

# Actualisation des connaissances et cartographie de l'aléa instabilités de falaises côtières sur le littoral des Bouches-du-Rhône

hib-2 d7-hia



de-hia hib

**Rapport final** 



.89 3740,46 -625.5

PRÉFET DES BOUCHES-DU-RHÔNE

Direction départementale des Territoires et de la Mer





# Actualisation des connaissances et cartographie de l'aléa instabilités de falaises côtières sur le littoral des Bouches-du-Rhône

Rapport final

BRGM/RP-62643-FR

Mars 2014

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets) de Service public (Recherche) du BRGM 11RISE21

> N. Marçot Avec la collaboration de L. Schuller et C. Mathon

#### Vérificateur :

Nom : VANOUDHEUSDEN E.

Date : 19 mars 2014

#### Approbateur :

Nom : ARNAL C.

Date : 21 mars 2014

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





PRÉFET DES BOUCHES-DU-RHÔNE

Direction départementale des Territoires et de la Mer

**Mots-clés** : aléa, cartographie de l'aléa, chutes de blocs, éboulements, érosion côtière, EUCC, falaise, glissement de terrain, instabilité, littoral provençal, Bouches-du-Rhône, France.

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

**Marçot N., Schuller L., Mathon C.** (2014) – Actualisation des connaissances et cartographie de l'aléa instabilités de falaises côtières sur le littoral des Bouches-du-Rhône. Rapport final BRGM/RP-62643-FR, 72 p., 50 ill., 6 ann, 1 DVD, 1 SIG sur Disque Dur externe.

© BRGM, 2014, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

# Synthèse

L e littoral des Bouches-du-Rhône se développe sur environ 360 km dont 41 km de littoral insulaire (Frioul, Maïre, Riou, Ile Verte pour les plus grandes), auxquels il faut ajouter les 78 km de littoral de l'Etang de Berre. Ce littoral est composé à 70 % de côtes basses (sableuses ou rocheuses généralement inférieures à 2 m de hauteur), les 30 % restants étant des côtes rocheuses généralement à falaises.

Compte-tenu de l'importance touristique de cette partie du littoral provençal, ce dernier est de plus en plus confronté au problème de l'érosion des falaises, avec des questions qui se posent sur la réalisation ou non de travaux coûteux de protection dans un souci d'aménagement. Cette érosion se traduit par un aléa instabilités de falaise, plus ou moins fort selon les zones du littoral.

Le BRGM a produit en 2004 (commande de la Région et de la DREAL Provence Alpes Côte d'Azur) une cartographie de l'aléa instabilités de falaises à l'échelle du 1/100 000<sup>e</sup> (validité 1/50 000<sup>e</sup>) sur l'ensemble du littoral de la région PACA, ainsi que sur le littoral de l'Etang de Berre et des îles habitées. Cette cartographie très générale à l'échelle de la région a permis de mettre en évidence des secteurs particulièrement sensibles aux instabilités de falaises (mouvements de terrain de type chutes de blocs, éboulements en masse, glissements de terrain). Deux manifestations de valorisation et d'appropriation de l'étude par les gestionnaires ont permis de faire connaître les travaux :

- Des ateliers de terrain EUCC<sup>1</sup> à Carry-le-Rouet les 1<sup>er</sup> et 2 avril 2009
- Un colloque sur la problématique instabilités de falaises : pour une meilleure gestion des risques, à Marseille, le 2 décembre 2010.

La Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Bouches du Rhône (DDTM 13) a aujourd'hui besoin de disposer d'une cartographie de l'aléa instabilité de falaises à une échelle cohérente avec les documents d'urbanisme pour répondre aux besoins des communes. L'échelle du 1/10 000<sup>e</sup> a été proposée sur les secteurs qui ont été mis en évidence comme particulièrement sensibles à ce phénomène et présentant des enjeux impliquant la nécessité d'affiner cette connaissance. Sur les secteurs dits « sans enjeux », la cartographie de l'aléa au 1/100 000<sup>e</sup> établie en 2004 par le BRGM a été reportée sur le trait de côte de la BD Topo IGN à l'échelle du 1/25 000<sup>e</sup>.

La typologie des phénomènes instabilités de falaises utilisée jusqu'à présent sur le littoral a dû être précisée et adaptée au littoral spécifique des Bouches-du-Rhône, marqué par une géologie et une lithologie caractéristiques des littoraux Provençaux (calcaire Barrémien à faciès Urgonien des Calanques, calcarénite et sables de la Côte Bleue, poudingues de la Ciotat et formations tertiaires de l'Etang de Berre). Un inventaire des événements historiques, ainsi qu'un inventaire des études géotechniques et des arrêtés municipaux ont été mis à jour dans le cadre de l'étude. Des fiches descriptives par secteur homogène de littoral en termes d'instabilités et de morphologie ont été réalisées. Plus de 3000 photos acquises lors des expertises de terrain complètent ces données.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> European Coastal & Marine Union

L'aléa a été cartographié à partir de missions d'expertise sur le terrain afin d'identifier, à dire d'expert, les facteurs de prédisposition permanents<sup>2</sup> aux instabilités rocheuses des falaises, selon un certain nombre de critères (lithologie, état de la fracturation, circulation d'eau, morphologie de la falaise, hauteur, volumes mobilisables...).

L'ensemble des données produites ont été géoréférencées, et composent aujourd'hui un système d'information géographique (SIG), réalisé sur le logiciel MapInfo à la demande du client, et proposé également sous la forme d'un .pdf interactif.

A l'échelle du 1/25 000<sup>e</sup>, en termes d'aléa instabilités de falaises côtières, sur les 438 km de littoral (comprenant le littoral de l'Etang de Berre), 6% présentent un aléa fort, 8% un aléa moyen et 16 % un aléa faible. Le reste correspondant à un aléa nul à faible.

A l'échelle du 1/10 000<sup>e</sup> sur les 97 km de zones dites « à enjeux », l'étude a permis de caractériser un aléa instabilités de falaises côtières sur une surface de 4,45 km<sup>2</sup>. En termes d'aléa, cela représente (le reste correspondant à un aléa nul à faible) :

- 1% en aléa très fort
- 18% en aléa fort
- 7% en aléa moyen à fort
- 34% en aléa moyen
- 19% en aléa faible à moyen
- 19% en aléa faible.

L'inventaire des arrêtés municipaux a permis de mettre en évidence que 15 km de littoral étaient couverts par un arrêté municipal ou une information d'interdiction de passage ou de risque de chute de blocs.

L'inventaire des événements historiques a permis de comptabiliser 130 événements au total qui se répartissent de la façon suivante :

- 110 chute de blocs / éboulement
- 17 glissements de terrain
- 1 érosion de berge
- 2 coulées de boue

Cette étude va permettre à la DDTM 13 de faire un porté à connaissance auprès des 12 communes du littoral des Bouches-du-Rhône, concernées par un aléa instabilités de falaise côtières, à savoir :

- Port-de-Bouc Marseille
- Martigues Cassis
- Sausset-les-Pins La Ciotat
- Carry-le-Rouet
- Ensuès-la-Redonne Saint-Mitre-les-Remparts
- Le Rove
- Vitrolles

- Istres

Ce travail aidera également la DDTM 13 à compléter l'étude caractérisant plus finement le Domaine Publique Maritime (DPM) du département, en intégrant la composante aléa instabilités de falaises.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Par opposition aux facteurs aggravants (précipitations, action de la houle, gel/dégel...)

# Sommaire

1.	Objectifs et méthode	9
	<ul> <li>1.1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE</li> <li>1.1.1.Contexte</li> <li>1.1.2. Problématique</li></ul>	9 9 11 13
	1.2. OBJECTIFS 1.2.1. Phase 1 1.2.2. Phase 2 1.2.3. Phase 3	14 14 15 15
	1.3. METHODOLOGIE GENERALE	16
2.	Phase 1 : Actualisation des connaissances en termes d'événements historiques d'études	et 17
	2.1. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE	17
	2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE	20
	<ul> <li>2.3. MISE A JOUR DE L'INVENTAIRE DES EVENEMENTS HISTORIQUES ET DES ETUDES GEOTECHNIQUES</li> <li>2.3.1. Collecte des données événements</li> <li>2.3.2. Collecte des études géotechniques</li> </ul>	22 22 25
	2.4. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA INSTABILITES AU 1/25 000 <sup>E</sup>	26
	2.5. IDENTIFICATION DES ZONES A ENJEUX SUR LE LITTORAL POUR UNE CARTOGRAPHIE DE L'ALEA AU 1/10 000 <sup>E</sup>	28
3.	Phase 2 : Qualification d'un aléa instabilités au 1/10 000 <sup>e</sup> sur les zones à enjeux identifiées	31
	3.1. DEFINITION DE L'ALEA	31
	<ul> <li>3.2. TYPOLOGIE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN</li> <li>3.2.1.Les instabilités rocheuses:</li> <li>3.2.2.Les glissements de terrains :</li> </ul>	34 35 37
	<ul><li>3.3. EXPERTISE GEOTECHNIQUE DE TERRAIN</li><li>3.3.1.Description des falaises</li><li>3.3.2.Traitement et mise en forme des données</li></ul>	38 38 44
	3.4. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA AU 1/10 000 <sup>E</sup>	49
4.	Phase 3 : Synthèse des travaux et cartographie	53
	4.1. CARTOGRAPHIES	53

6. Bibliographie	63
5. Conclusion	61
4.2.3. Secteurs avec un aléa instabilités moyen à fort	59
4.2.2. Secteurs avec un aléa instabilités fort	58
4.2.1. Secteurs avec un alea instabilités très fort	56
4.2. IDENTIFICATION DES SECTEURS A ALEA FORT	56

## Liste des illustrations

Illustration 1 : Extrait de l'aléa instabilités de falaises au 1/100 000 <sup>e</sup> sur le littoral des Bouches-du-Rhône issu de l'étude régionale du BRGM (2004)9
Illustration 2 : Falaise du Château à Cassis10
Illustration 3 - Recul par à-coup du pied de falaise sapé par les vagues armées de blocs (Source : rapport BRGM-62521-FR)11
Illustration 4 : Différents profils de falaises (A : Roche homogène, B :roche résistante sus-jacente, C : roche résistante sous-jacente) d'après Emery et Kuhn (1982)- m = érosion marine, Sa = érosion sub-aérienne
Illustration 5 : Différents type de falaises (A : falaise vive, B : falaise stabilisée, C : falaise morte) d'après Paskoff (1994)12
Illustration 6 : Formation et recul d'une falaise ; développement corrélatif d'une plate- forme rocheuse basale d'après Paskoff (1994)12
Illustration 7 : Extrait de l'analyse morpho structurale sur le trait de côte rocheux de la région PACA (Giuliano et al., 2013)
Illustration 8 : Falaise du Liouquet à la Ciotat14
Ilustration 9 : Méthodologie générale16
Illustration 10 : Falaise de Carry-le-Rouet17
Illustration 11 : Falaise de Figuerolles sur le littoral de la commune du Rove17
Illustration 12 : Falaise de la plage de la Verrerie à Marseille18
Illustration 13 : Falaise de la calanque de Sormiou18
Illustration 14 : Baie de Cassis19
Illustration 15 : Falaise du Liouquet à la Ciotat19
Ilustration 16 : Géologie du département des Bouches-du-Rhône (Carte Géologique Marseille       1/250 000 <sup>e</sup> BRGM)21
Illustration 17 : Tableau de synthèse de l'enquête auprès des communes
Illustration 18 : Cartographie de synthèse de l'enquête auprès des communes23
Illustration 19 : Extrémité Est du cap de l'Espéron sur la commune de Sausset-les-Pins (au niveau de la plateforme calcaire). Chute d'au moins un bloc de plusieurs m3 encerclées en rouge. a) Photo de 2003 ; b) Photo de 201324
Illustration 20 : Tableau de synthèse de l'inventaire auprès des organismes ciblés24
Illustration 21 : Extrait de la table renseignant les métadonnées pour les événements mouvements de terrain recensés

Illustration 22	: Cartographie des événements mouvements de terrain recensés et des études géotechniques	.26
Illustration 23	: Report de l'aléa instabilités de falaises sur la BD Topo au 1/25 000 <sup>e</sup>	.27
Illustration 24	: Deux exemples de côtes urbanisées – (1) à Martigues avec sentier du littoral,constructions en cours et villas; (2) à Méjean (Ensuès-la-Redonne) dans le port.	.28
Illustration 25	: Emprises des secteurs cartographiés au 1/10 000 <sup>e</sup> en termes d'aléa instabilités de falaises côtières	.30
Illustration 26	: Tableau récapitulatif des différents niveaux d'aléa avec leurs critères respectifs et une illustration associée	.33
Illustration 27	: Typologie d'érosion et d'instabilités sur lelittoral des Bouches-du-Rhône	.34
Illustration 28	: Schéa d'une rupture de surplomb	.35
Illustration 29	: Schéma d'un décollement de toit de dalle	.35
Illustration 30	: Schéma d'une chute de bloc suivie d'un éclatement de la roche	.36
Illustration 31	: Schéma d'écaillage puis basculement de bloc	.36
Illustration 32	: Schéma d'écaillage, basculement et pivotement	.36
Illustration 33	: Schéma de fauchage de bloc	.36
Illustration 34	: Schéma de glissement banc sur banc	.37
Illustration 35	: Exemple de glissement de terrain à Martigues dans des argiles et schéma classique d'un glissement de terrain plan (à gauche), et rotationnel (à droite), d'après « Le risque mouvements de terrain en Provence Alpes Côte d'Azur » (2011)	.37
Illustration 36	: Diagramme stéréoscopique issu des mesures prises dans les calcaires urgoniens de l'Anse de la Beaumaderie (Martigues). La projection se fait en 2D sur l'hémisphère inférieur.	.41
Illustration 37	: Extrait d'une fiche recto verso	.43
Illustration 38	: Détail de la table Aléa au 1/25 000 <sup>e</sup>	.44
Illustration 39	: Détail de la table Aléa au 1/10 000 <sup>e</sup>	.45
Illustration 40	: Détail de la table des arrêtés municipaux	.46
Illustration 41	: Détail de la table des études géotechniques	.46
Illustration 42	: Détail des champs associés aux photos dans la table de données SIG	.47
Illustration 43	: Détail des tables fiches terrain (ponctuelles et linéaires)	.48
Illustration 44	: Illustration de la méthode des cônes	.50
Illustration 45	: Résultat de la modélisation obtenue avec CONEFALL sur la falaise de Sormiou à Marseille (en bas). La zone rouge est la zone de propagation des blocs.	.50
Illustration 46	: Cartographie de l'aléa instabilités de falaise au 1/10 000 <sup>e</sup>	.51
Illustration 47	: Cartographie de l'aléa au 1/25 000 <sup>e</sup>	.53
Illustration 48	: Cartographie de l'aléa au 1/10 000 <sup>e</sup>	.54
Illustration 49	: Cartographie des éléments d'information	.55
Illustration 50	: Localisation des secteurs en aléa très fort sur le littoral des Bouches-du-	
	Rhône	.57

## Liste des annexes

Annexe 1 - Diagnostic Pointe des Lombards – Cassis (Octobre 2013)......65

## Liste des annexes hors rapport

Annexe 2 Hors texte	Fiches descriptives par secteur homogène		
Annexe 3 Hors texte	Inventaire des études géotechniques sur le littoral des Bouches- du-Rhône		
Annexe 4 Hors texte	Cartographies des zones à enjeux à étudier pour un aléa instabilités au 1/10 000 <sup>e</sup> présentées en début de projet (2012)		
Annexe 5 Hors texte	Cartographies de l'aléa instabilités de falaises au 1/25 000 <sup>e</sup>		
Annexe 6 Hors texte	Cartographies de l'aléa instabilités de falaises au 1/10 000 <sup>e</sup> et cartographie des éléments d'information sur le littoral à enjeux des Bouches-du-Rhône en lien avec la cartographie de l'aléa instabilités de falaises au 1/10 000 <sup>e</sup>		
Annexe 7 Hors texte	Cartographies .pdf numériques interactives à l'échelle du 1/10 000e		

# 1. Objectifs et méthode

### 1.1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

#### 1.1.1. Contexte

Le département des Bouches-du-Rhône compte 362 km de littoral dont 41 km de littoral insulaire (Frioul, Maïre, Riou, Ile Verte pour les plus grandes), auxquels il faut ajouter les 78 km de littoral de l'Etang de Berre. Ce littoral est composé à 70 % de côtes basses (sableuses ou rocheuses généralement inférieures à 2 m de hauteur), les 30 % restants étant des côtes rocheuses généralement à falaises.

Une étude réalisée par le BRGM entre 2004 et 2007 a permis de faire un état de l'érosion des falaises côtières de l'ensemble du littoral de la région PACA, y compris des îles habitées, ainsi que du littoral de l'étang de Berre (Illustration 1).



Illustration 1 : Extrait de l'aléa instabilités de falaises au 1/100 000<sup>e</sup> sur le littoral des Bouches-du-Rhône issu de l'étude régionale du BRGM<sup>4</sup> (2004)

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Rapport BRGM-RP52829-FR (2004)

Cette étude a montré que les falaises littorales provençales sont affectées par une grande variété de phénomènes. Les éboulements (chutes de blocs, de pierres...) sont très répandus, sur la côte bleue et sur le massif des Calanques. La fracturation est souvent intense, les structures en surplomb et en aval-pendage très fréquentes. Ces facteurs caractéristiques engendrent alors d'autres types d'instabilités comme les glissements banc sur banc par exemple. L'action de la houle marine au pied des falaises génère à long terme des sous-cavages dans les niveaux inférieurs, souvent moins compétents et plus facilement altérables, pouvant déstabiliser des colonnes ou pans rocheux. Les faciès du Miocène, très représentés sur la chaîne de la Nerthe, sont marqués par des phénomènes d'érosion différentielle intense du fait d'une alternance régulière de niveaux de marnes, de sable et de calcaire. Les falaises de la Ciotat montrent une érosion de type Taffoni<sup>5</sup> dans les poudingues du Turonien. Enfin, les littoraux formés de terrains meubles sont aussi touchés par des ravinements.

Cette étude BRGM a été réalisée à une échelle régionale (1/100 000<sup>e</sup> avec une validité 1/50 000<sup>e</sup> car utilisant en tant que donnée de base la carte géologique du BRGM au 1/50 000<sup>e</sup>), elle avait pour objectif d'orienter les gestionnaires dans leur mission de prévention des risques naturels. Elle a permis de qualifier l'aléa instabilités<sup>e</sup> sur les 362 km de côte du département des Bouches-du-Rhône. Ainsi, sur les 100 km de côte rocheuse identifiées, près de 50 % sont qualifiées en aléa faible, 30 % en aléa moyen et 20 % en aléa fort.

L'interprétation qui peut être faite de ces travaux, en particulier la cartographie d'aléa instabilités, reste conditionnée par cette échelle du 1/100 000<sup>e</sup> (1 cm sur la carte correspond à 1 km sur le terrain). Cette étude ne peut donc pas être utilisée pour qualifier le niveau d'aléa d'un secteur de moins d'1 km de long et par conséquent n'est pas adaptée pour les documents d'urbanisme.

La DDTM 13 a aujourd'hui besoin de disposer d'une cartographie de l'aléa instabilités de falaises à une échelle cohérente avec les documents d'urbanisme pour répondre aux besoins des communes. L'échelle du 1/10 000<sup>e</sup> est proposée sur les secteurs qui ont été mis en évidence comme particulièrement sensibles à ce phénomène au 1/100 000<sup>e</sup> et où la présence d'enjeux est importante.



#### Illustration 2 : Falaise du Château à Cassis

Le zonage d'aléa proposé n'est représentatif qu'à l'échelle de levé du 1/10 000<sup>e</sup> et doit être utilisé en tenant compte de la limite de cette échelle

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Cavité arrondie, du décimètre jusqu'à plusieurs mètres de diamètre et de profondeur, due à l'érosion en climat sec ou sur certains littoraux (Dictionnaire de géologie – 4<sup>ème</sup> édition MASSON A. Foucault ; J.-P. Raoult)

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Correspondant à de la susceptibilité aux instabilités rocheuses sur les falaises côtières

#### 1.1.2. Problématique

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

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



Illustration 3 - Recul par à-coup du pied de falaise sapé par les vagues armées de blocs (Source : rapport BRGM-62521-FR)

La falaise est la partie subaérienne d'un versant mixte qui se prolonge sous la mer. Elle évolue, comme tout versant subaérien, sous l'action des intempéries (pluies, gel, ruissellement des eaux, action des vagues...), de la surcharge pondérale due à la saturation en eau, de l'élargissement des diaclases, de la reptation des altérites ... Son originalité provient de ce que les matériaux entraînés vers sa base sont déblayés au fur et à mesure, ce qui interdit au versant de prendre son profil d'équilibre, et renouvelle sans cesse son attaque subaérienne. Le profil de falaise est différent selon la proportion des actions marines et continentales et selon la nature de la roche (Illustration 4).



Illustration 4 : Différents profils de falaises (A : Roche homogène, B :roche résistante sus-jacente, C : roche résistante sous-jacente) d'après Emery et Kuhn (1982)- m = érosion marine, Sa = érosion subaérienne.

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

Une falaise ne cesse de reculer que si la mer cesse de déblayer sa base. Les éboulis engendrés par les attaques aériennes viennent alors protéger sa base jusqu'à la conduire à son profil d'équilibre. Il s'agit alors d'une falaise morte dont la morphologie est très différente de celles des falaises vives (Illustrations 5 et 6).

- les **falaises vives** sont caractérisées par un escarpement généralement raide, car battues par les vagues.
- les falaises mortes, qui échappent à l'action marine, présentent un tablier de débris (pente de 20 à 30°) issus du démantèlement de l'abrupt. Celui-ci empâte le profil originel de la falaise qui peut être partiellement ou totalement masqué. L'absence de déblaiement des colluvions par la mer fait que l'abrupt évolue comme un versant continental. A noter que les falaises mortes, bien qu'elles évoluent sous l'action continentale, sont quand même vraisemblablement marquées par le milieu marin (nature de l'altération des roches, etc...).



Illustration 5 : Différents type de falaises (A : falaise vive, B : falaise stabilisée, C : falaise morte) d'après Paskoff (1994)



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

#### 1.1.3. Recherches en cours sur la thématique

Un programme de recherche mené par le BRGM, en collaboration avec GEOAZUR, le CEREGE et le LPED (Laboratoire Population Environnement Développement) est en cours actuellement en région Provence Alpes Côte d'Azur sur la problématique de l'érosion des falaises côtières et plus particulièrement sur les mécanismes d'érosion (projet VALSE<sup>7</sup>). Ce projet inter-disciplinaire a pour objectifs de quantifier l'érosion des falaises du littoral de la région PACA, d'évaluer l'occurrence des éboulements de falaises et qualifier le comportement humain face à ces phénomènes pour améliorer la connaissance du risque et aider à sa gestion sur le territoire littoral.

L'aléa d'éboulement est d'abord évalué en cartographiant le recul des falaises à l'échelle du 20e siècle sur l'ensemble de la côte de la région Provence Alpes Côte d'Azur, en valorisant les archives d'ortho photos du CRIGE qui remontent par endroit jusqu'à 1922, notamment sur le secteur de Toulon (Var). Une étude à l'échelle communale doit quantifier les éboulements de falaise pour la commune de Carry-Le-Rouet dans les Bouches-du-Rhône connue pour être un des lieux vulnérables du littoral de la Région avec des événements d'éboulements récents - sur la base de scans laser bisannuels réalisés pendant la durée de l'étude. Enfin, un suivi photogrammétrique stéréo terrestre et géophysique le long d'une section de falaise doit permettre de contraindre le moment de survenance des éboulements. En parallèle, des mesures environnementales (météo et hydrologique) du même site sont acquises pour cerner les causes des éboulements et les relier par exemple éventuellement à des tempêtes. Ces investigations conduiront à contraindre l'aléa de manière probabiliste et à proposer des hypothèses sur les conditions environnementales qui y donnent lieu. Une analyse sociologique de la vulnérabilité est par ailleurs réalisée dans le cadre de ce projet par le laboratoire LPED. L'ensemble de cet observatoire interdisciplinaire est pensé dans une logique d'aide à la décision dans le cadre d'une gestion durable du territoire.

Ce projet d'une durée de 3 ans est actuellement dans sa troisième année d'étude (2014). Les premiers résultats montrent à l'échelle régionale PACA un contrôle majeur des failles héritées sur l'orientation Est-Ouest du trait de côte (Illustration 7), notamment sur les massifs du littoral des Bouches-du-Rhône (Nerthe et Calanque), un faible taux de recul (mm/an) et une érosion en tête de falaise plus importante qu'en pied, et par conséquent une dominance de processus subaérien (Giuliano *et al.*, 2013).



Illustration 7 : Extrait de l'analyse morpho structurale sur le trait de côte rocheux de la région PACA (Giuliano et al., 2013)

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Vulnérabilité et Adaptation pour Les Sociétés face aux Erosions de falaises côtières en région Provence Alpes Côte d'Azur

## 1.2. OBJECTIFS

Le programme s'est déroulé selon 3 phases de travail successives, ayant eu chacune des objectifs techniques spécifiques dont les résultats ont été discutés puis validés au cours de comités de pilotage BRGM-DDTM13 :

#### 1.2.1. Phase 1

La phase 1 a consisté à réaliser un inventaire des études existantes (études spécifiques de bureaux d'étude, étude BRGM, historique des événements mouvements de terrain et événements récents...) réalisé à partir d'une étude bibliographique et par un questionnaire envoyé aux communes concernées, afin de mettre à jour le catalogue historique des événements mouvements de terrain sur le littoral du département, en complément de la base de données mouvements de terrain existante (www.mouvementsdeterrain.fr) et des données inventoriées dans l'étude du BRGM en 2004. Une définition des linéaires de falaises particulièrement sensibles a été réalisée avec la DDTM 13, à partir de l'étude régionale et des informations qui ont été collectées, afin d'identifier les secteurs à étudier au 1/10 000<sup>e</sup>.

#### Objectifs visés par la phase 1 :

- Actualisation du catalogue d'événements mouvements de terrain sur le littoral rocheux des Bouches-du-Rhône ;
- Définition des secteurs qui seront étudiés au 1/10 000<sup>e</sup> en termes d'aléa instabilités de falaises ;
- Calage de l'aléa instabilités de falaises issu de l'étude régionale sur un trait de côte à l'échelle du 1/25 000<sup>e</sup> pour les secteurs qui ne seront pas étudiés au 1/10 000<sup>e</sup>, à partir d'un travail cartographique n'intégrant pas de visites de terrain supplémentaires.



Illustration 8 : Falaise du Liouquet à la Ciotat

#### 1.2.2. Phase 2

La phase 2 a consisté à réaliser une expertise de terrain pour l'évaluation et la qualification d'un aléa instabilités à l'échelle du 1/10 000<sup>e</sup> sur les secteurs mis en évidence au cours de la phase 1. Elle s'est traduite par une expertise géotechnique sur le terrain, afin d'identifier, à dire d'expert<sup>®</sup>, les facteurs de prédisposition permanents aux instabilités rocheuses des falaises, ainsi que les facteurs aggravants variables dans le temps, et définir les niveaux de susceptibilité résultants vis-à-vis des instabilités rocheuses. Pour ce faire, ont été réalisées une vingtaine de journées de terrain (avec prises de photographies géo référencées et prise de mesures structurales) dont certaines ont du se faire par bateau pour les secteurs difficilement accessibles à pied.

#### Objectifs visés par la phase 2 :

- Préciser la typologie des événements mouvements de terrain spécifiques du contexte du département des Bouches-du-Rhône
- Disposer d'un aléa instabilités de falaises à l'échelle du 1/10 000<sup>e</sup> sur les secteurs identifiés comme particulièrement sensibles et selon 7 niveaux : aléa nul à faible, aléa faible, aléa faible à moyen, aléa moyen, aléa moyen à fort, aléa fort et aléa très fort ;

#### 1.2.3. Phase 3

La phase 3 a consisté à réaliser une synthèse des travaux sous la forme de cartographie de l'aléa instabilités de falaises à l'échelle du 1/10 000<sup>e</sup> et du 1/25 000<sup>e</sup> selon les secteurs, correspondant au présent rapport.

Objectifs visés par la phase 3 :

- Disposer d'un document de synthèse sur l'aléa instabilités de falaises sur le littoral des Bouches-du-Rhône (secteurs ciblés à enjeux) à une échelle pertinente et cohérente avec les documents d'urbanisme (type P.L.U), pour que la DDTM 13 puisse répondre de façon précise à des sollicitations communales en termes d'aménagement ;
- Disposer d'une base de données SIG complète (sous MapInfo) avec l'ensemble des données présent dans un même environnement.

<u>Remarque :</u> la cartographie a été réalisée principalement par expertise de terrain associée à un traitement numérique à l'échelle du 1/10 000<sup>e</sup> ; l'interprétation qui peut en être faite reste conditionnée par cette échelle.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Expertise synthétisant les observations faites *in situ* et les données documentaires, permettant de caractériser le massif et l'affleurement d'un point de vue géologique, géotechnique et structural (lithologie, pente, hauteur de la falaise, aspect général, présence de discontinuités susceptibles de générer des instabilités rocheuses (type dièdres et surplombs), présence d'eau...), sans recours à des reconnaissances spécifiques (sondages, essais en laboratoires), ni à des calculs.

Aléa instabilités de falaises côtières sur le littoral des Bouches-du-Rhône

#### 1.3. METHODOLOGIE GENERALE

La méthodologie employée dans cette étude est présentée ci-dessous (Illustration 9).



Ilustration 9 : Méthodologie générale

Photos et schémas

- Végétation et

construction

Niveau d'aléa

Etudes

Fiches

Aléa

# 2. Phase 1 : Actualisation des connaissances en termes d'événements historiques et d'études

#### 2.1. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

La côte rocheuse proprement dite, commence réellement au centre du littoral des Bouchesdu-Rhône dans le massif de la Côte Bleue, au niveau de la Couronne. On observe à ce niveau, des petites falaises atteignant parfois les 15 mètres de haut, et principalement constituées de terrains sédimentaires tertiaires (Miocène inférieur). Ces terrains tertiaires affleurent jusqu'aux environs d'Ensuès-la-Redonne, en passant par Carry-le-Rouet (Illustration 10).



Illustration 10 : Falaise de Carry-le-Rouet

A partir de Méjean (4 km à l'Est d'Ensuès-la-Redonne), les falaises s'élèvent régulièrement vers l'est, et deviennent de plus en plus calcaire, pour finalement constituer le massif calcaire de la côte Bleue. Ce massif est formé tout d'abord de terrains d'âge Crétacé supérieur, passant ensuite aux calcaires et dolomies du Jurassique Supérieur. Les falaises côtières sont alors beaucoup plus hautes, et plus abruptes. Le massif s'élève aux environs de 200 m d'altitude, et les falaises côtières atteignent parfois les 50 m de haut (Illustration 11).



Illustration 11 : Falaise de Figuerolles sur le littoral de la commune du Rove

Au niveau de l'agglomération Marseillaise, seuls quelques pointements rocheux sont visibles, d'une part sur les îles du Frioul, et d'autre part, au sud de la ville, à proximité du quartier de la Madrague de Montredon (Illustration 12).



Illustration 12 : Falaise de la plage de la Verrerie à Marseille

On atteint alors progressivement le massif des Calanques de Marseille, important massif calcaire qui se divise géographiquement en deux ensembles inégaux :

- un chaînon occidental qui culmine au sommet de Marseilleveyre (altitude 432 m) et qui comprend par exemple les calanques de Morgiou et Sormiou (Illustration 13);

- un ensemble oriental plus vaste, dont la façade maritime s'étend de Sugiton à Cassis. Les falaises côtières du massif sont composées principalement de Barrémien à faciès Urgonien : calcaire biodétritique compact à patine blanche et à niveaux détritiques, mais on voit parfois apparaître quelques niveaux du Néocomien, plus marneux (Valanginien et Hauterivien).



Illustration 13 : Falaise de la calanque de Sormiou

La dépression de la baie de Cassis marque un changement dans la morphologie de la côte (Illustration 14) : contrairement au massif calcaire des Calanques, les falaises de Cassis et de la Ciotat sont composées de grès et poudingues, et culminent à 416 m au Cap Canaille (plus haute falaise maritime d'Europe). Ces falaises sont très escarpées, et montrent une érosion intense. Le massif du Bec de l'Aigle, composé de poudingues, est très caractéristique d'un point de vue morphologique : on y observe des érosions éoliennes de type taffoni.



Illustration 14 : Baie de Cassis

La limite entre les départements des Bouches-du-Rhône et du Var passe au niveau de la baie de la Ciotat (Illustration 15). Les premières falaises du département du Var concernent les massifs de la Madrague-Port d'Alon et les côtes rocheuses de Bandol et Sanary. On y trouve des faciès du Jurassique inférieur et du Trias, représentés par des petites falaises de 10 à 15 mètres de haut environ, souvent très altérées, et des petites plages de sable ou galets en fond de baie.



Illustration 15 : Falaise du Liouquet à la Ciotat

## 2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le département des Bouches-du-Rhône fait partie de la Provence calcaire qui est délimitée à l'ouest par la basse vallée du Rhône et à l'est par le massif des Maures [Demory et al, 2010]. La géologie de ce secteur est marquée par une succession d'épisodes tectoniques. Parmi les plus anciens figurent l'orogène hercynienne qui engendra une fracturation du socle orientée Nord-Sud [Olivet et al., 1971].

Les séries triasiques se déposent ensuite sur des épaisseurs pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres [Guieu et al, 2008]. Celles-ci sont principalement constituées de calcaires et de dolomies qui ont sédimenté pendant le Trias moyen et sur lesquels se sont déposées des séries évaporitiques au Trias supérieur qui serviront par la suite de couches savon lors des futurs décollements.

Le Jurassique est marqué par un approfondissement du domaine marin dû à l'amincissement de la plaque européenne engendrant des failles normales orientées Nord-Est - Sud-Ouest [Guieu et al, 2008].

Des variations eustatiques ont été mises en évidence au cours du Crétacé inférieur causant des alternances entre des dépôts de marnes et de calcaires [Guieu et al, 2008]. A la fin du Crétacé inférieur, l'émergence de l'isthme durancien va provoquer l'arrêt de la sédimentation. Celui-ci est formé par des rides orientées Est-Ouest [Olivet et al, 1971] et Est-Nord-Est - Ouest-Sud-Ouest [Guieu et al, 2008]. Cette phase de surrection va donner naissance à un nouveau continent : « le continent sud-provençal ». Une nouvelle phase tectonique dite « phase pyrénéo-provençale » [Demory et al, 2010] se produit au Turonien. Elle est liée au coulissage des plaques Ibérique et Europe selon une direction Est-Ouest [Olivet et al, 1971]. Cette dernière va donner naissance à un réseau de failles de mêmes orientations ainsi que des plis qui formeront de nouveaux reliefs comme par exemple le massif de la Nerthe ou de l'Etoile.

C'est à l'Eocène moyen que débute une nouvelle phase tectonique majeure avec le décollement de la couverture sédimentaire au niveau des séries évaporitiques du Trias qui jouent le rôle de couches savon. Cette phase produira des chevauchements orientés Est-Ouest et se poursuivra jusqu'à l'Eocène supérieur [Olivet et al., 1971]. Ensuite de nouveaux mouvements verticaux se produiront à l'Oligocène avec notamment la création de grabens qui débute à la fin du Stampien [Guieu et. al, 1987] comme par exemple le fossé de Marseille mais aussi la création de bombements Nord-Est – Sud-Ouest (massif des Maures) induits par une déformation affectant le socle hercynien. Les nouvelles structures ainsi créées vont venir recouper les anciens accidents Est-Ouest [Olivet et al, 1971]. Ces mouvements seraient contemporains à l'affaissement de la chaine pyrénéenne en Méditerranée et à l'ouverture du golfe du Lion.

Au Miocène, la phase alpine est marquée par la convergence entre l'Europe et l'Afrique qui va provoquer une surrection dans le domaine provençal. La géomorphologie va ensuite être affecté par la crise messinienne à l'origine de la formation de profonds canyons [Demory et al, 2010].

L'Illustration 16 présente un extrait de la carte géologique de Marseille au 1/250 000<sup>e</sup> du BRGM.



Ilustration 16 : Géologie du département des Bouches-du-Rhône (Carte Géologique Marseille 1/250 000<sup>e</sup> BRGM)

#### 2.3. MISE A JOUR DE L'INVENTAIRE DES EVENEMENTS HISTORIQUES ET DES ETUDES GEOTECHNIQUES

#### 2.3.1. Collecte des données événements

Un inventaire de données concernant à la fois des données d'événements historiques mouvements de terrain sur le littoral et d'aléa, a été réalisé par le biais d'une enquête préalable auprès des 9 communes littorales du département des Bouches-du-Rhône, qui s'est élargi dans un deuxième temps aux 8 communes bordant l'étang de Berre.

Le tableau et la cartographie de synthèse des réponses des communes est proposé cidessous (Illustrations 17 et 18) :

N°	Communes	Courrier envoyé le	Relance	Réponse	Données
1	Port-de-Bouc	25/11/2011		oui	oui
2	Martigues	25/11/2011		oui	oui
3	Sausset-les-Pins	25/11/2011		oui	oui
4	Carry-le-Rouet	25/11/2011		oui	oui
5	Ensuès-la-Redonne	25/11/2011		oui	oui
6	Le Rove	25/11/2011		oui	oui
7	Marseille	25/11/2011	oui	oui	oui
8	Cassis	25/11/2011		oui	oui
9	La Ciotat	25/11/2011		oui	oui
10	Istres	05/12/2011	oui	non	-
11	St Mitre les Remparts	05/12/2011		oui	oui
12	Marignane	30/05/2012		oui	non
13	Vitrolles	30/05/2012		oui	oui
14	Berre l'Etang	29/05/2013		oui	non
15	Chateauneuf les martigues	30/05/2012		non	-
16	Saint chamas	30/05/2012		non	-
17	Rognac	30/05/2012		non	-

Illustration 17 : Tableau de synthèse de l'enquête auprès des communes



Illustration 18 : Cartographie de synthèse de l'enquête auprès des communes

Il a ainsi été recensé :

- Un certain nombre d'événements « mouvements de terrain » qui se sont produits sur le littoral ;
- Une liste d'études géotechniques concernant des instabilités sur le littoral.

Au total, 130 événements « mouvements de terrain » se sont produits sur le littoral des Bouches-du-Rhône :

- 110 chutes de blocs
- 17 glissements de terrain
- 1 érosion de berges
- 2 coulées de boue.

Cet inventaire complète l'inventaire existant qui mentionnait 106 événements. Les données nouvelles viendront compléter la base de données mouvements de terrain *www.mouvementsdeterrain.fr*.

Afin de mettre en évidence des nouveaux événements et ainsi compléter l'inventaire, une comparaison photo a été faite entre celles prises en 2003 lors de l'étude au 1/100 000<sup>e</sup> par le BRGM, et les photos prises lors de la présente étude (Illustration 19). Chaque cas mis en évidence et validé est ensuite répertorié sur une fiche de saisie et vient compléter la table des événements historiques. L'intérêt étant d'associer un événement, mis en évidence par les photos de 2003 et de 2013 prises au même point, au lieu où il s'est produit. Ces événements ont été datés comme postérieurs à 2003 si aucune autre information n'était disponible, et géoréférencés



Illustration 19 : Extrémité Est du cap de l'Espéron sur la commune de Sausset-les-Pins (au niveau de la plateforme calcaire). Chute d'au moins un bloc de plusieurs  $m^3$  encerclées en rouge. a) Photo de 2003 ; b) Photo de 2013

En parallèle, un inventaire de données réalisé auprès de différents organismes a été réalisé. Le tableau ci-dessous présente les résultats (Illustration 20).

N°	Organismes	Service	Courrier envoyé le	Relance	Réponse	Données
1	CC 12	Direction de l'Environnement	05/12/2011		non	-
2		Direction des Routes:	05/12/2011		oui	oui
3	Conservatoire du Littoral	Délégation Provence Alpes Côte d'Azur	05/12/2011		oui	oui
4		Pôle Risques	Réunion le		oui	oui
5		Service mer & littoral	01/12/2011		oui	oui
6		Pays de Martigues	05/12/2011		non	-
7	Communauté d'agglomération	Marseille Provence Métropole - DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'ÉCOLOGIE URBAINE	05/12/2011		non	-
8		SAN Ouest Provence	05/12/2011		oui	non
9	GIP Calanques	-	05/12/2011		oui	oui
10	Parc Marin de la Côte Bleue	Observatoire du Parc Marin	05/12/2011	oui	non	-
11	SDIS	-	05/12/2011		non	-
12	ONF	L'agence interdépartementale de l'Office National des Forêts (O.N.F.) Bouches du Rhône-Vaucluse	07/12/2011		oui	oui
13	Conseil Régional PACA	Service Risques Naturels Majeurs			non	-
14	CEEP : Association Le Conservatoire d'espaces naturels de PACA	-	12/12/2011		oui	oui
15	La Provence	Archives / Centre de Documentation	16/12/2011		oui	non

Illustration 20 : Tableau de synthèse de l'inventaire auprès des organismes ciblés

L'ensemble des informations ainsi recueillies ont été géoréférencées sous Système d'Information Géographique (SIG) en renseignant différents champs comme par exemple le type d'événement, la lithologie, l'origine du phénomène et en replaçant les événements sur une carte (Illustration 21).

Illustration 21 : Extrait de la table renseignant les métadonnées pour les événements mouvements de terrain recensés

ID:	12 100 056	
Source_information:	BRGM - Ville de Marseille	
Date_validite_information:	2011	
Code_Type_Mvt:	1	
Libelle_Type_Mvt:	Chute de blocs / Eboulement	
Code_INSEE:	13 055	
Nom_Commune:	Marseille	
Description_lieu:	Visible de la plage des Pierres Tombées	
Date_debut_Evenement:	5/2/2006 00:00:00	
Precision_date:	1	
Libelle_precision_date:	Jour	
Ampleur:	2	
Volume_m3:	0	
Stratigraphie_Geol50:	Portlandien supérieur	
Lithologie_Geol50:	Calcaires	
Lithologie_Observée:	Calcaires	
Formation_Sup:	N	
Origine_Anthropique:	3	
Libelle_Origine_Anthropique:	Inconnu	
Origine_Naturelle:	1	
Libelle_Origine_Naturelle:	Oui	
Description_Origine:	Erosion de la falaise	
Existance_Dommages:	1	
Libelle_Existance_Dommages:	Oui	
Description_dommages:	1 mort	
Existance_Etude:	2	
Libelle_Etude:	Non	
References_Etude:		
Nom_BE:		
Travaux:	1	

#### 2.3.2. Collecte des études géotechniques

63 études géotechniques sont aujourd'hui recensées et pour certaines géoréférencées sur le littoral. Ces études sont liées ou non à un événement historique.

Ces données recensées ont été intégrées à la base SIG du projet (sous Map Info), et mises au format standard du projet (cf BDD SIG fournie avec le rapport). Elles sont visibles de manière synthétique sur la carte ci-après (Illustration 22), et un certain nombre d'entre elles ont pu être collectées et intégrées en fichier numérique au format .pdf à la base de données.

Le tableau complet de synthèse de l'ensemble des études géotechniques inventoriées est présenté en annexe 3.



Illustration 22 : Cartographie des événements mouvements de terrain recensés et des études géotechniques

### 2.4. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA INSTABILITES AU 1/25 000<sup>E</sup>

Un deuxième travail de la phase 1 a consisté à retraiter l'aléa instabilités de falaises côtières déterminé en 2004 sur l'ensemble du littoral de la région PACA, afin de le caler sur le trait de côte BD Topo de l'IGN au 1/25 000<sup>e</sup>. Le trait de côte BD Topo de l'IGN a été privilégié par rapport à la donnée Histolitt, car elle ne tient pas compte des ouvrages anthropiques (Illustration 23).

Ainsi, sur 530 km de littoral des Bouches-du-Rhône (y compris Etang de Berre et littoral camarguais) :

- 28 km ressortent en aléa fort
- 37 km en aléa moyen
- 70 km en aléa faible

Les 395 km restants sont considérés en aléa à priori nul (et correspondent principalement à des côtes sableuses ou anthropisées). Les côtes aménagées et confortées dans un objectif de lutte contre les chutes de blocs ont bien été considérées comme montrant un aléa

instabilités. En effet, dans la réglementation PRR notamment, il est bien indiqué qu'il faut considérer les aménagements de type confortement comme non pérennes et prendre en considération l'aléa sous-jacent.

#### Cartographie de l'aléa instabilités de falaises es pour une Terre durabl côtières au 1/25 000e sur le littoral des communes du département des Bouches-du-Rhônes **Communes** littorales Communes concernées par des événements mouvements de terrain Aléa instabilités de falaises côtières au 1/25 000e (Source : aléa instabilité 1/100 000e reporté sur trait de côte BD Topo IGN) Nul à faible Faible Moyen Fort Istre Saint-Mitreles-Remparts Port-de-Bouc e Roy Martiques Ensuès-la-Redonne Carry-le-Rouet Marseille Sausset-les-Pins Cassis La Ciotat 0 10 km

Illustration 23 : Report de l'aléa instabilités de falaises sur la BD Topo au 1/25 000<sup>e</sup>

Sur certains secteurs, comme celui de la calanque de la Vesse au Rove, la cartographie du BRGM (2004) avait pris en considération le trait de côte rocheux en termes d'aléa instabilités de falaise strictement, et n'avait pas intégré la falaise au-dessus du port de la Vesse dans son analyse. Or cette falaise présente un aléa fort à très fort en termes d'instabilités.

Dans la cartographie au 1/10 000<sup>e</sup> de l'aléa réalisée au cours de cette étude, cette falaise a été intégrée dans le zonage.

Il apparaît donc une incohérence entre les deux aléas cartographiés :

- Faible sur l'aléa linéaire de 2004
- Fort à très fort sur le zonage réalisé ici.

En accord avec la DDTM13, la cartographie de l'aléa au 1/25 000<sup>e</sup> a été modifiée en termes de niveau d'aléa sur ce secteur, et indique aujourd'hui un niveau d'aléa fort sur la portion de littoral du port de la Vesse, prenant bien en considération la falaise en amont qui fait l'objet actuellement d'un arrêté d'expropriation.

L'annexe 5 présente la cartographie de l'aléa au 1/25 000<sup>e</sup> sur l'ensemble du littoral des Bouches-du-Rhône.

# 2.5. IDENTIFICATION DES ZONES A ENJEUX SUR LE LITTORAL POUR UNE CARTOGRAPHIE DE L'ALEA AU 1/10 000<sup>E</sup>

A partir de l'aléa régional réalisé en 2004, et la mise en évidence de secteurs homogènes en aléa modéré à fort et à enjeux, il a été identifié les secteurs à cartographier au 1/10 000<sup>e</sup>. Cette sélection a été validée avec la DDTM 13 au cours d'un comité de pilotage et sur le terrain au cours de l'expertise, afin de ne pas prendre en considération des secteurs sans enjeux. Ainsi, 97 km ont été identifiés comme devant nécessiter d'une cartographie de l'aléa instabilités de falaises côtières plus précise au 1/10 000<sup>e</sup> (exemples de littoral urbanisé sur l'Illustration 24).



Illustration 24 : Deux exemples de côtes urbanisées – (1) à Martigues avec sentier du littoral,constructions en cours et villas ; (2) à Méjean (Ensuès-la-Redonne) dans le port.

Une série de cartographies présentant les secteurs étudiés au 1/10 000<sup>e</sup> avec des illustrations sur les événements a été présentée au cours du premier comité de pilotage en DDTM des Bouches-du-Rhône en mai 2012.

Ces planches cartographiques sont présentées en annexe 4.

Les secteurs à cartographier ont ensuite été discutés, modifiés et validés pour ne représenter que strictement les secteurs à enjeux pour la DDTM13 dans une vision d'aménagement du territoire. Ainsi, les secteurs comme le littoral du massif des Calanques en dehors de toute urbanisation n'a pas été cartographié au 1/10 000<sup>e</sup> en termes d'aléa instabilités de falaises.

Des secteurs non étudiés en 2004 et présentant néanmoins des phénomènes d'instabilités ont été ajoutés, comme par exemple le littoral de l'Etang de Berre à Vitrolles.

L'Illustration 25 ci-dessous présente les secteurs définitifs étudiés au 1/10 000<sup>e</sup> en termes d'aléa instabilités dans la présente étude.



Illustration 25 : Emprises des secteurs cartographiés au 1/10 000<sup>e</sup> en termes d'aléa instabilités de falaises côtières

# 3. Phase 2 : Qualification d'un aléa instabilités au 1/10 000<sup>e</sup> sur les zones à enjeux identifiées

#### 3.1. DEFINITION DE L'ALEA

Le terme d'aléa désigne la probabilité d'occurrence d'un phénomène avec une intensité supposée, en un lieu donné et sur une période de temps considérée. Dans notre étude, il serait plus rigoureux d'utiliser le terme de susceptibilité aux instabilités de terrain sur les falaises côtières, en l'absence de notion de période de retour. Même s'il a été décidé de manière arbitraire de prendre une période de retour de l'ordre de 30 ans pour les phénomènes observés afin de pouvoir parler d'aléa.

L'élaboration d'une typologie des différentes instabilités rencontrées requiert, au préalable, une bonne connaissance de la zone d'étude se basant à la fois sur une bibliographie détaillée rassemblant les événements passés ainsi que les études géotechniques et sur des observations faites sur le terrain. Les premières observations se sont basées sur la typologie établie lors de la première étude au 1/100 000<sup>e</sup>. Celle-ci a ensuite été affinée compte tenu de la nouvelle échelle de travail et d'une observation de terrain plus pointue, au fur et à mesure de l'avancement du travail.

Il en va de même pour la qualification de l'aléa et de son niveau d'intensité. Une échelle d'aléa a été proposée allant du niveau nul à faible à très fort, et comportant 7 niveaux (Illustration 26). Ces niveaux sont relatifs par rapport aux terrains observés et, par conséquent, ne s'appliquent que sur le littoral des Bouches-du-Rhône. En effet, dans le cadre de cette étude, une échelle d'aléa prédéfinie qui pourrait être appliquée, de manière générale, à d'autres sites de France ne serait pas assez détaillée par rapport à la précision de l'étude. La prédominance des phénomènes de chutes de blocs / éboulements sur les glissements de terrain sur le littoral de la région PACA nous a amené à axer la description des niveaux d'aléa sur des exemples de phénomènes rocheux. L'aléa glissement de terrain étant souvent visible par la présence d'un événement, l'aléa est plus souvent de niveau élevé.

Niveau d'aléa	Critères de détermination	Illustrations sur exemples de falaises étudiées
Nul à faible	Zone de micro-falaise < 5 m avec des pentes faibles, plateforme stable ou zone de plage	Pointe de l'Espéron, Sausset- les-Pins
Faible	Zone de micro-falaise d'en moyenne 5 m de hauteur mais pouvant localement atteindre 8 à 10 m avec des pentes faibles de l'ordre de 10 à 12° maximum, plateforme sans indice de production de pierres/blocs (quelques cm <sup>3</sup> à dm <sup>3</sup> ), roche pouvant être fracturée, avec présence de matériaux meubles (marnes, argiles)	Cap Couronne, Martigues
Faible à moyen	Falaises de hauteurs variables (entre 5 et 10 m mais pouvant atteindre 20 à 30 m), chutes de pierres/blocs notable avec une occurrence d'environ 30 ans, mobilisation de matériaux de taille <1 m <sup>3</sup>	Bec de l'Aigle, La Ciotat
Moyen	Falaises avec des pentes très variables >15° et pouvant être sub-verticales, hauteur de falaise de 5 à 30 m environ, présentant des instabilités mais avec un volume de matériaux mobilisés modéré (généralement quelques dm <sup>3</sup> à quelques m <sup>3</sup> )	Anse du Verdon, Martigues

Niveau d'aléa	Critères de détermination	Illustrations sur exemples de falaises étudiées		
Fort	Falaises généralement à pente >45° et de hauteur comprise entre 10 et 40 m, traces évidentes de mouvement (indices d'activité : zone d'ablation fissurée, écailles ouvertes parfois de plusieurs centimètres en crête et/ou sur la falaise), zone de dépôt en pied avec formations meubles (pied de glissement, glacis) ou nombreux blocs témoignant de l'activité de la zone, traces d'événements encore observables, fragilisation du versant (sous cavage de plusieurs mètres de profondeur, fracturation de forte densité et profonde), les matériaux mobilisés sont potentiellement de taille importante (quelques m <sup>3</sup> à plusieurs dizaines de m <sup>3</sup> ) : chutes de blocs, glissements de terrain et éboulements en masse limitée (de plusieurs dizaines de m <sup>3</sup> à environ 500 m <sup>3</sup> ) observés	Pointe des Tamaris, Martigues		
Très fort	Falaises généralement à pente forte >80° voir sub-verticales et de hauteur comprise entre 10 et 40 m (voir plus), traces évidentes de mouvement (indices d'activité : zone d'ablation fortement fissurée, écailles très ouvertes (quelques centimètres à plus de 10 cm) en crête et/ou sur les pans de falaise), zone de dépôt en pieds avec formations meubles (pied de glissement, glacis) ou nombreux blocs témoignant de l'activité de la zone, traces d'événements encore observables, fragilisation du versant (sous cavage de plusieurs mètres de profondeur, fracturation très dense et profonde de plusieurs mètres), les matériaux mobilisés sont potentiellement de taille importante (quelques m <sup>3</sup> à plusieurs dizaines de m <sup>3</sup> ) et des éboulements en masse limitée ou non (de plusieurs dizaines de m <sup>3</sup> à environ 500 m <sup>3</sup> ) sont observés.	Anthenors, Ensuès-la- Redonne et Cap Rousset, Carry-le- Rouet		

Illustration 26 : Tableau récapitulatif des différents niveaux d'aléa avec leurs critères respectifs et une illustration associée

#### 3.2. **TYPOLOGIE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN**

Les nouvelles données acquises au cours des expertises de terrain ont permis de valider la typologie préexistante des événements mouvements de terrain, qui finalement s'adaptait relativement bien au contexte du littoral des Bouches-du-Rhône.

Ainsi, 3 types d'érosion ont été conservés, et 7 types d'instabilités. La typologie présentée cidessous est illustrée de falaises du littoral des Bouches-du-Rhône (Illustration 27).

#### Typologie d'érosion et d'instabilités

#### FROSION

EROS	ION	X JETA 13	2300 0000	
Ed	Erosion différentielle	Ed		
Та	Erosion de type Taffoni			
Sc	Sous cavage		la	Sc
INSTA	BILITES			
Ra	Ravinement			Gb
GI	Glissement de terrain	Ra		
Gb	Glissement banc sur banc	- A C	Gl	
Ср	Chute de pierre			
Cb	Chute de blocs	ATE		
Ebl	Eboulement en masse limité			
Ebm	Eboulement en masse	Ср	Cb	Ebl/m

Illustration 27 : Typologie d'érosion et d'instabilités sur lelittoral des Bouches-du-Rhône

Néanmoins, certains mécanismes de rupture ont pu être précisés sur le terrain pour affiner cette typologie, et à partir des deux types principaux de mouvements de terrain :

- Les instabilités rocheuses
- Les glissements de terrain
#### 3.2.1. Les instabilités rocheuses:

Elles concernent les chutes de blocs ou les éboulements lorsque la quantité de matériaux mobilisés est plus conséquente. C'est le phénomène le plus fréquemment rencontré sur le littoral du département. Le mécanisme consiste en une chute d'un ou de plusieurs blocs rocheux se propageant en roulant ou en rebondissant sur une pente ou en chute libre. Ce phénomène rapide survient généralement sur des reliefs de forte pente, fracturés ou dont les éléments remobilisés étaient initialement pris dans une matrice qui s'érode. Il est, par exemple, accentué par la présence de fluides (lubrifiant et dissolution dans les calcaires), de sous-cavage en pied de falaise, de la présence de végétation ou d'érosion différentielle. Il est généralement difficile de prédire avec certitude quand un bloc va tomber en raison de la complexité de l'évaluation des différents paramètres en jeu.

Les chutes de blocs / éboulements peuvent être subdivisés en différentes catégories selon la nature du mouvement en question. On y distingue :

#### - Ruptures de surplombs :

Les roches sont généralement mises en surplomb par souscavage ou érosion différentielle. Des écailles se forment ensuite par le biais de fractures préexistantes ou qui se créent par la décompression engendrée par le vide (Illustration 28).

Illustration 28 : Schéma d'une rupture de surplomb

#### - Décollement de dalles de toit :

Ce mouvement se produit sous l'action de la gravité. Les joints de stratification représentent des discontinuités contraignant le découpage des blocs. La propagation est en général faible (Illustration 29).



Illustration 29 : Schéma d'un décollement de dalle de toit



# - Production de blocs par éclatement de la roche :

Certains blocs se désolidarisant de la falaise, éclatent en impactant le sol et de plus petits éléments sont projetés dans toutes les directions (Illustration 30).

Illustration 30 : Schéma d'une chute de bloc suivie d'un éclatement de la roche

#### - Ecaillage et basculement :

Des fissures apparaissent en crête, initiant la formation d'écailles. Les blocs individualisés basculent pour se poser sur la pente sans se propager (Illustration 31).





#### Ecaillage, basculement et pivotement:

Le mécanisme de formation des blocs est le même que précédemment mais dans ce cas il a suffisamment d'énergie pour se propager sur la pente. Lorsqu'il arrive en pied de celleci, sa trajectoire est perturbée par la rupture de pente et il peut subir une rotation (Illustration 32).

#### Illustration 32 : Schéma d'écaillage, basculement et pivotement

#### - Fauchage :

Ce cas de figure se produit lorsque le relief est fragilisé par le sapement du pied de talus. Le pan de falaise ainsi déstabilisé s'effondre en contrebas par un mouvement de rotation (Illustration 33).



Illustration 33 : Schéma de fauchage de bloc

#### - Glissement banc sur banc :

Malgré l'appellation, ce type de mouvement est assimilé à une chute de blocs rocheux bancs issus de stratigraphiques glissant les uns par rapport aux autres, les joints de stratification servant de surface de glissement (Illustration 34).

Illustration 34 : Schéma de glissement banc sur banc

#### 3.2.2. Les glissements de terrains :

Il s'agit de mouvement affectant des matériaux meubles comme des marnes, des argiles ou des formations superficielles. Ce phénomène est généralement plus lent que le premier bien qu'il puisse subir de fortes accélérations. Les indices de mouvements sont plus visibles (courbure des troncs d'arbres, gonflement de la zone de pied, fissuration du sol au niveau de la niche d'arrachement). La surface ainsi que le volume de matériaux mobilisés sont très variables allant de quelques  $m^3$  à plusieurs millions de  $m^3$ . La rupture s'initie le long d'une semelle de glissement dont la forme dépend fortement de la lithologie et de l'orientation des strates. Un glissement est dit rotationnel si cette surface est courbe et translationnel si celleci est plane (Illustration 35).



Illustration 35 : Exemple de glissement de terrain à Martigues dans des argiles et schéma classique d'un glissement de terrain plan (à gauche), et rotationnel (à droite), d'après « Le risque mouvements de terrain en Provence Alpes Côte d'Azur » (2011)<sup>9</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Classeur « Le risque mouvements de terrain en Provence Alpes Côte d'Azur » ISBN : 978-2-7159-2496-3 (2011)

# 3.3. EXPERTISE GEOTECHNIQUE DE TERRAIN

Le travail de cartographie au 10 000<sup>e</sup> de l'aléa instabilités de falaises côtières a été réalisé à partir de missions de terrain et de caractérisation à dire d'expert, sur un certain nombre de critères repris dans les fiches de synthèse, et détaillés ci-après. Ces critères permettent ensuite la classification selon le tableau de l'Illustration 26.

## 3.3.1. Description des falaises

Lors des missions de terrain, les observations sont répertoriées sur des fiches de saisie sur lesquelles différents critères sont abordés. La géomorphologie, la géologie, les diagnostics techniques, les travaux et les observations générales portant sur la falaise y sont décrits.

Les fiches réalisées et présentées ci-après (Illustration 37) et en Annexes reprennent l'ensemble des caractéristiques étudiées précédemment.

# Description géomorphologique générale sur linéaire homogène :

Cette description donne notamment des informations sur l'état apparent de la falaise, ainsi que sur l'historique des instabilités dans la zone. Les processus d'érosion affectant la falaise y sont aussi exposés. Par exemple, on peut observer des falaises présentant des cicatrices récentes témoignant d'une activité effective qui peut se traduire également par la présence de blocs en pied dont on peut apprécier la taille et le nombre lorsqu'ils ne sont pas remobilisés par la mer. On peut aussi y distinguer des surplombs qui peuvent s'avérer instables ou des constructions partiellement endommagées par des chutes de blocs.

#### Les diagnostics techniques :

#### • Type d'instabilité/érosion pouvant affecter la zone :

Rappelons que les différents types d'instabilités répertoriés dans les fiches sont les chutes de blocs et chutes de pierres, les glissements de terrain, les glissements banc sur banc, les éboulements en masse limitée ou non, ainsi que les ravinements.

Dans cette partie sont également inventoriés les différents types d'érosion. Le sous cavage en est l'un des plus répandus sur la zone d'étude. Ce phénomène concerne le sapement des pieds de falaises par action marine et est discernable sur tous les types de roches. Il est également possible d'observer de l'érosion différentielle. Celle-ci affecte les affleurements qui présentent des lithologies différentes et qui, par conséquent, ne réagissent pas de la même façon à l'érosion en fonction de leur niveau de compétence. Les fronts de falaises montrent donc des irrégularités avec des niveaux moins résistants qui vont se trouver en recul par rapport aux niveaux plus consolidés pouvant quant à eux engendrer des surplombs. Ces derniers se retrouvent dans un état instable qui peut conduire à des chutes de pierres voir de blocs en fonction de leur taille (contrainte par la densité de fracturation et par l'épaisseur des strates). L'érosion de type Taffoni est aussi visible sur les côtes des Bouches-du-Rhône. Elle se développe sur les fronts de falaises en formant des cavités vacuolaires. Elle est principalement liée à l'action éolienne et touche dans notre cas les roches sédimentaires grenues comme les grès ou les calcarénites.

#### Historique d'instabilités

L'établissement d'une base de données relatant les événements qui se sont produits par une actualisation des connaissances est important. En effet, il peut renseigner sur l'activité de la falaise. On peut ainsi savoir si des mouvements de terrain se sont produits, avec quelle

intensité et même dans certains cas (plus rares du fait du court intervalle de temps sur lequel est fait l'échantillonnage) avoir une idée de la période de retour.

Si l'on possède les dates des événements, il est aussi possible de les relier à des phénomènes extérieurs (tempêtes, séismes).

Le travail d'inventaire a repris les événements déjà inventoriés dans la base de données nationales BDMVT<sup>10</sup>, en le complétant par les événements observés sur le terrain, et ceux collectés auprès des communes (voir paragraphe 2.3).

#### • Facteurs permanents de prédisposition :

Ce sont des facteurs intrinsèques des roches qui peuvent les fragiliser. Ils correspondent à la fracturation (densité, orientation des failles), à la morphologie du versant, à la présence de cavités ou de vacuoles (karst ou Taffoni), à la stratification (amont ou aval pendage) ou à l'épaisseur des formations superficielles (susceptibles aux glissements de terrain et/ou aux ravinements).

## • Facteurs déclenchants / aggravants :

Ce sont des facteurs extérieurs qui vont affaiblir les matériaux. Ils correspondent à la pression hydrostatique, l'alternance gel/dégel, la présence de végétation, les sollicitations sismiques, le sapement des pieds de falaises par l'action marine ou par l'érosion éolienne. Des facteurs supplémentaires s'appliquent aux glissements de terrain. Ce sont la saturation en eau des sols (liée aux précipitations) et donc l'augmentation de la pression de pores, les travaux de terrassements (dépôts de remblais ou création de talus pour une route avec déblais de matériaux) et le ruissellement.

#### Niveau d'aléa :

Au vu des informations recueillies, un niveau d'aléa est défini, selon la méthodologie décrite plus haut, pour une zone homogène c'est-à-dire présentant les mêmes caractéristiques morpho-structurales. Ce niveau a pu être redéfini à mesure que de nouveaux éléments sont venus compléter l'étude.

Les 7 niveaux d'aléas sont les suivants : nul à faible, faible, faible à moyen, moyen, moyen à fort, fort et très fort.

# • Protections / Confortements existants :

Lors de l'estimation de l'aléa, la présence de travaux n'est pas prise en compte. Il est généralement admis que si des aménagements ont été construits dans la zone étudiée, il faut considérer uniquement l'affleurement naturel pour une question de pérennité technique et financière de ces aménagements. Toutefois, il est utile de les signaler car cette information peut servir lors d'éventuelles futures études d'aménagement ou de risques qui s'appuieraient sur cette étude. De plus, ils ont pu être mis en place à la suite d'un événement ce qui témoigne de l'activité de la zone.

La nature et l'efficacité des travaux sont donc renseignées dans les fiches. Elles regroupent les parades actives qui ont pour objectif d'empêcher le phénomène de se produire comme, par exemple, les ancrages ou le béton projeté et les parades passives, dont l'objectif est de limiter les conséquences d'un phénomène, telles que les grillages tendus qui sont plaqués sur les parois ou les grillages d'arrêts disposés dans la pente. D'autres travaux peuvent être réalisés comme, par exemple, des enrochements qui sont généralement installés en pied de

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Accessible sur Internet : <u>www.mouvementsdeterrain.fr</u>

falaise pour réduire le développement de sous cavage ou une réduction de la pente dans les matériaux meubles. Les communes peuvent également interdire d'accès certaines zones dangereuses par arrêtés municipaux dans le cas où aucun travaux ne sont envisageables dans l'immédiat.

L'efficacité de l'aménagement est jugée bonne dans la mesure où son état actuel permet une bonne protection.

## Descriptions générales

#### • Géologie / lithologie :

Cette rubrique se base sur les indications présentent dans la carte géologique au1/50 000<sup>e</sup> éditée par le BRGM, agrémentée de quelques observations de terrain supplémentaires. A cette échelle, la carte géologique n'a pas été redessinée, mais les informations recueillies sur le terrain, notamment en ce qui concerne la lithologie, sont renseignées. La lithologie étant un des critères prépondérant dans la détermination de l'aléa.

#### Altération :

Le terme, qui est étroitement lié à l'érosion, est ici employé pour qualifier l'état de dégradation de la falaise. L'altération peut se faire par dissolution de la roche formant, par exemple, des Lapiaz dans les calcaires quand elle affecte des diaclases en accentuant les irrégularités de la roche, ou prendre la forme de vacuoles et former des Taffoni. Elle se fait aussi par lessivage de la matrice dans les poudingues.

#### • Formations superficielles :

Si leur épaisseur est importante on peut y observer des phénomènes de mouvement de terrain tels que des ravinements, des glissements (généralement limités) ou encore des chutes de pierres et de blocs si elles contiennent des éléments grossiers remobilisés.

#### • Discontinuités :

Les failles contraignent le découpage des reliefs et donc l'aléa qui en découle. En effet, l'orientation, la densité (espacement entre les failles) et la profondeur de pénétration vont jouer un rôle important sur la récurrence des instabilités et le volume des matériaux mobilisés.

Dans certains cas intéressants, des diagrammes stéréoscopiques ont été réalisés à partir des données structurales du pendage des failles et de la stratification prises sur le terrain. Ces données sont ensuite mises en forme à l'aide du logiciel stereonet (version 8). Elles permettent d'observer la formation de dièdres par croisement des plans de fractures (Illustration 36).



Illustration 36 : Diagramme stéréoscopique issu des mesures prises dans les calcaires urgoniens de l'Anse de la Beaumaderie (Martigues). La projection se fait en 2D sur l'hémisphère inférieur.

# • Hydrogéologie :

Elle concerne la circulation de fluides dans les roches. Des traces d'écoulements peuvent être visibles au niveau de joints de stratification ou de failles dans les niveaux calcaires mais aussi localement dans les niveaux marneux ou encore les poudingues.

La circulation de fluides joue un rôle de « lubrifiant » dans les semelles de glissements ou dans les fractures et accentue l'écartement de ces dernières par dissolution. Son action peut être profonde.

# • Hydraulique :

Elle rejoint l'hydrogéologie mais concerne les circulations de fluides principalement d'origine anthropique comme les canalisations.

# Versant :

La morphologie du relief va influencer le développement des instabilités qui sont soumises à la gravité mais surtout, elle va contraindre le domaine de propagation des matériaux mobilisés. Par exemple, si un bloc se désolidarise d'une falaise à pic et atterri directement sur un terrain plat l'énergie sera directement dissipée dans sa quasi-totalité. En revanche, si ce même bloc se propage sur une pente de terrain (comme un glacis par exemple), il va conserver de l'énergie et se propagera sur une distance plus importante.

# Végétation :

Elle peut présenter un avantage ou un inconvénient. En pied de talus, la végétation peut limiter la propagation des blocs mais ne constitue en aucun cas une parade. Effectivement, les incendies, qui sont fréquents en région PACA peuvent à tout moment la détruire. Certains végétaux maintiennent les parois en place mais il en existe d'autres dont le développement du système racinaire conduit à un éclatement de la roche et à un écartement des fractures.

#### Constructions et autres éléments exposés :

Tout comme les travaux, les constructions diverses n'entrent pas en compte dans l'estimation de l'aléa mais peuvent renseigner sur l'occupation du sol pour de futures études. Ce sont des lieux fréquentés comme, par exemple, des habitations, des routes, des campings ou encore des plages ou des sentiers pédestres.

Il est également spécifié si ces constructions ont un effet aggravant ou non sur l'aléa instabilités.



Illustration 37 : Extrait d'une fiche recto verso

# 3.3.2. Traitement et mise en forme des données

Un certain nombre de données produites au cours de l'étude composent la base de données finale (remise au client). D'autres données fournies, issues de bases de données diverses alimentent le SIG et seront, notamment la géologie issue de la carte harmonisée du BRGM, visible uniquement dans le document cartographique final .pdf interactif (Annexe 7). Les paragraphes suivants reprennent chacune des données produites au cours de l'étude et détaillent la constitution de la table SIG.

# Cartographie linéaire de l'aléa au 1/25 000<sup>e</sup> sur l'ensemble du littoral des Bouches-du-Rhône associée aux cadres d'emprises des planches cartographiques au 1/25 000<sup>e</sup>

Cette donnée est une donnée linéaire extraite de la cartographie linéaire de l'aléa instabilités de falaises côtières produite en 2004 par le BRGM et reportée sur le trait de côte de la BD Topo IGN. Les champs visibles dans cette table sont présentés dans l'Illustration 38.

Infos	
ID:	70
Nature:	Alea instabilites falaises 1/25 000e
Source:	BRGM
Echelle:	1/25 000
Dat_MAJ:	2012
Code_alea:	4
Legende_alea:	Fort
Distance_km:	0,50604791640329
Donnee_source:	BD Topo IGN
<< >> Liste	ALMV_Falaise25_13_Ligne 🚽

Illustration 38 : Détail de la table Aléa au 1/25 000<sup>e</sup>

Associée à cette donnée, on retrouve la table des emprises cartographiques au 1/25 000<sup>e</sup>.

## Zonage de l'aléa au 1/10 000<sup>e</sup> sur les zones à enjeux du littoral des Bouches-du-Rhône associé aux cadres d'emprises des planches cartographiques au 1/10 000<sup>e</sup> et aux zebras délimitant la fin de la zone à enjeux

Cette donnée a été produite au cours de la présente étude et correspond au zonage à l'échelle du 1/10 000<sup>e</sup> de l'aléa instabilités de falaises côtières sur les zones à enjeux du littoral des Bouches-du-Rhône. Les champs visibles dans cette table sont présentés dans l'Illustration 39.

Cette donnée mentionne notamment le type de phénomène d'instabilités et d'érosion rencontré sur la zone (Cp : chute de pierres ; Cb : chute de blocs ; Ebl : éboulement en masse limité ; Ebm : éboulement en masse ; Gl : glissement de terrain ; Gb : glissement banc sur banc ; Ra : ravinement ; Sc : sous-cavage ; Ed : érosion différentielle ; Ta : Taffoni).

Associée à cette donnée, on retrouve la table des emprises cartographiques au 1/10 000<sup>e</sup> ainsi que la table des zebras indiquant la limite de la cartographie au 1/10 000<sup>e</sup> sur les zones à enjeux et l'information qu'il faut se reporter au-delà de cette limite à la cartographie linéaire de l'aléa au 1/25 000<sup>e</sup>.

Infos		
ID:	190	
INSEE_Communes:	13 088	
Nom_Communes:	Le Rove	
Lieux_dits:	LaVesse	
Niveau_Alea:	Fort	
Cp:	oui	
Cb:	oui	
Ebl:	oui	
Ebm:	non	
GI:	non	
Gb:	non	
Ra:	oui	
Sc:	non	
Ed:	oui	
Ta:	non	
Surface_km <sup>2</sup> :	0,0068674638671875	
<< >> Liste	ALMV_Falaise10_13_Poly_L93 🚽	

Illustration 39 : Détail de la table Aléa au 1/10 000<sup>e</sup>

#### Les arrêtés municipaux

Cette donnée a été produite au cours de la présente étude à partir de données issues à la fois des communes, de la DDTM 13 et des visites de terrain.

Les champs visibles dans cette table sont présentés dans l'Illustration 40. On y retrouve notamment le numéro de l'arrêté, sa date et les liens éventuels vers une illustration ou l'arrêté lui-même.

Cette donnée ne se veut pas exhaustive dans la mesure où certains arrêtés ont pu être pris et les panneaux endommagés ou détruits depuis. Il s'agit là d'une donnée proposée pour être mise à jour ensuite dans la base de données par ses utilisateurs

Infos		
ID:	ß	
Nature_donnee:	Arrêté Municipal	
Nom_Commune:	Carry-le-Rouet	
Code_INSEE:	13 021	
Numero_1er_arrête:	109-96	
Date_1er_arrête:	05/06/1996	
Precision_date_1er_arrête:	jour	
Numero_2e_arrête:	236-98	
Date_2e_arrête:	23/10/1998	
Precision_date_2e_arrête:	jour	
Numero_3e_arrête:		
Date_3e_arrête:		
Precision_date_3e_arrête:		
Numero_4e_arrête:		
Date_4e_arrête:		
Precision_date_4e_arrête:		
Lien:	D:\TravailNathalie\ASgr\Convention_DDTM13 _ Falaises13\Phase 1\Terrain\Arretes\DSC04347.JPG	
Lien_2:	D:\TravailNathalie\ASgr\Convention_DDTM13 _ Falaises13\Phase 1\Terrain\Arretes\DSC04391.JPG	
Lien_3:	D:\TravailNathalie\ASgr\Convention_DDTM13 _ Falaises13\Phase 1\Terrain\Arretes\DSC04505.JPG	
Lien_4:		
<< >> Liste	Arretes_municipaux 🚽	

Illustration 40 : Détail de la table des arrêtés municipaux

#### Les études géotechniques

La table des études géotechniques sur le littoral des Bouches-du-Rhône a été produite au cours de la présente étude. Les champs visibles dans cette table sont présentés dans l'Illustration 41.

Cette donnée mentionne notamment le titre de l'étude et l'entreprise maître d'ouvrage, la commune concernée, le format et la disponibilité des résultats de cette étude, et un lien vers le document numérique quand il existe (qui est fourni également dans la base de données fournie au client).

Infos		
ID:	3	
Reference_BE:	15948.01	
Nom_BE:	CETE méditerranée	
Titre:	"Sentier littoral, secteur « Port de carry - Port du Rouet »	
Date_realisation:	2001	
Commune_concernee:	CARRY-LE-ROUET	
Localisation_Etude:	BRGM SGR PAC	
Disponibilité:	Oui	
Format:	Numérique	
Fichier_numerique:	D:\TravailNathalie\ASgr\Convention_DDTM13 _ Falaises13\Phase 1\Inventaire\Etudes_Biblio\CETE_Carry_003.pdf	
Nature:	Etudes géotechniques instabilités littoral 13	
Source:	BRGM	
Date_MAJ:	2 012	
Echelle:	1/25 000	
<< >> Liste	Etudes_Littoral_13_L93	

Illustration 41 : Détail de la table des études géotechniques

## La localisation des photographies

Toutes les photos prises sur le terrain lors de l'étude ont été géoréférencées sur SIG à l'aide du logiciel MapInfo (à la demande du client). Les photos étant prises souvent d'en face (la morphologie côtière de la région en calanques permettant de bien observer les falaises avec un certain recul), il n'a pas été choisi d'utiliser le « Global Positioning System » (GPS) systématiquement. En effet, la phase de travail consistant à pointer les photos prises sur le scan IGN au 1/25 000<sup>e</sup> et sur les ortho-photos permet de situer exactement la falaise prise en photo. Dans la table SIG recensant l'ensemble des données, plusieurs champs sont renseignés (Illustration 42) tels que la commune, le lieu-dit correspondant à une indication de lieu plus précise dans la commune et le chemin conduisant au répertoire où se trouve la photo afin que lorsque l'on clique sur le point, la photo s'affiche.

	28	<u></u>
NSEE_Communes:	3 056	
Nom_Communes:	Aartigues	
Nom_Emprise:	Nartigues_4	
Lieux_dits:	Pointe_Tamaris	
Type_photo: [	Inique	
photo: [	:\Documents\schuller\Travail\Terrain\Photos\Martig	ues\Ven050413\IMG_0139.JPG

Illustration 42 : Détail des champs associés aux photos dans la table de données SIG

Un certain nombre de photos prises lors de missions précédentes, notamment des missions embarquées sur bateau nous ayant permis de photographier certaines portions du littoral vues de la mer, ont été géoréférencées et intégrées à la base de données. Ces photographies sont classées par date de mission.

#### Les événements historiques

La table des événements historiques a été créée à partir des données existantes issues de la base de données mouvements de terrain (<u>www.mouvementsdeterrain.fr</u>) complétée des événements recensés au cours de l'étude du BRGM de 2004 et de ceux recensés au cours de la présente étude. A ce stade 130 événements historiques sont recensés sur le littoral des Bouches-du-Rhône comme cela est présenté dans le chapitre précédent numéro 2.3.1.

#### Les fiches de terrain

Les fiches de terrain qui ont été réalisées au cours de la présente étude sont également géoréférencées. Tout comme les photos et les événements, elles sont représentées par un cadre auquel sont associés les informations de lieux et le chemin conduisant au répertoire pour créer un lien direct avec la fiche. Les champs visibles dans cette table sont présentés dans l'Illustration 43.

Infos	
ID:	2
Numero_fiche:	002LC2
INSEE_Communes:	13 028
Nom_Communes:	La Ciotat
Lieux_dits:	Plage_Cros_Est
Chemins_fiches:	D:\TravailNathalie\ASgr\Convention_DDTM13 _ Falaises13\Phase 1\Terrain\Fiches_terrain\fiche_002LC2.pptx
<< >> Liste	Fiches_terrain_13_L93

Illustration 43 : Détail des tables fiches terrain (ponctuelles et linéaires)

# Autres données utilisées

Les données ci-dessous sont extraites de bases de données publiques, utilisées pour la production des données listées ci-dessus :

- Limites de des communes (BD Carto IGN 2004)
- Scan IGN au 1/25 000<sup>e</sup>
- BD Ortho INFOTERRA
- MNT INFOTERRA
- Géologie sur le littoral des Bouches-du-Rhône et éléments structuraux associés au 1/50 000 (BRGM – BD Charm)
- Les parcelles issues du Cadastre (2010)
- Les cavités issues de la base de données cavités www.cavites.fr

# 3.4. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA AU 1/10 000<sup>E</sup>

Ce travail a permis d'établir une hiérarchisation de l'aléa sur le linéaire, tous phénomènes confondus, associée à une description par secteurs homogènes des caractéristiques des instabilités de falaises côtières, sous la forme de fiches.

La digitalisation des polygones d'aléa sous SIG a été réalisée à l'aide des fonds cartographiques suivant :

- Le scan 25 de l'IGN qui permet de se situer géographiquement par rapport à l'occupation du sol, à une échelle relativement correcte jusqu'au 1/10 000<sup>e</sup>;
- L'ortho photo sur le département (INFOTERRA), avec une résolution native de 15 cm, et une précision planimétrique de 30 cm, qui permet d'affiner le tracé des limites des zones d'aléa, par rapport au bâti et à l'occupation du sol visible cette fois de manière plus précise
- Le MNT au pas de 5 m (INFOTERRA), avec une précision altimétrique de 50 cm qui permet de caler la limite amont de la zone d'aléa, en prenant en général 5 m en arrière de la crête, distance estimée comme étant le maximum atteint par l'érosion de la falaise. Cette distance pouvant évoluer en fonction de la lithologie et de l'état de la falaise.

Contrairement à la première étude réalisée par le BRGM en 2004, l'aléa n'est plus linéaire mais surfacique. Cette mise en forme des données est possible à l'échelle du 1/10 000<sup>e</sup>. En effet, les falaises côtières représentent un espace étroit et la largeur des polygones aurait été inférieure à l'échelle de la première étude. Cette dernière avait permis de mettre en évidence des secteurs affectés par des phénomènes de mouvements de terrain de nature et d'ampleurs variées. Mais l'échelle ne permettait pas de voir des variations de faibles amplitudes car 1cm sur la carte équivaut à 1km.

Le passage d'un niveau d'aléa à un autre est lié à un changement de l'état de la falaise (fracturation, altération, traces d'érosion), à un changement de lithologie ou de morphologie (Illustration 46).

Les polygones tracés sur le terrain lors de l'expertise de terrain sont ensuite redéfinis de manière plus précise à l'aide des fonds géographiques et topographiques cités ci-dessus. Les polygones englobent la falaise mais une zone de sécurité est définie en crête pour anticiper le recul de la crête à mesure que les matériaux se désolidarisent de la falaise. Cette zone est fonction du niveau d'aléa et de la morphologie de la falaise, et avoisine généralement les 5 mètres. Une zone de propagation est également prise en compte dans le cas où les matériaux sont susceptibles de se propager en pied de talus.

Le cas particulier du massif des calanques nous a contraints à dessiner des limites arbitraires dans le massif. En effet, l'objectif de l'étude était de caractériser l'aléa instabilités au droit du littoral, sans rentrer davantage dans les terres. Le massif étant particulièrement soumis à cet aléa instabilités de falaises, y comprises pour les falaises terrestres, il a été dessiné des limites arbitraires pour les limites amont du massif.

Par ailleurs, dans certains cas, comme la calanque de Sormiou à Marseille par exemple, une étude rapide de trajectographie a été réalisée pour affiner le zonage, et en particulier la limite aval du polygone d'aléa, notamment lorsque des enjeux en pied de talus sont présents (comme c'est le cas dans l'exemple de Sormiou avec une rangée de cabanons habités). Cette étude n'étant pas axée sur la trajectographie, les modélisations se sont faites avec le logiciel CONEFALL reproduisant la méthode des cônes (Illustration 44). Cette dernière consiste à

déterminer la distance maximale qu'un bloc peut parcourir en partant d'un point A de départ et en fixant un angle  $\beta$  (d'après rétro analyse de cas avérés) entre l'horizontale et la droite reliant le point de la source et le point B le plus éloigné que le bloc puisse atteindre. Le logiciel va donc modéliser une zone où le bloc est susceptible de se propager (en rouge sur la l'Illustration 45) à partir d'un MNT et en ayant défini une zone probable de départ de blocs (en noir sur l'Illustration 44).



Illustration 44 : Illustration de la méthode des cônes



Illustration 45 : Résultat de la modélisation obtenue avec CONEFALL sur la falaise de Sormiou à Marseille (en bas). La zone rouge est la zone de propagation des blocs.



Illustration 46 : Cartographie de l'aléa instabilités de falaise au 1/10 000<sup>e</sup>

Par ailleurs, à la demande de la DDTM13, une mission spécifique sur le terrain à Cassis a été organisée au niveau de la Pointe des Lombards, afin de caractériser un aléa dans le but d'un éventuel réaménagement du sentier du littoral. Les observations réalisées au cours de cette mission de terrain ont été intégrées directement dans la présente étude, et sont présentées en Annexe 1.

# 4. Phase 3 : Synthèse des travaux et cartographie

# 4.1. CARTOGRAPHIES

A la demande de la DDTM13, trois types de cartographies ont été produites dans le rapport final, et sont présentées en annexes hors texte :

#### La cartographie de l'aléa au 1/25 000<sup>e</sup>

Elle représente sur un fond topographique représenté par le Scan 25 de l'IGN, l'aléa instabilités de falaises côtières de façon linéaire produit par le BRGM en 2004 à l'échelle du 1/100 000<sup>e</sup> (validité 1/50 000<sup>e</sup>) et reporté sur le trait de côte BD Topo de l'IGN pour une représentation au 1/25 000<sup>e</sup> à l'échelle de tout le littoral des Bouches-du-Rhône. 11 planches cartographiques sont éditées (extrait sur l'Illustration 47 et cartographies en Annexe 5).



Illustration 47 : Cartographie de l'aléa au 1/25 000<sup>e</sup>

#### La cartographie de l'aléa au 1/10 000<sup>e</sup>

Elle représente sur un fond topographique représenté par le Scan 25 de l'IGN, le zonage de l'aléa réalisé à l'échelle du 1/10 000<sup>e</sup> sur les zones à enjeux du littoral. 22 planches cartographiques sont éditées.

A l'échelle du 1/10 000<sup>e</sup>, seul le fond topographique du scan 25 est lisible pour l'édition. Les fonds ortho photographiques sont peu lisibles à cette échelle, et le fond parcellaire du cadastre est également difficile d'utilisation à cette échelle. Néanmoins, ces fonds sont disponibles dans la cartographie dynamique fournie au format .pdf (en annexe hors texte)

Les zebras noirs indiquent qu'à partir de cette limite, il faut se reporter à la cartographie de l'aléa instabilités de falaises côtières linéaire à l'échelle du 1/25 000<sup>e</sup> car il ne s'agit plus d'une zone à enjeux identifiée (extrait sur l'Illustration 48 et cartographies en annexe 6).



Illustration 48 : Cartographie de l'aléa au 1/10 000<sup>e</sup>

#### - La cartographie des éléments d'informations complémentaires

Elle représente sur un fond topographique représenté par le Scan 25 de l'IGN, les éléments d'informations décrits ci-dessus et présents dans la base de données SIG, à savoir :

- Les événements historiques recensés
- Les études géotechniques sur le littoral
- Les arrêtés municipaux
- Les fiches de terrain par zone homogène
- Les cavités souterraines

22 planches .pdf ont ainsi été créées à ce format, à l'échelle du 1/10 000<sup>e</sup> (Extrait sur l'Illustration 49 et cartographies en annexe 6) sur les zones à enjeux précédemment identifiées.

Le BRGM a proposé également de fournir une cartographie au format .pdf numérique et interactive, qui permet à l'utilisateur d'afficher les couches de son choix sur la carte dans un environnement .pdf (annexe 7).



Illustration 49 : Cartographie des éléments d'information

# 4.2. IDENTIFICATION DES SECTEURS A ALEA FORT

A partir de la carte d'aléa au 1/10 000<sup>e</sup> élaborée, les secteurs particulièrement sensibles aux instabilités de falaises ont été identifiés par niveau d'aléa.

#### 4.2.1. Secteurs avec un alea instabilités très fort

14 secteurs en aléa très fort ont été identifiés sur le littoral des Bouches-du-Rhône (Illustration 50):

	NOM COMMUNE	LIEUX-DITS
1	Carry-le-Rouet	La Tasse
2	Carry-le-Rouet	Chapelle
3	Cassis	Pointe Lombards
4	Ensuès-la-Redonne	Anthenors
5	Ensuès-la-Redonne	Anthenors
6	Ensuès-la-Redonne	Anthenors
7	Ensuès-la-Redonne	Anthenors
8	Ensuès-la-Redonne	Anthenors
9	Le Rove	Port de la Vesse
10	Marseille	Frioul Fort Ratonneau
11	Marseille	Mauvais Pas
12	Marseille	N568 Port de Corbiere
13	Marseille	N568 Port de Corbiere
14	Marseille	N568 Port de Corbiere

Ces secteurs sont caractérisés par des falaises généralement assez élevées (jusqu'à 40 m de hauteur), avec des lithologies calcaires ou en alternance calcarénites et sables et/ou grès et sables voir des formations de brèches ou de poudingues et donc particulièrement sensibles aux aléas instabilités de falaises du fait des différences de compétences des matériaux. La fracturation y est souvent très intense (Illustration 50).

Ces secteurs en aléa très fort sont en général aménagés (avec des parades contre les chutes de blocs par exemple), ou interdits d'accès par arrêté municipal ou simple panneau d'interdiction. Le secteur du Port de la Vesse urbanisé avec une rangée de cabanons est aujourd'hui soumis à un arrêté d'expropriation.



Illustration 50 : Localisation des secteurs en aléa très fort sur le littoral des Bouches-du-Rhône

## 4.2.2. Secteurs avec un aléa instabilités fort

51 secteurs en aléa fort ont été identifiés sur le littoral des Bouches-du-Rhône :

	NOM COMMUNE	LIEUX-DITS
1	Carry-le-Rouet	Le Moulin
2	Carry-le-Rouet	La Tasse
3	Carry-le-Rouet	Calanque Cap Rousset
4	Carry-le-Rouet	Barqueroute
5	Cassis	Anse de l'Arene
6	Cassis	Pointe Corton
7	Cassis	Plage Corton
8	Cassis	Pointe Lombards
9	Cassis	Port Miou
10	Ensuès-la-Redonne	Madrague de Gignac
11	Ensuès-la-Redonne	Madrague de Gignac
12	Ensuès-la-Redonne	Calanque du Puy
13	Ensuès-la-Redonne	Anthenors
14	Ensuès-la-Redonne	Anthenors
15	Ensuès-la-Redonne	Anthenors
16	Ensuès-la-Redonne	Anthenors
17	Ensuès-la-Redonne	Anthenors
18	Istres	Monteau
19	Istres	Saint-Pierre
20	Istres	Les Heures-Claires
21	Istres	Les Heures-Claires
22	Istres	La Pujeade
23	La Ciotat	Plage Liouquet
24	La Ciotat	Plage Liouquet
25	La Ciotat	Cap Liouquet
26	La Ciotat	Plage Arene Cros
27	La Ciotat	Plage Liouquet
28	Le Rove	La Vesse
29	Le Rove	La Vesse
30	Marseille	Callelongue
31	Marseille	Sormiou
32	Marseille	Sormiou
33	Marseille	Morgiou
34	Marseille	Plage du Colombet
35	Marseille	Plage de la Verrerie
36	Marseille	Frioul Ratonneau Morgiret
37	Marseille	Frioul Fort Ratonneau
38	Marseille	Frioul Pomegues Port
39	Marseille	Malmousque Centre océanographique
40	Marseille	Mauvais Pas

	NOM COMMUNE	LIEUX-DITS
41	Marseille	Port de Corbiere Port de la Lave
42	Marseille	Calanque En Vau Est
43	Marseille	Corniche Kennedy Palm Beach
44	Martigues	Anse Beaumaderie
45	Martigues	Anse Beaumaderie
46	Martigues	Anse Sainte-Croix
47	Martigues	Sainte-Croix
48	Martigues	Port Tamaris
49	Martigues	Pointe Tamaris
50	Martigues	Touret du Vallier
51	Vitrolles	Les Vignettes

Ces secteurs en aléa fort sont pour la plupart aménagés pour protéger contre les chutes de blocs ou interdit d'accès par arrêté municipal ou simple panneau d'interdiction. L'aléa y est fort en raison d'une hauteur de falaise et de volumes mobilisable suffisants pour générer des instabilités dommageables. On y retrouve tous les types de géologie et de lithologie, souvent très fracturée.

#### 4.2.3. Secteurs avec un aléa instabilités moyen à fort

29 secteurs en aléa moyen à fort ont été identifiés sur le littoral des Bouches-du-Rhône :

	NOM COMMUNE	LIEUX-DITS
1	Carry-le-Rouet	Le Moulin
2	Carry-le-Rouet	Le Moulin
3	Carry-le-Rouet	Port de Carry
4	Carry-le-Rouet	Port de Carry
5	Carry-le-Rouet	Feu du Moulin
6	Cassis	Lombards
7	Cassis	Lombards
8	Ensuès-la-Redonne	Calanque du Puy
9	Ensuès-la-Redonne	Calanques des Eaux Salées
10	Ensuès-la-Redonne	Petite Mejean
11	Ensuès-la-Redonne	La Grande Mona
12	Ensuès-la-Redonne	Les Figuières
13	Ensuès-la-Redonne	Les Figuières
14	Istres	Barabant
15	Istres	Monteau
16	Istres	Ranquet
17	Marseille	Pointe de Montredon
18	Marseille	La Madrague
19	Marseille	Plage de la Verrerie
20	Marseille	Plage de la Verrerie
21	Marseille	La Madrague
22	Marseille	Samena

	NOM COMMUNE	LIEUX-DITS
23	Marseille	Calanque En Vau Est
24	Marseille	Palm Beach
25	Martigues	Anse Verdon
26	Martigues	Sainte-Croix
27	Martigues	Touret du Vallier
28	Port-de-Bouc	Plage Galets
29	Sausset-les-Pins	Grand Rouveau

Ces secteurs sont moins exposés à un aléa instabilités que les précédents, mais peuvent, avec une période de retour plus longue, être le lieu d'événements marquants.

# 5. Conclusion

Cette étude a permis d'améliorer l'état des connaissances sur la problématique instabilités de falaises à l'échelle de l'ensemble du littoral des Bouches-du-Rhône (y compris de l'Etang de Berre).

A l'échelle du 1/25 000<sup>e</sup>, en termes d'aléa instabilités de falaises côtières, sur les 438 km de littoral (comprenant le littoral de l'Etang de Berre), 6% présentent un aléa fort, 8% un aléa moyen et 16 % un aléa faible. Le reste correspondant à un aléa nul à faible.

A l'échelle du 1/10 000<sup>e</sup> sur les 97 km de zones dites « à enjeux », l'étude a permis de caractériser un aléa instabilités de falaises côtières sur une surface de 4,45 km<sup>2</sup>. En termes d'aléa, cela représente :

- 1% en aléa très fort
- 18% en aléa fort
- 7% en aléa moyen à fort
- 34% en aléa moyen
- 19% en aléa faible à moyen
- 19% en aléa faible.

Le reste correspond à un aléa nul à faible.

L'inventaire des arrêtés municipaux a permis de mettre en évidence que 15 km de littoral étaient couverts par un arrêté municipal ou une information d'interdiction ou de risque de chute de blocs.

L'inventaire des événements historiques a permis de comptabiliser 130 événements au total qui se répartissent de la façon suivante :

- 110 chute de blocs / éboulement
- 17 glissements de terrain
- 1 érosion de berge
- 2 coulées de boue

Cette étude va permettre à la DDTM 13 de faire un porté à connaissance auprès des 12 communes du littoral des Bouches-du-Rhône, concernées par un aléa instabilités de falaise côtières (de faible à très fort), à savoir :

- Port-de-Bouc Marseille
- Martigues Cassis
  - La Ciotat
- Sausset-les-PinsCarry-le-Rouet

Le Rove

- Istres
- Ensues-la-Redonne
  - e Saint-Mitre-les-Remparts - Vitrolles
- Ce travail aidera également la DDTM 13 à compléter l'étude caractérisant plus finement le Domaine Publique Maritime (DPM) du département, en intégrant la composante aléa instabilités de falaises.

# 6. Bibliographie

Arlhac P., Catzigras F., Colomb E., Durand J.-P., Gervais J., Guieu G., Masse J.- P., Nury D., Philip J., Rousset C., Blanc J.-J., Roux M. et Rouire J. (1977) – Notice explicative et Carte géol. France (1/50 000), feuille Martigues-Marseille (1020) Orléans : BRGM, 51 p.

Colomb E., Roux M., Guieu G., L'Homer A., Toni C., Glintzboeckel Ch., Blanc J.- J., Vernier E. et Rouire J. (1976) - Notice explicative et Carte géol. France (1/50 000), feuille Istres (1019) Orléans : BRGM, 47 p.

**Demory** *et al.* (2010), La basse Provence calcaire, Extrait de Audra, Grottes et karsts de France, Karstologia Mémoires, n°19, p. 236-237

**Giuliano, J., Godard, V., Dewez, T., Lebourg, T., Tric E. and Marçot, N.** (2013) - Structural control on regional coastline orientations: example from South-eastern France, Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. xxx-xxx, ISSN 0749-0208.

**Foucault A., Raoult J.-P.** (1995) - Dictionnaire de géologie – 4<sup>ème</sup> édition MASSON

**Guieu** *et al.* (1987), Le détritisme provençal du Crétacé moyen à l'Oligocène dans son cadre paléogéographique, structural et géodynamique, Géologie Alpine, Mém. h.s. n°13, p. 247-271

**Guieu** *et al.* (2008), Découverte géologique de Marseille et de son environnement montagneux, Ed. Jean Laffitte, 244 p.

Haug E., Lanquine A., Maury E., Denizot G., Lutaud L., Pfender J., Blanc J.-J., Bonifay E., Campredon R., Caron J.-P., Guieu G., Humbert S., Philip J., Taxy- Fabre S., Tempier C., Pérès J.-M., Picard J., Rouire J. et Guieu G. (1969) - Noticeexplicative et Carte géol. France (1/50 000), feuille Aubagne-Marseille (1044) Orléans : BRGM, 26 p.

Haug E., Lanquine A., Maury E., Blanc J.-J., Gouvernet C., Philip J., Tempier C., Froget C., Muschotti E. et Rouire J. (1977) - Notice explicative et Carte géol. France (1/50 000), feuille La Ciotat (1063) Orléans : BRGM, 23 p.

**Marçot N.** (2010) - Rapport de synthèse sur le projet « Valorisation de l'étude relative à la prise en compte de la problématique des risques liés aux falaises côtières dans l'aménagement du territoire en Provence Alpes Côte d'Azur ». Rapport final BRGM/RP-59324-FR.

**Marçot N.** (2007) – 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 : Rapport d'avancement : Etude de segments représentatifs, propositions d'aménagement et établissement d'une méthodologie de gestion de risque communale. Rapport BGRM RP-55945-FR.

**Marçot N.** (2006) – 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 : Définition des enjeux sur le linéaire de falaises côtières, caractérisation et hiérarchisation des risques. Rapport BGRM RP-54316-FR.

**Marçot N. avec la collaboration de Mathon C.** (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'Etang de Berre et des îles habitées de la région PACA. Rapport BGRM RP-53951-FR.

**Marçot N. avec la collaboration de Mathon C.** (2004) – Prise en compte de la problématique des risques liés aux falaises côtières dans l'aménagement du territoire en Provence-Alpes-Côte-D'azur – Année 1 : Bilan des connaissances, définition des instabilités et qualification de l'aléa. Rapport BGRM RP-52829-FR.

**Olivet** *et al.* (1971) Description géologique de la bordure provençale, Publication CNEXO série: « Résultats des Campagnes à la Mer », n°110, p. 375-394

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

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

**Rivet F.** *et. al* (2011) - Classeur « Le risque mouvements de terrain en Provence Alpes Côte d'Azur » ISBN : 978-2-7159-2496-3

# Annexe 1

# Diagnostic Pointe des Lombards – Cassis (Octobre 2013)





## Falaise des Lombards – Cassis (13)

#### Diagnostic rapide des solutions d'aménagement en vue de l'ouverture d'un sentier du littoral

- Zone 1 : de la plage de la Grande Mer à la Pointe des Lombards
- Zone2 : De la Pointe des Lombards à la Plage du Corton



#### Rappel géologie - lithologie

La pointe des Lombards fait apparaître trois étages géologiques, un étage Crétacé Inférieur (Aptien), et deux étages du Crétacé Supérieur (Cénomanien & Turonien) :

- Cénomanien : grès et marnes, les grès sont souvent ferrugineux et très noduleux
- Turonien : Grès et marnes, les grès sont plus ou moins massifs
- Aptien (Gargasien) : marnes grisâtres

Un pendage orienté N40 20°SE permet d'observer la stratigraphie depuis le Turonien jusqu'aux marnes grises de l'Aptien, selon une structure amont pendage sur la zone 1 et aval pendage sur la zone 2.



#### Zone 1 : ensemble de la zone en aléa très fort

#### Zone 1a : Zone protégée

Le premier secteur (Zone 1a) de 100 mètres de linéaire environ est à la fois protégée par des écrans dynamiques sur le talus, et par la présence d'arbres en pied. Un ancien mur avec un grillage (à réparer) permet aussi de retenir des blocs/pierres de petits volumes. La présence d'une plage formée par divers blocs donne la possibilité de reculer le sentier vers la mer.



Illustration 1 : Falaise des Lombards sous le Château (Cassis)



Illustration 2 : Espace rocheux en pied de pente (à gauche), et dalle en béton (à droite)

A réaliser :

- Purge des écrans et entretiens
- Réparation du grillage sur mur en maçonnerie
- Signalisation du sentier



#### Zone 1b : Blocs

Trois blocs détachés de la falaise sont posés en haut du glacis marneux. Il conviendrait de les emmaillotés dans des filets de câbles amarrés à l'aide d'ancrages ponctuels, afin de les stabiliser. L'un d'entre eux est déjà fracturé.



Illustration 3 : Détail des trois blocs à emmailloter, et du bloc de droite fracturé

#### A réaliser :

- Examen détaillé de l'aléa de départ au niveau de la falaise
- Emmaillotage des trois blocs

#### Zone 1c : Surplomb

Une masse imposante est actuellement en surplomb. Elle a déjà produit des blocs de plusieurs  $m^3$  visibles sur la pente et à fleur d'eau.

Il faudrait l'examiner de plus près pour étudier l'état de la fracturation, estimer les volumes des blocs mobilisables, et voir la faisabilité d'un aménagement en vue de protéger un sentier en pied.

Un niveau marneux de 4-5 m d'épaisseur est visible au pied de la barre en surplomb, et montre une érosion plus forte que le grès. Cette différence de vitesse d'érosion accentue l'aléa.

Illustration 4 : Coupe de la zone en surplomb, avec des blocs éboulés en pied



Les blocs déjà éboulés peuvent servir de parade pour retenir de nouveaux blocs, il convient néanmoins de combler les espaces non protégés –« dents creuses » – par des barrières fixes (poteaux HEA, câbles transversaux et grillage)



#### Expertise du 14/10/2013



Illustration 5 : Espace libre entre deux blocs à combler pour protéger la propagation de futurs éboulements

Par ailleurs, la ligne d'énergie a été évaluée sur le terrain entre 33 et 40° à partir des blocs déjà éboulés, soit une forte probabilité d'atteinte de toute la zone en pied de falaise confirmant une très forte probabilité d'atteinte par toute chute de blocs. Sur certains secteurs sur lesquels le muret de l'ancien chemin est encore en état, il est possible de le surélever pour bloquer les blocs d'un volume raisonnable (inférieur au m<sup>3</sup>).

A réaliser :

- Examen détaillé du surplomb et de la fracturation associée afin de qualifier plus précisément un aléa de départ
- Aménagement d'une barrière fixe entre deux blocs éboulés

#### Zone 1d : Dièdres et surplombs

Le secteur est composé d'une falaise haute de 45 m composée de bas en haut :

- d'un glacis marneux (marnes grises), arboré
- d'un niveau de marnes grises hétérogène au centre
- de dièdres successifs de plusieurs mètres de hauteur formés dans un niveau de grès noduleux,
- de niveaux plus fins en partie supérieure montrant une érosion différentielle entre niveaux de grès indurés et passées marnogréseuses
- d'un niveau de grès orangés en crête de falaise, en surplomb sur plus de 50 cm.



Illustration 6 : Vue de la falaise de grès jusqu'à la Pointe des Lombards


## *Expertise du 14/10/2013*

De manière générale, la pente est forte jusqu'en bas, il y a peu de place pour un sentier sécurisé vis à vis des chutes de blocs. De nouveaux écrans dynamiques installés en pied de pente pourraient retenir les masses éboulées de grès et de marnes, mais ne retiendront pas les blocs très volumineux produits par les dièdres de grés noduleux.



Illustration 7 : Vues sur le niveau gréseux noduleux fracturé, et formant des dièdres en surplomb + blocs en pied de falaise



Illustration 8 : Transition entre les marnes grises de l'Aptien (détail ci-dessous), et les Grès du Cénomanien très fracturés et noduleux





Des éboulements récents ont eu lieu dans la pente (grès orangés), les blocs ont rompus des branches de pins, endommagés l'ancien sentier en maçonnerie et atteint la mer.



Illustration 9 : Illustrations des dommages en pied de pente des blocs de grès

De nouveau, on retrouve quelques secteurs étroits protégés dans la mesure où il y a une très forte rugosité sur la pente et donc la possibilité de piéger les blocs dans des éboulis déjà formés, un ancien muret (s'il est en bon état) peut encore retenir des blocs, un replat peut également stopper la trajectoire d'un bloc.

La solution de construire un sentier reposant sur certains blocs déjà éboulés est délicate :

- s'assurer de la bonne stabilité des blocs éboulés (certains sont sous-cavés)
- s'éloigner suffisamment du pied de pente pour ne pas être atteint par les chutes de blocs
- rendre les passerelles amovibles et fermer l'accès lors de coups de mer, ou de forte houle



Illustration 10 : Vue depuis la Pointe des Lombards vers Cassis, sur les blocs potentiellement utilisables pour y installer un sentier amovible

# <u>Zone 1e :</u>

L'extrémité de la pointe des Lombards (Illustration 11) présente des alternances de niveaux plus fins, sur une hauteur de 20 à 25 m maximum. Cette zone peut être équipée d'un grillage plaqué. Mais cette solution ne concerne que ce secteur.



### **Conclusion zone 1**

Cette zone montre un aléa global très fort chute de blocs, qui s'explique par deux types de mécanismes au niveau de l'aléa de rupture, occasionnant un aléa de départ très fort, associé à un aléa de propagation également très fort du fait de la forte pente :

- La barre de grès noduleux du Cénomanien est fracturée et présente des dièdres, sur une épaisseur pouvant atteindre 6 à 8 m de hauteur. La récurrence de la mise en mouvement d'un bloc issu de ce découpage est faible à moyenne, mais l'intensité de l'événement est très forte du fait du volume des blocs, ce qui donne un aléa très fort (certains blocs de ce type sont néanmoins visibles sur l'ancien chantier, et ne sont par conséquent pas très vieux (moins de 20 ans);
- Les niveaux gréseux orangés en crête de falaise produisent des volumes des blocs moins importants (de l'ordre du m<sup>3</sup>), mais les chutes sont fréquentes, et l'aléa est par conséquent très fort.

La réalisation d'un sentier, hormis les quelques secteurs protégés ou aménageables selon les solutions préconisées ci-dessus, reste néanmoins très complexe et très coûteuse sur cette zone.

La trajectographie n'apporterait pas plus d'informations compte tenue de la pente très forte de la falaise, les blocs ont en effet des trajectoires relativement directes et sans obstacles avant le sentier et la mer.



Illustration 11 : Vue générale de la falaise des Lombards côté Cassis (zone 1) avec en blanc la zone pouvant être aménagée avec du grillage plaqué



#### Zone 2 : zone en aléa moyen à fort

#### Zone 2a : Zone en aléa moyen

La première partie du sentier, en partant de la Pointe des Lombard vers Corton, présente un aléa moyen en termes de chute de blocs, et ravinement. Un grillage plaqué sur la falaise permettrait de protéger le sentier contre les chutes de blocs de moins de 1m<sup>3</sup>.

#### Zone 2b : Zone en aléa moyen à fort

La zone qui suit présente un aléa moyen à fort mais beaucoup de végétation dans la pente empêche de bien observer l'état de la falaise pour estimer ensuite le risque sur le sentier.

Certains blocs peuvent s'observer en pied de pente, leur volume nécessite tout de même une protection en cas de remise en état du sentier.



Illustration 12 : Dalles de grès basculées par érosion différentielle et mise en surplomb

#### A réaliser :

- Nettoyer la végétation pour pouvoir expertiser la falaise, et qualifier unaléa de départ

### Zone 2c : Zone en aléa fort

Cette zone montre à la fois du glissement de terrain et ravinement, et des chutes de blocs, du fait de la présence de barres gréseuses dans les marnes du Cénomanien.



### Expertise du 14/10/2013

Une solution pour protéger le sentier pourrait être la mise en place de barrières fixes verticales – câbles tendus entre poteaux HEA (tête amarrée par un câble ancré dans la pente) + grillage -. Ces barrières joueraient à la fois le rôle de piège à blocs, et de protection du sentier.

Quelques purges préalables seront nécessaires pour faire tomber des écailles aujourd'hui instables.

Dans les niveaux sous-cavés (parfois profonds : 6 à 7 m), il conviendra d'installer des plots en béton.

Sur toute cette zone, un nettoyage de la végétation également en crête permettra de supprimer l'effet des racines, très nombreuses et très pénétrantes dans le massif.

Enfin, de nombreux murets en maçonneries et des aménagements privés sont visibles sur la falaise, leur état parfois très dégradé nécessitera de les expertiser dans le détail pour éviter de rajouter un aléa.



Illustration 13 : Différents cas de figures dans la zone en aléa fort chute de blocs, montrant du sous-cavage, de la formation d'écailles, des systèmes racinaires et des murets en surplombs.





### **Conclusion sur la zone 2**

De manière générale, la zone 2 présente un aléa global moins élevé que la zone 1, avec néanmoins des secteurs en aléas fort (aléa de départ et de propagation) qu'il conviendra d'aménager pour mettre en sécurité le sentier. La solution d'une barrière verticale et grillagée, ancrée dans la falaise peut être utilisée sur l'ensemble du linéaire de la zone 2c, avec quelque secteurs à protéger avec des grillages plaqués, et d'autres à purger au préalable.

La réouverture du sentier est donc envisageable sur cette zone, sous réserve de dimensionner et réaliser les travaux de protection qui s'imposent.



Illustration 14 : Vue générale de la falaise des Lombards côté Corton (zone 2)

Réalisation BRGM – Direction Régionale Provence Alpes Côte d'Azur

Auteur : Nathalie Marçot

Validation : Christian Mathon



Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr Direction Régionale Provence Alpes Côte d'Azur 117 avenue de Luminy BP 168 13276 - Marseille cedex 09 – France Tél. : 04 91 17 74 77