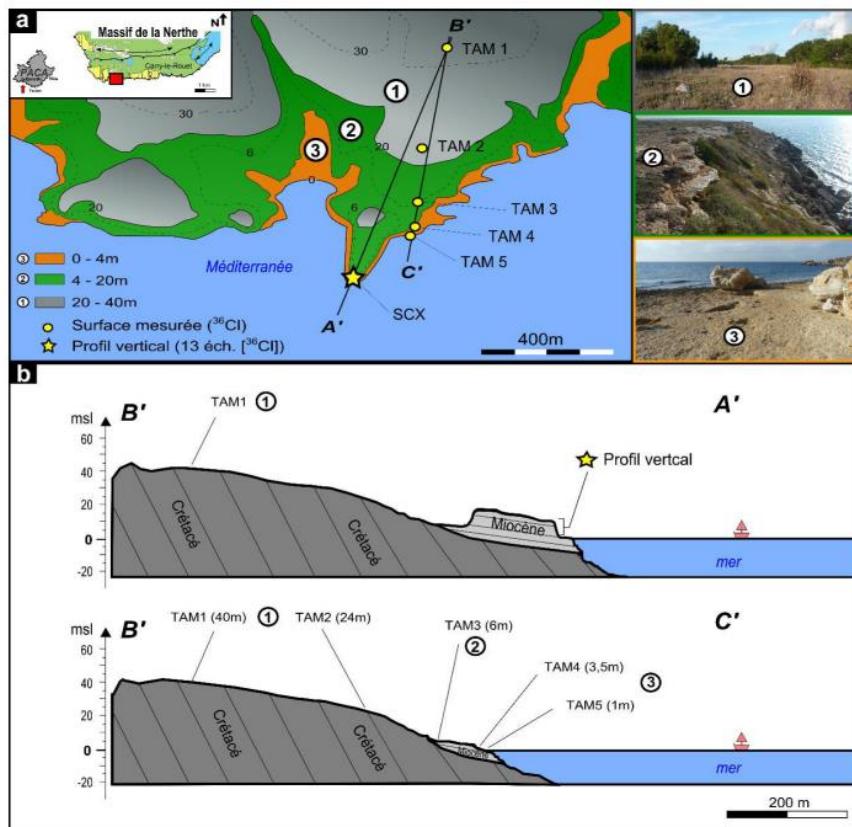


Figure 80 : Présentation de la campagne d'échantillonnage du secteur des Tamaris (section A'B' complétée par un profil vertical sur un escarpement fraîchement érodé, section C'B' correspondant au profil recoupant les différentes surfaces à dater. a- Carte topographique et photographies illustrant les surfaces étudiées. b- Coupes géologiques avec repositionnement des échantillons étudiés) (Guiliano, 2014)

Le profil vertical au niveau de l'escarpement Sud du cap avait été fraîchement érodé. Son échantillonnage et son analyse des âges en ^{36}Cl , a permis d'évaluer un taux de dénudation très faible de l'ordre de 0,0055 mm/an.

9.3. BASE DE DONNEES RECULS ET OBSERVATIONS (BDRO)

Afin de définir des scénarios de recul, une base de données compilant observations de terrain et phénomènes historiques (BDRO) a été assemblée à partir des éléments suivants :

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

- L'analyse des données historiques disponibles dans la Base de données nationales sur les Mouvements de Terrain (BDMVT) ainsi que d'autres études spécifiques⁴ ;
- L'inspection de 95 km de côtes rocheuses sur le terrain (2023-2024) ;
- Des compléments d'observation réalisés « à distance », grâce aux campagnes de photographies héliportées complétées par les données numériques (MNT, Ortho-photos).

Les sources associées aux 461 entités spatialisées, contenues dans la BDRO se répartissent de la manière suivante :

- 209 phénomènes historiques, dont 139 issus de la BDMVT,
- 218 observations de terrain issus des campagnes de 2023-2024,
- 34 observations à distance, réalisées à partir des photographies héliportées de 2020, complétées par d'autres numériques (MNT, Ortho-photos - IGN 2020 et 2023, Modèle numérique 3D de Google Earth).

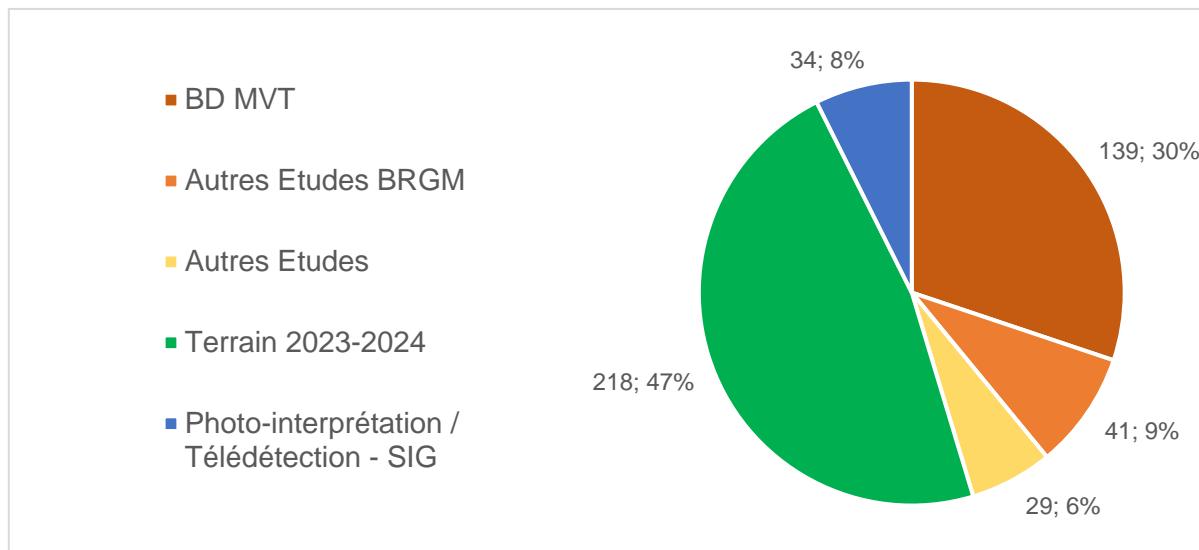


Figure 81 : Répartition des points d'observation en fonction de leurs sources

La structure de la BDRO est décrite en Annexe 7 du présent rapport. A partir des 461 points d'observation, 331 valeurs reculs ont pu être extraites. Il convient de distinguer les reculs effectivement observés, les reculs extrapolés (à partir d'un volume et d'une morphologie de falaise) et les reculs potentiels estimés. Parmi les données historiques, les observations peuvent être distinguées en 4 catégories :

- Les points bien documentés, pour lesquels un mouvement de terrain est relativement bien daté (année ou intervalle d'années) et une largeur de recul peut être observée ou extrapolée à partir d'un volume et d'une configuration de paroi (cf. Annexe 6) ;

⁴ En début de projet, un courrier a été adressé aux communes concernées afin de récolter des informations complémentaires. Le BRGM a obtenu les contacts de référents ayant des connaissances sur les sites sujets aux aléas littoraux et quelques études géotechniques. Ces études ont été intégrées à la base de données événementielles.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

- Les points pour lesquels l'occurrence d'un mouvement de terrain est attestée sans qu'il soit possible de le dater, à partir desquels une largeur de recul peut éventuellement être observée ou extrapolée, mais pour lesquels la période de retour n'apparaît pas nécessairement en adéquation avec les objectifs de l'étude⁵ ;
- Les points associés à une description d'instabilité sans constat effectif de mouvement de terrain (souvent issus d'un diagnostic de sécurisation de falaise), pour lesquels une valeur de recul a pu être éventuellement extrapolée ;
- Les points sans information associée (mis à part la nature du phénomène concerné), qui indiquent a priori l'occurrence d'un mouvement ou l'existence d'une instabilité mais dont la fiabilité apparaît très limitée.

A ces éléments, il faut ajouter les observations faites sur le terrain et sous SIG, sur la base desquelles d'autres phénomènes gravitaires passés ont pu être constatés et un recul potentiel a pu être estimé à dire d'expert, en s'appuyant sur l'analyse de la morphologie de la côte (failles, fracturation, stratigraphie, altération, etc. Voir Annexe 4).

Tableau 7 : Synthèse des modalités d'évaluation des reculs

Recul	Temporalité	Méthodologie	Observations concernées
Estimé	Prospective	Dire d'expert	Recul potentiel / observation
Extrapolé	Historique ou prospectif	Calcul à partir d'un volume et d'une configuration de paroi ; Choix de la valeur à dire d'expert	MVT daté, MVT non daté, Indice instabilité
Observé	Historique	Mesure lors du constat sur le terrain ou a posteriori sur photos / sous SIG	MVT daté, MVT non daté

⁵ Il s'agit à 90% d'observations récoltées lors des campagnes terrain mais également de phénomènes recensés dans la BDMVT.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

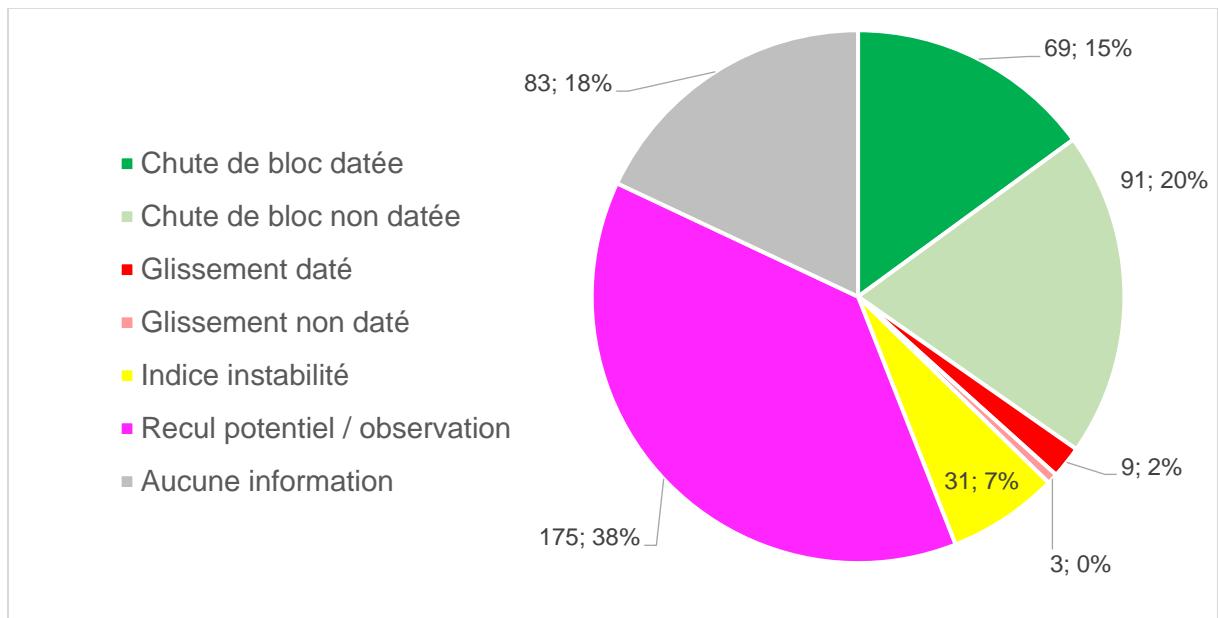


Figure 82 : Répartition des observations contenues dans la base de données constituée par nature et synthèse des informations correspondantes en termes de recul

On retiendra que les valeurs de recul unitaire sont globalement comprises entre 0 et 15 m et 90% des valeurs sont inférieures ou égales à 5 m. Les reculs moyens et médians globaux sont autour de 2 et 2,5 m.

9.4. ANALYSE ET CRITIQUE DES VALEURS DE RECUS ATTRIBUEES

On notera que les reculs tendent à être plus prononcés lorsqu'ils sont estimés à titre prospectif et plus minimes lorsqu'ils sont extrapolés à partir d'un volume. Cela peut être lié au fait que les volumes pris en considération ne correspondent pas toujours au volume total associé à un évènement gravitaire, mais également au fait que les chutes de blocs ne génèrent pas systématiquement de recul selon le type de rupture (voir méthodologie en annexe).

De plus, les reculs associés aux mouvements de terrain non datés sont globalement plus prononcés que ceux estimés pour les mouvements de terrain datés. Cela tend à démontrer que ces phénomènes doivent être considérés avec davantage de précaution, dans la mesure où les reculs qui peuvent leur être associés ne correspondent pas nécessairement à ce qui peut être attendu sous l'horizon temporel de référence (cf. section 9.2).

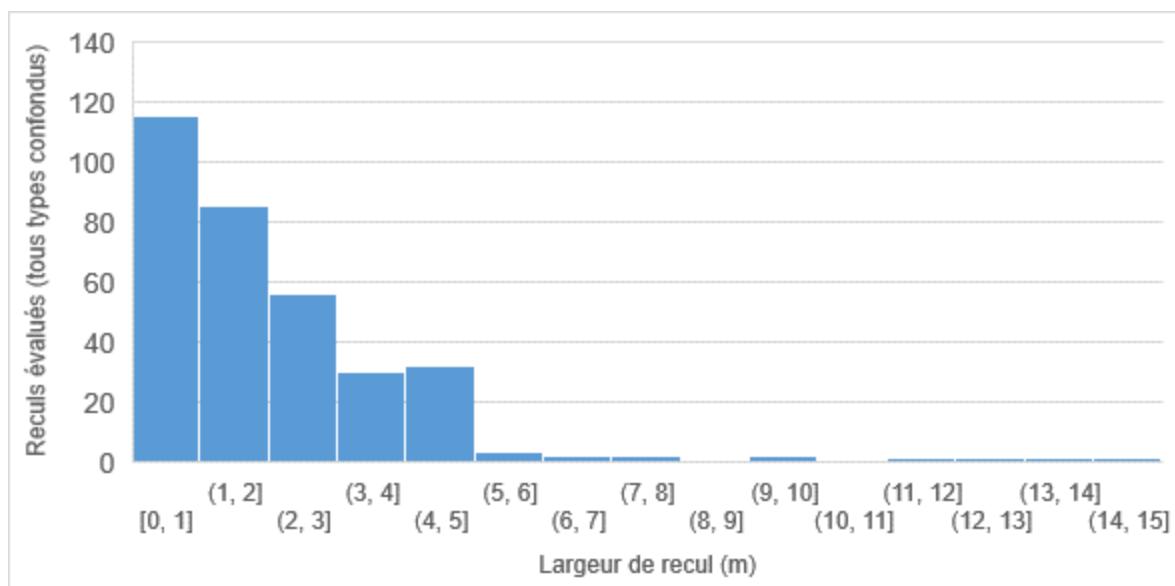


Figure 83 : Histogramme de répartition des reculs par classe de largeur

Tableau 8 : Valeurs caractéristiques associés aux différentes séries de reculs évalués

Valeur	Recul observé	Recul extrapolé	Recul estimé	Tous reculs
min	0.0	0.5	0.0	0.0
max	7.0	14.0	15.0	15.0
médiane	1.5	1.0	2.5	2.0
moyenne	2.0	1.9	3.1	2.4
écart-type	1.8	1.9	2.8	2.1
total	33	145	153	332.0

10. Carte informative

Des cartes informatives au 1 :25 000 ont été produites pour rassembler l'ensemble des éléments mobilisés en préparation des projections de recul. Les documents sont joints en Annexe 1 du présent rapport. Sont figurés :

- Les Traits de Référence décrits au chapitre 7, classés en fonction de la typologie des falaises établie au chapitre 6
- La géologie harmonisée au 1 :50 000 (Bd Charm-50, BRGM : <https://infoterre.brgm.fr/formulaire/telechargement-cartes-geologiques-departementales-150-000-bd-charm-50>) qui complète la classification morphologique.
- Les ouvrages littoraux décrits au chapitre 8
- La Base de données Reculs et Observations présentée au chapitre 9

Les données sont représentées sur fond IGN et MNT Ombré (RGE Alti, 2022) afin de faire ressortir le relief. Un extrait de la carte informative est présenté en Figure 84.

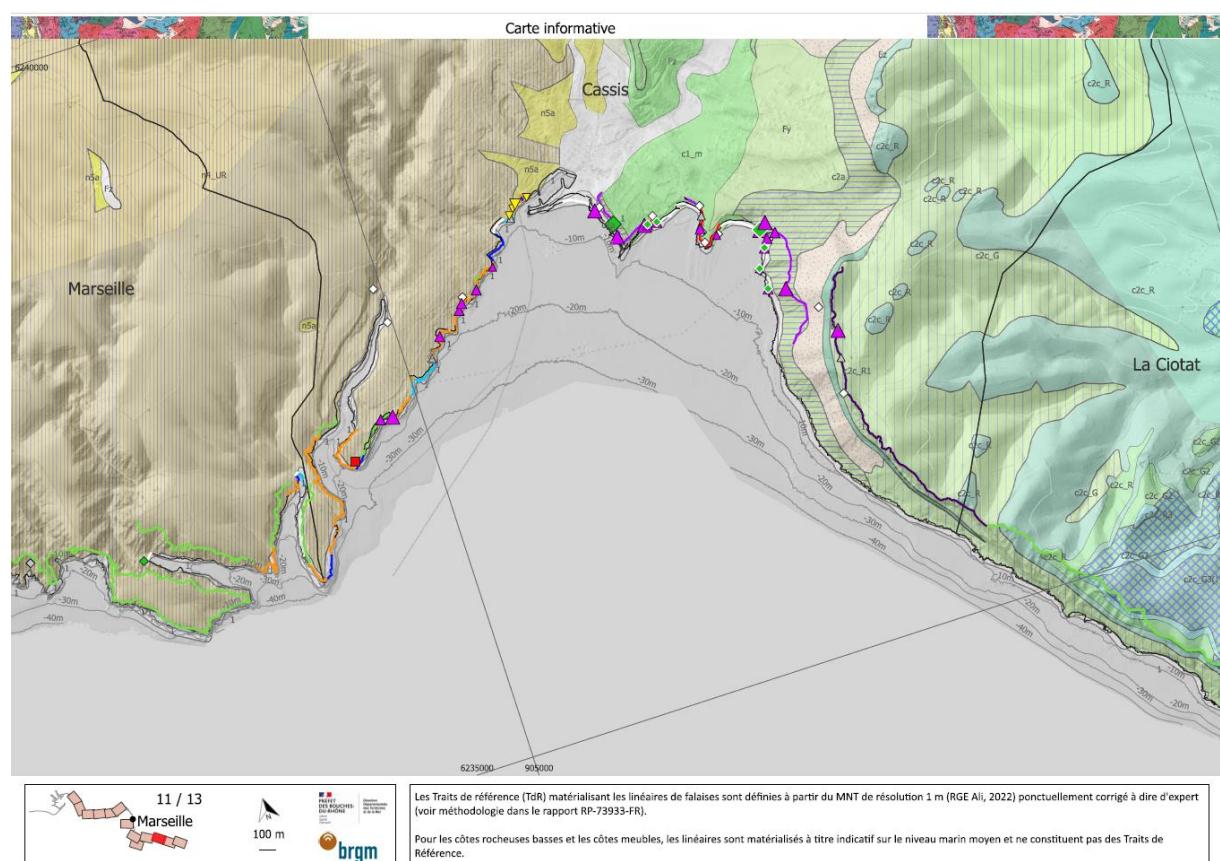


Figure 84 : Exemple d'une des planches de l'atlas de cartes informatives fournies en Annexe 1. Chaque planche permet de visualiser la géologie et la morphologie des falaises, la position du Trait de Référence, la présence d'ouvrages de protection, ainsi que les points d'observation et les événements gravitaires historiques. L'encart en bas à gauche permet de localiser la position de la planche cartographique le long du linéaire côtier (rectangle rouge). A noter que cette planche est montrée à titre illustratif, l'échelle au 1/25000 n'est pas respectée dans cette représentation. La légende des cartes est présentée en Annexe 1.

11. Projections de recul aux échéances +30 et +100 ans

11.1. ADAPTATION DES RECOMMANDATIONS NATIONALES AU LITTORAL ROCHEUX DES BOUCHES-DU-RHÔNE

Comme exposé au paragraphe 1.3, l'approche méthodologique proposée dans le cadre de cette étude s'inspire des travaux en cours pour la cartographie des aléas gravitaires et vise à mieux considérer la dynamique évènementielle des côtes rocheuses, dont la cinétique est gouvernée majoritairement par des cycles d'érosion comprenant deux phases : une phase préparatoire et une phase d'écroulement (Figure 85 ; § 6.1).

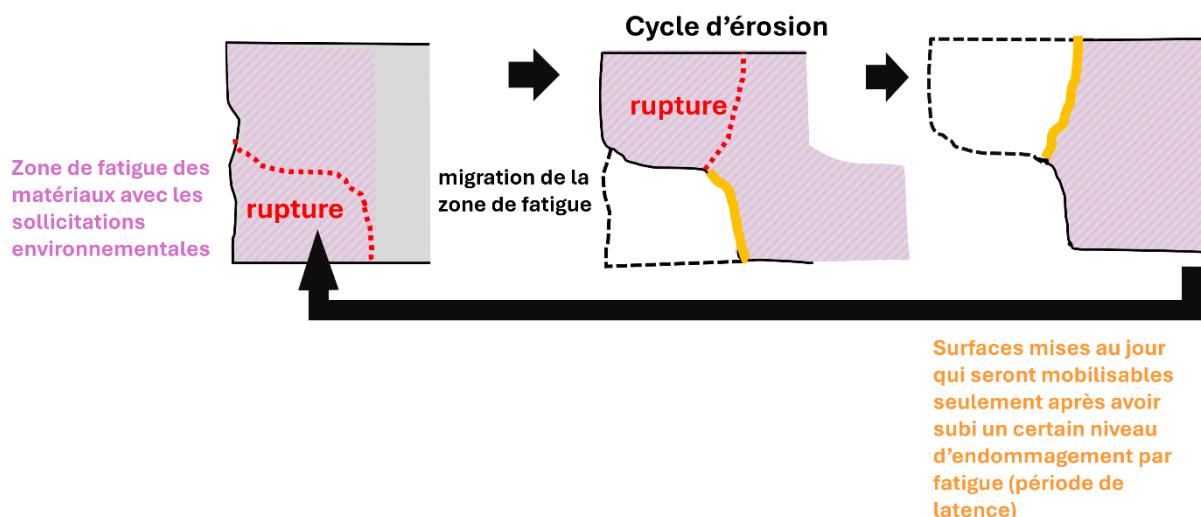


Figure 85 : Schéma conceptuel du cycle d'érosion appliquée à un escarpement rocheux

L'approche retenue s'attache à caractériser un « aléa de référence », soit le recul du sommet (ou tête) de falaise (ou d'escarpement), dénommé « Recul unitaire » (Ru), d'occurrence et d'intensité données, sur une période de référence donnée (GT MEZAR).

L'aléa de référence est défini à partir de « scénarios de référence » dans les travaux et méthodologies relatifs aux aléas gravitaires (MEZAR en cours ; MEZAP, 2021). Ces scénarios ne correspondent pas exactement aux scénarios « médians » et « sécuritaire » dont la prise en compte est recommandée par la documentation nationale en matière d'exposition au recul du trait de côte (BRGM-Cerema 2022, p.14).

Dans le cadre de cette étude, un scénario unique est considéré et il se fonde sur des hypothèses maximisantes (période de référence de 100 ans), c'est-à-dire sécuritaires.

Des hypothèses de répétition de Ru aux horizons +30 et +100 ans sont ensuite déterminées pour des tronçons de falaises considérés comme homogènes.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

En pratique, l'expert cherche donc à caractériser la potentialité que 2 évènements (ou plus) affectent successivement le même tronçon de falaise pour la période prospective étudiée (Figure 86).

Le changement climatique est susceptible d'induire une modification des sollicitations environnementales de la falaise, et donc de la cinématique de vieillissement de celle-ci. In fine, la conséquence possible est un changement de la durée du cycle d'érosion, avec notamment un possible raccourcissement de la période de latence. Les connaissances actuelles ne permettent pas d'avoir une approche quantitative de ces changements, mais elles permettent de faire des hypothèses pour encadrer (ordre de grandeur) les changements attendus.

De la même manière, les ouvrages et les mesures de gestion en général peuvent également jouer un rôle dans la cinématique de démantèlement des falaises. Encore faut-il les identifier et être en mesure de caractériser leur pérennité.

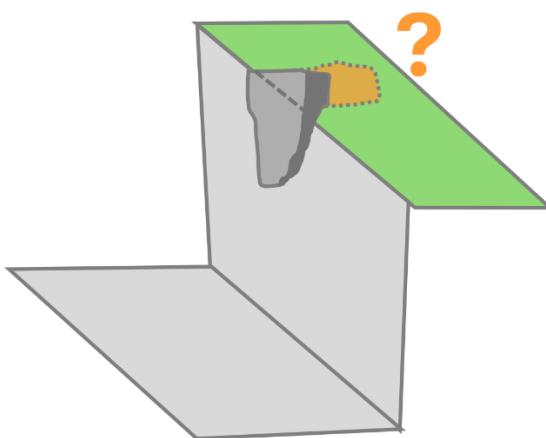


Figure 86 : Représentation schématique de la potentialité que deux évènements affectent successivement le même escarpement

Il convient donc de :

- De déterminer des valeurs de Recul Unitaire et de les affecter à des tronçons de falaise caractérisés comme homogènes, auxquels correspondent des Traits de Référence;
- D'estimer l'influence que le changement climatique pourrait avoir sur la succession éventuelle de ces reculs ;
- De définir les modalités de prise en compte des ouvrages.

Le Tableau 9 expose à chaque étape les problématiques posées, les méthodes déployées et les paramètres ou données d'entrée retenus. Des développements viennent expliciter le déroulé de ces étapes dans les sections suivantes.

Tableau 9 : synthèses des problématiques adressées et des réponses apportées pour la projection de recul aux horizons 30 et 100 ans

Problématiques	Méthode	Paramètres		
Identification du Trait de Référence	Définition d'une typologie des falaises, Etude de la distribution des pentes par lithologie	Ligne de crête digitalisée		
Détermination des Reculs unitaires (ou événementiels)	Observations de terrain, Analyse des données historiques, Confrontation aux tronçons homogènes	<i>Recul rocheux unitaire</i>	<i>Recul unitaire (Ru)</i>	
		+ éventuel <i>recul meuble en tête</i>		
Prise en compte du Changement climatique	Forfaitaire et dire d'expert	Application d'un <i>Ru</i> à l'horizon 2030. CC négligé.		
		Application d'un second <i>Ru</i> pour les tronçons géomorphologiquement sensibles à l'élévation du niveau de la mer à l'horizon +100 ans		
Prise en compte des ouvrages de protection	Actualisation de l'inventaire de la BD nationale et affectation d'hypothèses de pérennité	BD Ouvrages littoraux		

Identification des incertitudes



11.2. DEFINITION DU RECOL

L'évolution du TdR est mesurée en **recol**, correspondant à la distance mesurée entre la position initiale du TdR et la projection du recul en cas de déclenchement d'une ou plusieurs instabilités rocheuses.

Le recul se mesure à l'horizontale dans la direction perpendiculaire à l'escarpement. **Le recul lié à un événement unique est le Recul unitaire (Ru ; Figure 87).** **Le recul lié à plusieurs événements successifs est le Recul cumulé ou total (Rc Figure 87).** Chaque recul unitaire est un événement considéré comme instantané. Cette phase d'éboulement peut être précédée d'une période de lente évolution de la stabilité du compartiment rocheux qui peut parfois se constater avec l'observation d'une déformation de surface ou l'ouverture de fissures de décompression par exemple.

Le nombre d'événements successifs retenus pour évaluer le recul cumulé dépend de l'horizon temporel considéré.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

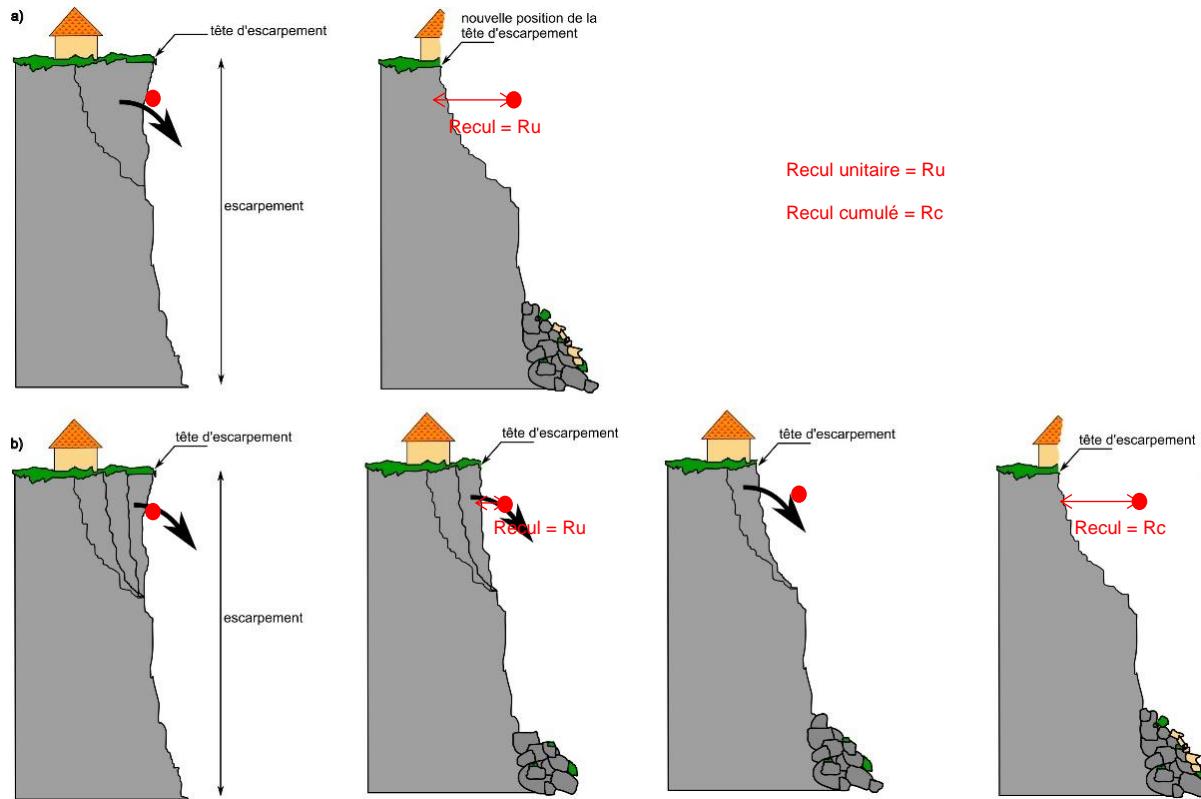


Figure 87 : Représentation schématique du recul de la tête d'escarpement lié à un (a) ou plusieurs éboulements (b), soit, respectivement, l'observation du recul unitaire ou cumulé de la tête d'escarpement (Adapté des travaux du GT MEZAR)

Le zonage de l'aléa de recul représente la zone en amont de versant pouvant être affectée par le déclenchement d'une chute de bloc ou d'un éboulement et « des effets cascades » de cet aléa. La séquence des phénomènes considérés doit nécessairement comprendre la déstabilisation de matériaux rocheux. Dans le cas de mouvements gravitaires complexes (par exemple, un éboulement en falaise qui déstabilise une couche de matériaux meubles en tête sous forme de glissement), le zonage de l'aléa de recul doit intégrer l'ensemble des mouvements gravitaires considérés (§ 11.3.2).

La probabilité de recul au sein d'un tronçon homogène est identique en tout point du tronçon, considérant que le caractère homogène correspond à des configurations de falaises/versants très semblables sur l'ensemble du linéaire. **On parle de phénomène « diffus »** (Figure 88).

Cette hypothèse pourrait être précisée sur la base d'acquisitions de données supplémentaires à l'échelle locale : connaissance fine des lithologies, géométries des formations géologiques, densité de fracturation, circulations d'eau, etc.

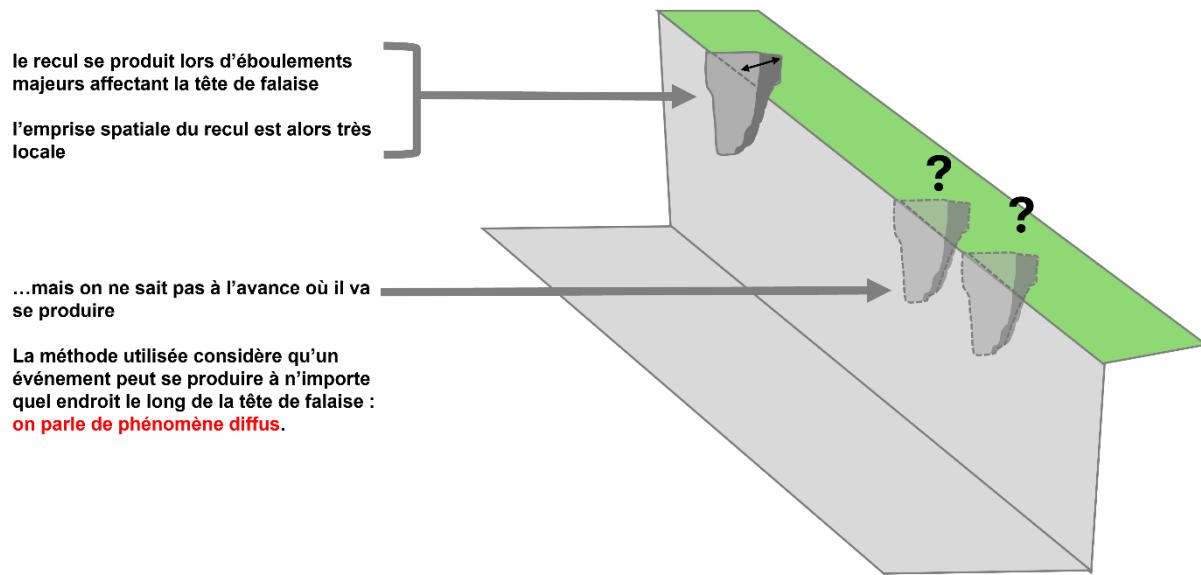


Figure 88 : Schéma de principe sur les événements rocheux entraînant du recul en tête de falaise. Ces phénomènes sont considérés comme diffus à l'échelle du linéaire de falaise dans un objectif de cartographie de l'aléa

11.3. DEFINITIONS DES TRONÇONS DE FALAISE HOMOGENES ET AFFECTATION DES VALEURS DE RECOL

Afin de définir des valeurs de reculs unitaire R_u à retenir, la base de données évènementielle a été interrogée à partir des tronçons de falaise. Les observations ont été extraites dans un rayon de 20 et 50 m autour de chaque tronçon⁶.

Des bilans sont ensuite dressés en croissant (détail en Annexe 8) :

- Les caissons géologiques (nature des roches en présence définissant une zone de lithologie homogène)
- La typologie des falaise (§ 6.2).

Le « tronçon homogène » est défini par le croisement d'un caisson géologique, d'un type de falaise et éventuellement d'une spécificité morphologique supplémentaire (hauteur par exemple, lorsque de grandes variations sont observées).

11.3.1. Affectation des valeurs de recul unitaire

L'affectation des valeurs de reculs est menée à dire d'expert :

- Lorsque le bilan est homogène et cohérent à l'échelle d'un caisson géologique, la valeur de Recul unitaire retenue est attribuée directement à l'ensemble des tronçons lui appartenant, quelle que soit leur type.
- Lorsque le bilan est hétérogène, les valeurs de recul retenues sont attribuées par type de falaise et/ou en fonction de paramètres morphologiques tels que la hauteur, l'orientation et l'épaisseur des bancs, en fonction des corrélations observées.

⁶ Dans un rayon de 20 m, les observations relatives à un tronçon de falaise de faible hauteur ressortent bien, mais pour les falaises à multi-escarpement, les observations pertinentes peuvent être localisées loin de la crête de référence

De manière sécuritaire, la valeur retenue est systématiquement la valeur la plus élevée sauf lorsque cette valeur apparaît en inadéquation avec la période de référence considérée (100 ans). Le recul déterminé correspond à un potentiel maximum, extrapolé à l'ensemble d'un tronçon défini comme homogène.

Ponctuellement, en présence d'aléa localisé identifiés spatialement et en cas de configuration très défavorable par rapport aux tronçons homogènes (mêmes typologie et caisson géologique) des valeurs de recul unitaire locales sont en effet proposées (Figure 89).

Les valeurs de reculs retenues en fonction des configurations sont présentées en Annexe 9 du rapport et en extrait ci-dessous :

Tableau 10 : Valeurs de Recul unitaires retenus (extrait de l'Annexe 9)

N° caisson	Caisson géologique	Types de falaises	Nb de configurations retenues	Valeurs de Recul unitaire retenues (m)		
				Cas 1	Cas 2	Cas 3
27	Grès du Baguier du Coniacien	5ter	1	1		
28	Grès et marnes sableuses Santonien	5ter, 11, 12	3	T5ter : 4 m	Configuration localisée très défavorable (T5ter) : 15 m	De part et d'autre de la configuration très défavorable (T5ter) : 10 m

Cette analyse, par exemple identifie pour le caisson géologique 28, 3 scénarios de reculs. Le Ru est attribué indépendamment des types de falaises rencontrés, la lithologie contrôle majoritairement le recul :

- Diffus $R_u = 4 \text{ m}$ (T5ter)
 - Localisé $R_u = 15 \text{ m}$ (T5ter configuration défavorable ; Figure 89)
 - Localisé $R_u = 10 \text{ m}$ (T5ter voisinage de la configuration défavorable)



Figure 89 : Configuration ponctuelle très défavorable avec compartiment massif sous-cavé, fracturé par l'arrière (La Ciotat – Photo : DDTM13, 2020)

11.3.2. Cas particulier de scénarios en cascade : recul de terrain meuble en tête

Pour les tronçons de falaise caractérisés par la présence de matériaux meubles en tête, un recul affectant l'escarpement rocheux est susceptible de venir déstabiliser les dépôts en amont conformément au schéma de la Figure 90.

Afin de prendre en compte ces configurations de recul « en cascade » des hypothèses simplificatrices permettent d'estimer le recul des terrains meubles en tête :

- L'épaisseur réelle des matériaux meubles est assimilée à la hauteur de terrains meubles (Hmeuble) ;
- Deux hypothèses de pente d'équilibre sont retenues en fonction de deux grandes classes de matériaux meubles définies à partir des observations (Terrain et Campagne photographique héliportée)⁷ :
 - Une pente de 33° pour les matériaux fins,
 - Une pente de 38° pour les remblais grossiers.

⁷ Ces valeurs ont été définies à dire d'expert à partir des pentes naturelles jugées à l'équilibre observées dans ces formations via le MNT.

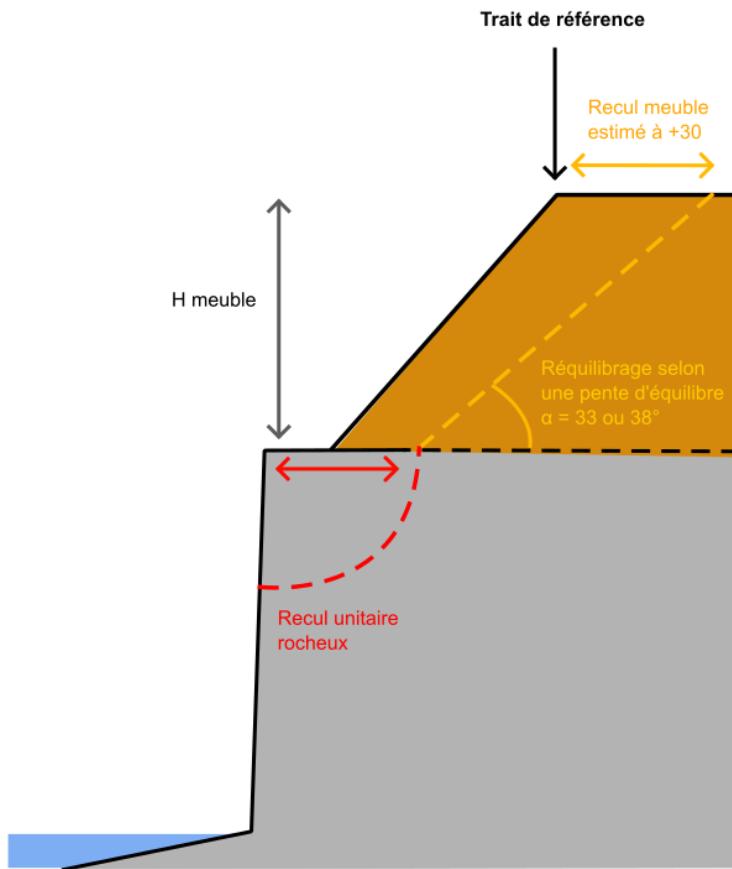


Figure 90 : Schéma de principe pour l'estimation des reculs susceptibles d'affecter les formations meubles en tête de falaise

Pour chaque tronçon, plusieurs profils ont été extraits du MNT (RGE Alti, résolution 1 m) et ont servi à estimer directement la largeur de recul meuble mobilisable en tête en cas de rééquilibrage postérieur à un recul rocheux (valeur définie à partir du croisement présenté précédemment). **La valeur mesurée la plus pénalisante (à l'exclusion des valeurs considérées comme aberrantes à dire d'expert) est retenue comme valeur de Recul unitaire pour le tronçon concerné.**

Dans l'hypothèse d'un deuxième cycle érosif, la largeur de recul à ajouter correspond directement au recul rocheux, puisque la pente d'équilibre est supposée déjà atteinte à l'issue du premier cycle érosif.

11.4. DETERMINATION DU NOMBRE DE CYCLES EROSIFS PAR TRONÇON

11.4.1. Echéance +30 ans

Pour l'échéance +30 ans, un scénario de référence associé à la projection d'un Recul unitaire a été systématiquement considéré pour l'ensemble des linéaires de falaise. Cette **hypothèse englobante et sécuritaire** s'appuie sur le fait que la survenue d'un évènement associé à l'intensité de recul retenue est possible localement, bien que les configurations varient au sein d'un même tronçon (surplombs, fracturation, etc.).

A cette échéance, l'influence du changement climatique (et de l'augmentation du niveau marin) est considérée comme négligeable à dire d'expert. Les conséquences de l'évolution du climat apparaissent difficiles à estimer à l'horizon 30 ans dans le cadre d'un travail mené à l'échelle départementale. Cela étant, il est supposé que le changement climatique ne contribuera pas à modifier de manière significative l'activité de chute de blocs des falaises, car la période de latence entre deux événements de référence successifs, même si elle diminue, restera supérieure à 30 ans.

11.4.2. Echéance +100 ans

A l'horizon +100 ans, et à l'échelle des tronçons la mise en place de conditions propices à générer un second cycle de recul (au moins), après la survenue d'un premier évènement apparaît globalement difficile à estimer.

La revue bibliographique propose un état des conséquences prévisibles du changement climatique sur les variables océanographiques et météorologiques selon différentes trajectoires d'adaptation au changement climatique. Pour les falaises et versants rocheux situés à l'interface terre-mer, l'évolution est régie par les agents dynamiques marins (principalement niveau marin moyen, états de mer saisonniers et inter-annuels, évènements de fortes houles) et les agents dynamiques continentaux (température, précipitation, circulations d'eaux de surface et souterraines).

Si des trajectoires d'évolution dans un contexte de changement climatique, selon différentes trajectoires de réchauffement, de chacun de ces paramètres existent, aucune publication qui combinerait les effets de ces évolutions sur la dynamique des falaises n'a été mise en évidence. Les configurations des falaises et versants (nature des formations géologiques, nature et densité de fracturation, paramètres structuraux, niveaux d'altération, géométries) sont d'une telle diversité, qu'il conviendrait d'en tenir compte pour étudier l'impact des évolutions de chacune des variables météo-marines sur leur dynamique. La réponse d'une falaise ou d'un versant dépendra donc de sa sensibilité à chacun de ces forçages et de leurs évolutions dans un contexte de changement climatique.

En première approche, l'élévation du niveau de la mer, associée notamment à une augmentation de la fréquence d'action érosive de la houle et à de potentiels phénomènes de réhydratation invite à émettre des hypothèses sécuritaires.

Ainsi, un deuxième cycle de recul a été considéré pour l'ensemble des tronçons de falaise caractérisés par une lithologie jugée sensible à l'érosion, dès lors que celle-ci sera davantage atteinte et érodée par la mer. Cela concerne :

- Les falaises à profil mixtes, à lithologie meuble en pied, de faible hauteur (type Lombard).
- Les falaises à lithologies multiples (type Carry-le-Rouet, La Ciotat, La Tasse).

Les falaises à lithologie massive ne sont pas concernées par un deuxième cycle de recul. Cette exclusion est proposée à dire d'expert, sur la base des phénomènes observés car l'activité est jugée trop faible.

De même, les falaises caractérisées par des escarpements multiples (et souvent une hauteur importante) susceptibles de décorrérer les processus marins du recul affectant la tête d'escarpement, ne sont également pas concernées par un deuxième cycle de recul.

11.5. PRISE EN COMPTE DES OUVRAGES

Les Recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition invitent à s'interroger sur la pérennité des ouvrages de protection qui tendent à fixer le trait de côte. La pérennité des ouvrages aux horizons +30 et +100 devrait être idéalement définie et appréciée dans le cadre d'une stratégie locale de gestion intégrée du trait de côte. A défaut de stratégie, un ouvrage sans gestionnaire identifié ne faisant pas l'objet d'une surveillance et de mesures d'entretien ne sauraient être considéré comme pérenne.

Dans cette étude à échelle départementale, mis à part deux exceptions, les ouvrages recensés ont systématiquement été considérés comme non pérennes. Ainsi le Trait de Référence et des projections de recul sont définis pour l'ensemble du linéaire de falaise aménagé par extrapolation des hypothèses retenues pour les tronçons non aménagés environnant.

Les exceptions concernent deux ouvrages majeurs (infrastructures de transport entretenues), dont les gestionnaires sont clairement identifiés :

- la Voie Ferrée de la Côte Bleue (SNCF) ;
- la route de la Corniche à Marseille (Ville de Marseille).

Pour ces deux ouvrages, les projections de recul s'arrêtent au niveau de l'ouvrage.

Le choix sécuritaire proposé ici pourrait être modulé pour chaque ouvrage dans le cadre d'une étude à échelle locale avec connaissance ou définition d'une stratégie de gestion.

Il est utile de rappeler ici que les « littoraux très artificialisés », pour lesquels un aménagement fait disparaître totalement l'affleurement ne sont pas pris en compte dans le cadre de l'étude (§ 8.2).



Figure 91 : Voie ferrée de la Côte Bleue au Rove (Photo : DDTM13)

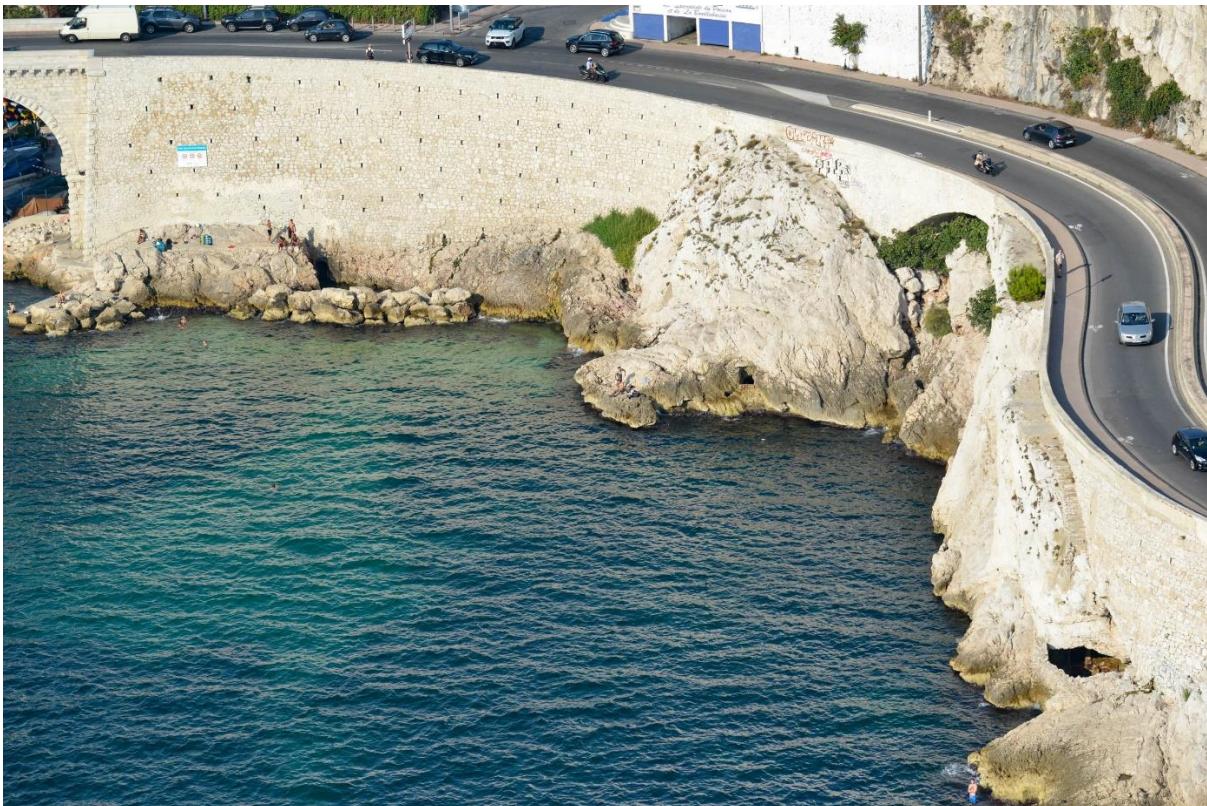


Figure 92 : Route de la Corniche à Marseille (Photo : DDTM 13)

11.6. CARTES DE PROJECTION DU RECOL A +30 ET +100 ANS

Les cartes de projection du recul sont produites au 1:10 000 et livrées en Annexe 2 du présent rapport. Les paragraphes suivants permettent d'expliquer les choix de représentation et la traduction des projections. Un extrait de la carte de projection du recul et sa légende sont présentés au paragraphe 11.6.3.

11.6.1. Considérations cartographiques globales

Pour des raisons inhérentes à la production cartographique, des décisions relatives à la représentation spatialisée des données nécessitent d'être prises. Ces choix ne doivent pas mettre en cause l'évaluation du recul mais méritent d'être énoncés pour faciliter la lecture des documents :

- Les reculs à +30 et +100 ans sont projetés sous forme de tampons depuis le Trait de Référence (§ 7), pour chaque tronçon. La géomorphologie de certains tronçons conduit à ne pas prévoir un second cycle érosif dans les scénarios de projection. Dans ces cas, seul le recul à 30 ans est représenté cartographiquement.
- Une découpe des polygones obtenus en recul du trait de référence est réalisée manuellement pour limiter les effets de bords qui n'auraient aucune réalité physique.
- Les polygones de reculs au droit des deux ouvrages pérennes identifiés sont découpés et interrompus par la couche Ouvrages.
- Lorsque des tronçons de différente nature se suivent sur le littoral, il arrive que le Trait de Référence considéré soit discontinu (hypothèse de multi-escarpement notamment ; Figure

93). Afin d'assurer le recouvrement des espaces de jonction dans ces hypothèses, deux traits et deux emprises de recul peuvent coexister sur une même portion de linéaire côtier et des terrains en recul peuvent également être compris dans une zone d'exposition aval.

- Les types de côte exclus de l'étude (platiers et micro-escarpements, côte rocheuse à profil réglé ; plage, talus et versant meubles ; littoraux très artificialisé) sont matérialisés à titre indicatif sur le niveau marin moyen, afin de rendre intelligibles les discontinuités et de pas occulter les enjeux qu'ils représentent. Ces linéaires doivent en effet faire l'objet d'une analyse spécifique dans la mesure où ils sont également soumis à des phénomènes littoraux et exposés à l'élévation du niveau de la mer. Les Figure 94 et Figure 95 présentent des exemples de sectorisation du littoral explicitant les motifs d'exclusion de ces linéaires de l'étude.



Figure 93 : Exemples d'escarpements discontinus (Photo : DDTM 13)

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

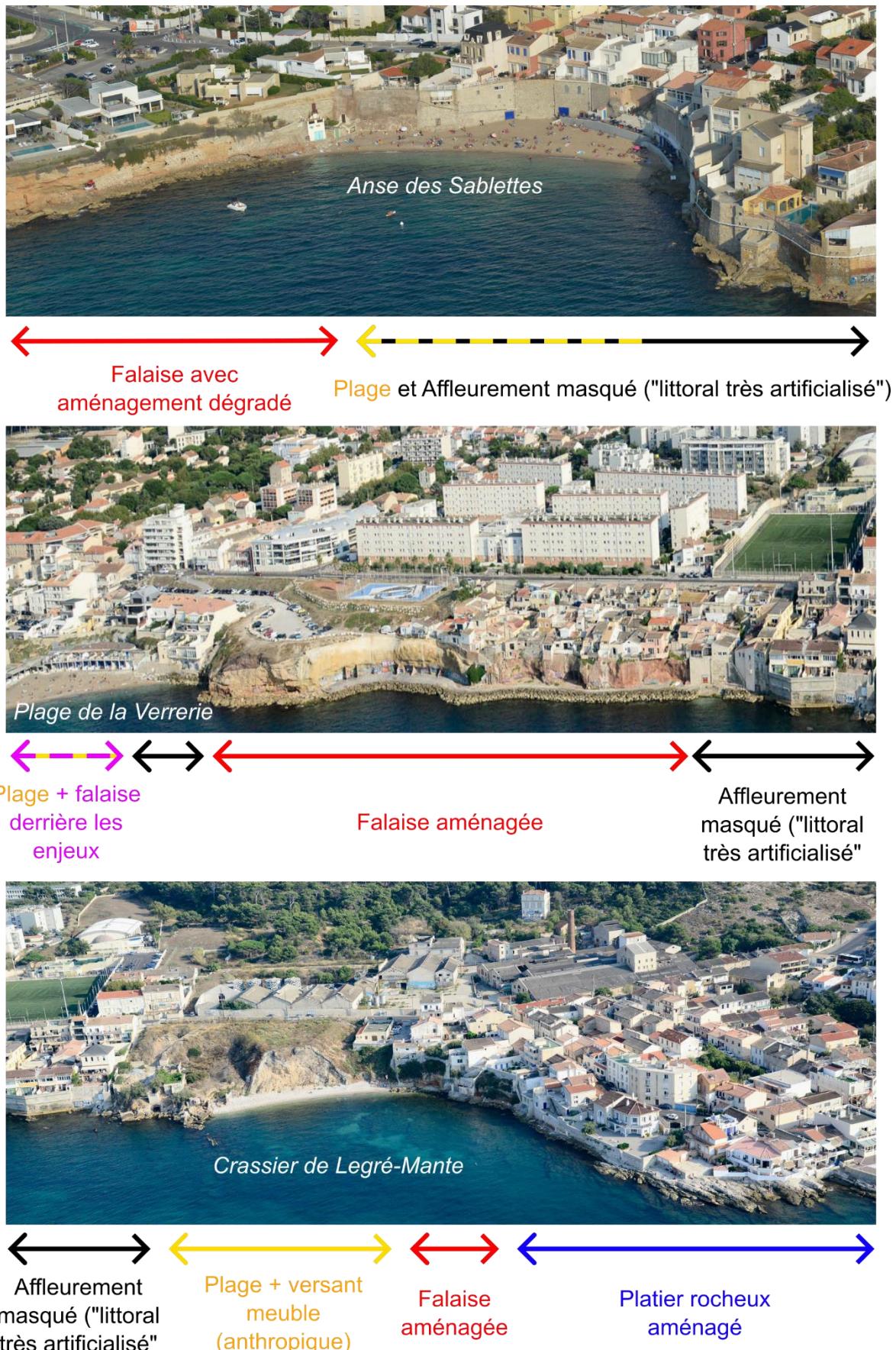


Figure 94 : Exemple de sectorisation du littoral justifiant les exclusions du cadre de l'étude entre la Pointe Rouge et la madrague de Montredon à Marseille (Photo : DDTM13)

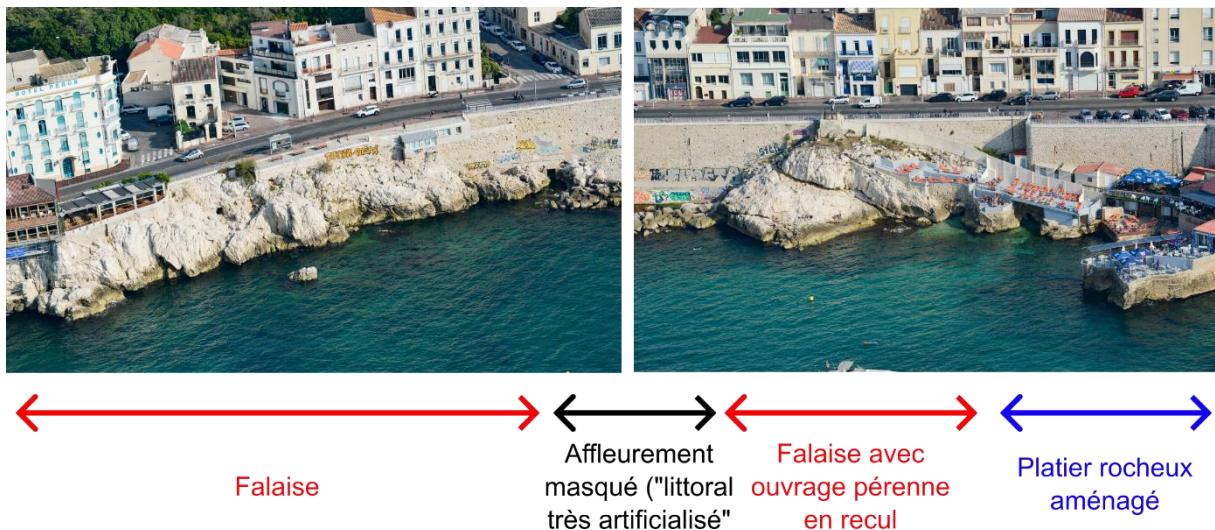


Figure 95 : Exemple de sectorisation du littoral justifiant les exclusions du cadre de l'étude au niveau de la corniche de Marseille (Photo : DDTM 13)

11.6.2. Notion de zone exposée

Afin de faciliter la compréhension de la carte et notamment de contextualiser les hypothèses où des reculs sont projetés en tête de falaises présentant plusieurs escarpements, les terrains situés en aval de la crête de référence sont représentés en hachuré et désignés comme « zone aval exposée ». Cette information est fournie à titre indicatif et ne saurait être considérée comme une cartographie fiable et actualisée de l'aléa chutes de blocs, en particulier des phénomènes de propagation.

Par ailleurs, il est nécessaire d'insister sur le fait que l'aléa cartographié correspond à des phénomènes « diffus » (voir section 1.3 et Figure 96). **Le zonage de l'aléa de recul ne correspond donc pas à la caractérisation d'un potentiel recul uniforme, affectant la totalité de la falaise mais plutôt comme la matérialisation des zones où la potentialité qu'un recul local se produise est élevée.**

La Figure 96 permet d'illustrer la signification des figurés utilisés dans une configuration de versant avec un seul escarpement, avec :

- Le bandeau de recul potentiel à +30 ans ;
- Le bandeau de recul potentiel à +100 ans ;
- La zone aval exposée au recul.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

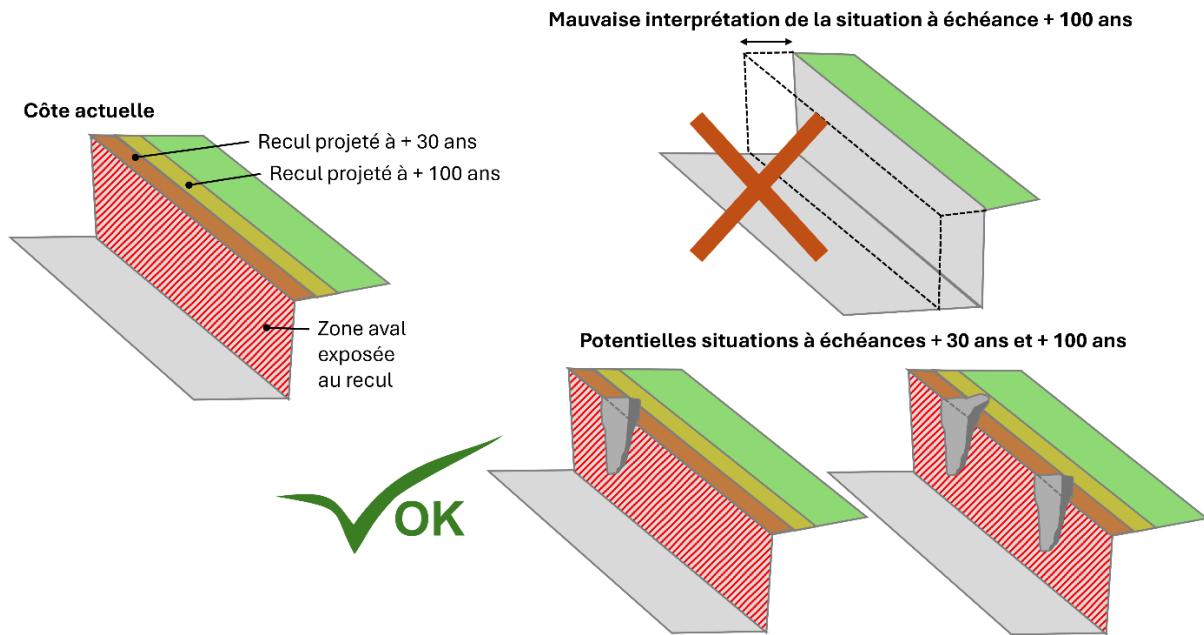


Figure 96 : Schéma de principe permettant d'illustrer la signification des figurés des cartes de projection du recul pour une configuration de versant avec un seul escarpement

Des figurés différents sont également proposés afin de distinguer ce type de configuration avec plusieurs escarpements. La Figure 97 permet d'illustrer la signification des figurés utilisés dans une configuration de versant multi-escarpements, avec :

- Les têtes d'escarpements exposées à des processus de recul déconnectés des phénomènes marins ;
- Les zones exposées aux mouvements de terrain et à des processus de recul diffus, avec une influence des processus marins difficilement quantifiable, décroissante depuis le niveau marin, nulle à négligeable au niveau des têtes d'escarpement amont.

Dans ces dernières configurations, la bande de recul en tête est intégrée à la « zone exposée » et ne fait pas l'objet d'un bandeau distinct.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

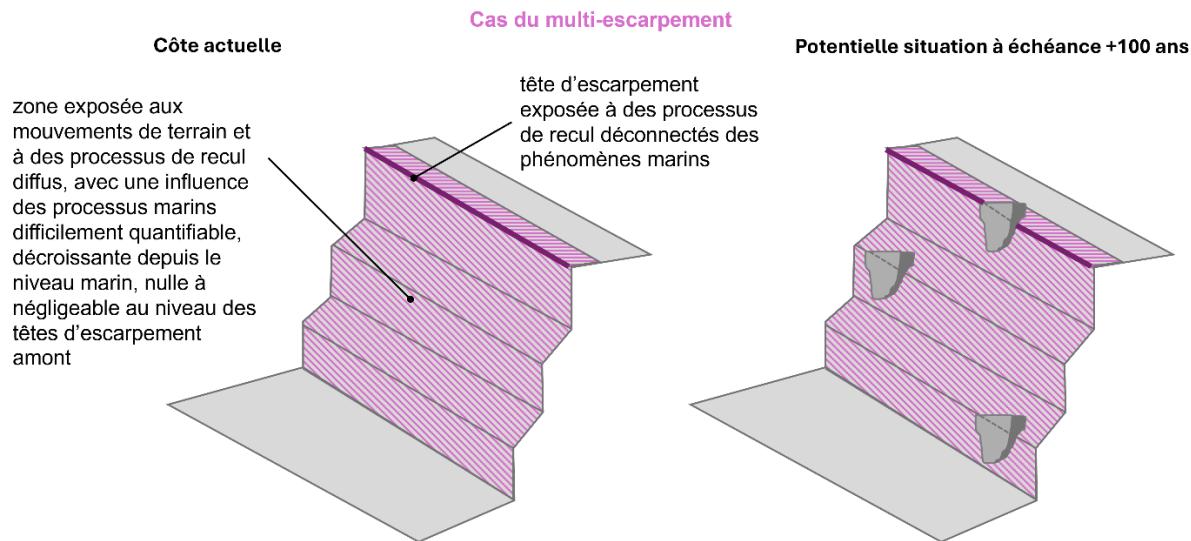


Figure 97 : Schéma de principe explicitant les figurés des cartes de projection du recul pour une configuration de versant avec escarpements multiples et TdR déconnecté des processus marins

Les « zones exposées aux mouvements de terrain et à des processus de recul diffus » dans le prolongement de certains escarpements à l’intérieur des terres (Figure 93) ou au sein de zones « très artificialisés » (zone portuaire par exemple ; Figure 98) sont également cartographiées sur quelques mètres à quelques dizaines de mètres dans le prolongement continental de certains escarpements, pour alerter sur la continuité des aléas.



Figure 98 : Projection du zonage proposé sur le prolongement d'une falaise littorale dans la zone portuaire de Carry-le-Rouet (Photo : DDTM 13)

11.6.3. Rendu cartographique

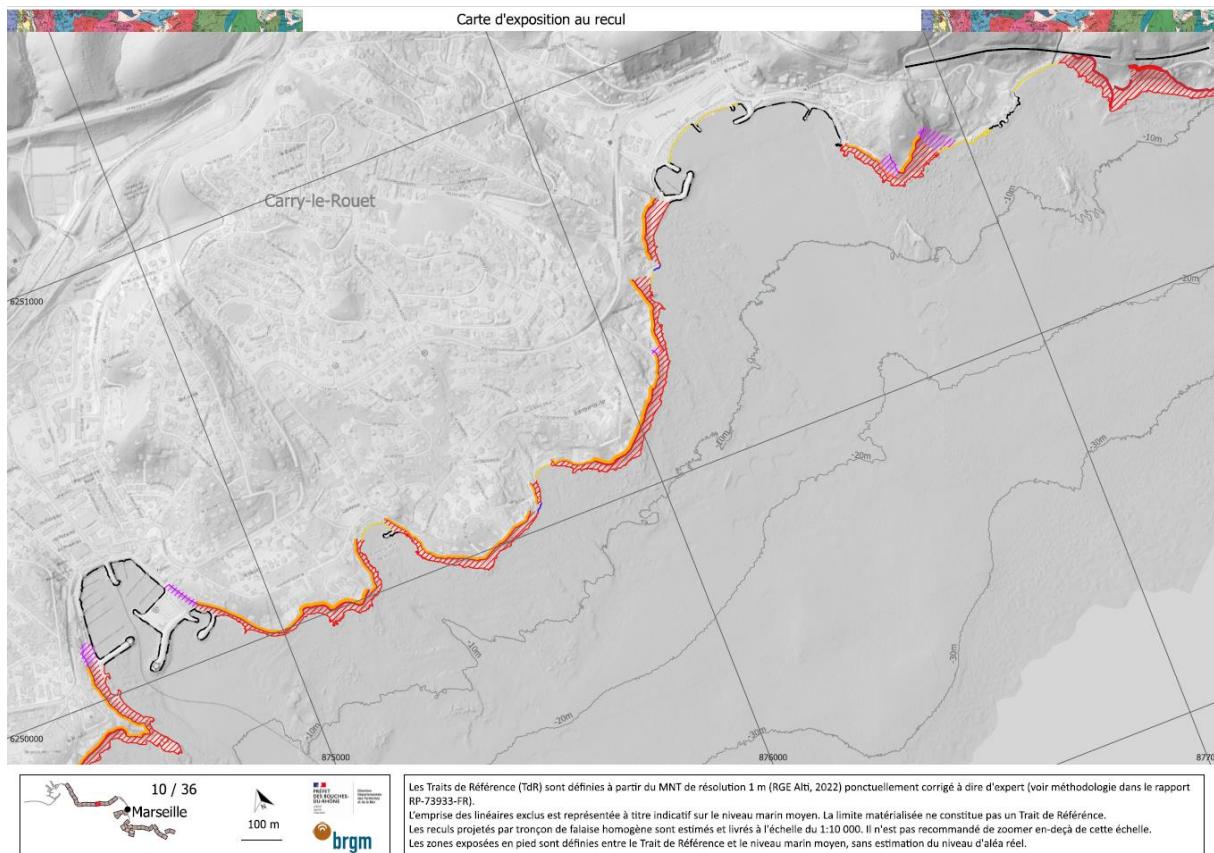


Figure 99 : Exemple d'une des planches de l'atlas de cartes de projection du recul fournies en Annexe 2. Chaque planche permet de visualiser la position du Trait de Référence, les types de linéaire exclus de l'étude, la projection du recul aux échéances +30 ans et + 100 ans, ainsi que, la position des ouvrages pérennes et les versants exposés en aval du TdR. L'encart en bas à gauche permet de localiser la position de la planche cartographique le long du linéaire côtier (rectangle rouge). A noter que cette planche est montrée à titre illustratif, l'échelle au 1/10000 n'est pas respectée dans cette représentation. La légende des cartes est présentée en Annexe 2.

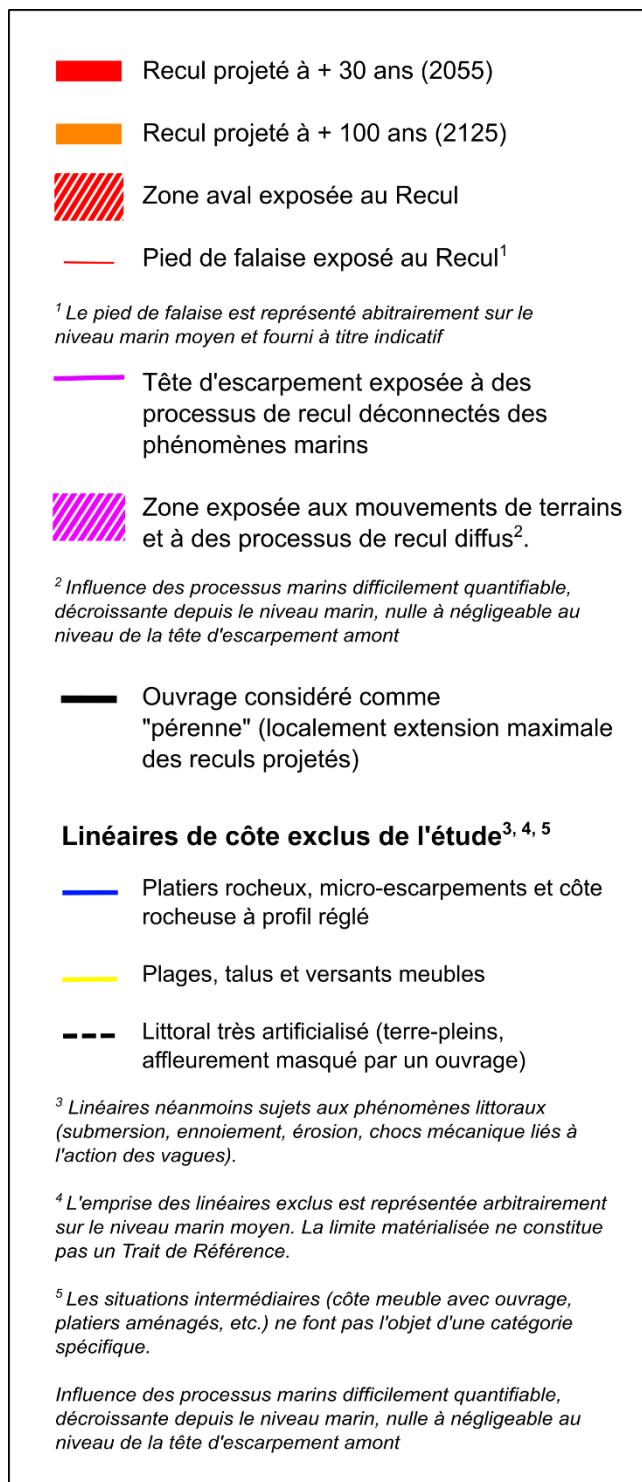


Figure 100 : Légende accompagnant la carte d'exposition au recul des falaises

11.7. IDENTIFICATION ET PRISE EN COMPTE DES INCERTITUDES

L'hétérogénéité des incertitudes présentes lors du travail effectué ne permet pas d'en proposer une quantification précise et encore moins de les représenter cartographiquement avec les résultats. Ces incertitudes et la manière de les prendre en compte sont néanmoins synthétisées dans le Tableau 11 :

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Tableau 11 : Gestion des incertitudes associées à la cartographie

Etape de travail	Type d'incertitude	Incertitude	Caractérisation des incertitudes	Traitement des incertitudes proposé
Trait de référence	Donnée d'entrée	Précision planimétrique du MNT source	Variable quantifiable	Quantifiée : 0.5 m
	Cartographie	Digitalisation	Variable quantifiable	Quantifiée : 2 m
Prise en compte des ouvrages	Incertitudes inhérentes aux scénarios et à l'exhaustivité des ouvrages	Existence et pérennité des ouvrages et capacité à maintenir le trait de référence	Variable non quantifiable	Ouvrages considérés comme non pérennes sauf 2 exceptions majeures
Détermination des reculs unitaires (Ru)	Incertitude paramétrique	Données évènementielles non exhaustives.	Variable non quantifiable	Multiplication des sources d'observation (BDRO)
		Imprécision dans l'observation, l'extrapolation ou l'estimation d'un recul dans la base de données		Réflexion à l'échelle de tronçons homogènes (extrapolation pour les tronçons sans information)
		Détermination de la valeur de recul rocheux	Variable non quantifiable (données insuffisantes)	Prise en considération de l'ensemble des points extraits autour des tronçons
		Détermination de la valeur de recul meuble (épaisseur et pente d'équilibre des terrains meubles)	Variable non quantifiable	Couverture des possibles par le choix d'une valeur sécuritaire et/ou définition de configurations localisées très défavorables
Détermination de l'impact du CC et de répétition des scénarios à +30 et +100 ans	Incertitudes paramétriques et de modèles	Incertitudes multi-sources, multi-impacts, et dépendantes des niveaux de réchauffements futurs possibles	Variable non quantifiable à l'échelle départementale	Approximation morphologique sécuritaire et choix d'une valeur de recul sécuritaire (max)
Projection cartographique	Incertitude paramétrique		Variable quantifiable	D'ordre métrique, localement

11.8. SYNTHESE DES RESULTATS

Les résultats globaux des projections synthétisés à l'échelle départementale et par communes sont présentés dans les tableaux suivants.

Les linéaires sont à prendre en considération avec précaution dans la mesure où les traits de référence suivent plus ou moins fidèlement les indentations de la côte, du fait la méthodologie et des typologies retenues (voir § 6).

Tableau 12 : Synthèse départementale

Recul projeté	Linéaire (km) concerné à +30 ans	Linéaire (km) concerné à +100 ans
< 2 m	0.8	0.3
2 à 5 m	19.4	12.6
5 à 10 m	83.4	87.1
> 10 m	1.3	4.7

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Tableau 13 : Synthèse par commune

		Linéaire (km) concerné à +30 ans	Linéaire (km) concerné à +100 ans
Carry-le-Rouet	< 2 m	0.2	0.0
	2 à 5 m	3.0	0.9
	5 à 10 m	0.6	2.5
	> 10 m	0.0	0.5
Cassis	< 2 m	0.0	0.0
	2 à 5 m	2.6	1.8
	5 à 10 m	4.5	4.5
	> 10 m	0.8	1.5
Ensueès-la-Redonne	< 2 m	0.0	0.0
	2 à 5 m	0.2	0.2
	5 à 10 m	2.1	2.1
	> 10 m	4.2	4.2
La Ciotat	< 2 m	0.2	0.0
	2 à 5 m	1.7	0.5
	5 à 10 m	9.1	10.0
	> 10 m	0.5	0.9
Le Rove	< 2 m	0.0	0.0
	2 à 5 m	0.0	0.0
	5 à 10 m	0.8	0.8
	> 10 m	5.4	5.4
Marseille	< 2 m	0.1	0.1
	2 à 5 m	6.1	5.2
	5 à 10 m	56.1	57.0
	> 10 m	0.0	0.0
Martigues	< 2 m	0.0	0.0
	2 à 5 m	1.1	0.6
	5 à 10 m	3.1	2.1
	> 10 m	0.0	1.4
Port-de-Bouc	< 2 m	0.0	0.0
	2 à 5 m	0.2	0.2
	5 à 10 m	0.5	0.0
	> 10 m	0.0	0.5
Sausset-les-Pins	> 2 m	0.1	0.0
	2 à 5 m	1.7	0.5
	5 à 10 m	0.0	1.3
	> 10 m	0.0	0.0

12. Conclusion

La réalisation des cartes de recul potentiel des falaises du littoral des Bouches du Rhône s'est faite sur la base d'une méthodologie innovante, en phase avec les travaux en cours (GT MEZAR) et les Recommandations Nationales pour l'élaboration des cartes d'exposition au recul du trait de côte (BRGM-Cerema, 2022).

Elle s'appuie sur l'observation détaillée sur le terrain de près de 100 km d'une côte rocheuse très diversifiée, la valorisation de différents jeux de données numériques précis (photographies, ortho-photographies, MNT) et un travail de recueil bibliographique très complet.

Les données valorisées ont permis la constitution d'une base de données de plus de 450 points spatialisant des estimations de recul d'évènements passés ou de constats prospectifs et la définition d'une typologie des falaises en 15 morphotypes. En outre environ 800 ouvrages de protection ont été répertoriés dans le cadre de l'étude. L'ensemble de ces données permet d'établir un socle de connaissances fondamentale à l'étude des aléas affectant les falaises du département et, in fine d'objectiver les analyses cartographiques réalisées.

La méthodologie repose sur :

- la classification des falaises et la définition de Traits de Référence adaptées aux différentes configurations morphologiques qu'elles présentent ;
- la définition de Reculs unitaires faisant suite à un évènement de référence, dépendant de la géomorphologie, des données évènementielles et d'observation ;
- la proposition d'un scénario unique de recul reposant sur des hypothèses sécuritaires, pour chaque horizon temporel, par tronçon de falaise homogène.

Les résultats des travaux sont une carte informative des phénomènes, restituée à l'échelle du 1 :25 000^{ème} rassemblant les données sources et une carte de recul potentiel à l'échelle du 1 :10 000^{ème} pour les deux échéances de +30 et +100 ans.

A l'horizon +30 ans, environ 20 km de côte sont concernés par un recul inférieur à 5 m tandis que près de 85 km sont concernés par un recul supérieur à 5 m. A l'horizon +100 ans, la tendance globale n'est pas significativement différente (90 km affectés par un recul supérieur à 5 m, dont près de 5 km affectés par un recul supérieur à 10 m). La distribution des résultats est figurée également par commune.

Il est important de rappeler que la démarche est conduite à l'échelle départementale et que les projections réalisées sont valides à l'échelle du 1 :10 000^{ème}. Cette étude a été réalisée en l'état actuel des connaissances. Tout événement majeur naturel ou anthropique nouveau pourrait conduire à réviser l'étude d'aléa et par conséquent les scénarios d'évolution du Trait de Référence.

Les données et les projections produites dans le cadre de l'étude constituent le socle de connaissance essentiel valorisable pour l'établissement des cartographies locales d'exposition au recul du trait de côte rocheux. Il est à noter que les secteurs de côte rocheuse basse, de côte meuble, de littoral très artificialisé sont exclus du cadre de l'étude.

13. Bibliographie & Webographie

Bibliographie

Assemblée nationale et le Sénat (2021), Loi n° 2021-1104 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (22 août 2021).

Bonnot-Courtois, C., & Feiss-Jehel, C. (2013). Saint-Malo : un port, une cité qui vont s'édifier avec la mise en place des cordons littoraux. *Encyclopédie de la Bretagne*, p-67.

Candhis (2024) : Analyses 2024 des états de mer, Tome 2 : Méditerranée, Rapport d'étude Cerema, novembre 2024, N° NOVA : 24-RE-0093, 323 p.

Cerema (2017) Cartographie des ouvrages et aménagements littoraux (métropole et outre-mer) Spécification technique du produit (version 1.0 – août 2017), 12 p.

Collectif (groupe de travail MEZAP), (2021), Caractérisation de l'aléa rocheux dans le cadre d'un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN) ou d'un Porter à Connaissance (PaC). BRGM, Collections scientifique et technique, ISBN: 978-2-7159-2760-5.

Collectif (BRGM/Cerema), (2022), Recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte. Coédition BRGM et Cerema, août 2022, 95 p. ISBN : 978-2-7159-2791-9 et 978-2-37180-566-8

Derruau M., (1962), Précis de géomorphologie, 3ième édition, Edition Masson & Cie, 413 p., 164 Fig., 61 Pl. ht.

Equilbey, E., Marçot, N. (2019) - Aléa chute de blocs rocheux du flanc Est de la calanque de Port-Miou à Cassis (13). Rapport final. BRGM/RP-69141- FR, 57 p., 1 CD.

Emery, K., Kuhn, G., (1982) Sea cliffs: their processes, profiles, and classifications. Geol. Soc. Am. 93, 644-654.

Garreau J., Foucault A. et Raoult J.-F., (2010), Dictionnaire de géologie.

Garner, G. G., T. Hermans, R. E. Kopp, A. B. A. Stangen, T. L. Edwards, A. Levermann, S. Nowikci, M. D. Palmer, C. Smith, B. Fox-Kemper, H. T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirs ðóttir, S. S. Drijfhout, T. L. Edwards, N. R. Golledge, M. Hemer, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I. S. Nurhati, L. Ruiz, J-B. Sallée, Y. Yu, L. Hua, T. Palmer, B. Pearson (2021) - IPCC AR6 Sea Level Projections. Version 20210809. Dataset accessed [YYYY-MM-DD] at <https://doi.org/10.5281/zenodo.5914709>.

Giuliano J., (2015), Thèse : Erosion des falaises de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur : évolution et origine de la morphologie côtière en méditerranée. Université de Nice-Sophia Antipolis,

Giuliano J., Claeys C., Lebourg T., Godard V., Premaillon M., Fissier L., Rouadja A., Tepongning- Megnifo H., Mathon C., Stepanian A., Marçot N. et Dewez T., (2016) Projet VALSE : Vulnérabilité et Adaptation pour les sociétés face aux érosions de falaises côtières en région Provence Alpes Côte d'Azur, Synthèse des travaux. BRGM/RP-64069-FR, 123 p., 75 Ill., 22 ann., 1 CD.

Kopp, R. E., Garner, G. G., Hermans, T. H. J., Jha, S., Kumar, P., Reedy, A., Slanger, A. B. A., Turilli, M., Edwards, T. L., Gregory, J. M., Koubbe, G., Levermann, A., Merzky, A., Nowicki, S., Palmer, M. D., & Smith, C. (2023) - The Framework for Assessing Changes To Sea-Level (FACTS) v1.0: A platform for characterizing parametric and structural uncertainty in future global, relative, and extreme sea-level change. *Geoscientific Model Development*, 16, 7461–7489. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-7461-2023>

Lombard M., Marçot N., Mirgon C., Mallet C. et Garnier C. (BRGM), Giuliano J. (GeoConseil Environnement), Zoulalian F., Terramorsi S., Langumier J. et Gastaud C. (DDTM 13), Albin M. et Lubrano M. (DREAL PACA), Oudin S. et Auray E. (Région Sud) (2022), Guide + Gestion du littoral rocheux de la côte bleue. 94 p., <https://www.monlittoral.fr/ressources/guide-de-gestion-du-littoral-rocheux-de-la-cote-bleue/>

Loye, A., Jaboyedoff, M. et A. Pedrazzini, (2009), Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a dem-based geomorphometric analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(5) :1643–1653.

Hantz, D., Ventroux, Q., Rossetti, J. P., & Berger, F. (2018). A new approach of diffuse rockfall hazard. In *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice* (pp. 1063-1067). CRC Press.

Marçot, N., Ferradou, L., Schroëtter, J.M. (2024) - Diagnostic d'instabilités sur le sentier du Lézard à Carry-le-Rouet. Rapport final. BRGM/RP73326-FR, 60 p. 20 ill., 2 ann.

Marçot, N. (2023) - Rapport d'expertise sur l'éboulement du 17 mai 2023 quartier Barqueroute au 11 allée de la Falaise à Carry-le-Rouet. Rapport final. BRGM/RP-72786-FR, 38 p., 23 ill., 1 ann.

Marçot, N., Mathon, C. (2012) - Rapport d'expertise : Commune du Rove (13). Evénement chute de blocs du 21 mai 2012. Avis du BRGM. BRGM/RP61172-FR, 31 p.

Marçot, N., Stépanian, A. (2014) - Expertise d'une falaise vis-à-vis du risque d'érosion en cas de démolition de deux cabanons sur le Domaine Public Maritime (DPM), calanque de Sormiou (Marseille, 13). BRGM/RP-63591-FR, 19 p., 3 ann.

Marçot, N., Dewez, T., Giuliano, J., Claeys, C., Lebourg, T. ; Godard, V., Prémaillon, M., Fissier, L. ; Rouadia, A. ; Tepongning Megnifo, H. ; Mathon, C., Stépanian, A. (2016) - Projet VALSE : Vulnérabilité et Adaptation pour Les Sociétés face aux Erosions de falaises côtières en région Provence Alpes Côte d'Azur. Synthèse des travaux menés dans le cadre du projet de recherche VALSE. Synthèse de l'opération acquisition scan Laser sur le littoral de Carry-le Rouet. Rapport final. BRGM/RP64069-FR, 123 p., 20 ann., 1 CD.

Marçot, N., Azibi, L. ; Boucher, E. (2008) - Prise en compte de la problématique des risques liés aux falaises côtières dans l'aménagement du territoire en Provence Alpes Côte d'Azur Année 3 : Etude de segments représentatifs, propositions d'aménagement et établissement d'une méthodologie pour réduire la vulnérabilité à l'échelle d'une commune. BRGM/RP-56090-FR, 132 p.

Marçot, N. (2005) - Prise en compte de la problématique des risques liés aux falaises côtières dans l'aménagement du territoire en Provence-Alpes Côte d'Azur. Année 2 : Complément - Qualification de l'aléa instabilités de falaises sur le littoral de l'étang de Berre et des îles habitées de la Région PACA. BRGM/RP-53951-FR, 97 p. 9 fig., 16 phf.

Marçot, N., Azibi, L. (2007) - Prise en compte de la problématique des risques liés aux falaises côtières dans l'aménagement du territoire. Année 3 : Etude de segments représentatifs,

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

propositions d'aménagement et établissement d'une méthodologie de gestion de risque communale. Rapport d'avancement. BRGM/RP-55945-FR, 56 p. 3 ann.

Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDdE)/Direction Générale de la Prévention des Risques, (2014), Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux, 168 p.

Nunes, M., Ferreira, O., Schaefer, M., Clifton, J., Baily, B., Moura, D., Loureiro, C., (2009) Hazard assessment in rock cliffs at Central Algarve (Portugal): A tool for coastal management. Ocean and Coastal Management 52, 506-515.

Pannet P., Thollon O., Lechat K., Schroetter JM., coll. Branellec M., Le Roy M. (2012) – Analyse de la carte de prédisposition aux risques mouvements de terrain réalisée par la DREAL de Basse-Normandie. Tranche 1 : cartographie de l'aléa chute de blocs à Cherbourg-Octeville, Saint-Lô et Vire. Rapport BRGM\RP-60464-FR. 152 p., 44 ill., 11 tabl., 3 ph., 4 ann

Prémaillon M., (2018), Hiérarchisation des facteurs d'érosion des falaises côtières du site au globe, Thèse de doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier, 260p.

Recorbet, F., Rochette, P., Braucher, R., Bourlès, D., Benedetti, L., Hantz, D. et Finkel, R. C., (2010), Evidence for active retreat of a coastal cliff between 3.5 and 12 ka in Cassis (South East France), Geomorphology 115, 1–10.

Regard, V., Dewez, T. J., Cnudde, C., & Hourizadeh, N. (2013). Coastal chalk platform erosion modulated by step erosion and debris shielding: example from Normandy and Picardy (northern France). *Journal of Coastal Research*, (65), 1692-1697.

Rosser, N., Lim, M., Petley, D., Dunning, S., & Allison, R. (2007). Patterns of precursory rockfall prior to slope failure. *Journal of geophysical research: earth surface*, 112(F4).

Rouadjia. A., Marçot, N., Claeys, C. (2012) - Projet VALSE (Vulnérabilité et Adaptation pour Les Sociétés face aux Erosions de falaises côtières en région PACA). Le risque à l'épreuve des sciences sociales Rapport de stage d'Anna Rouadjia. BRGM/RP-61435-FR, 68 p., 4 ann.

Samat., O., (2007), Efficacité et impact des ouvrages en enrochements sur les plages microtidales : le cas du Languedoc et du delta du Rhône. Thèse de doctorat, Université d'Aix-en-Provence, 371 p.

SHOM (2022) Références Altimétriques Maritimes, 119p

Sunamura, T. (1983) Processes of sea cliff and platform erosion. In *Handbook of Coastal Processes and Erosion* (ed. Komar, P.D.). CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 233–265. 2)

Sunamura, T. (1992) Geomorphology of Rocky Coasts. Wiley, Chichester.

Vecchio, A, M Anzidei, et E Serpelloni. « Sea level rise projections up to 2150 in the northern Mediterranean coasts ». *Environmental Research Letters* 19, n° 1 (18 décembre 2023): 014050. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad127e>.

Zaprowski, B., Pazzaglia, F., et Evenson, E. (2005) Climatic influences on profile concavity and river incision. *J. Geophys. Res.*, 110, F03004, doi:10.1029/2004JF000138.

Webographie

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

BRGM (2022), Erosion côtière, observatoire régional des risques majeurs, <https://prmrpacadrupal.brgm-rec.fr/phenomenes/phenomenes-naturels/erosion-cotiere>

Bd Charm-50, BRGM : Cartes géologiques départementales harmonisées à 1/50 000 : <https://infoterre.brgm.fr/formulaire/telechargement-cartes-geologiques-departementales-150-000-bd-charm-50>

Conseil économique social et environnementale. Site de la convention citoyenne pour le climat. 22 août 2021. <https://www.conventioncitoyennepourleclimat.fr>

GoogleEarth (2024) : <https://www.google.fr/earth/>

IGN, site de l’Institut Géographique National : <https://www.ign.fr>

Ministère de l’écologie. Site de l’observatoire national sur les effets du réchauffement climatique. <https://www.ecologie.gouv.fr/observatoire-national-sur-effets-du-rechauffement-climatique-onercscroll-nav4>

RGE ALTI® Version 2.0 – Descriptif de contenu – Septembre 2018 (https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2021-07/DC_RGEALTI_2-0.pdf), 38p.

SHOM, DataSHOM : Portail d’informations géographiques maritimes de références : <https://infoterre.brgm.fr/formulaire/telechargement-cartes-geologiques-departementales-150-000-bd-charm-50>

14. Annexe 1 : cartes informatives

15. Annexe 2 : cartes de recul

16. Annexe 3 : Description des campagnes de terrain

L'auscultation des 95 km de côtes rocheuses correspond à une inspection de l'ensemble du littoral concerné dans la mesure où celui-ci était accessible, soit par les têtes de falaises, soit par leurs pieds.

Les objectifs principaux étaient :

- De caractériser les modes de rupture des falaises et de déterminer une typologie pour l'ensemble du linéaire,
- D'identifier/caractériser le type de mouvements de terrain ou gravitaires : chute de blocs, glissement etc.,
- D'évaluer le recul évènementiel potentiel, ou « recul estimé ».

Les campagnes de terrain ont également permis de valider ou modifier les informations issues de la carte géologique pour attribuer des caissons géologiques à chaque tronçon de falaise,

Les constats relatifs aux mouvements de terrain ne permettent pas toujours de dater les phénomènes. Dans certains cas, le caractère relativement récent peut être estimé grâce à la présence d'éléments anthropiques pris dans les glissements ou sous les blocs tombés (Figure 101).



Figure 101 : Eléments anthropiques impliqués dans les mouvements gravitaires : a – Eléments plastiques dans un glissement marneux ; b – Tirants dans le vide et c – Tête de falaise glissée et éléments plastiques dans les marnes glissées.

Le recul évènementiel estimé, s'appuie sur l'analyse de la morphologie des côtes rocheuses et sur les processus de reculs associés à travers :

- L'analyse des failles, fractures, stratigraphies (ensemble discontinuités des roches) qui dicte la géométrie des massifs rocheux,
- L'analyse du degré de fracturation (mesure des densités de fractures)
- Et celle du degré d'altération qui fragilisent le massif rocheux etc.

Les informations sur les discontinuités (failles, fractures etc. ; à travers le levé de leur orientation et inclinaison) des côtes rocheuses ont permis :

- L'analyse de la stabilité mécanique (par l'analyse stéréographique) (Annexe 2),
- Mais aussi pour les chutes de blocs (dièdres) de déterminer l'intensité (volume mobilisable).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Cette campagne de terrain réalisée au cours de l'année 2023 et début 2024, complémente la connaissance géologique déjà acquise lors de études précédentes (Marçot, 2014 ; Marçot et al., 2014).

Réalisée par deux agents du BRGM, 250 points d'observations ont été parcourus le long des 95 km de côtes des Bouches-du-Rhône, où les critères relevés sont résumés dans le tableau ci-dessous pour chaque point d'observation :

Secteur : numero de la station d'obs.	<i>ComXX</i>	
Phénomène observé :		
Erosion en pied (marin)		<i>Er</i>
Erosion différentielle		<i>Er diff</i>
Sous cavage		<i>sCav</i>
Surplomb		<i>SurP</i>
Chute de blocs		<i>CdB</i>
Glissement de dièdres		<i>Gld</i>
Glissement banc sur banc		<i>Glb/b</i>
Glissement plan		<i>Glp</i>
Glissement rotationnel		<i>Glr</i>
Basculement		<i>Bas</i>
Coulée de boues		<i>Cb</i>
Ravinement		<i>Rav</i>
Tailles de blocs :	<i>en m3</i>	
Stabilité : analyse stéréographique		
Nbres de discontinuités	<i>entier</i>	
Fréquences	<i>decimal</i>	
Nbres d'intersection en zone critique	<i>entier</i>	
Stabilité gravitaire	<i>stable</i>	<i>instable</i>
Recul potentiel : Ru	Pied de falaise ou	Tête de falaise
Dates	date min. ou	date max.
Réccurence/Occurrence :	<i>Terrain ou bibliographiques</i>	
Sources :	<i>Terrain ou bibliographiques</i>	
Géomorphologie		
Nbre de pentes	<i>entier</i>	
Hauteur 1	<i>en m</i>	
Hauteur 2	<i>en m</i>	
Nbre de lithologies:	<i>entier</i>	
Lithologie 1	<i>de terrain</i>	
Lithologie 2	<i>de la carte géologique du BRGM au 1/50 000</i>	

Tableau 14 : Structure des observations et lexique utilisé lors de la campagne de terrain de 2023

Outre la base de données constituées par ces points d'observation, des coupes schématiques des types de falaises caractéristiques ont été systématiquement relevées.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

L'ensemble de ces données de terrain sont présentées dans les deux cartes qui suivent. Sur la géologie au million, sont reportées les coupes schématiques types des falaises et les analyses des stéréogrammes des discontinuités (failles, fractures etc.).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

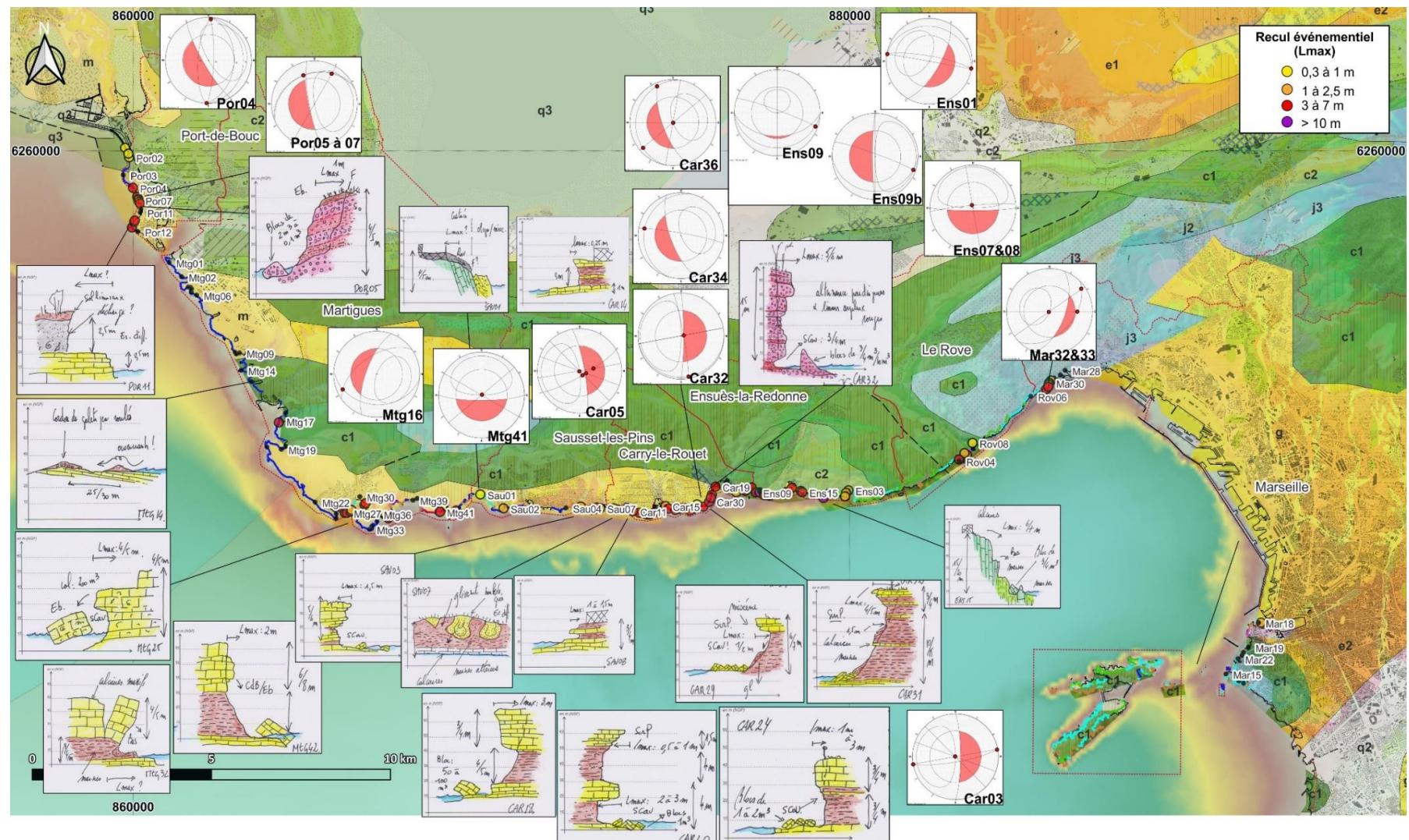


Figure 102 : Partie Ouest de la zone d'étude, Carte des relevés de terrain : L_{max} mesurées lors de la campagne de terrain 2023, coupes schématiques de falaises et analyses des stéréogrammes de stabilité (Fonds : mnt 25m ©IGN, Bathymétrie ©GEBCO et Carte géologique au million ©BRGM)

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

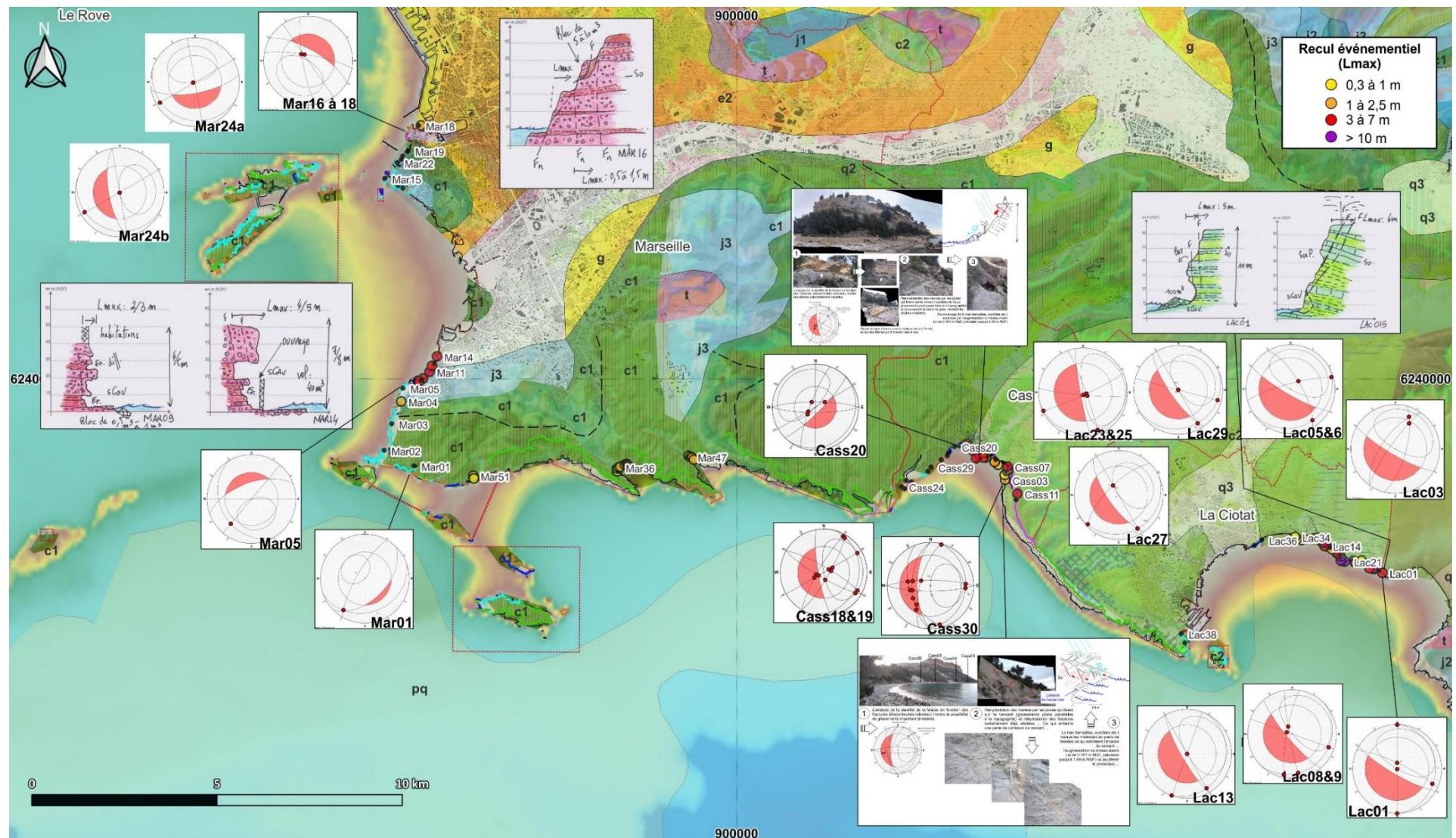


Figure 103 : Partie Ouest de la zone d'étude, Carte des relevés de terrain : L_{max} mesurées lors de la campagne de terrain 2023, coupes schématiques de falaises et analyses des stéréogrammes de stabilité (Fonds : mnt 25m ©IGN, Bathymétrie ©GEBCO et Carte géologique au million ©BRGM)

17. Annexe 4 : Analyse de la stabilité des falaises par stéréogramme

Levés de la fracturation

Pour chaque point d'observation, l'objectif de la visite de terrain a été de déterminer la distribution des différentes familles de discontinuités (foliation, schistosité, fracture/diaclase etc.) à travers un levé des discontinuités structurales des affleurements rocheux : Direction par rapport au Nord, pendage (inclinaison), espacement et récurrence.

L'orientation de la falaise est également relevée, car son intersection avec les directions des différentes familles de discontinuités (foliation, schistosité, fracture/diaclase etc.) joue un rôle prépondérant dans l'analyse des possibilités de rupture.

Représentation de la fracturation

La représentation des familles de discontinuités (foliation, schistosité, fracture/diaclase etc.) a été réalisée sur un stéréogramme (représentation stéréographique de diagrammes polaires (Figure 94 ; diagrammes de Schmidt - hémisphère inférieure)).

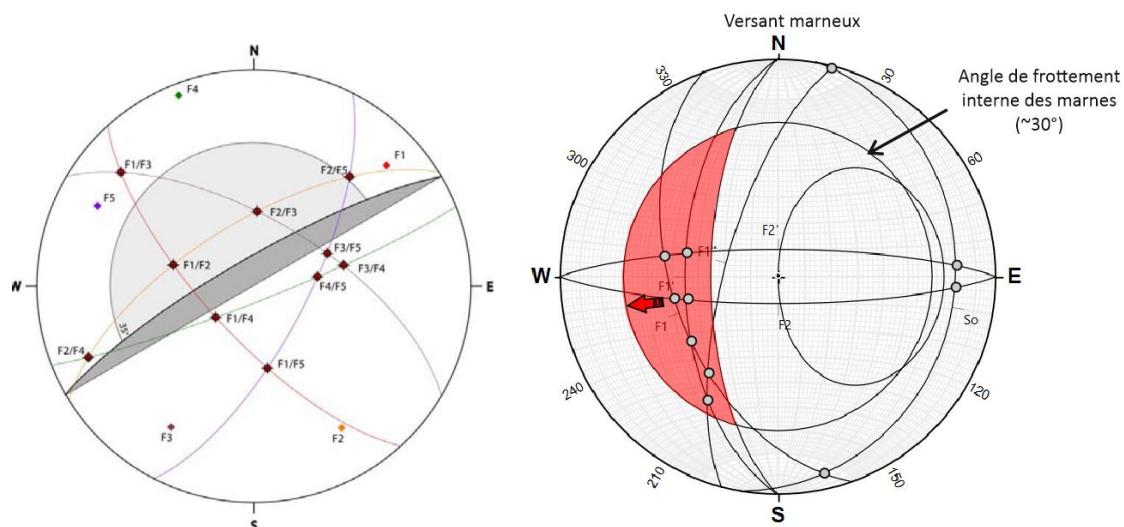


Figure 104: A gauche - Représentation stéréographique des orientations et pendages des discontinuités moyennes principales, du front de taille considéré (arc de cercle en gris foncé) et de l'angle de frottement interne moyen (arc de cercle en gris clair), pour l'évaluation de l'aléa « rupture » (Pannet et al., 2012) ; A droite – même chose, les intersections des discontinuités dans la zone critique en rouge (définie par l'angle de frottement interne et l'orientation du front/versant rocheux) montre un versant ou front avec des instabilités de fait avec un potentiel de glissement ou chute de bloc dans la direction de la flèche rouge.

Méthode

Sur la représentation stéréographique sont représentées : pour chaque point d'observation, les différentes familles de discontinuités (foliation, schistosité, fracture/diaclase etc.), l'orientation de

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

la falaise et enfin l'angle de frottement interne (des joints rocheux) qui est fonction de la lithologie (nature la roche de la).

L'analyse de stabilité se fait à partir de l'analyse de ces trois variables. Les intersections entre les différentes familles de discontinuités (foliation, schistosité, fracture/diaclase etc.) qui se situent dans le cercle de frottement de la roche (en gris clair) et hors du cercle représentant le front ou le versant (en gris foncé, Figure 104), sont considérées comme critiques vis-à-vis de la rupture.

Afin de diminuer l'avis d'expert, une synthèse des angles de frottement des matériaux est utilisée. Celle-ci permet à ce que l'observateur (géologue, géotechnicien ou ingénieur risque naturel), puisse définir au mieux l'angle de frottement interne qu'il va utiliser dans son analyse stéréographique. Il s'est avéré ici sur l'ensemble des lithologies observées sur les falaises, un angle de 40° était convenable pour avoir un aperçu des ruptures possibles.

Cette méthode est principalement efficace pour les ruptures en dièdres. Lorsque : (1) les fractures ont un fort pendage amont (c'est-à-dire à contre pente), entraînant des ruptures en basculement ou une mise en surplomb de masses rocheuses et (2) les fractures ont un pendage aval et une orientation, les deux proches de l'affleurement, entraînant des ruptures par glissements plans (banc sur banc), il est important que l'opérateur (à « dire d'expert ») intervienne et tienne compte de ces deux cas de figures particuliers.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Source : Parriaux A. & Arnould M., 2006 dans Pannet et al., 2012

Par famille de roches

Angle de frottements internes des joints (en °) par type de roches							min.	max.	Moy.
Roches magmatiques (granites, basaltes)							40	60	50
Roches métamorphiques massives (gneiss, marbres, quartzites)							35	50	42,5
Roches métamorphiques schisteuses (micaschistes, chloritoschistes)							20	40	30
Roches sédimentaires non-argileuses (calcaire, grès)							35	50	42,5
Roches sédimentaires argileuses (argillites, marnes)							8	30	19

Source : Mazzoleni, 1997

Par famille de roche et par frottement au niveau des joints

Roche	Discontinuité	Etat de la surf.	Surf. (en cm²)	Angle de frottement par palier			Moy.
				Palier 1	Palier 2	Palier 3	
Basalte	nc	Lisse	72	35	37	33	35 nc 34,6
	nc	Rugueux	111	37 nc	35	36	37 36,3
	nc	Rugueux	133	37	39	35	39 37 37,2
Gneiss	Diaclase	Rugueux	174	29	32	35	39 nc 34,4
	Diaclase	Rugueux	124	22	29 nc	25	25 27 25,6
	Schistosité	Micacé	134	25	28	29	31 30 31 29,0
Schistes	Schistosité	Lisse	160	30	31	30	32 nc 33 31,2
	Schistosité	Lisse	162	nc	28	28	29 nc 29 28,5
	Diaclase	Rugueux	152	nc	27	nc	25 nc 25 25,7
Schistes houillés	Schistosité	Lustré	82	22	24	23	25 22 23 23,2
	Schistosité	Lustré	65	15	17 nc	17	nc 16 16,3
	Schistosité	Lustré	95	nc	22	nc	22 nc 22,0
Calcaires	Schistosité	Lustré humidiifié avec remplissage	95	nc	16 nc	16 nc	16 16,0
	Schistosité	Lustré	95	nc	14 nc	13 nc	13 13,3
	Stratification	Lisse	71	33	35 nc	35 nc	35 34,5
Calcaires	Stratification	Rugueux	112	42	45 nc	41	37 40 41,0
	Stratification	Rugueux	95	nc	43	42	40 42 42,0
	Stratification	Rugueux	85	36	37 nc	36	36 38 36,6
Joint marneux	Stratification	Lisse	76	25	26 nc	27	nc 27 26,3
	Joint marneux	Lisse	72	nc	20 nc	20	19 20 19,8

Source : Barton, 1974

Roche		Description					min.	max.	Moy.
Basalte		brèche basaltique							42 42,0
Bentonite		bentonite dans de la craie							7,5 7,5
		niveaux fins					12	17	14,5
		test triaxial					9	13	11,0
Schiste argileux bentonitique		test triaxial					8,5	29	18,8
Craie		surconsolidation, glissements, joints et petits disalignements					12	18,5	15,3
Craie argileuse		test triaxial					32	32,0	
Roche charboneuse		niveaux de craie mylonitiques					16	16,0	
Dolomite		niveaux de schiste argileux altéré					1	1,0	
Diorite, granodiorite et porphyre		argile de gouge					26,5	26,5	
Granite		argiles dans les plans de faille					24	45	34,5
		terre sableuse des remplissage de faille					40	40,0	
		Roches de faille					42	42,0	
Grès (grauwacke)		avec des plans d'argiles de 1 à 2 mm					nc	nc	
Calcaire		10 à 20 mm de remplissage argileux					13	14	13,5
		< 1 mm de remplissage argileux					17	21	19,0
Calcaire, marbre & lignites		alternance de lignite					38	38,0	
		contact lignite/marbre					10	10,0	
Lignite		niveau entre la lignite et l'argile					15	17,5	16,3
Montmorillonite		niveaux de 80 mm					14	14,0	
Argile bentonitique							7,5	11,5	9,5
Schistes, quartzites & schistes siliceux		100 à 15 mm de niveaux d'argile					32	32,0	
		stratification avec niveaux fins					41	41,0	
		stratification avec niveaux épais					31	31,0	
Ardoise		finement laminées et altérées					33	33,0	
Quartz, kaolin, pyrolusite		test triaxial					36	38	37,0

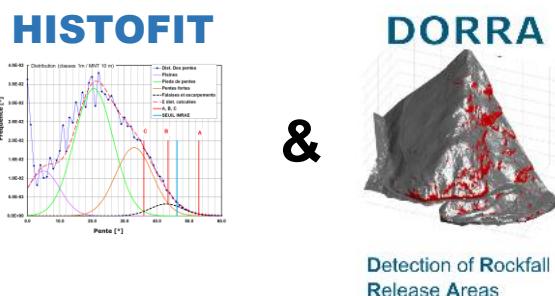
Figure 105 : Ordres de grandeur des angles de frottement sur des discontinuités préexistantes (joints de stratification ou fracture ; Synthèse JM Schroëtter non publié)

18. Annexe 5 : Définitions et outils pour la cartographie du trait de référence pour les falaises. Implémentation pour les falaises des Bouches du Rhône

Définitions associées à la cartographie du trait de référence

- **Escarpe**ment : zone de départ de chutes de bloc et d'éboulements rocheux, à forte pente (de l'ordre de 45° et plus).
- **Tête d'escarpement** : la limite amont d'une zone de départ en chute de bloc / éboulement qui se matérialise la plupart du temps par une rupture de pente marquée.
- **Tête de versant** : rupture de pente matérialisant la transition entre le versant (au moins partiellement rocheux) et le replat du plateau sus-jacent. Dans le cas de versant exclusivement rocheux, la tête de versant est confondue avec la tête d'escarpement.

Description de la suite d'outils HISTOFIT et DORRA pour la détection des zones sources de chute de blocs



En s'appuyant sur les travaux de Loyer et al. (2009), le BRGM a développé une méthode d'aide à la détection de zones sources de chutes de blocs en s'appuyant sur la donnée morphologique représentée par la pente de la topographie (dérivée du modèle numérique de terrain, MNT). Les principes sont les suivants (Figure 106) :

- Définition de seuils de pente propice à la présence de zones de départ de chutes de blocs (méthode HISTOFIT) ;
- Spatialisation des zones de départ de proche en proche pour rendre compte de la continuité d'escarpements naturels (DORRA).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

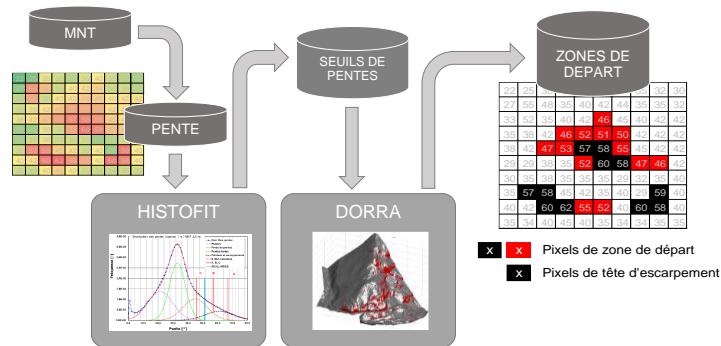


Figure 106: Principes d'utilisation de la suite d'outils HISTOFIT et DORRA développés par le BRGM

HISTOFIT

La disponibilité de modèles numériques de terrain (MNT) permet l'analyse de la topographie avec des niveaux de détail élevés. Loyer et al. (2009) a montré que les zones sources potentielles de chutes de blocs (zones de départ) peuvent être identifiées en fonction de la distribution des angles de pente déduite du MNT croisée avec d'autres informations extraites des cartes géologiques et topographiques au format SIG.

La méthode HISTOFIT consiste à décomposer la distribution des pentes (SAD = Slope Angle Distribution) en plusieurs distributions gaussiennes (de pentes) caractéristiques des principales unités morphologiques (GDMU = Gaussian Distribution of Morphologic Units) d'une topographie donnée (Figure 107).

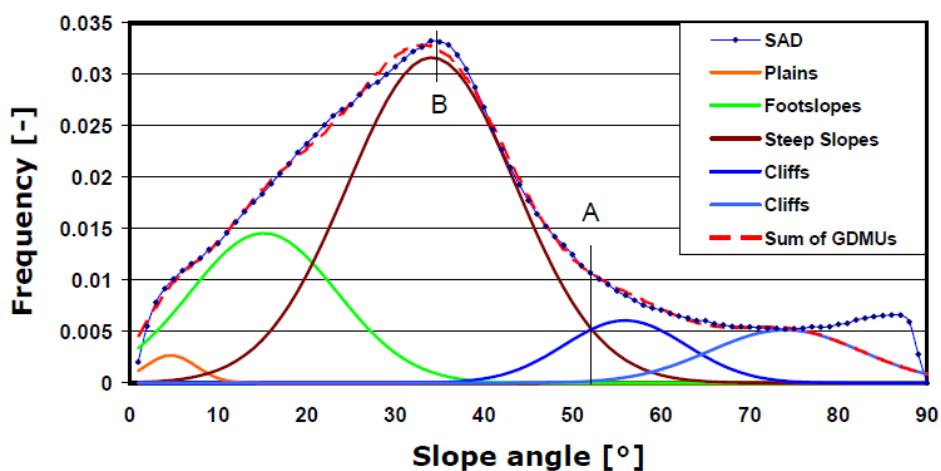


Figure 107 : Distribution de pente (SAD = slope angle distribution) de MNT 1m (zone pilote de la vallée alpine des Diablerets) et GDMU de la topographie (Loyer, 2009) (A indique l'angle de pente seuil au-dessus duquel les pentes appartiennent majoritairement aux falaises et sont donc considérées comme une zone source potentielle de chutes de blocs. B indique le mode des fortes pentes du GDMU. Les deux unités de falaises représentent deux familles de parois rocheuses nues lithologiquement distinctes)

La décomposition du SAD en GDMU est effectuée en minimisant l'erreur type du SAD estimé (la somme des GDMU) par rapport au SAD calculé. Possiblement quatre ou cinq principales unités morphologiques (UM) peuvent être identifiées :

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

1. Plaines : faibles angles de pente correspondant aux dépôts fluviaux et fluvio-glaciaires.
2. Pieds de pente : angles de pente douce caractérisés par la partie inférieure de la pente caractérisée par des cônes colluviaux, des coulées de débris et des dépôts de glissement de terrain.
3. Pentes abruptes : contenant des affleurements rocheux recouverts de végétation.
4. Falaises : pentes très raides, qui correspondent à des affleurements rocheux.

Les deux dernières unités morphologiques peuvent contenir des zones sources d'éboulement. Ce sont les unités sur lesquelles se focaliser, afin de définir les angles seuils de pente au-dessus desquels les sources de chutes de blocs peuvent être localisées.

La comparaison entre ces UM extraites avec une distribution gaussienne et celles sur l'ombrage montre qu'elles se superposent fidèlement mais ceci n'est pas systématiquement vérifié. En conséquence, une **partie d'interprétation du GDMU est nécessaire et une validation de terrain a minima partielle s'impose systématiquement**. On parlera d'un outil d'aide à l'identification des zones sources de chutes de blocs.

Cette analyse de la distribution des pentes d'un secteur doit théoriquement se faire selon des unités morphométriques homogènes, présentant des caractéristiques similaires de lithologie, d'histoire géologique et morphotectonique.

Le calage des courbes s'effectue en faisant varier pour chaque GDMU (exemple en Figure 108) :

- Le poids de la GDMU dans la SAD ;
- La moyenne et d'écart type de la fonction gaussienne associée.

	Plaines	Pieds de pentes	Pentes fortes	Falaises et escarpements
Poids	0,29	0,37	0,21	0,102
Moyenne	21,4	33	45	61
Ecart-type	8,4	5,4	8,2	9,5

Figure 108 : Paramétrage des lois gaussiennes normales représentant chaque morphologie de terrain (GDMU)

Cette classification morphologique peut également être appliquée à des paysages moins accidentés (non homogène in-fine), représentée majoritairement par des grandes zones planes (plateaux) ou des faibles pentes, pour lesquels la fréquence des pentes supérieures à 30° est très faible (morphologies accidentées clairsemées dans un tel avant-pays ou un paysage vallonné). La topographie ne s'y reflète pas de manière homogène. Dans ces contextes, l'extraction de GDMU est délicate. Dans ces conditions, le GDMU peut être calculé sur la base d'un SAD provenant d'une série de sections transversales le long des zones accidentées uniquement, sans tenir compte des grandes zones « planes » entre les deux. Ainsi, l'analyse SAD se concentre uniquement sur le terrain escarpé, où l'activité de chutes de pierres est susceptible de se produire (Loye, 2009).

La Figure 109 présente les courbes de distribution des pentes sur un exemple avec une interprétation adaptée (méthode BRGM). Les seuils A, B et C sont alors définis comme étant respectivement :

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

- A, falaises largement dominantes : au-dessus de ce seuil, les pentes de falaises représentent plus de 90 % de l'ensemble des pentes
- B, falaises > pentes fortes : au-dessus de ce seuil, les pentes de falaises représentent plus de 50 % de l'ensemble des pentes
- C, falaises >> pieds de pentes : au-dessus de ce seuil, les pentes de falaises représentent plus de 10 % de l'ensemble des pentes
- Seuil INRAe (projet Interreg PROVIALP, 2008) définissant une valeur seuil de pente (angle α) conditionnant la présence de zone de départ :

$$\alpha = 55^\circ \times \text{RES}^{-0,075} \text{ avec RES = la résolution en mètres du MNT}$$

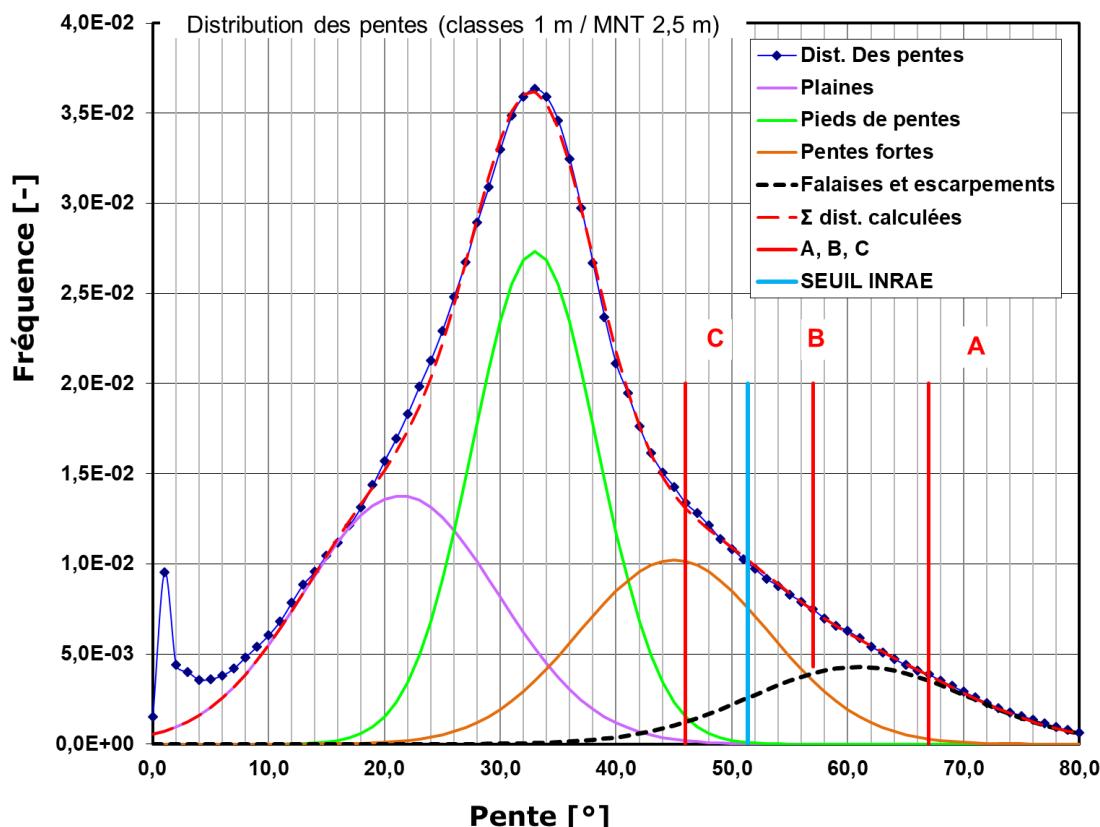


Figure 109 : Exemple de distribution de pente (SAD = slope angle distribution) de MNT et GDMUs. Les seuils A, B et C représentent respectivement la proportion de pentes de falaises supérieure à 90/50/10% par rapport à l'ensemble des pentes. Le seuil de pente théorique obtenu par la formule de l'INRAE est reporté en bleu clair sur le graphique.

Il est à noter que la résolution du MNT influe naturellement sur les seuils calculés par effets de lissage des topographies.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

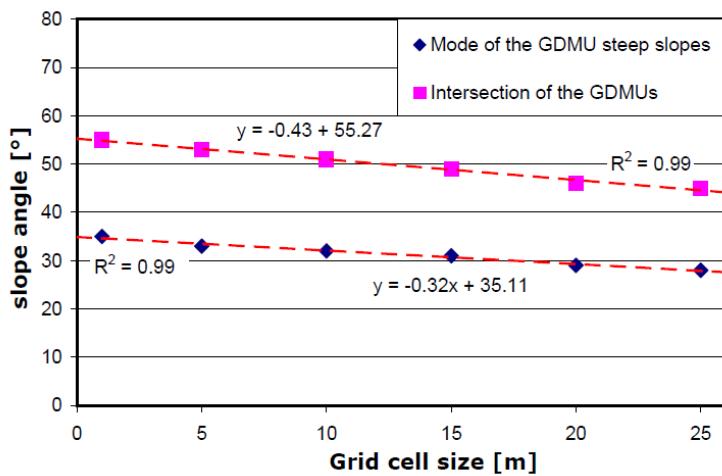


Figure 110 : Résultats de l'analyse SAD effectuée sur un MNT de 6 résolutions différentes (Loye et al., 2009)

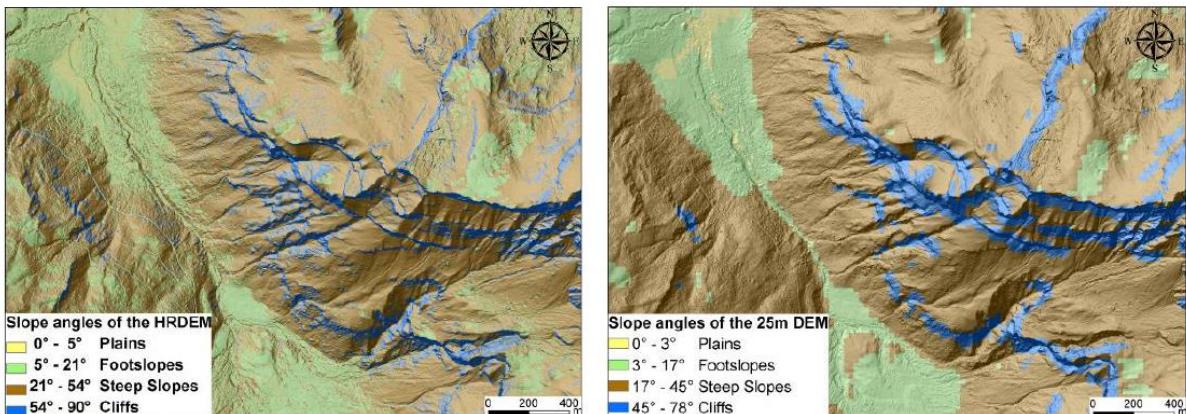


Figure 111 : Résultats de l'analyse SAD effectuée sur un MNT 1 m et 25 m (Loye et al., 2009)

DORRA

Les retours d'expérience terrain de la valorisation de la méthode HISTOFIT ont mis en évidence un défaut de reconnaissance de zones de départ dans les zones contigües aux secteurs définis par seuils de pente. Afin de combler ce manque (préjudiciable dans le cadre de la cartographie de l'aléa rocheux puisque « manquant » des zones de départ) un principe d'agrégation de cellules aux zones de départ HISTOFIT a été développé.

Pour répondre à ce point, un code spécifique a été développé par le BRGM pour permettre la ‘clusterisation’ des pixels voisins à une zone de départ considérée comme avérée, en fonction de critères de pente : code DORRA (Detection Of Rockfall Release Area) :

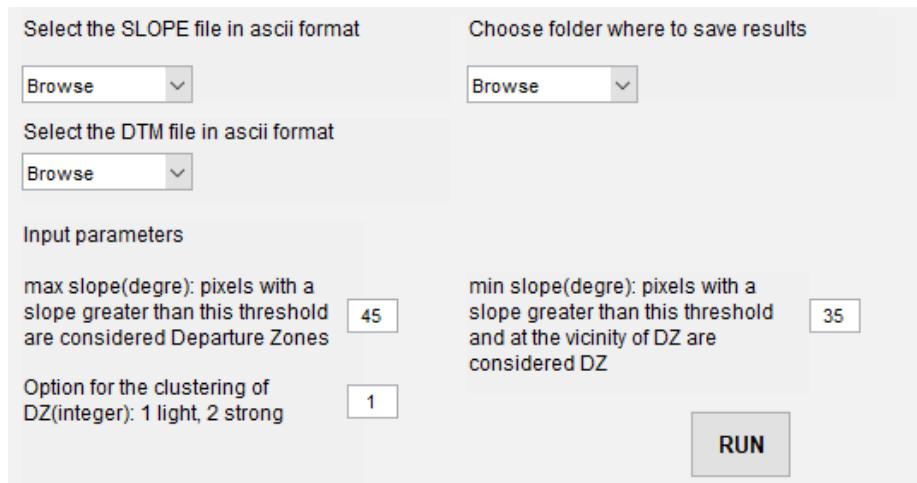


Figure 112 : interface utilisateur de DORRA (Detection Of Rockfall Release Area) pour sa version du 11/07/2022

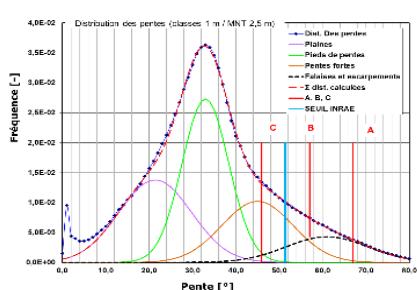
Principe

Le principe de ‘clusterisation’ est réalisé comme suit:

- Étape 1: les pixels de pente supérieures à une valeur de seuil définie par l’utilisateur ($\text{pente} > \text{max_seuil}$) sont déclarés zone de départ avéré (pixels ZD) ;
- Étape 2: les pixels avec $\text{min_seuil} \leq \text{pente} < \text{max_seuil}$ sont déclarés zone de départ lorsqu’ils sont à proximité de pixels déjà déclarés zone de départ :
 - option 1 : cette clusterisation est « légère » et ne considère que les pixels contigus aux pixels ZD de l’étape 1
 - option 2 : cette clusterisation est « forte » et sont considérés tous les pixels avec $\text{min_seuil} \leq \text{pente} < \text{max_seuil}$ pouvant être raccordés de proche en proche aux pixels ZD de l’étape 1.

Le choix des valeurs min_seuil et max_seuil est laissé à l’appréciation de l’utilisateur. Il est à noter que, des pixels de pente dont la valeur est inférieure au « seuil_max » et n’étant pas voisins de zone de départ définies à la première étape, ne seront pas considérés comme des zones de départ.

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône



Seuils HISTOFIT

- X B : 57° ---> Pente > B
- X C : 46° ---> B < Pente > C
- X Zones de départ après clusturisation
- X Pixels de tête d'escarpement
- X Pixels de pied d'escarpement

22	25	38	35	32	36	40	35	32	30
27	55	48	35	40	42	44	35	35	32
33	52	35	40	42	46	45	40	42	42
35	38	42	46	52	51	50	42	42	42
38	42	47	53	57	58	55	45	42	42
29	29	38	35	52	60	58	47	46	42
30	35	38	35	35	35	29	32	35	40
35	57	58	45	42	35	40	29	59	40
40	42	60	62	55	52	40	60	58	40
35	34	40	45	40	35	34	34	35	35

Raster de pente

22	25	38	35	32	36	40	35	32	30
27	55	48	35	40	42	44	35	35	32
33	52	35	40	42	46	45	40	42	42
35	38	42	46	52	51	50	42	42	42
38	42	47	53	57	58	55	45	42	42
29	29	38	35	52	60	58	47	46	42
30	35	38	35	35	35	29	32	35	40
35	57	58	45	42	35	40	29	59	40
40	42	60	62	55	52	40	60	58	40
35	34	40	45	40	35	34	34	35	35

Raster des zones de départ

22	25	38	35	32	36	40	35	32	30
27	55	48	35	40	42	44	35	35	32
33	52	35	40	42	46	45	40	42	42
35	38	42	46	52	51	50	42	42	42
38	42	47	53	57	58	55	45	42	42
29	29	38	35	52	60	58	47	46	42
30	35	38	35	35	35	29	32	35	40
35	57	58	45	42	35	40	29	59	40
40	42	60	62	55	52	40	60	58	40
35	34	40	45	40	35	34	34	35	35

Raster des zones de départ

Figure 113 : Sélection des zones de départ sur le raster des Pentes avec DORRA en fonction des seuils de pente déterminés avec HISTOFIT

Choix recommandé des valeurs `min_seuil` et `max_seuil`

DORRA fait appel à deux seuils de pentes : `max_seuil` et `min_seuil`. Sur les cartographies d'aléa chutes de blocs les tests réalisés à différentes échelles mettent en évidence que les valeurs de pentes des points B et C de l'approche HISTOFIT peuvent avantageusement être retenues pour respectivement les valeurs `max_seuil` et `min_seuil`.

Valeurs calculées par zone de départ

L'outil DORRA livre des données relatives aux zones de départ évaluées:

Paramètres globaux au niveau d'une zone de départ homogène :

- **NbPoints** : nombre de pixels contigus formant la partie sommitale d'une zone de départ (ZD) identifiée par un identifiant de groupe.
- **Hmax** : hauteur maximale d'escarpement calculée pour le groupe (unité: m). Cette valeur est la valeur maximale de la hauteur d'escarpement calculée pour chacun des profils de plus grande pente évalué depuis les pixels sommitaux du groupe.
- **Hmedian** : hauteur médiane d'escarpement mesurée pour le groupe (unité: m). Cette valeur est la médiane des hauteurs de ZD calculées à partir de l'ensemble des profils de plus grande pente évalués depuis les pixels sommitaux du groupe.
- **Lmedian** : Largeur médiane de falaise mesurée pour le groupe (unité: m). Cette valeur correspond à la médiane des distances planimétriques entre les pixels sommitaux et les pixels en pied de la ZD pour chacun des profils de plus grande pente évalué depuis les pixels sommitaux du groupe.
- **Icmedian** : Indice de convexité (unité: sans). Cette valeur est la médiane des indices de convexité des ZD calculés pour chacun des profils de plus grande pente évalué depuis les pixels sommitaux du groupe. La formule utilisée pour calculer l'indice de convexité est celle proposée par Zaprowski et al. (2005)
- **Anmedian** : Aire normalisée (unité: sans). Cette valeur est la médiane des Aires normalisées calculées pour chacun des profils de plus grande pente évalué depuis les pixels sommitaux du groupe. La formule utilisée pour calculer l'indice de convexité est celle proposée par Lévy et al. (2021)
- **AltHautmedian** : Altitude médiane de la tête d'escarpement (unité: m). Cette valeur est calculée à partir de la donnée MNT en considérant les pixels de la tête d'escarpement (pixels sommitaux).
- **AltPiedmedian** : Altitude médiane du pied d'escarpement (unité: m). Cette valeur est calculée à partir de la donnée MNT en considérant les pixels du pied d'escarpement (pixels basaux).

Paramètres locaux pour chaque pixel de la tête d'escarpement

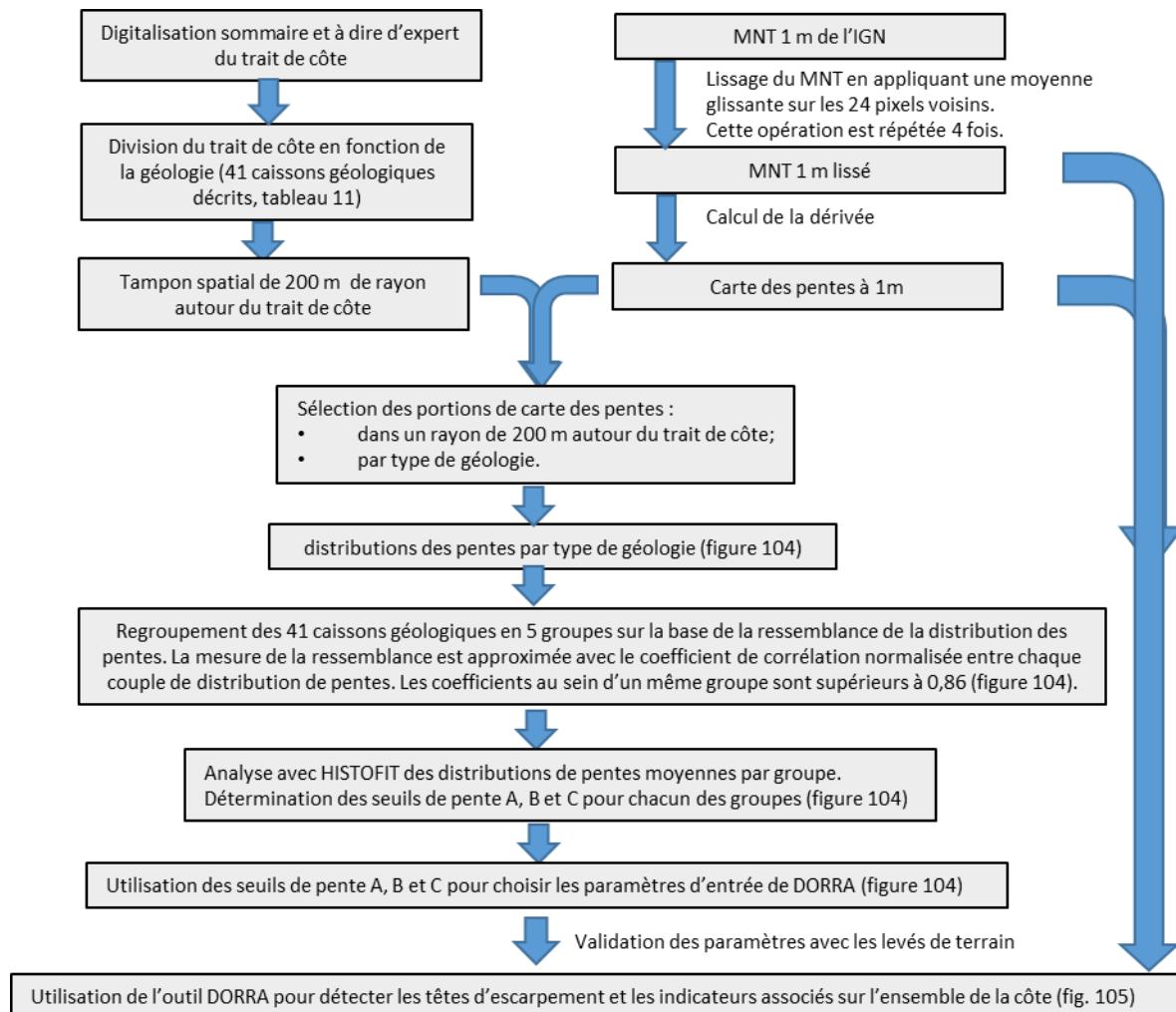
- H : hauteur d'escarpement calculée pour le pixel considéré (unité: m). Cette valeur est calculée pour le profil de plus grande pente évalué à partir du pixel considéré (c'est la différence d'altitude entre AltHaut et AltPied).
- L : distance planimétrique de la ZD calculée pour le pixel considéré (unité: m). Cette valeur est calculée pour le profil de plus grande pente évalué à partir du pixel considéré
- IC : Indice de convexité. Elle est calculée pour le pixel considéré en utilisant le profil topographique de la ZD dans la direction de plus grande pente à partir du pixel considéré (unité : sans) La formule utilisée pour calculer l'indice de convexité est celle proposée par Zaprowski et al. (2005)
- An : Aire normalisée. Elle est calculée pour le pixel considéré en utilisant le profil topographique de la ZD dans la direction de plus grande pente à partir du pixel considéré (unité : sans) La formule utilisée pour calculer l'aire normalisée est celle proposée par Lévy et al. (2021).
- AltHaut : Altitude du pixel considéré calculée à partir du MNT (unité : m).
- AltPied : Altitude en pied de la zone d'escarpement calculée suivant le profil de plus grande pente depuis le pixel considéré (unité : m).

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

- AltPiedtot : Altitude du pied de la ZD la plus avale du versant pour le profil de plus grande pente tirés depuis le pixel considéré.
- DirAzimuth : Direction de plus grande pente depuis le Nord dans le sens des aiguilles d'une montre pour le pixel considéré (unité : degrés). Cette valeur est calculée en utilisant les données du MNT du pixel considéré et de ses 8 pixels voisins.

Implémentation de la suite d'outils HISTOFIT et DORRA pour les falaises littorales des Bouches du Rhône

Le logigramme en ci-dessous résume les étapes de préparation des données pour la suite d'outils HISTOFIT et DORRA.



**Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral
des Bouches-du-Rhône**

Tableau 15 : liste des caissons géologiques utilisés pour cette étude

Description de caisson géologique	num. caisson	num. de cluster
Argile et calcaire gris Burdigalien	2	4
Gres carbonaté massif, marnes gréseuses, marnes bleues, calcaires marneux	3	4
Breches calcaires et dolomitiques Oligocène inf	5	5
Breches du Cap de la Vierge post-Oligocène	6	4
Calcaires à facies urgonien (partie sup) et marnes et calcaires argileux (partie inf), Hauterivien	7	4
Calcaires à Rudistes Turonien sup	8	2
Calcaires du Plan de Sausset Burdigalien inf	10	4
Calcaires et calcaires marneux siliceux ou à silex Aptien inf (Bedoulien)	11	4
Calcaires lacustres blancs, localement marnes, argiles et gres verts Oligocène inf	12	2
Calcaires marneux, marnes gréseuses, marnes et sables lignitifères Turonien sup	13	2
Calcaires noduleux et calcaires marneux, Rudistes Coniacien-Santonien	14	4
Calcaires noduleux, calcarenites massives Valanginien	15	4
Calcaires zoogénés blancs et calcaires dolomitiques Tithonique moyen	16	4
Calcaires, calcaires argileux, marnes Valanginien	17	4
Calcareite blanche à Chlamys praescabriuscula Burdigalien sup	18	4
Calcareites, marno-calcaires, gres et sables (Rudistes sur Martigues) Cénomanien	19	2
Carbonates dolomitiques Kimmeridgien	20	5
Dolomies gris sale, breches intraformationnelles Kimmeridgien sup	23	2
Dolomies massives grises Tithonique inf	24	1
Eboulis et colluvions du Wurm	25	1
Gres de Soubeyran (microconglomérats et gres coquilliers) Turonien sup	26	5
Gres du Baguier du Coniacien	27	4
Gres et marnes sableuses Santonien	28	4
Gres, marnes sableuses, calcaires à entroques, calcaires à rudistes du Coniacien	30	2
Intercalations marneuses Santonien	31	4
Marnes à lentilles de poudingues Maestrichtien inf	32	4
Marnes et calcaires (Formation de Carry) Aquitanien sup	33	4
Marnes et calcaires à rudistes, gres Santonien	34	2
Marnes et gres du Cénomanien	35	4
Marnes grises à céphalopodes, calcaires glauconieux et siliceux Aptien sup (Gargasien)	36	2
Marnes rouges et conglomérats (Formation du Rouet) Oligocène sup	37	4
Poudingues du Turonien sup	38	3
Poudingues, argiles et limons rouges de l'Oligocène inf. (Stampien)	39	4
Remblais, dépôts anthropiques	40	4
Sables, marnes et calcaires (Formation de Sausset) Aquitanien sup	41	4
Calcaires à rudistes (facies urgonien) Barremien	42	1
Eboulis récents	43	1
Marnes et calcaires (Formation du Cap de Nantes) Aquitanien sup	44	4
Marnes gréseuses, marnes bleues, calcaires marneux du Turonien inf	45	4
Marnes et sables (Formation du Rousset) Aquitanien sup	46	4
Cones de déjection du Wurm	47	4

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

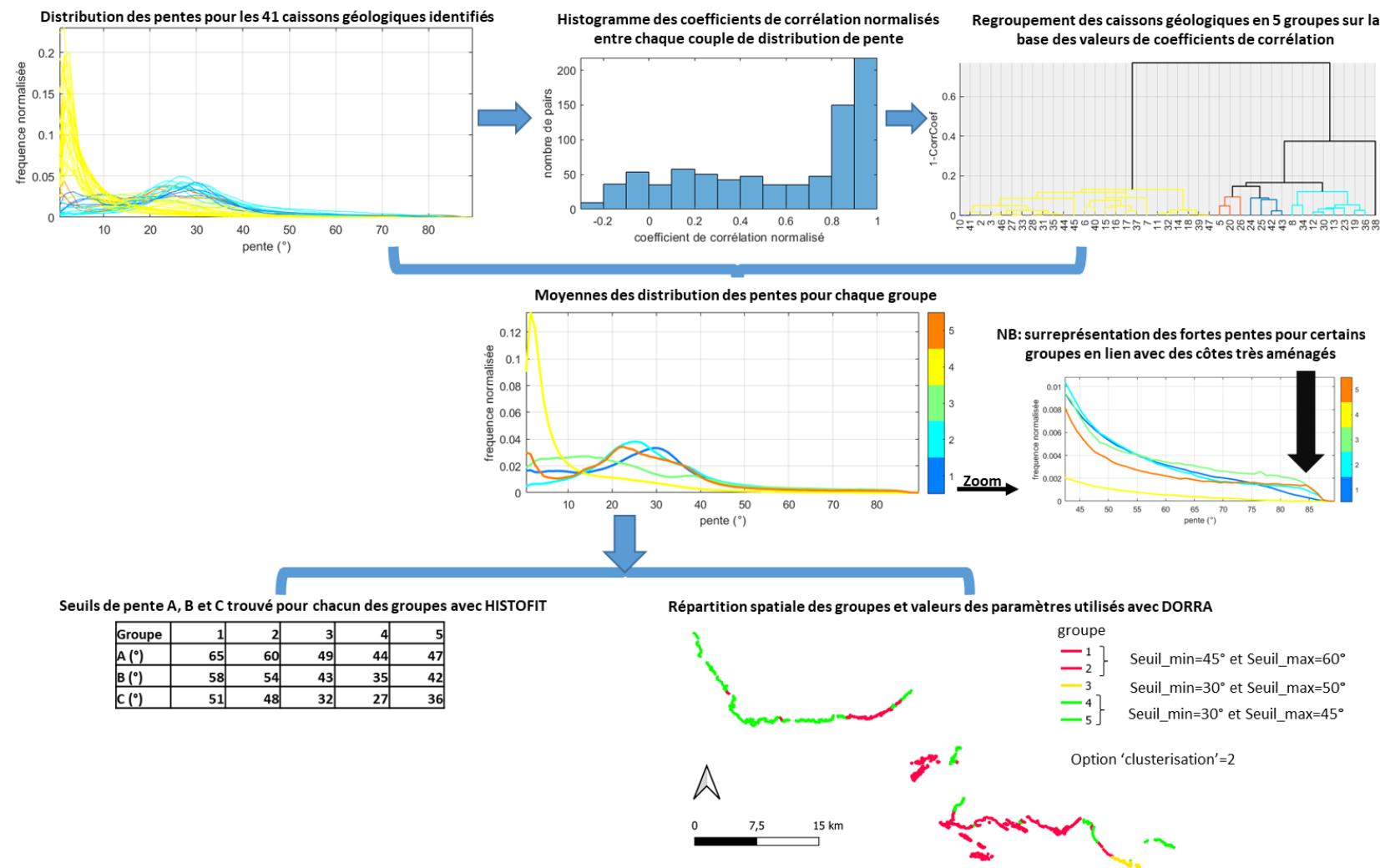


Figure 114 : illustration des étapes d'utilisation des outils HISTOFIT et DORRA pour les falaises littorales des Bouches du Rhône

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

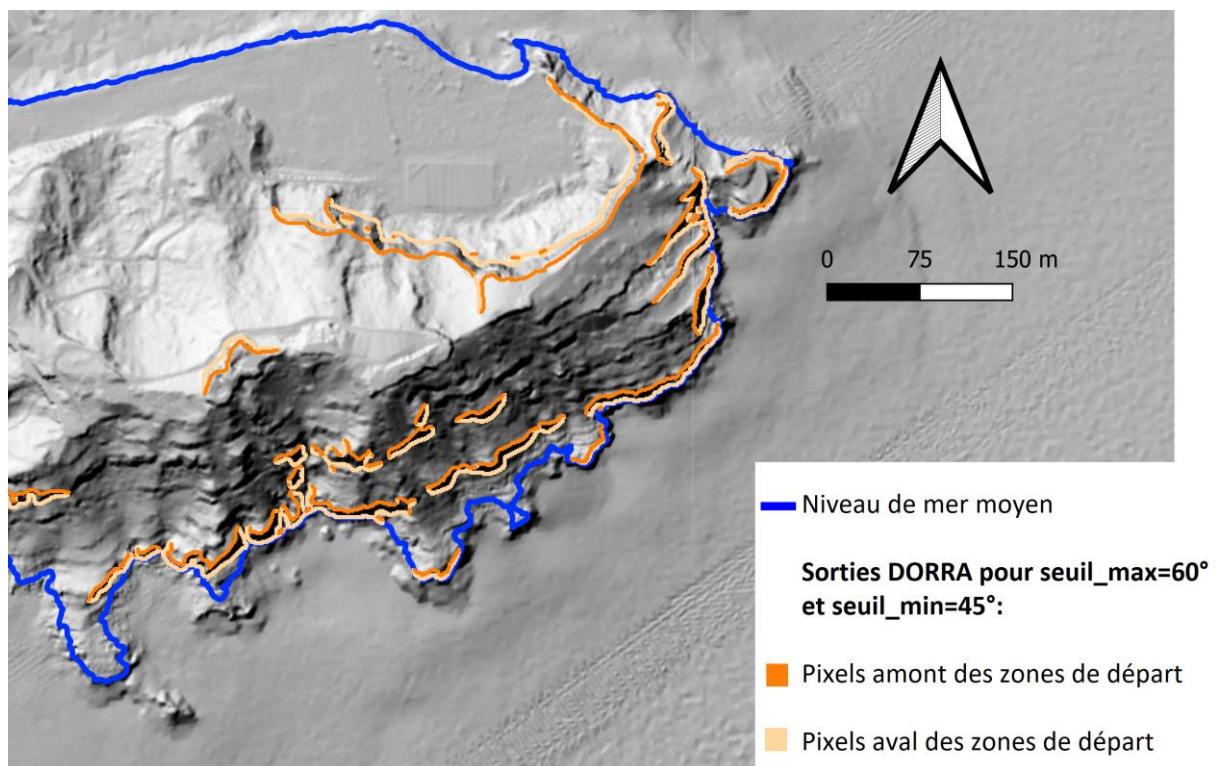


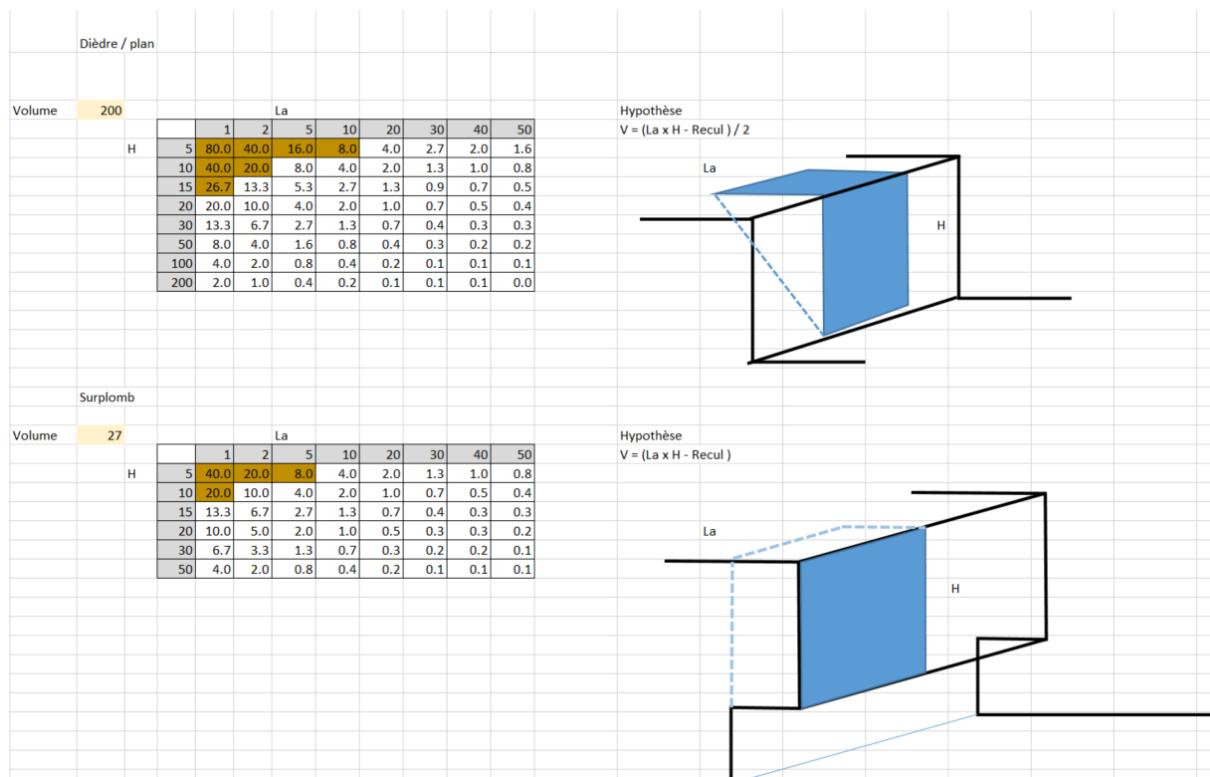
Figure 115 : Exemple de sorties DORRA pour l'un des secteurs à falaises littorales des Bouches du Rhône

19. Annexe 6 : Extrapolation de valeurs de recul à partir de volumes

Lorsque seuls des volumes sont associés aux phénomènes historiques, une gamme de largeur de recul peut être estimée sur la base de la géométrie de la falaise et du mode de rupture considéré. Des tables d'estimation reposant sur des lois très simples mais sécuritaires ont été prises en considération pour des hypothèses de rupture de dièdre et de rupture de surplombs (hypothèses les plus fréquentes).

Ainsi pour chaque phénomène associé à un volume, la hauteur de falaise a été mesurée, une estimation de la largeur d'arrachement a été considérée et une valeur de recul a pu être attribuée. Dans un intervalle donné, la valeur retenue est la plus élevée.

Le fait de retenir ces valeurs majorantes constitue une hypothèse très sécuritaire dans la mesure où une part importante des mouvements de terrain, n'entraîne en tant que tel pas de recul de la crête de falaise mais simplement le départ d'un volume en paroi. Cependant, dans de nombreuses situations, les volumes sont également sous-estimés car le volume renseigné n'est pas toujours le volume total de l'éboulement.



20. Annexe 7 : Table attributaire associée à la Base de donnée Reculs et Observations (BDRO)

Champ	Contenu
ID	identifiant
Source	origine de l'observation
Nature	type d'observation
Phénomene	phénomène passé ou redouté
Date_MVT	date du mouvement de terrain
Date_OBS	date de l'observation
Precis_Loc	précision relative à la localisation du point
Meca_Rupt	mécanisme de rupture identifié
Autre_meca	autre mécanisme érosif éventuel
DESCR	champ libre de description
Volm3	volume mesuré en m3
Recul_Obs	recul mesuré ou observé
Recul_Ext	recul extrapolé à partir du volume et de la configuration morphologique du site
Recul_Esti	recul prospectif estimé à dire d'expert
Recul_Glo	recul global

21. Annexe 8 : Tableaux de synthèse des croisements de la BDRO et des typologie de falaise par caisson géologique

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
2	Argile et calcaire gris Burdigalien	faible	4										
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		0	0	NaN	NaN			0	0	0	0	0	NaN

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster											
3	Gres carbonate massif, marnes greuses, marnes bleues, calcaires marneux	faible	4											
	typo	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs		
		11	389	2	3.5	5	Terrain	CBD ou CDB-GLT	1	0	1	0	2	
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km	
		389	2	3.5	5	Terrain	CBD ou CDB-GLT	1	0	1	0	2	5.1	2.6

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster									
5	Breches calcaires et dolomitiques Oligocene inf	fort	5									
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs
		10	234	0	2	2	Terrain	CBD ou CDB-GLT	0	0	0	1
		12	136	1	Nan	Nan			0	0	1	0
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km
		371	1	2	2	Terrain	CBD ou CDB-GLT	0	0	1	0	1
												2.7
												0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster									
6	Breches du Cap de la Vierge post-Oligocene	fort	4									
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs
		4	630	3	4	4	MVT_nodate	CBD ou CDB-GLT	0	1	2	0
		6	40	0	Nan	Nan			0	0	0	0
		7	900	2	1.5	5	Terrain	CBD ou CDB-GLT	0	2	0	3
		10	80	0	Nan	Nan			0	0	0	0
		11	195	1	1.5	3	MVT_nodate	CBD ou CDB-GLT	0	1	0	1

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km	
		1846	6	1.5	5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	4	2	0	5	3.3	0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster											
7	Calcaires a facies urgonien (partie sup) et marnes et calcaires argileux (partie inf), Hauterivien	fort a moyen	4											
	typo	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs		
		4	579	1	1	2	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	1	0	0	3	
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km	
		579	1	1	2	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	1	0	0	3	1.7	0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
8	Calcaires a Rudistes Turonien sup	fort	2										
	typo	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		6	3777	1	4.5	4.5	MVT_no date	CBD ou CDB/GLT	0	1	0	0	0
		9	261	2	4	4.5	MVT_no date	CBD ou CDB/GLT	0	2	0	0	0
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

	4038	2	4	4.5	MVT_nodate	CBD ou CDB/GLT	0	2	0	0	0	0.5	0
--	------	---	---	-----	------------	----------------	---	---	---	---	---	-----	---

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster											
10	Calcaires du Plan de Sausset Burdigalien inf	moyen	4											
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs		
		4	166	0	NaN	NaN		0	0	0	0	0		
		11	396	3	5	7	MVT_nodate	CBD ou CDB-GLT	0	2	1	0	0	
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km	
		562	3	5	7	MVT_nodate	CBD ou CDB-GLT	0	2	1	0	0	5.3	0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
11	Calcaires et calcaires marneux siliceux ou a silex Aptien inf (Bedoulien)	fort	4										
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		4	86	0	NaN	NaN		0	0	0	0	0	
		5	369	3	3	4	MVT_nodate	CBD ou CDB-GLT	0	2	1	0	1
		12	410	1	1	3	Terrain	CBD ou CDB-GLT	1	0	0	0	3

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km	
		865	4	1	4	MVT_nodate	CBD ou CDB/GLT	1	2	1	0	4	4.6	1.2

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster											
12	Calcaires lacustres blancs, localement marnes, argiles et gres verts Oligocene inf	faible a moyen	2											
	typo	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs		
		4	468	1	2	2	Terrain	CBD ou CDB-GLT	0	1	0	0	1	
		6	115	0	NaN	NaN			0	0	0	0		
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km	
		582	1	2	2	Terrain	CBD ou CDB-GLT	0	1	0	0	1	1.7	0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
13	Calcaires marneux, marnes greuses, marnes et sables lignitifères Turonien sup	faible a moyen	2										
	typo	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		6	84	0	NaN	NaN			0	0	0	0	

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

		9	150	1	4	4	MVT_nod ate	CBD ou CDB/GLT	0	1	0	0	0	0
bilan caisson	lineaire		nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_dat e	nb MVT_no date	nb MVT_auncu ne_info	nb MVT_indice _instab	nb Obs	nb MVT/ km	nb MVT date/km
		234	1	4	4	MVT_nod ate	CBD ou CDB/GLT	0	1	0	0	0	4.3	0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster											
14	Calcaires noduleux et calcaires marneux, Rudistes Coniacien-Santonien	fort	4											
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_dat e	nb MVT_no date	nb MVT_auncu ne_info	nb MVT_indice _instab	nb Obs	nb MVT/ km	nb MVT date/km	
		0	0	NaN	NaN			0	0	0	0	0	NaN	NaN

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster											
15	Calcaires noduleux, calcarenites massives Valanginien	fort	4											
	typo	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_da te	nb MVT_nodat e	nb MVT_auncu ne_info	nb MVT_indice _instab	nb Obs		
		4	190	2	0.1	5	MVT_nod ate	CBD ou CDB/GLT	1	1	0	0	1	
		6	739	5	1	5	MVT_indic e_instab	CBD ou CDB/GLT	0	0	0	5	0	
		12	196	1	1	5	MVT_nod ate	CBD ou CDB/GLT	0	1	0	0	1	
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_dat e	nb MVT_no date	nb MVT_auncu ne_info	nb MVT_indice _instab	nb Obs	nb MVT/ km	nb MVT date/km	

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

	1125	8	0.1	5	MVT_indic e_instab	CBD ou CDB-GLT	1	2	0	5	1	7.1	0.9
--	------	---	-----	---	-----------------------	-------------------	---	---	---	---	---	-----	-----

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster											
16	Calcaires zoogènes blancs et calcaires dolomites Tithonique moyen	fort	4											
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs		
		4	475	1	4	4	MVT_nodate	CBD ou CDB-GLT	0	1	0	0		
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km	
		475	1	4	4	MVT_nodate	CBD ou CDB-GLT	0	1	0	0	0	2.1	0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
17	Calcaires, calcaires argileux, marnes Valanginien	fort	4										
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		4	1505	7	0	4	MVT_indic e_instab	CBD ou CDB-GLT	2	1	2	2	5
		12	297	1	1	2	Terrain	CBD ou CDB-GLT	0	1	0	0	1
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		1802	7	0	4	MVT_indic e_instab	CBD ou CDB-GLT	2	1	2	5	3.9	1.1

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster									
18	Calcarenite blanche à <i>Chlamys praescabriuscula</i> Burdigalien sup	fort à faible	4									
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs
		4	1327	7	1.5	14	MVT_nodate	CBD ou CDB/GLT	0	6	1	0
		5	917	2	0	3	Terrain	CBD ou CDB/GLT	1	0	1	0
		5.1	121	0	NaN	NaN			0	0	0	0
		12	372	3	0	2	Terrain	CBD ou CDB/GLT	1	1	1	0
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km nb MVT date/km
		2737	9	0	14	MVT_nodate	CBD ou CDB/GLT	1	6	2	0	8
												3.3
												0.4

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster									
19	Calcarenites, marno-calcaires, grès et sables (Rudistes sur Martigues) Cénomanien	fort	2									
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_datede	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs
		6	304	2	2.5	5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	1	1	0	0
		9	123	2	2.5	4	MVT_nodate	CBD ou CDB/GLT	0	2	0	0

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km	
		427	3	2.5	5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	1	2	0	0	1	7	2.3

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster											
20	Carbonates dolomitiques Kimmeridgien	fort	5											
	typo	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs		
		4	118	0	NaN	NaN			0	0	0	0	0	
		6	524	0	NaN	NaN			0	0	0	0	0	
		9	922	8	1.5	2	MVT_no date	CBD ou CDB/GLT	0	2	6	0	0	
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km	
		1564	8	1.5	2	MVT_no date	CBD ou CDB/GLT	0	2	6	0	0	5.1	0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
23	Dolomies gris sale, breches intraformationnelles Kimmeridgien sup	Fort a moyen	2										
	typo	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

		6	551	1	Nan	NaN			0	0	0	1	0
		9	151	2	1.5	8	MVT_nodate	CBD ou CDB/GLT	0	1	0	1	0
bilan caisson	lineaire		nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km nb MVT date/km
		702	3	1.5	8	MVT_nodate	CBD ou CDB/GLT	0	1	0	2	0	4.3 0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
24	Dolomies massives grises Tithonique inf	fort	1										
	typo	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		4	175	0	Nan	NaN			0	0	0	0	0
		6	119	1	Nan	NaN			0	0	0	1	0
bilan caisson	lineaire		nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km nb MVT date/km
		294	1	Nan	Nan	MVT_indice_instab	CBD ou CDB/GLT	0	0	0	1	0	3.4 0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
25	Eboulis et colluvions du Wurm	faible	1										

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs		
		4	360	2	1	1	Terrain	CBD ou CDB/GLT	1	1	0	0	1	
		6	68	0	NaN	NaN			0	0	0	0		
		12	213	0	2	2	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	0	0	0	1	
bilan caisson	lineaire		nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		641	2	1	2	Terrain	CBD ou CDB/GLT	1	1	0	0	2	3.1	1.6

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster											
26	Gres de Soubeyran (microconglomérats et gres coquilliers) Turonien sup	fort	5											
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs		
		5	81	0	2	2	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	0	0	0	1	
		11.1	2229	1	5	5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	0	1	0	2	
bilan caisson	lineaire		nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		2311	1	2	5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	0	1	0	3	0.4	0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

27	Gres du Baguier du Coniacien	moyen	4											
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs		
		5.2	58	0	0.5	0.5	Terrain	CBD ou CDB-GLT	0	0	0	0	1	
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km	
		58	0	0.5	0.5	Terrain	CBD ou CDB-GLT	0	0	0	0	1	0	0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster											
28	Gres et marnes sableuses Santonien	moyen	4											
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs		
		5.2	931	6	1	15	Terrain	CBD ou CDB-GLT	0	5	1	0	10	
		11	174	0	NaN	NaN			0	0	0	0	0	
		12	78	0	NaN	NaN			0	0	0	0	0	
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km	
		1184	6	1	15	Terrain	CBD ou CDB-GLT	0	5	1	0	10	5.1	0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

30	Gres, marnes sableuses, calcaires à entroques, calcaires à rudistes du Coniacien	moyen	2										
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		6	403	0	NaN	NaN			0	0	0	0	
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		403	0	NaN	NaN			0	0	0	0	0	0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster											
31	Intercalations marneuses Santonien	fort à moyen	4											
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs		
		5.2	990	6	0.5	6	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	6	0	0	13	
		11	97	0	NaN	NaN			0	0	0	0	0	
		12	108	0	NaN	NaN			0	0	0	0	0	
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km	
		1195	6	0.5	6	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	6	0	0	13	5	0

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
32	Marnes a lentilles de poudingues Maestrichtien inf	faible a moyen	4										
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_da te	nb MVT_nodat e	nb MVT_auncu ne_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		5	494	7	0.5	5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	1	4	2	0	5
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_dat e	nb MVT_no date	nb MVT_auncu ne_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		494	7	0.5	5	Terrain	CBD ou CDB-GLT	1	4	2	0	5	14.2
													2

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
33	Marnes et calcaires (Formation de Carry) Aquitanien sup	faible	4										
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_da te	nb MVT_nodat e	nb MVT_auncu ne_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		5	813	13	0	6	Terrain	CBD ou CDB-GLT	8	4	1	0	6
		5.1	200	1	2	3	Terrain	CBD ou CDB-GLT	0	0	1	0	2
		11	88	4	1	3	Terrain	CBD ou CDB-GLT	0	0	4	0	2
		12	253	5	1	3	Terrain	CBD ou CDB-GLT	0	1	4	0	4
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_dat e	nb MVT_no date	nb MVT_auncu ne_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		1355	19	0	6	Terrain	CBD ou CDB-GLT	8	4	7	0	10	14
													5.9

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster									
34	Marnes et calcaires a rudistes, gres Santonien	fort	2									
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs
		4	353	4	1	5	MVT_date	CBD ou CDB/GLT	1	1	2	0
		7	982	3	6	6	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	0	3	0
		8	1626	6	1	25	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	4	2	0
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km
		2961	11	1	25	Terrain	CBD ou CDB/GLT	1	5	5	0	6
												3.7
												0.3

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster									
35	Marnes et gres du Cenomanien	faible a moyen	4									
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs
		5	525	6	0.5	3	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	2	4	0
		11	297	1	3	3	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	0	1	0
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km
		822	6	0.5	3	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	2	4	0	6
												7.3
												0

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
36	Marnes grises à céphalopodes, calcaires glauconieux et siliceux Aptien sup (Gargasien)	fort	2										
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		4	284	0	NaN	NaN			0	0	0	0	
		6	134	0	NaN	NaN			0	0	0	0	
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		418	0	NaN	NaN			0	0	0	0	0	0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
37	Marnes rouges et conglomerats (Formation du Rouet) Oligocène sup	faible	4										
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		5	537	11	1	4	Terrain	CBD ou CDB-GLT	8	1	2	0	3
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		537	11	1	4	Terrain	CBD ou CDB-GLT	8	1	2	0	3	20.5
													14.9

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
38	Poudingues du Turonien sup	fort	3										
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		4	283	0	3	3	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	0	0	0	1
		6	5644	3	1	5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	0	2	1	1
		7	396	0	NaN	NaN			0	0	0	0	0
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		6323	3	1	5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	0	2	1	2	0.5

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
39	Poudingues, argiles et limons rouges de l'Oligocène inf. (Stampien)	moyen	4										
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		4	326	2	1	1.5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	1	1	0	0	3
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		326	2	1	1.5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	1	1	0	0	3	6.1

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
40	Remblais, depots anthropiques	moyen	4										
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		0	0	NaN	N			0	0	0	0	0	NaN

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
41	Sables, marnes et calcaires (Formation de Sausset) Aquitaniens sup	moyen	4										
	typo	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		5	1849	6	1	3	Terrain	CBD ou CDB-GLT	0	1	5	0	6
		11	227	3	1	3	Terrain	CBD ou CDB-GLT	2	0	1	0	3
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		2076	9	1	3	Terrain	CBD ou CDB-GLT	2	1	6	0	8	4.3

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
42	Calcaires a rudistes (facies urgonien) Barremien		1										

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
	4	23469	11	0	5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	4	3	1	3	16	
	6	38942	6	0.5	4	Terrain	CBD ou CDB/GLT	1	1	2	2	2	
	7	438	1	2.5	2.5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	0	1	0	1	
	9	1213	1	NaN	NaN			1	0	0	0	1	
	12	204	3	3.5	5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	1	0	0	2	2	
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
	64266	21	0	5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	7	4	4	6	21	0.3	0.1

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
43	Eboulis récents		1										
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
	4	106	0	0.5	5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	0	0	0	3	
	11	759	3	2	13	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	1	2	0	5	
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
	865	3	0.5	13	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	1	2	0	8	3.5	0

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster									
44	Marnes et calcaires (Formation du Cap de Nantes) Aquitainien sup		4									
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs
		4	300	2	NaN	NaN		0	0	2	0	0
		5	445	0	1	2	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	0	0	3
		6	33	1	1	2.5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	1	0	1
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km
		778	3	1	2.5	Terrain	CBD ou CDB/GLT	0	1	2	0	4
												3.9
												0

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster									
45	Marnes gréseuses, marnes bleues, calcaires marneux du Turonien inf		4									
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_date	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km
		0	0	NaN	NaN			0	0	0	0	NaN
												NaN

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
46	Marnes et sables (Formation du Rousset) Aquitanien sup		4										
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_dante	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		5	677	10	0	3	Terrain	CBD ou CDB-GLT	8	1	1	0	7
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_dated	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		677	10	0	3	Terrain	CBD ou CDB-GLT	8	1	1	0	7	14.8
													11.8

num caisson	description caisson	resistance expert	cluster										
47	Cones de dejection du Wurm		4										
	typo	lineaire	nb MVT	R min	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_dante	nb MVT_nodate	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	
		5	864	14	0	5	Terrain	CBD ou CDB-GLT	8	2	1	2	4
		12	98	4	0.5	5	Terrain	CBD ou CDB-GLT	1	2	1	0	1
bilan caisson	lineaire	nb MVT	Rmin	Rmax	Nature Rmax	Pheno Rmax	nb MVT_dated	nb MVT_no date	nb MVT_auncune_info	nb MVT_indice_instab	nb Obs	nb MVT/km	nb MVT date/km
		962	17	0	5	Terrain	CBD ou CDB-GLT	8	4	2	2	5	17.7
													8.3

22. Annexe 9: Scénarios et reculs unitaires retenus par tronçons homogènes

N° Caisson	Caisson géologique	Type de falaise	Nb de configurations retenues	Valeur de Recul unitaire retenue (m)					
				Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
3	Gres carbonate massif, marnes greuses, marnes bleues, calcaires marneux	11	1	5					
5	Breches calcaires et dolomitiques Oligocène inf	4, 6, 10, 12	1 + meuble en tête	4					
6	Breches du Cap de la Vierge post-Oligocène	6, 7, 10, 11	1	5					
7	Calcaires à facies urgonien (partie sup) et marnes et calcaires argileux (partie inf), Hauterivien	4	1	2					
8	Calcaires à Rudistes Turonien sup	6, 9	1+ meuble en tête	5					
10	Calcaires du Plan de Sausset Burdigalien inf	4	1	5					
11	Calcaires et calcaires marneux siliceux ou à silex Aptien inf (Bedoulien)	4, 5, 10, 12	1 + meuble en tête	T10 : 3	T4,T5,T12 : 4				
12	Calcaires lacustres blancs, localement marnes, argiles et gres verts Oligocène inf	4, 6	1	2					
13	Calcaires marneux, marnes greuses, marnes et sables lignitifères Turonien sup	6, 9	1 + meuble en tête	4					
15	Calcaires noduleux, calcarenites massives Valanginien	4, 6, 12	2 + meuble en tête	5	T4, configuration isolée (La Vesse) : 1				
16	Calcaires zoogénés blancs et calcaires dolomitiques Tithonique moyen	4	1	4					

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

	Calcaires, calcaires argileux, marnes Valanginien	4, 12	2 + meuble en tête	Configuration de type Samena (H ~ 10-15 m, Subverticale, Surplombs majeurs) : 4	Configuration de type Corniche (H <10 m, Pente plus faible, sous-cavage plus limités) : 2				
17	Calcareite blanche a Chlamys praescabriuscula Burdigalien sup	4, 5, 12	1	5					
18	Calcareites, marno-calcaires, gres et sables (Rudistes sur Martigues) Cenomanien	6, 9	1	5					
19	Carbonates dolomitiques Kimmeridgien	6, 9	1	5					
20	Dolomies gris sale, breches intraformationnelles Kimmeridgien sup	6, 9	1	5					
23	Dolomies massives grises Tithonique inf	4, 6	2	5					
25	Eboulis et colluvions du Wurm	4, 12	1 + meuble en tête	2					
26	Gres de Soubeyran (microconglomérats et gres coquilliers) Turonien sup	5, 6, 11bis	2	T11bis et T6 : 5	Zone localisée très défavorable (T11bis) : 18	T5 : 2			
27	Gres du Baguier du Coniacien	5ter	1	1					
28	Gres et marnes sableuses Santonien	5ter, 11, 12	3	T5ter : 4	Configuration localisée très défavorable (T5ter) : 15	De part et d'autre de la configuration très défavorable (T5ter) : 10			
30	Gres, marnes sableuses, calcaires a entroques, calcaires a rudistes du Coniacien	6	1	5					
31	Intercalations marneuses Santonien	5ter, 11, 12	3	H > 12 m : 6	H < 12 m : 4	H < 3 m : 1			
32	Marnes a lentilles de poudingues Maestrichtien inf	5	1	5					
33	Marnes et calcaires (Formation de Carry) Aquitanien sup	5, 5bis 11, 12	2 + meuble en tête	H > 20 m : 5	H < 20 m : 3				

Développement méthodologique : Caractérisation du recul potentiel des falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône

	Marnes et calcaires a rudistes, gres Santonien	4, 7, 8	6	T8 avec Plans parallèles au rivage : 5	T8 avec Plans perpendiculaires au rivage : 1	T7 à bancs épais et surplombs majeurs : 7	T7 à bancs fins : 2	T4 avec H > 40 m : 5	T4 avec H < 20 m : 3
34	Marnes et calcaires a rudistes, gres Santonien	4, 7, 8	6	T8 avec Plans parallèles au rivage : 5	T8 avec Plans perpendiculaires au rivage : 1	T7 à bancs épais et surplombs majeurs : 7	T7 à bancs fins : 2	T4 avec H > 40 m : 5	T4 avec H < 20 m : 3
35	Marnes et gres du Cenomanien	5, 11	2	T5 : 3	T11 : 4				
36	Marnes grises a céphalopodes, calcaires glauconieux et siliceux Aptien sup (Gargasien)	4, 6	1	5					
37	Marnes rouges et conglomerats (Formation du Rouet) Oligocène sup	5	2	H > 15 m : 4	H < 12 m : 2				
38	Poudingues du Turonien sup	4, 6, 7	2	T6, T7 : 5	T4 : 3				
39	Poudingues, argiles et limons rouges de l'Oligocène inf. (Stampien)	4	1	3					
41	Sables, marnes et calcaires (Formation de Sausset) Aquitanien sup	5, 11	2	H > 3 m : 3	H < 3 m : 1				
42	Calcaires a rudistes (facies urgonien) Barremien	4, 6, 7, 9, 12	3 + meuble en tête	Global : 5	Configuration type Cassis (H < 10 m, pendage subvertical, surplomb légers) : 2,5	Configuration type Cassis, très défavorable : 4			
43	Eboulis récents	4, 11	4	T4 : 3	T11 à épaisseur d'éboulis majeurs : 13	T11 à épaisseur d'éboulis limitée : 4			
44	Marnes et calcaires (Formation du Cap de Nantes) Aquitanien sup	4, 5, 6	3	H > 10-12 m : 3	H < 10 m : 2	T5 Configuration isolée (Martigues) : 2.5			
46	Marnes et sables (Formation du Rousset) Aquitanien sup	5		H > 10-12 m : 5	H < 10 m : 3				
47	Cones de déjection du Wurm	4, 11	1 + meuble en tête	4					



*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemen
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale PACA

117, Avenue de Luminy
BP 168
13276 Marseille Cedex 9
Tél. : 04 91 17 74 77
www.brgm.fr

