

Document public

Aléa chute de blocs rocheux du flanc Est de la calanque de Port-Miou à Cassis (13)

Rapport final

BRGM/RP-69141-FR
Septembre 2019

1.89 3740.46 -625.5



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

Aléa chute de blocs rocheux du flanc Est de la calanque de Port-Miou à Cassis (13)

Rapport final

BRGM/RP-69141-FR

Septembre 2019

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2019

E. Equilbey

Avec la collaboration de

N. Marçot

Vérificateur :

Nom : B. Colas

Date : 31/07/2019

Signature :



Approbateur :

Nom : JL Lambeaux

Fonction: Directeur régional

Date : 02/08/2019

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Avertissement

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

Ce rapport est le produit d'une expertise institutionnelle qui engage la responsabilité civile du BRGM. Il constitue un tout indissociable et complet ; une exploitation partielle ou sortie du contexte particulier de l'expertise n'engage pas la responsabilité du BRGM.

La diffusion des rapports publics est soumise aux conditions de communicabilité des documents, définie en accord avec le demandeur. Aucune diffusion du présent document vers des tiers identifiés ne sera volontairement engagée par le BRGM sans notification explicite du demandeur.

Le BRGM a mis en place un dispositif de déontologie visant à développer une culture de l'intégrité et de la responsabilité dans le quotidien de tous ses salariés.

Après examen, il est ressorti qu'il n'existait aucun lien d'intérêt :

- ***entre le BRGM et l'objet ou les différentes parties prenantes de la présente expertise,***
- ***entre les salariés du BRGM qui seront impliqués et l'objet ou les différentes parties prenantes de la présente expertise.***

susceptible de compromettre l'indépendance et l'impartialité du BRGM dans la réalisation de cette expertise.

Mots-clés : Calcaire, Urgonien, Littoral, Falaise, Fracturation, Chute de bloc, Chute de pierre, Aléa rocheux, Méthode MEZAP, Port-Miou, Cassis, Bouches-du-Rhône, Provence-Alpes-Côte d'Azur.

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

Equilbey E., Marçot N. (2019) - Aléa chute de blocs rocheux du flanc Est de la calanque de Port-Miou à Cassis (13). Rapport final. BRGM/RP-69141-FR, 57 p., 42 ill., 1 CD.

Synthèse

À La demande du Service Mer, Eau, Environnement de la DDTM des Bouches-du-Rhône (DDTM 13), la direction régionale Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) du BRGM a été chargée de réaliser une évaluation de l'aléa rocheux sur le flanc Est de la calanque de Port-Miou à Cassis, à l'échelle du site.

L'estimation de l'aléa rocheux a été faite avec la nouvelle méthode MEZAP¹ (utilisée pour les Plans de Prévention des Risques Naturels - PPRN), mais cette cartographie demandée n'est pas strictement adaptée au contexte local en termes d'échéance ou de type d'enjeux présents.

Une approche complémentaire, adaptée à la problématique posée de décision de renouvellement d'Autorisation d'Occupation Temporaire du Domaine Public Maritime (durée de 15 ans, bateaux en mouillage et la circulation piétonne sur les pontons), dans un contexte de zone exposée aux éboulement rocheux, a dans ce cadre été proposée.

En matière de problématique de circulation piétonnière en fond de calanque, la cartographie du risque confirme la pertinence de l'arrêté d'interdiction de l'accès au public, avec seulement 120 m de ponton (à mi-parcours) non concernés par un zonage de risque élevé.

Quant à la problématique des bateaux au mouillage, 4 zones différentes de risque de niveau élevé sont actuellement rencontrées. La première de ces zones est au droit du secteur de falaise la plus active connue (et de plus particulièrement haute, y compris à plus de 25 m). Après une interruption sur 60 m, cette zone de risque reprend plus au sud sur un linéaire de falaise là encore haute (20/25 m de dénivelé). Il reste sinon aux deux extrémités nord et sud de la zone de mouillage et pour des hauteurs de falaises plus courtes (10 - 12 m), deux zones distinctes inventoriées.

Un des rares bâtiments fixes (Club Nautique de Port-Miou) est également concerné par du risque de niveau élevé.

Il est à rappeler qu'il s'agit là que d'un premier diagnostic de risques rocheux à l'échelle du site, basé avant tout sur une observation visuelle à distance. De plus, certains facteurs difficilement quantifiables (comme la prise en compte de la végétation) n'ont pas été pris en compte. La méthode employée reste majorante, sécuritaire (calée sur l'endommagement potentiel avant tout) et les niveaux obtenus restent à relativiser au vue de l'activité rocheuse basse du site. Aucun risque visible immédiat ou imminent n'a été de plus constaté.

Sur les secteurs de zones de risque élevé qui pourraient perdurer dans le projet de réaménagement en cours de définition, il est vivement conseillé d'engager un diagnostic rocheux ponctuel plus détaillé, (notamment encordé couplé à des profils trajectographiques) pour confirmer la pertinence du risque ou pas sur les 2 décennies à venir et dans l'affirmative d'un risque persistant, de proposer des solutions d'aménagement adaptées, au choix *a priori* entre :

- gel du mouillage sur les emplacements fortement exposés (suppression des enjeux) ;
- recul de la ligne de mouillage plus en aval (déplacement des enjeux);
- mise en place de parades rocheuses adaptées (suppression de l'aléa ou du risque). Dans le cas ici, cela pourrait passer par des méthodes (purge, ancrages) ne laissant pas ou peu d'impact visuel conséquent sur cette zone du Parc National des Calanques

¹ Groupe de travail réuni sous l'autorité du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie et de la Mer pour la détermination d'une Méthodologie de Zonage de l'Aléa chute de Pierres, à paraître.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Contexte général	13
2.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE.....	13
2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE, HYDROGÉOLOGIQUE ET MORPHOLOGIQUE	14
3. Visite de terrain	19
3.1. ACTIVITÉ ROCHEUSE HISTORIQUE.....	19
3.2. RECONNAISSANCES DES INSTABILITÉS ROCHEUSES PRÉSENTES SUR LE FLANC EST DE LA CALANQUE DE PORT-MIOU	21
3.2.1. Tête de versant.....	21
3.2.2. Pied de versant.....	23
4. Évaluation de l'aléa rocheux sur le flanc Est de la calanque de Port-Miou.....	35
4.1. MÉTHODE MEZAP	35
4.2. CARACTÉRISATION DES ZONES DE DÉPART HOMOGENES	37
4.3. ÉVALUATION DE LA PROPAGATION ROCHEUSE	38
4.4. CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA ROCHEUX SUIVANT L'APPROCHE MEZAP	45
5. Adaptation du zonage d'aléa au regard de la vulnérabilité des enjeux (approche de type « risque »)	51
5.1. PRISE EN COMPTE DANS LE ZONAGE D'ALÉA DU CHANGEMENT D'ÉCHELLE TEMPORELLE.....	51
5.2. PRISE EN COMPTE DANS LE ZONAGE D'ALÉA DE LA VULNERABILITE DES ENJEUX.....	51
5.2.1. Enjeux bâtis	51
5.2.2. Enjeux bateaux	52
5.2.3. Enjeux piétons	54
6. Conclusion.....	57

Liste des figures

Illustration 1 - Localisation générale de la zone à évaluer (http://m.geoportail.fr/).....	13
Illustration 2 - Zones de mouillage de Port-Miou de la zone étudiée (http://m.geoportail.fr/)	14
Illustration 3 - Extrait de la carte géologique BRGM 1/50 000 (http://infoterre.brgm.fr/), avec localisation du site étudié (polyligne en rouge) et des mouvements de terrain (http://www.georisques.gouv.fr/).....	15
Illustration 4 - Carte des pentes à hauteur de la Calanque de Port-Miou sur son flanc Est	16
Illustration 5 - Secteur de versant identifié comme le plus actif (avec report des différentes zones homogènes de départ rocheux localisés, décrites au chapitre 3.2 suivant)	20
Illustration 6 - Flanc Ouest de la calanque de Port-Miou (ancien front de taille de carrière) avec détails non loin de la zone de mouvement de terrain signalé en BDMVT à hauteur de la maison du gardien de l'ancienne carrière	21
Illustration 7 - Front de taille de l'ancienne extraction à ciel ouvert en tête de versant avec replat en pied +/- large, avec quelques blocs éboulés, et passage d'un sentier	22
Illustration 8 - Tête de versant et de falaise (ici FF4 décrite plus loin) à gauche et reprise du front de taille de l'ancienne extraction à ciel ouvert	22
Illustration 9 - Bloc M1 et aperçu du massif rocheux FF1 en amont pendage coté sud du tunnel	24
Illustration 10 - Flanc nord de FF1 avec détails sur les zones M2 et M3	24
Illustration 11 - Arête rocheuse de FF2 en début de ponton flottant et Zones M4 et M5 sur le flanc sud	25
Illustration 12 - Flanc Nord de FF2 avec les zones M6 et M7 et les blocs arrêtés sur le versant et au fond de calanque	25
Illustration 13 - Aperçu des fronts de falaises FF3 et FF4 et des zones M7 à M10	26
Illustration 14 - Flanc Est de la calanque au niveau de la partie centrale (VRD et CNPM)	26
Illustration 15 - Zone de versant diffus (VRD) plus ou moins raide avec accumulation de blocs jusqu'à saturation (E3) du replat sur le flanc Nord de la zone.....	27
Illustration 16 - Réapparition du falaise verticale au nord de VRD puis détails de la falaise à hauteur de M13.....	28
Illustration 17 - Éboulis de pied de versant et zone d'éboulis dans le versant (E1 et E2)	28
Illustration 18 - Aperçu de la paroi du front de falaise FF10 et des blocs en pied de versant	29
Illustration 19 - Rupture partielle de colonne en dièdre avec surplomb de la tête de colonne	30
Illustration 20 - Partie du flanc Est de la Calanque à l'activité rocheuse estimée comme la plus sensible.....	31
Illustration 21 - Fronts de falaise FF11 en pied de versant et t l'épandage pierreux E4 en partie haute de versant	32
Illustration 22 - Épandage pierreux E4	32
Illustration 23 - Front de falaise FF12 au nord de la Crique et blocs d'allure instable M18, M'18 et M''18	33
Illustration 24 - Carte informative du flanc Est de la calanque de Port-Miou (Cassis, 13).....	34
Illustration 25 - Estimation de la pente minimale - d'un possible départ rocheux en fonction de la résolution RES	37
Illustration 26 - Classes d'intensité de l'aléa rocheux en fonction du volume du bloc unitaire	37
Illustration 27 - Activité rocheuse.....	38
Illustration 28 - Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle +	39

Illustration 29 - Représentation de la zone de propagation rocheuse concernée dans le versant pour différents angles d'énergie différent	39
Illustration 30 - Coupes de profils de versant sur lesquels la propagation rocheuse a été évaluée sur le flanc est de la Calanque de Port Miou à Cassis (13)	41
Illustration 31 - Détermination des angles d'énergie d'atteinte forte, modérée et faible (ici le point pour la route représente le ponton et celui du bâtiment un bateau au mouillage)	42
Illustration 32 - Zonage de propagation en rapport avec la zone homogène de départ M12	43
Illustration 33 - Zonage de propagation rocheuse pour l'ensemble du flanc est de la Calanque de Port-Miou	44
Illustration 34 - Tableau de synthèse des principales caractéristiques des zones de départ (pour l'aléa comme pour la suite pour les risques).....	45
Illustration 35 - Détermination des probabilités d'occurrence	46
Illustration 36 - Détermination du niveau d'aléa	46
Illustration 37 - Cartographie MEZAP de l'aléa rocheux sur le flanc est de la calanque de Port-Miou.....	49
Illustration 38 - Estimation des énergies d'impact en lien avec le degré d'endommagement pour les bateaux.....	52
Illustration 39 - Estimation des énergies d'impact en fonction des volumes des blocs unitaires sur les zones de départs rocheux de faible à très faibles volumes	52
Illustration 40 - Évaluation du niveau d'aléa pour un zonage de risque adapté aux enjeux de type « bateaux au mouillage ».....	53
Illustration 41 - Cartographie du risque rocheux pour les bateaux au mouillage sur le flanc Est de la calanque de Port-Miou à Cassis (13)	55
Illustration 42 - Cartographie du risque rocheux pour les piétions sur le flanc Est de la calanque de Port-Miou à Cassis (13)	56

1. Introduction

Les falaises littorales de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur ont fait l'objet, en 2004 par le BRGM, d'une première cartographie de l'aléa instabilités rocheuses à l'échelle 1/100 000 (validité 1/50 000).

À la demande de la DDTM13, cette étude avait été approfondie en 2014 à l'échelle du département des Bouches-du-Rhône avec une seconde cartographie plus détaillée à 1/10 000 sur les secteurs à enjeux du littoral (rapport BRGM/RP-62643-FR). Cette étude concerne spécifiquement 12 communes du littoral départemental, dont la ville de Cassis.

Pour une meilleure caractérisation du Domaine Public Maritime à hauteur du flanc Est de la calanque de Port-Miou à Cassis (zone de mouillage permanent), classée actuellement en aléa de niveau faible à moyen (rapport BRGM/RP-62643-FR), le Service Mer Eau Environnement de la DDTM13 a demandé à la direction régionale PACA du BRGM de caractériser plus finement l'aléa rocheux, à l'échelle 1/5 000 en amont du ponton à bateaux (Illustration 1), soit sur près de 700 ml de littoral rocheux. Cette caractérisation est l'objet du présent rapport.

2. Contexte général

2.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE

La calanque de Port-Miou est la plus orientale du massif des Calanques (de Marseille-Cassis, aujourd'hui dans le Parc national des Calanques) et c'est la seule située hors du territoire de Marseille sur la commune limitrophe de Cassis. Elle est nettement encaissée, bordée au (nord)-ouest par une imposante falaise vive non littorale de près de 45 à 55 m de haut (front de taille verticale témoin d'une ancienne exploitation des roches à ciel ouvert) et sur son flanc (sud-)Est par une falaise littorale naturelle. Le dénivelé de cette falaise littorale en fond de crique à son extrémité nord atteint les 15 m de hauteur, augmentant rapidement à près de 40 m de haut puis diminue régulièrement en descendant au sud jusqu'à atteindre moins de 12 m à son extrémité sud.

La calanque de Port-Miou constitue une des portes d'entrée au Parc national des Calanques et elle a été aménagée en conséquence, mais c'est aussi une zone aménagée de mouillage permanent (Illustration 2), ceinturée sur les deux flancs de rive maritime par un ponton à bateaux. Le site des calanques est géré par la ville de Cassis via une structure dédiée, la Zone de Mouillage et Éléments Légers (ZMEL), dont l'Autorisation d'Occupation Temporaire du site sur 15 ans est en cours de renouvellement.

Le fond central de la calanque est ennoyé à des profondeurs de 1 m à l'extrémité nord de la zone et plus de 6 m de fond à l'extrémité sud de la zone de mouillage.



Illustration 1 - Localisation générale de la zone à évaluer (<http://m.geoportail.fr/>).

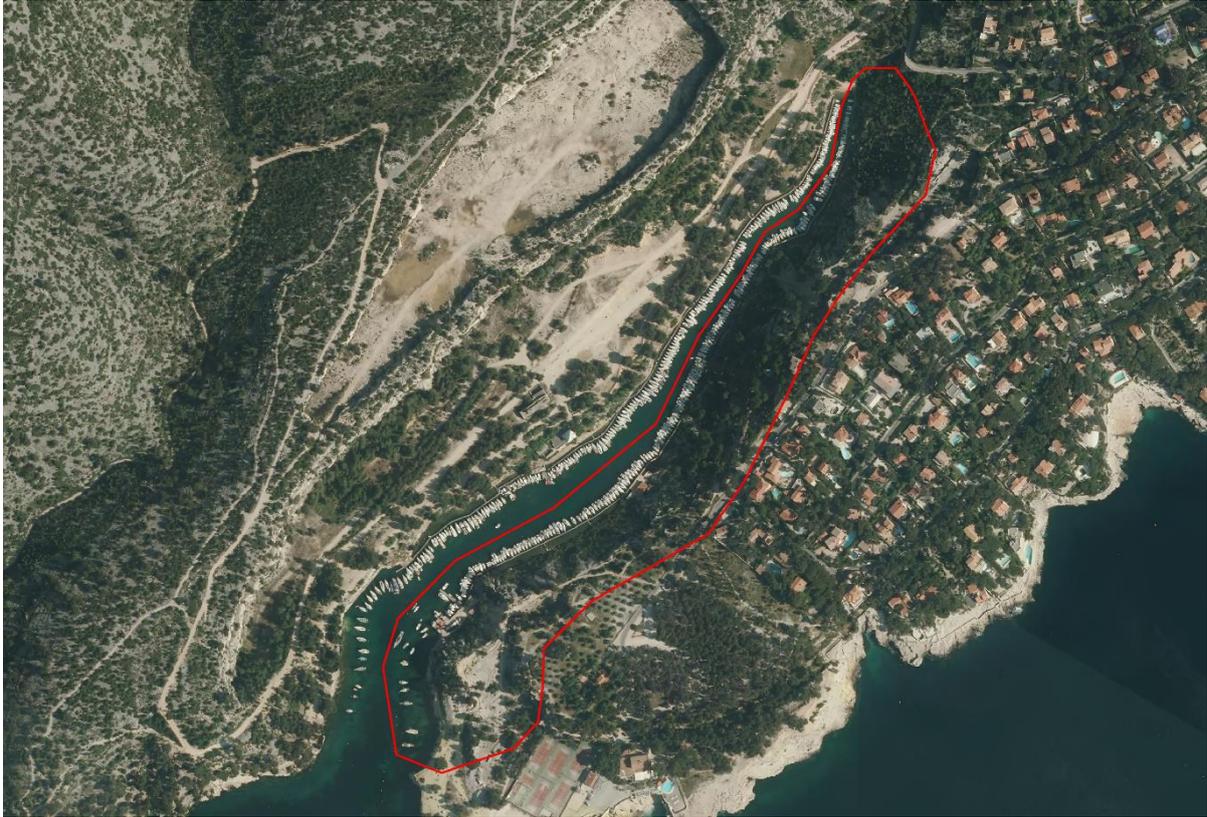


Illustration 2 - Zones de mouillage de Port-Miou de la zone étudiée (<http://m.geoportail.fr/>).

2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE, HYDROGÉOLOGIQUE ET MORPHOLOGIQUE

D'après la carte géologique au 1/50 000 du BRGM de Marseille-Aubagne (Illustration 3), le substratum géologique de la calanque de Port-Miou correspond aux calcaires barrémiens à faciès Urgonien (n4U) typiques du massif des Calanques. Au niveau de la calanque de Port Miou, ces calcaires récifaux en grands bancs sont particulièrement indurés et portent la dénomination de « Pierre de Cassis ».

Le fonds de la Calanque est tapissé de dépôts fins sablo-argileux.

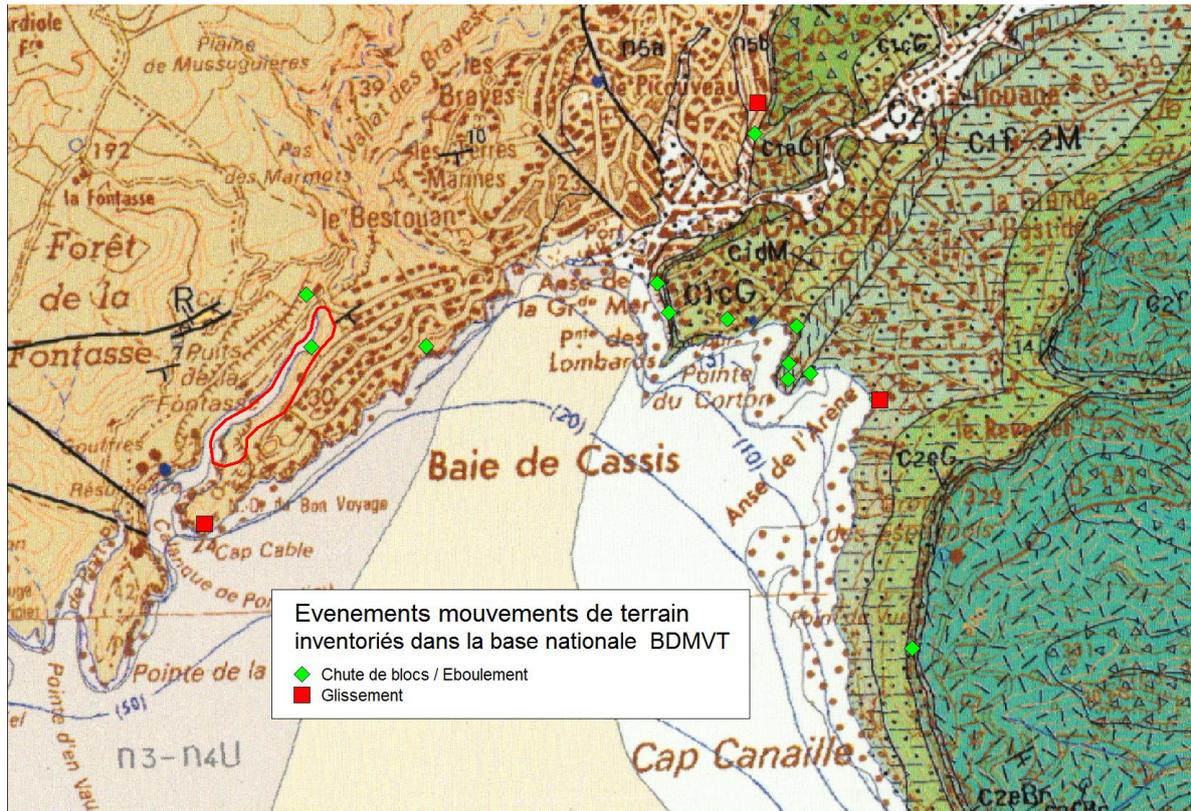


Illustration 3 - Extrait de la carte géologique BRGM 1/50 000 (<http://infoterre.brgm.fr>), avec localisation du site étudié (polyligne en rouge) et des mouvements de terrain (<http://www.georisques.gouv.fr>).

Un cours d'eau intermittent, le torrent de Gorge Longue, emprunte le fond de talweg de la calanque. Le drainage topographique de l'axe de la calanque et celle du Vallat des Braves au Bestouan, interceptant l'essentiel des eaux souterraines en amont provenant du massif des Calanques et la presque-île de Port-Miou, est ainsi hydrogéologiquement isolée, avec pour seule alimentation les infiltrations locales des pluies sur la surface peu étendue de l'interfluve de Port-Miou. La karstification des terrains sur ce flanc Est reste limitée : contrairement au flanc de calanque Ouest opposé (résurgence, gouffre, puits de la Fontasse, témoins d'un important réseau hydrographique souterrain), aucune émergence karstique significative n'est signalée ni n'a été repérée sur le terrain (possiblement présente, mais alors masquée sous les éboulis).

Comme l'ont relevé les reconnaissances de détail menées sur le flanc de versant Est de la calanque de Port-Miou, la falaise littorale n'est pas constituée d'un seul tenant et elle est séparée en six segments distincts par des zones d'éboulis rocheux (épandage de blocs ou de pierres voire de type grave) et elle est même, en son milieu, interrompue par un versant à pente moyenne moins raide, ne comportant plus que des affleurements rocheux résiduels et diffus (Illustration 4).

La géomorphologie du flanc Est de versant ne cesse donc de varier tout le long de la calanque, avec une majorité de secteurs au profil irrégulier, présentant des ressauts verticaux ou des tronçons de falaise, uniques ou successivement étagées, de 1 à près de 20 m de dénivelé. Ces parois rocheuses verticalisées sont localisées à tous les niveaux dans le versant, ceci alternant avec des replats et des vires rocheuses ou d'éboulis. Elles sont interrompues par quelques secteurs d'épandages rocheux au profil régulier à la pente plus ou moins raide (avec ou sans ressauts résiduels).

Ces variations constantes de la géomorphologie du versant vont constituer un des paramètres clés de l'analyse de la propagation rocheuse : grâce au levé litto3D du littoral, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) au pas de 1 m permet d'en apprécier numériquement toutes les évolutions de l'amont (extrémité nord) à l'aval (extrémité sud). C'est la carte des pentes issue du levé litto3D qui illustre le mieux ses variations géomorphologiques décrites ci-dessus (Illustration 4).

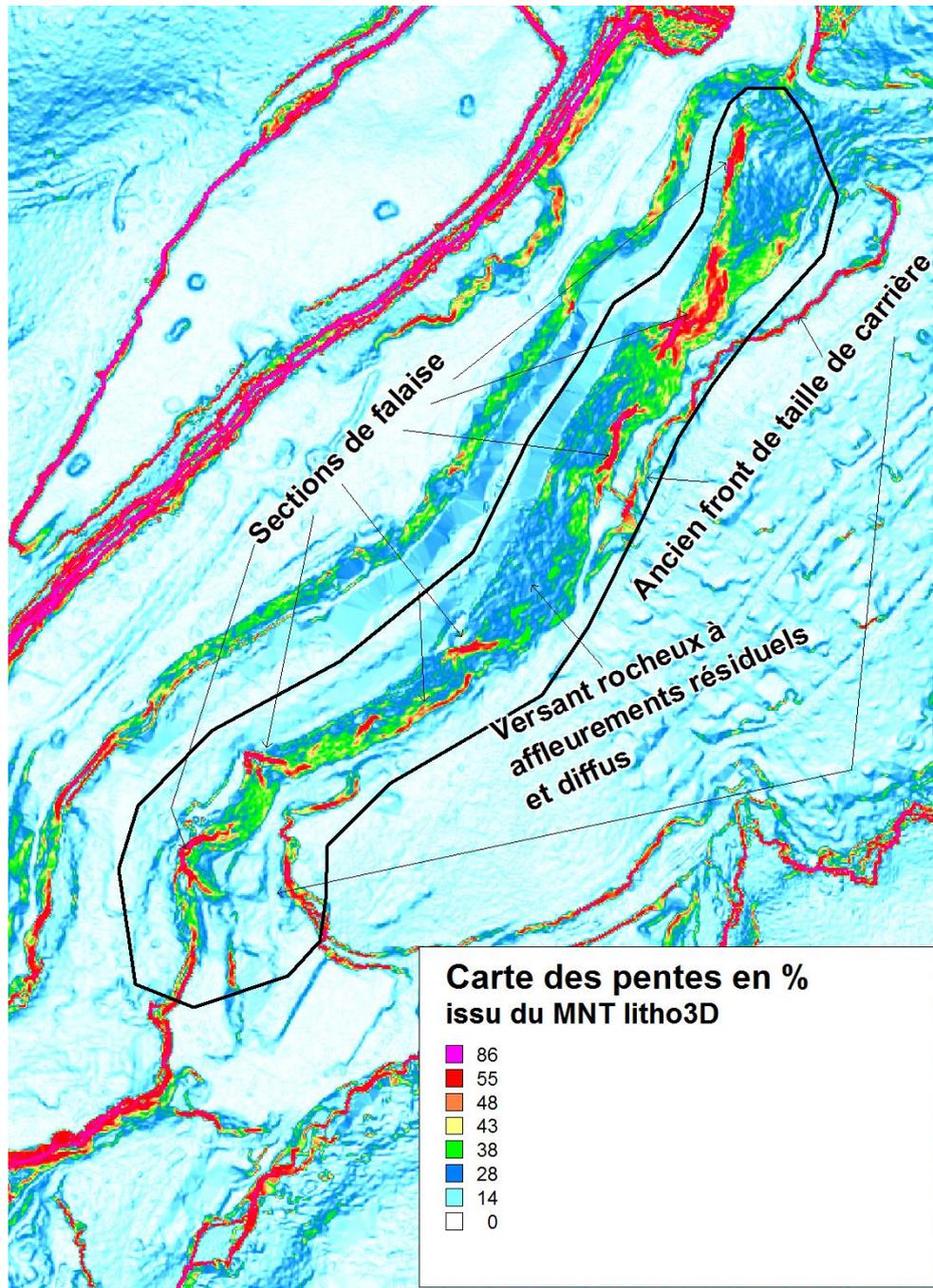


Illustration 4 - Carte des pentes à hauteur de la Calanque de Port-Miou sur son flanc Est.

La calanque de Port-Miou a fait l'objet jusqu'à un passé récent (1981) d'une activité d'extraction importante des calcaires urgoniens (carrière Solvay pour la « Pierre de Cassis »). C'est sur le flanc nord-ouest avec un front de taille vertical tout le long de la calanque que cette exploitation est la plus visible (avec un second front de taille en amont de moindre importance et en net retrait). En partie haute de versant sur le flanc sud-est de la calanque, les calcaires ont été également exploités, laissant un front de taille vertical discontinu d'une hauteur généralement proche des 5 à 10 m. Ce front de taille amont laissé par la carrière est en retrait du pied de versant littoral, séparé de celui-ci par une zone de replat large en général de 15 à 25 m (très ponctuellement entre 8 et 9 m seulement et jusqu'à plus de 65 m).

Ce front de versant a conservé pour l'essentiel son caractère naturel, même si notamment en tête de versant, l'extraction, les chemins piétonniers plus ou moins aménagés, quelques petits ouvrages anciens çà ou là (petits murets de pierre sèche, câbles de tyrolienne...), les deux maisons construites en tête de falaise et le tunnel d'accès à la partie sud du ponton ont légèrement modifié la surface du terrain naturel.

3. Visite de terrain

L'expertise terrain a eu lieu les 9 et 10 mai 2019. Sur le site, nous avons été accueilli par la ZMEL qui gère le site. Il lui avait été demandé de se renseigner, avant le passage du BRGM sur le terrain, sur de possibles évènements rocheux survenus au niveau de la calanque à toute époque (désordres anciens comme très récents).

3.1. ACTIVITÉ ROCHEUSE HISTORIQUE

Aucun évènement rocheux nouveau depuis 2013 n'a été signalé par la ZMEL : même les chutes occasionnelles de petites pierres engendrées par les cycles dégel/gel fréquemment rencontrés en métropole en saison hivernale (y compris en basse vallée) sont quasiment absentes ici (le climat côtier peu favorable à une notable occurrence de gel/dégel expliquant largement cette non activité rocheuse totale).

Il y a eu en 2013 un secteur du flanc en amont de paroi verticale qui a fait l'objet de travaux de purge, sans qu'il soit possible d'avoir plus de précisions techniques sur cette intervention passée (raisons ayant conduit à cette purge, ampleur de cette purge, entreprise acrobatique intervenante...). Le dossier de CEREG de janvier 2018 sur le renouvellement de l'Autorisation d'Occupation Temporaire du Domaine Maritime évoque plutôt l'année 2003 (sans signaler d'autres actions de purge sur 2013). Cette purge aurait eu lieu à hauteur de l'unique évènement rocheux signalé sur le flanc Est de la calanque datant de 1998 et qui n'est connu que par son impact (un bateau coulé au mouillage). Ce mouvement de terrain (losange vert reporté sur l'illustration 3) a été recensé dans l'inventaire départemental des mouvements de terrain (complément réalisé en 2013 : rapport BRGM/RP-62734-FR et bancarisé dans la base nationale des mouvements de terrain BDMVT² sans description technique *a minima* du mouvement rocheux survenu. Un courrier de l'ONF adressé en 2004 au service maritime de la DDTM13 lors de la réception des travaux de purge n'a hélas pas été retrouvé.

Dans ce secteur signalé comme étant la zone la plus active récente (tant par la ZMEL que par la base nationale des mouvements de terrain), plusieurs zones d'arrachement rocheux ont été observées (Illustration 5) sans qu'il soit possible d'y corréliser une date de survenue même très approximative : tout au plus peut-on dire que la patine des surfaces d'arrachement observées n'a pas un aspect de nette fraîcheur et la rupture rocheuse la plus récente daterait d'au moins plusieurs années, sans possibilité d'apporter plus de précisions.

L'examen comparatif des photos de 2003 et 2013 du flanc Est de la calanque de Port-Miou faites par le BRGM lors des reconnaissances précédentes n'a pas permis d'identifier d'évidentes zones de nouveaux départs rocheux survenus dans l'intervalle mais les points de prises de photos et les conditions de luminosité n'ont pas été les mêmes, limitant la possibilité de détecter de telles éventuelles différences.

Il n'a pas davantage été signalé, ni observé, de signes marqués de ravinement récents dans les zones d'épandage d'éboulis présents sur ce flanc Est. Le passage probable de la faune, et plus occasionnel mais avéré de quelques touristes hors des sentiers battus, n'a pas engendré en tout cas de remobilisation sensible des éléments rocheux sous forme de propagation rocheuse en aval des dépôts.

² Base accessible sur Géorisques : <http://www.georisques.gouv.fr/> et sur l'Observatoire Régional des Risques Majeurs ORRM PACA : <http://observatoire-regional-risques-paca.fr/>

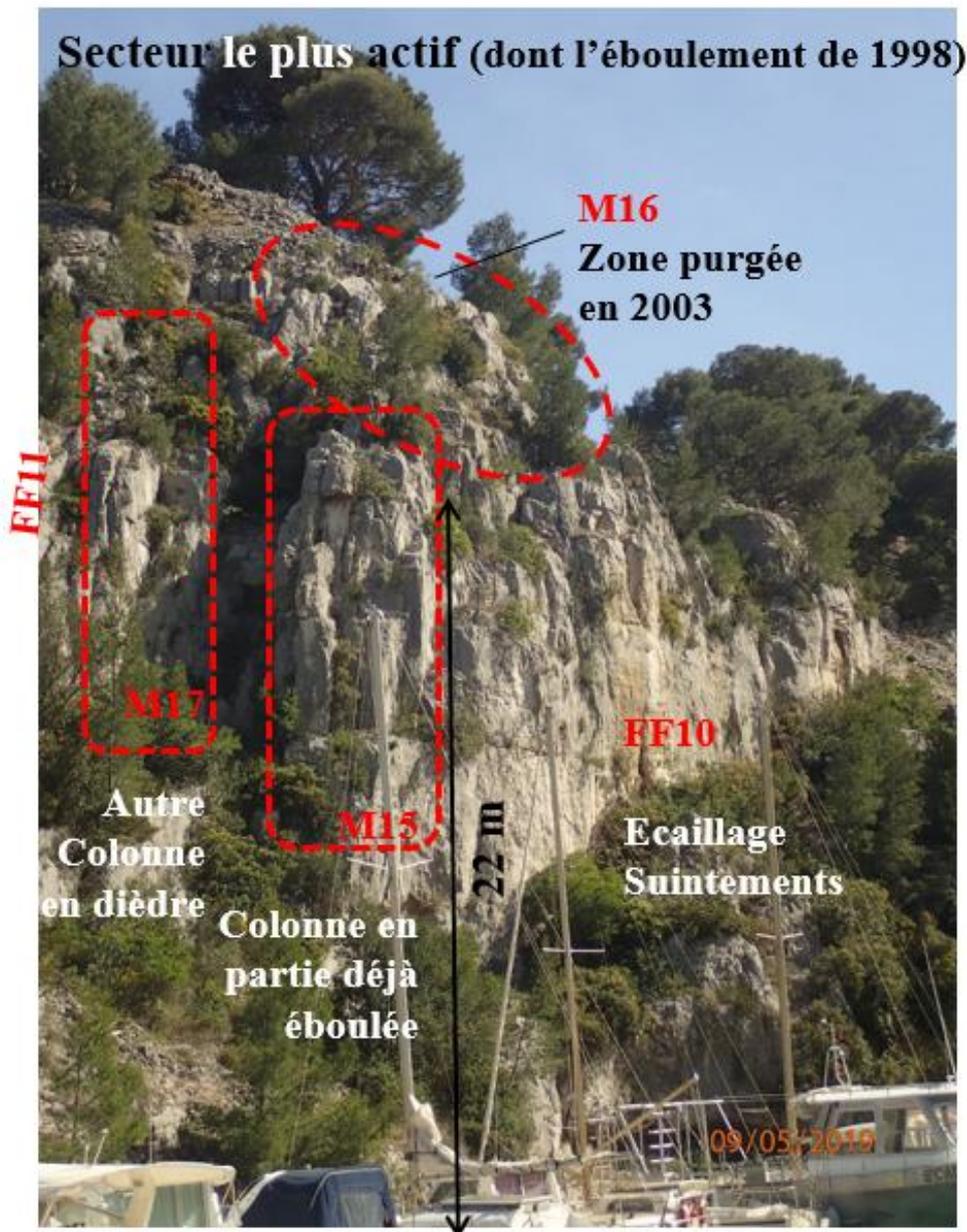


Illustration 5 - Secteur de versant identifié comme le plus actif (avec report des différentes zones homogènes de départ rocheux localisés, décrites au chapitre 3.2 suivant).

Le signalement, sur le versant nord-ouest opposé de mouvement de terrain rocheux non daté, semble surtout correspondre à des nombreuses cicatrices d'arrachement en lien avec le front de taille de l'ancienne carrière signalé dès 2005 lors de l'inventaire départemental initial (Illustration 6). Une des cicatrices d'arrachement les moins anciennes (plus de trace de fraîcheur de la patine rocheuse) est située juste en arrière-amont immédiat de la maison de l'ancien gardien de la carrière. Elle correspond à un départ significatif situé à une bonne trentaine de mètres en hauteur dans la falaise (volume total de plusieurs m³) avec un bloc de l'ordre du m³, posé en contrebas en partie basse de falaise au tiers) sur le replat d'un banc massif calcaire en relief (tout le front de taille du flanc Ouest de la calanque est classée actuellement en aléa de niveau fort, rapport BRGM/RP-62643-FR).



Illustration 6 - Flanc Ouest de la calanque de Port-Miou (ancien front de taille de carrière) avec détails non loin de la zone de mouvement de terrain signalé en BDMVT à hauteur de la maison du gardien de l'ancienne carrière.

3.2. RECONNAISSANCES DES INSTABILITÉS ROCHEUSES PRÉSENTES SUR LE FLANC EST DE LA CALANQUE DE PORT-MIOU

L'ensemble du versant du flanc Est en amont de la zone de mouillage permanent (ponton) a été examiné. Cet examen a débuté en tête de versant du nord au sud, avant un examen depuis le ponton en pied de versant du sud vers le nord.

3.2.1. Tête de versant

L'examen en tête de versant a permis de voir de près les zones d'éboulis ou de versant sans vrai paroi rocheuse verticale, les zones de raccords du haut de versant avec la partie en plateau de la presqu'île de Port-Miou, notamment en amont des parties de falaise verticale surplombant la berge littorale. Aucun décollement en arrière des parois rocheuses des falaises n'a été repéré (sans garantie d'absence de tels indices d'instabilités car partiellement masqués sous la végétation et d'accès trop périlleux par endroit en reconnaissance uniquement piétonne). Sur la moitié sud du flanc Est de la calanque, le plateau se raccorde directement sur la tête de falaise tandis qu'en moitié nord, la tête de falaise verticale est surplombée en amont par une tête de versant généralement raide, la plupart du temps masquée par une végétation arbustive, et la présence au sol de pierres épandus à l'affleurement, ou plus ou moins ancrés dans un sol meuble peu épais en première approche.

Le sentier piéton à flanc de versant dans la moitié nord finit en cul-de-sac à hauteur des deux maisons récentes construites en bordure de plateau dont les aménagements (jardins et murets) bloquent tout accès plus au sud. Ce sentier piéton constitue par ailleurs plus ou moins la limite aval de l'ancien front d'exploitation à ciel ouvert menée en partie haute de versant (Illustration 7), car il emprunte la zone de replat créée en aval du front. Le front de taille est presque partout vertical et il atteint quelques mètres de dénivelé (la plupart du temps compris dans une fourchette de 3 m à près de 10 m de haut). Aucun travail de remise en état ou de réaménagement de cet ancien front de taille (en général d'aspect très sain) n'a été réalisé et quelques blocs résiduels de toutes tailles (jusqu'à plusieurs m³) sont disséminés de manière disparate, posés sur le replat en pied de front, et exceptionnellement jusqu'à atteindre les abords du sentier lorsque celui-ci s'écarte un peu de la tête de falaise vers l'amont.

Le front de taille est trop en retrait en arrière du versant naturel pour que la propagation rocheuse puisse atteindre en aval la zone de mouillage en fond de calanque³ (et du coup hors du périmètre d'étude en terme d'évaluation de l'aléa rocheux).



Illustration 7 - Front de taille de l'ancienne extraction à ciel ouvert en tête de versant avec replat en pied +/- large, avec quelques blocs éboulés, et passage d'un sentier.

Au sud des deux maisons, avec le recul de la tête de versant jusqu'à hauteur de la rue bitumée, le versant au milieu du flanc Est de la calanque présente un versant rocheux à la fois à pente modérée et de plus au profil régulier. Un chemin (non public) permet d'accéder dans un versant rocheux affleurant de manière diffuse, à la cabane du Cercle Nautique de Port-Miou, implantée en pied versant, accolé côté amont au ponton.

Plus au sud (Illustration 8), la tête de falaise littorale constitue directement la tête de versant (bordure de plateau) et le front de taille d'exploitation en tête de versant réapparaît ensuite bien que pas immédiatement (plutôt dans le tiers sinon le quart final sud), en net retrait du flanc littoral (20 m minimum) : la hauteur du front reste d'abord limitée puis dépasse largement les 15 m à mi interfluve loin du flanc de la calanque. Le tracé de sentier qui longe ce front de taille reste potentiellement exposé (et ses usagers) aux futurs événements rocheux (en bordure aval de zone de propagation maximale).



Illustration 8 - Tête de versant et de falaise (ici FF4 décrite plus loin) à gauche et reprise du front de taille de l'ancienne extraction à ciel ouvert.

³ Ce point est vérifié et contrôlé § 4.3 lors de l'évaluation de la propagation rocheuse.

3.2.2. Pied de versant

L'examen du pied de versant a démarré peu avant le tunnel d'accès à la zone des pontons flottants et du local police municipale/mairie où le versant dépasse les 5 m de dénivelé.

La reconnaissance du pied de versant a constitué en :

- l'examen des parois verticales rocheuses mais aussi des zones d'épandage rocheux ou des parties de versant d'affleurement diffus ;
- l'identification au sein de ces masses rocheuses des zones d'instabilités rocheuses visibles ;
- l'examen des éboulis rocheux présents tant à flanc de versant qu'en pied de versant.

Cet examen permet de sectoriser le linéaire de versant étudié (flanc Est de la calanque) en **37 zones homogènes** distinctes.

L'ensemble de ces éléments est rapidement décrit ci-dessous.

Avant le tunnel, on trouve en tête de versant une première masse potentiellement instable (M1) découpée (sinon posée) située en partie haute de versant à une hauteur de dénivelé de 8,20 m au-dessus du chemin d'accès au tunnel. À l'aide du télémètre-laser, cette masse a été évaluée à 0,3 m de haut, 0,9 m de longueur et 0,5 m en profondeur, soit un volume de 135 l environ (Illustration 9).

Avant le tunnel, les couches calcaires présentent localement un plan de stratification N35 15°SE, soit en pendage-amont. D'un point de vue structural, ce sont plus de légères ondulations de pente des couches perpendiculaires à l'axe de la calanque et à très large rayon de courbure (nettement visibles sur le front de taille de la rive opposée⁴ où elles semblent plus prononcées qu'en rive Est) qui sont à noter. Plus au nord, la structure des couches présente ainsi quasi systématiquement soit un pendage quasi-nul, soit plutôt un très léger pendage vers l'est (amont pendage). En dehors de cette masse M1 individualisée au potentiel d'instabilité significative, le reste du massif rocheux comporte une falaise vive (F1), à paroi verticale irrégulière car découpée en bancs massifs par une série de courtes risbermes naturelles étagées le long du versant (Illustrations 9 et 10).

Après le tunnel à hauteur du ponton fixe, au nord de cet ensemble rocheux FF1 dans le versant et sur une bande courbe et large de 55 m environ domine un épandage graveleux voire sableux, végétalisé et à pente régulière, agrémenté sur les flancs sud et nord de quelques masses rocheuses saillantes (Illustration 10).

La première masse d'allure un peu instable (M2) sur ce flanc sud à une hauteur de 13,5 m à sa base ne présente pour l'instant pas encore une découpe suffisante pour craindre une rupture en partie haute d'ici une vingtaine d'années, mais par contre à l'aune d'un siècle, on ne peut pas exclure un départ qui dépasserait sensiblement les 250 l de volume (Illustration 10).

⁴ Ondulations observables sur l'illustration 6 (photo de gauche)



Illustration 9 - Bloc M1 et aperçu du massif rocheux FF1 en amont pendage coté sud du tunnel.

Une seconde masse (M3) déjà bien découpée sur ce flanc sud apparaît bien plus susceptible à une rupture rocheuse à moyen terme⁵, située à 15 m de hauteur de dénivelé à sa base, mais elle ne concerne plus qu'un volume deux fois moindre, autour d'une bonne centaine de litres (Illustration 10).



Illustration 10 - Flanc nord de FF1 avec détails sur les zones M2 et M3.

Sur le flanc nord de l'épandage graveleux, la falaise vive (FF2) reprend, formant d'abord une ligne de crête suivant la pente et formant en aval un éperon (Illustration 11). Au début de cette falaise, on trouve d'abord 2 masses découpées individualisées M4 et M5 (Illustration 11). Sur le flanc sud de la crête, la masse M4 n'est qu'une amorce d'écaillage qui comme M2, à court et moyen long terme ne menace pas de rompre, mais qui sur le long terme d'ici 100 ans, pourrait survenir (hauteur de dénivelé en base de 8 m). Cette écaillage pourrait engendrer des blocs unitaires dépassant au pire 250 l, mais guère plus. Sur la zone en crête, deux blocs en apparence posés de moins d'un m³ chacun, constituent la masse instable M5, situés à une hauteur de dénivelé de 11 m.

Sur le flanc nord de la crête, on note sur une bordure d'arête de falaise un pré-découpage avancé d'une masse en panneau de moins d'1 m³ (M6), situé à une hauteur de 9 m (Illustration 12).

La falaise vive (FF2) affleurante s'arrête du fait d'une zone d'épandage rocheux à dominante graveleuse et pierreuse masquant le reste du versant (E6). En tête de versant sur un îlot rocheux en falaise isolé, un bloc découpé (ou posé à plat) de moins de 100 l en situation précaire (Illustration 12) pourrait assez vite se propager à court terme (M7).

⁵ Classes de délais (LCPC, 2014) : Imminent (dans les jours semaines, mois), très court terme (dans les 2 ans), court terme (dans les 10 ans), moyen terme (dans les 30 à 50 ans), long terme (dans les 100 ans).

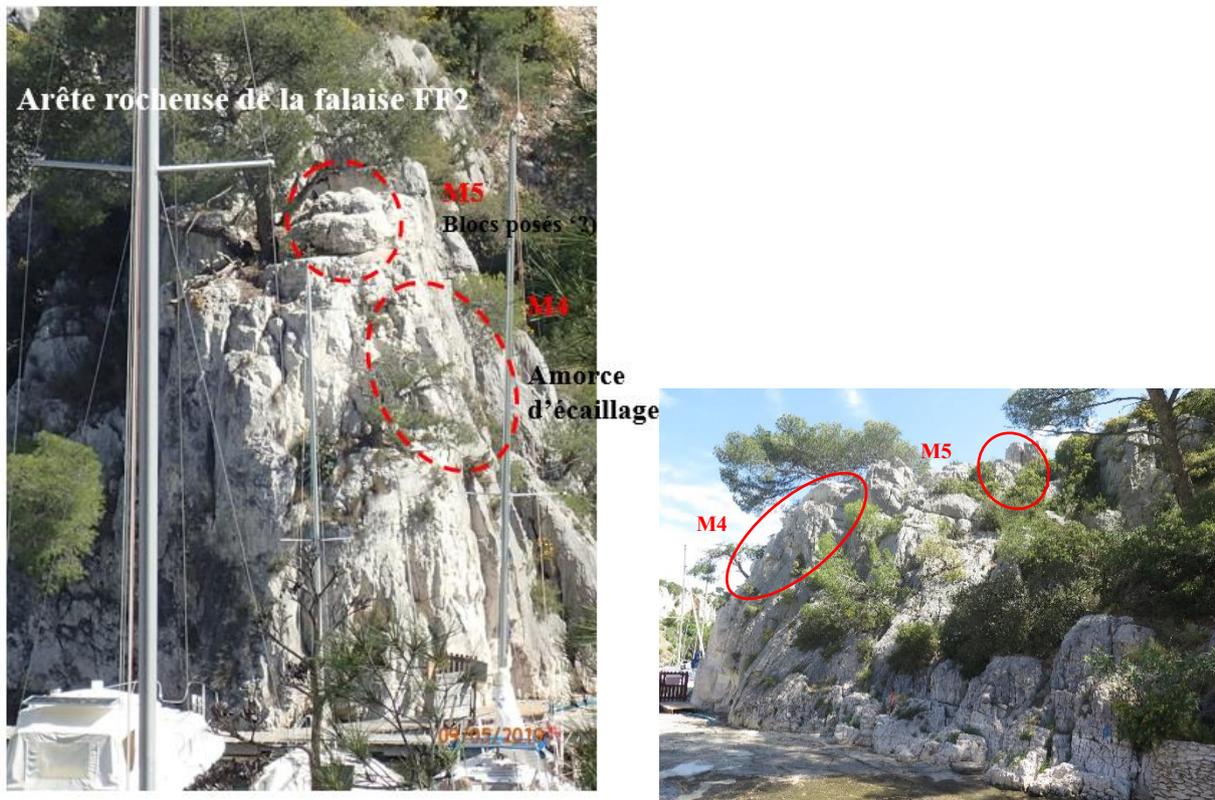


Illustration 11 - Arête rocheuse de FF2 en début de ponton flottant et zones M4 et M5 sur le flanc sud.

On note dans le pied de versant mais aussi dans le fond ennoyé de la calanque (moins d'un mètre d'eau) une série de blocs stoppés dans leur progression, tous anciens, disséminés çà et là (Illustration 12). Ces éléments témoignent de l'activité passée de la falaise et des conditions de propagation.



Illustration 12 - Flanc Nord de FF2 avec les zones M6 et M7 et les blocs arrêtés sur le versant et au fond de calanque.

La falaise vive reprend après cette zone d'épandage (E6), d'abord sur un court bout de falaise (FF3) située au 2/3 de la hauteur du versant, puis en tête de versant (FF4) en bordure du plateau (Illustration 13).

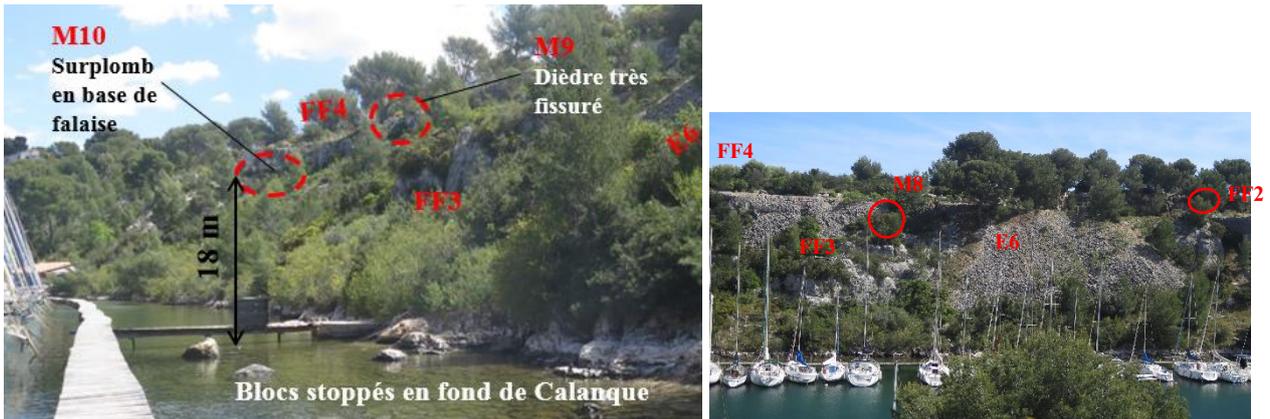


Illustration 13 - Aperçu des fronts de falaises FF3 et FF4 et des zones M7 à M10

Sur cette falaise, on note d'abord une petite masse déjà individualisée (Illustration 13) en paroi proche de 50 l (M8) puis juste sous la falaise une zone découpée en dièdre (M9) pouvant engendrer des petits blocs d'un peu plus de 100 l de volume chacun (Illustration 13).

En bout de falaise FF4, on retrouve en pied de paroi rocheuses une strate de couche légèrement sous-cavée (Illustrations 13 et 14), en surplomb (M10).

La falaise reprend ensuite (FF5) mais décalée nettement en aval et pour une moindre hauteur (entre 10 et 14 m). À l'amont immédiat du bâtiment du Club Nautique de Port-Miou (CPNM), deux blocs dépassant les 100 l chacun (M11) s'individualisent en tête de la falaise FF5 à 11 m de hauteur de dénivelé.

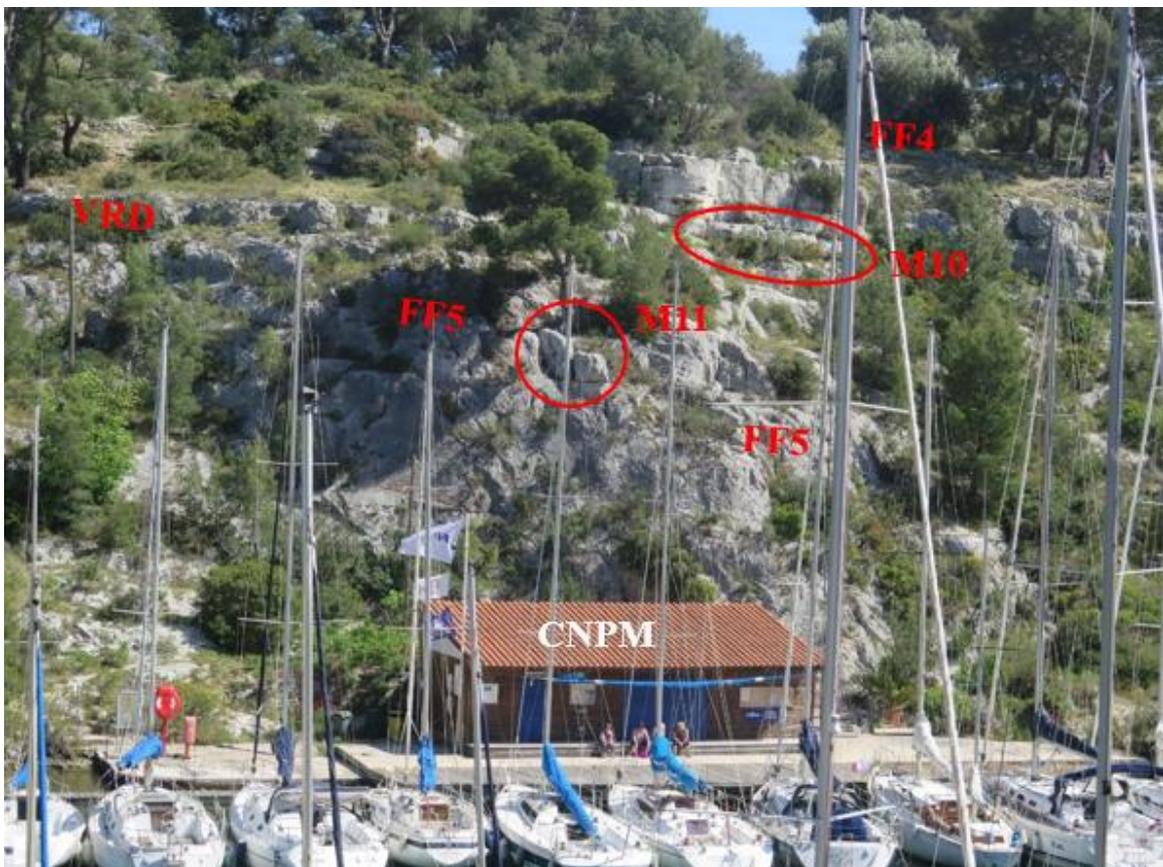


Illustration 14 - Flanc Est de la calanque au niveau de la partie centrale (VRD et CNPM).

Cette falaise FF5 s'achève sur le milieu de flanc Est de la calanque où l'érosion a localement fait reculer la tête de versant et a laissé place à un versant rocheux diffus (VRD) à pente régulière jusqu'à moins de 30°, avec de petits affleurements rocheux en très courts ressauts verticaux (Illustration 15) ne dépassant pas le mètre de hauteur étagées le long de cette zone de versant en cuvette géomorphologique. Un chemin serpentant réservé aux seuls usagers des zones de mouillages (interdit au tout public) permet de rejoindre les pontons flanquant les bateaux au mouillage.

Sur le flanc nord de cette cuvette, on retrouve une zone où à la faveur d'un relatif replat des blocs dépassant souvent les 100 à 200 l se sont accumulés en nombre (notamment en amont du replat), avec une bonne partie d'entre eux restant en équilibre assez précaire (zone d'éboulis de blocs E3).



Illustration 15 - Zone de versant diffus (VRD) plus ou moins raide avec accumulation de blocs jusqu'à saturation (E3) du replat sur le flanc nord de la zone.

Au nord de cette zone, deux propriétés sont situées en tête de versant, au-delà de la zone exploitée à ciel ouvert en carrière (du moins sur une partie n'ayant pas laissé de front de taille marquée).

Sur la première propriété où la tête de versant se rapproche vers l'ouest, la pente reste régulière mais se raidit : la parcelle est entièrement enclose jusqu'en pied de versant. Un premier talus rocheux (TR2), continu de quelques mètres tout au plus de hauteur de dénivelé, apparaît à mi- versant. L'état de la paroi est plutôt découpé en surface mais sans qu'il y émerge déjà une masse individualisée. On notera aussi plusieurs blocs d'allure ancienne (aucun signe de fraîcheur) accumulés dans une faible lame d'eau en pied de versant sous le mur aval de cette propriété.

Plus au nord, sous la seconde propriété, une section continue de falaise émerge (Illustration 16) en partie haute de versant d'un coup entre 17 et 22 m NGF et elle prend toute de suite de l'ampleur avec 9 m de paroi verticale avant de disparaître sous la plus notable zone d'épandage rocheuse (E1 et E2). Localement, des masses ponctuelles instables se sont individualisées en tête de falaise (M12 et M13, M14) dans cette falaise découpée en 4 zones (FF6 à FF9). C'est au niveau de M13 que la hauteur de dénivelé est la plus forte (11 m) et que la tête de falaise est la plus haute (31 m NGF).

Sur M12 (Illustration 16), le banc en tête de falaise apparaît être en surplomb (à 28 m NGF) et *a priori* découpé en masse individuelle sur les flancs dans la falaise (une végétation plaquée masque notamment les flancs).



Illustration 16 - Réapparition de la falaise verticale au nord de VRD puis détails de la falaise à hauteur de M13.

Sur M13, il est observé une découpe dense en surface de la paroi rocheuse par une trame régulière de fissures entrecroisées qui ne semblent pas inciser en profondeur. Les éléments rocheux ainsi prédécoupés restent en place (quasiment pas de cicatrices de départ) et ne constitueraient pas en général des masses unitaires de grand volume (moins de 50 l en moyenne avec quelques masses pouvant dépasser les 100 l). Dans la partie la plus haute, un peu plus prédécoupés, les volumes pourraient être localement plus forts (quelques blocs à plus de 250 l estimés contre une forte minorité de potentiels blocs entre 100 et 250 l). Il y a aussi des traces anciennes de suintements à mi-hauteur de paroi.

Sur M14, 2 à 3 blocs de faible volume (le plus gros pouvant dépassant 100 l) adjacents ou accolés se détachent en tête de falaise à 27 m NGF.

On note aussi en pied de versant au droit de la zone homogène de falaise FF8 une zone de forte accumulations d'anciens blocs dans le pied de versant (Illustration 17), vestige possible d'un éboulement plus conséquent ou résultat de l'activité extraction en carrière en tête de versant.



Illustration 17 - Éboulis de pied de versant et zone d'éboulis dans le versant (E1 et E2)

La zone d'épandage rocheuse (E1 et E2) à pente raide et régulière de de 40-45° (Illustration 17) correspond à une zone d'entaille de tout le versant sous cette piste et elle marque une ligne d'arrêt pour les falaises présentes de part et d'autre. Au cœur de cette zone d'épandage, on retrouve une accumulation de blocs de plus gros volume (E1 dont certains pourraient atteindre et légèrement dépasser 250 l), là où ailleurs (E2), les blocs sont proches de 30/50 l (dépassement possible au-delà de 100 l pour certains).

La falaise ressurgit sur le flanc nord de cette zone d'épandage de blocs d'abord sur deux barres étagées de 12 à 17 m et puis de 18 à 24 m puis très vite d'un seul tenant (FF10) d'abord de 13 à 25 m NGF puis sur près de 20 m de paroi verticale de 9 à 20 m NGF. La surface de cette paroi est régulière (Illustration 18) et présente, comme seuls indices d'instabilités visibles, un écaillage superficiel sur colonne. Au niveau de l'écaillage, des traces de décoloration traduisent aussi une zone de suintements récurrents (Illustration 18).

Sous cette falaise, on retrouve dans l'eau en pied de versant un certain nombre de blocs anciens (Illustration 18).



Illustration 18 - Aperçu de la paroi du front de falaise FF10 et des blocs en pied de versant.

L'extrémité nord de cette falaise FF10 forme un dièdre (M15), dont une partie médiane de la colonne s'est déjà rompue (Illustrations 19 et 20), laissant en tête de colonne haute un banc en surplomb de 0,6 m de hauteur à 22 m NGF (sans autre signe de rupture à court terme). C'est la partie déjà fragilisée et légèrement arrachée de cette colonne sur 5 à 6 m de haut sous la partie déjà emportée qui présente la menace de départ à terme la plus volumineuse sur ce versant par rupture du dièdre et/ou bascule de la colonne (autour des 10 m³ dont certains blocs après éventuel fractionnement pourrait dépasser le m³).

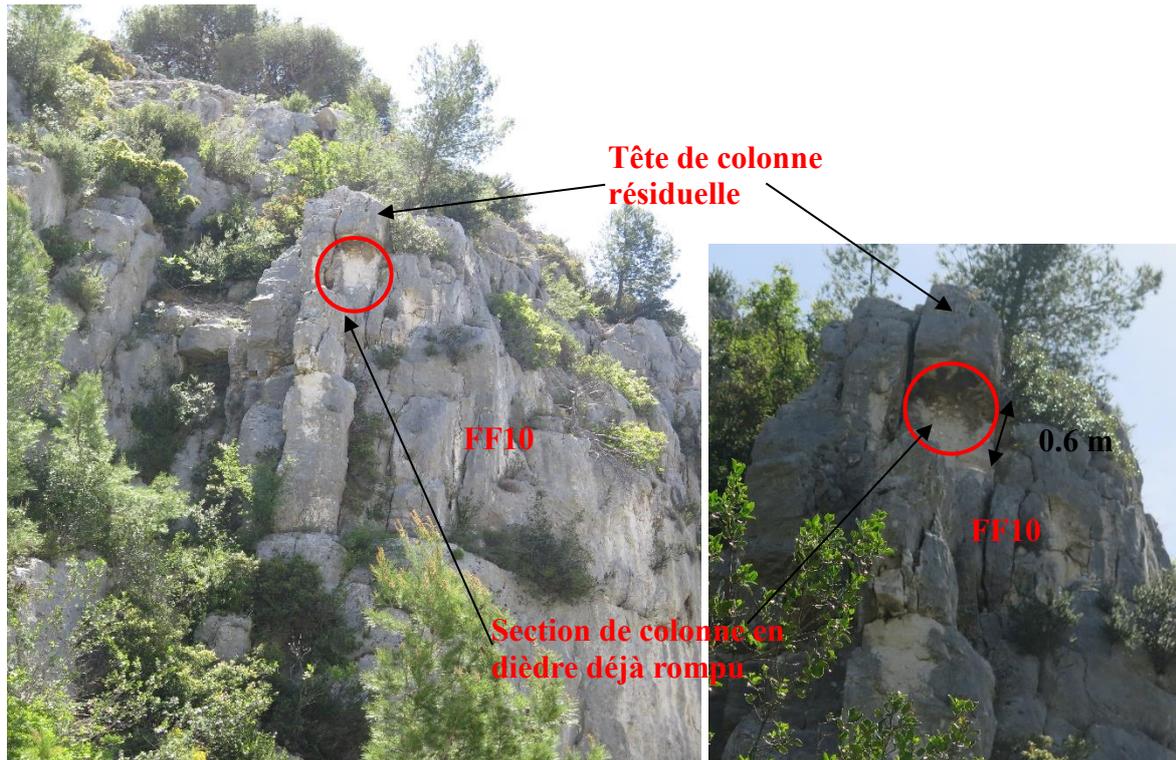


Illustration 19 - Rupture partielle de colonne en dièdre avec surplomb de la tête de colonne.

Au-dessus de la paroi verticale de FF10 (Illustration 20), le versant raide et de surface très irrégulière jusqu'en amont à hauteur de la zone d'ancienne carrière à ciel ouvert avait fait en 2003 (M16) l'objet de purge sans qu'on sache la nature exacte de la purge, l'ampleur et l'étendue exacte de celle-ci.

En arrière de la falaise FF10 et du dièdre M15, sur le flanc nord de la zone (M16), un second dièdre déjà nettement individualisée (M17) ne montre pour l'instant pas de signes manifestes d'instabilité visible (Illustration 20) mais à terme, les mêmes possibilités de rupture que M15 y sont attendues.

En léger retrait dans le versant, une paroi verticale de falaise (FF11) prend ensuite le relais (Illustration 21) : la hauteur de falaise reste au début élevée mais au fur et à mesure qu'on remonte vers le nord, la hauteur baisse de 33 m à 7 m. La paroi rocheuse reste déchiquetée et irrégulière sans que cela signale pour autant une zone de rupture de volume global très marquée (n'engendrant pas des blocs unitaires de plus de 250 l).

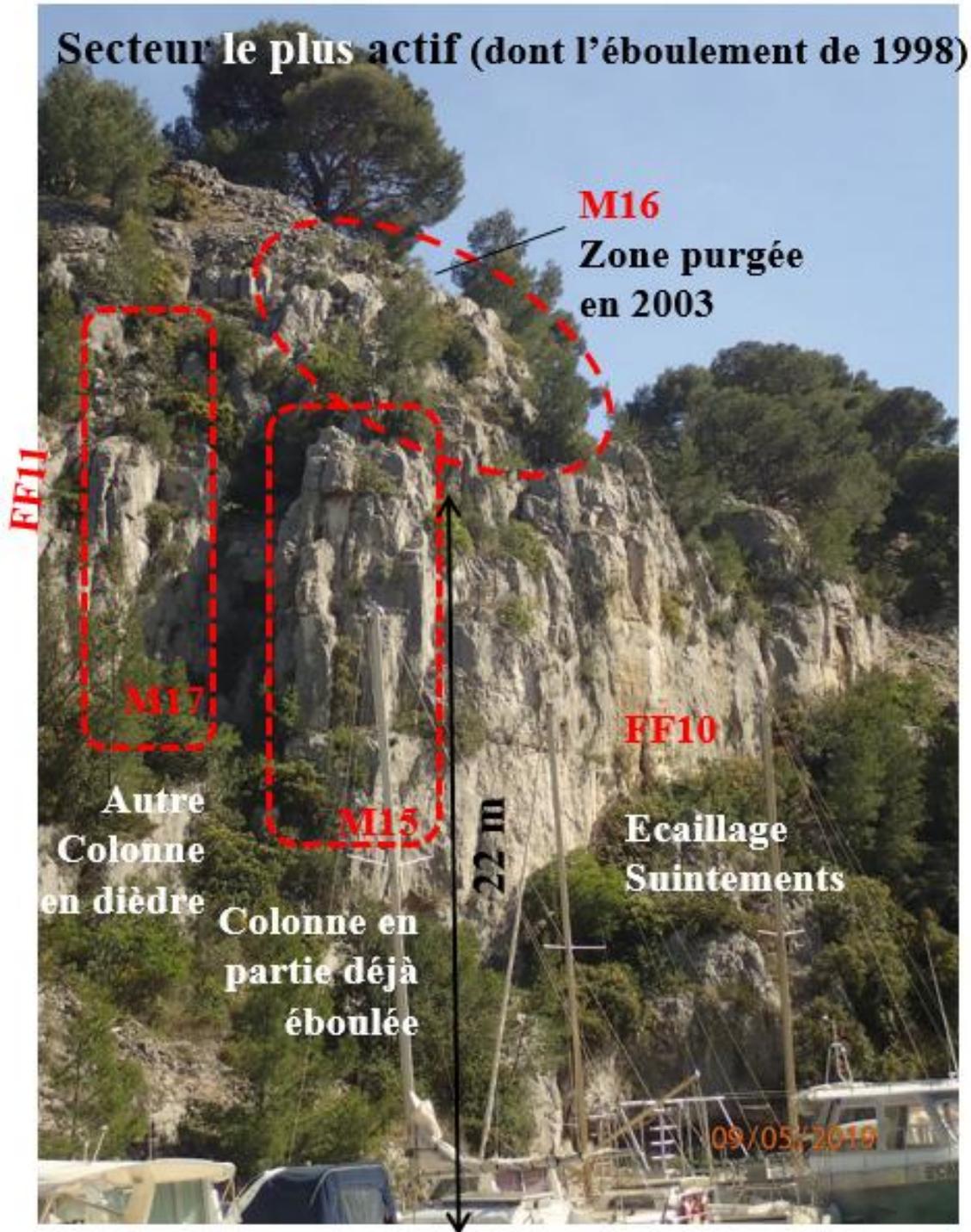


Illustration 20 - Partie du flanc Est de la Calanque à l'activité rocheuse estimée comme la plus sensible.

Au-dessus de la falaise F11, on trouve jusqu'en bordure de la zone d'extraction à ciel ouvert (matérialisée par une piste) une vaste zone pierreuse à nu (E4) à pente raide régulière (Illustration 22). Les éléments rocheux sont de volume moyen autour de quelques l (10 à 20 l pour les plus gros). Plus on remonte au nord, plus la tête de versant s'éloigne du pied de versant, la pente faiblit et devient un peu moins régulière. L'épandage cesse, le versant se végétalise et quelques courts ressauts (hauteur métrique) apparaissent sans compter que la partie de mi-versant évolue vers une zone de relatif replat.



Illustration 21 - Fronts de falaise FF11 en pied de versant et t l'épandage pierreux E4 en partie haute de versant.



Illustration 22 - Épandage pierreux E4.

Une rampe rocheuse raide de 9 m de dénivelé environ se raccorde en pied de versant avant apparition d'un dernier tronçon de falaise F12. La hauteur de F12 croit très vite de 2 à 10 m avant un pic à 15 m. En partie nord de cette falaise, alors que le dénivelé reste de 15 m de haut, un bloc en tête de falaise de près de 150 l apparaît posé (M18). Sous ce bloc (M18), on retrouve dans la paroi à la faveur des banquettes résiduelles entre deux strates un second bloc de près de 90 l posé à 11,5 m NGF. Dans les talus rocheux de pied de falaise, on retrouve un troisième bloc arrêté de près de 40 l à 3 m NGF. Quelques mètres plus loin, la falaise F10 diminue très vite de hauteur avant de disparaître définitivement en bout de crique.

L'ensemble de ces éléments ont été reportés sur la carte informative suivante (Illustration 24).



Illustration 23 - Front de falaise FF12 au nord de la Crique et blocs d'allure instable M18, M'18 et M''18.

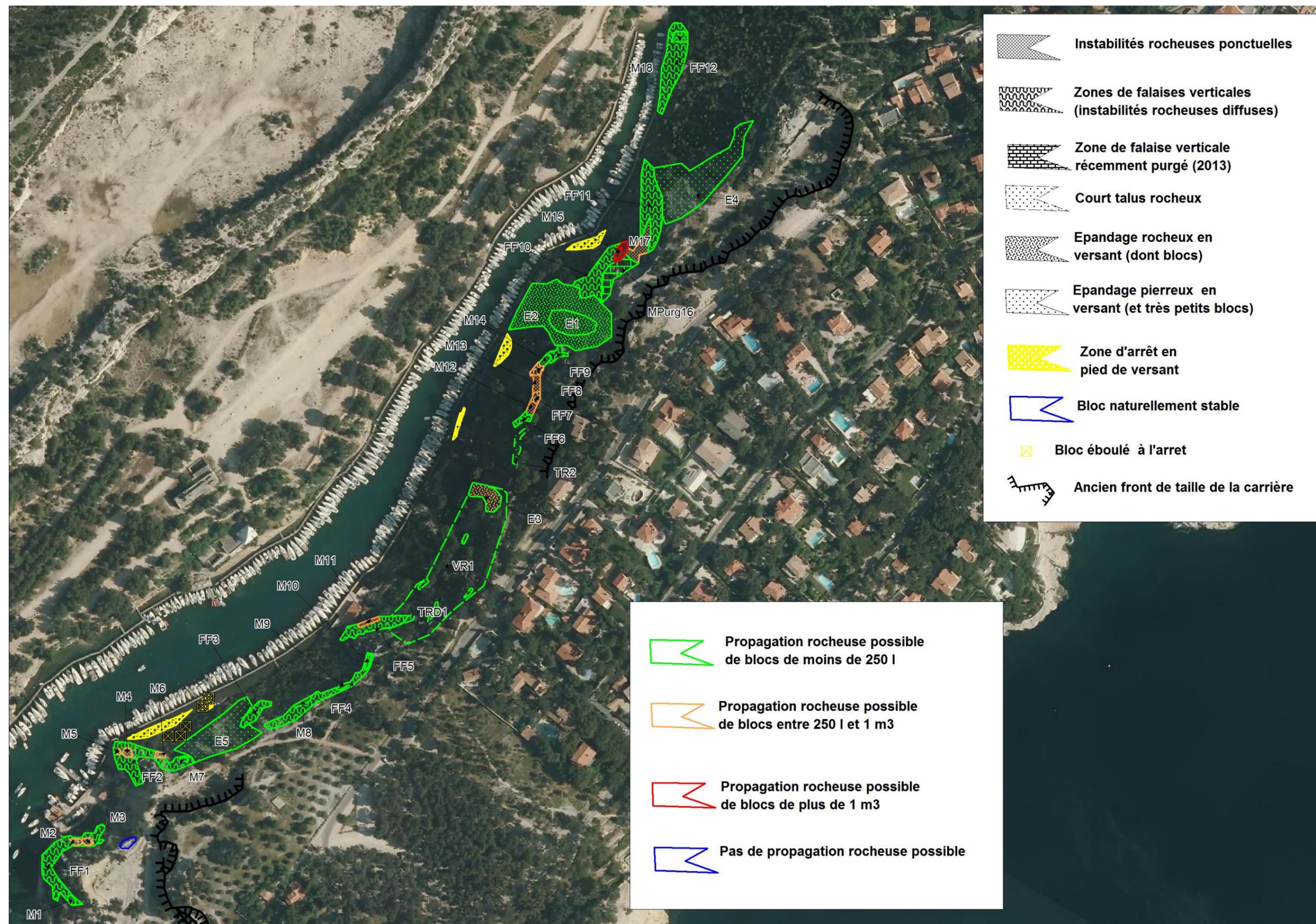


Illustration 24 - Carte informative du flanc Est de la calanque de Port-Miou (Cassis, 13).

4. Évaluation de l'aléa rocheux sur le flanc Est de la calanque de Port-Miou

L'aléa rocheux a été évalué grâce à la nouvelle méthodologie dite MEZAP (Méthode de l'Évaluation des Zones d'Aléa Rocheux « P »).

En termes pratiques, l'évaluation de l'aléa selon cette méthode reste classique, en 4 étapes :

- **aléa de rupture (aléa de départ) ;**
 - on définit ce qui peut être mis en mouvement (volume = intensité de phénomène),
 - on définit ensuite la fréquence avec laquelle ce ou ces volumes de roches se mettent en mouvement (activité du phénomène),
 - croisement de ces deux paramètres définit l'aléa de rupture : spatialisé en définissant les zones de départs potentiels (typologie) ;
- **aléa de propagation - probabilité d'atteinte ;**
 - analyse basée sur les retours d'expérience d'évènements passés et sur des modélisations plus ou moins complexes, validée ou « corrigées » par la connaissance terrain,
 - le résultat permet de définir des **probabilités d'atteinte** de blocs en tout point du territoire ;
- **probabilité d'occurrence ;**
 - la **probabilité d'occurrence** résulte du croisement de l'indice d'activité des zones de départ et des probabilités d'atteinte simulées ;
- **aléa résultant ;**
 - l'**aléa** de mouvement de terrain (ici « chutes de blocs ») résulte du croisement de la probabilité d'occurrence et de l'intensité du phénomène de référence considéré.

4.1. MÉTHODE MEZAP

Elle est le fruit d'un Groupe de Travail, actif de 2012-2013, portant sur la révision des aléas PPRN de Montagne, sous l'égide de la DGPR et animée par l'IRSTEA et la RTM et réunissant l'ensemble des acteurs techniques publics impliqués dans l'élaboration des PPRN rocheux (IRSTEA, RTM, BRGM, CEREMA, IFFSTAR, DGPR, DDT06, DDT38 et DDT74).

L'examen des cartes d'aléa rocheux existantes pour les PPRN en zone montagne, avait abouti notamment aux constatations suivantes :

- une pratique assez hétérogène de l'évaluation de l'aléa rocheux, tant liés aux méthodes employées (les guides méthodologiques déjà existants restent dans les généralités et ils ne rentrent pas ou du moins peu dans la définition technique de l'aléa) qu'aussi également aux acteurs impliqués (ce second point est d'autant plus sensible si la méthode s'appuie plus sur les dires d'expert) ;
- une difficulté très systématiquement rencontrée pour estimer la fréquence de rupture rocheuse ;
- de fortes disparités rencontrées dans la pratique de la trajectographie d'une structure à l'autre, outil généralement employé pour estimer la zone de propagation rocheuse mais aussi les probabilités d'atteinte. Il n'y a en général pas assez d'évènements rocheux pour

caler précisément le modèle trajectographique et calibrer de manière fiable et robuste les différents paramètres du modèle employé ;

- dans les zones de moindre probabilités d'atteintes (zones faiblement voire moyennement exposées), où les niveaux d'aléa sont souvent moindres (faible et au plus moyen) et rarement contraignants (zones restant constructibles), les rares blocs observés après approbation des PPRN correspondent presque toujours aux blocs des plus gros volumes existants sur le secteur et donc aux plus endommageant, qui conservent pendant tout leur course à quelques mètres finaux près, une énergie importante et un fort pouvoir d'endommagement.

La méthode MEZAP apporte à chacun de ces constats faits des mesures d'amélioration des pratiques, notamment via :

- un formalisme poussé pour une pratique la plus homogène possible d'un acteur à l'autre, à commencer par l'usage des termes employés tel que présentés ci-dessus ;
- un net accent mis, par rapport aux méthodes cartographiques passées, sur l'endommagement potentiel (énergie d'impact) par rapport aux estimations souvent difficiles à cadrer de probabilités de rupture (fréquence) ou d'atteinte (probabilité d'atteinte via la propagation rocheuse) faute d'évènements rocheux de référence en nombre suffisant pour contraindre de manière fiable le modèle ;
- **l'intensité** est directement liée à la masse et donc au volume du bloc unitaire se propageant (paramètre le plus abordable à évaluer par grandes classes de volume dans le scénario de référence)⁶;
- la fréquence de rupture marquée par son fort poids d'incertitude est remplacée par le concept simplifié d'**activité rocheuse** moins précis pour être **au final plus fiable** ;
- la propagation rocheuse demande beaucoup de données pour une approche déterministe fiable (MNT précis, volume et forme des blocs, cartes des sols dans la zone de propagation, etc.). Les estimations d'atteinte par propagation rocheuse s'appuient toujours (si possible) sur des méthodes très élaborées de modélisation numérique par trajectographie (dont la pertinence est souvent difficile à apprécier à moins de disposer qu'un grand nombre d'évènements qui confirme que les très nombreux paramètres du modèle sont bien calés sur la réalité) mais elles peuvent être croisées voire substituées par la **méthode des cônes** plus abordable, basée sur la ligne d'énergie et les **angles associés**⁷.

La méthode MEZAP a été conçue pour un usage opérationnel adapté à la carte d'aléa utile aux Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN), soit pour une échéance de 100 ans. Le principal enjeu considéré à titre préventif pour l'aménagement de territoire dans les PPRN reste la maison d'habitation⁸ et du coup les niveaux d'aléa sont calibrés pour faciliter (en absence d'une étude dédiée à la vulnérabilité spécifique des enjeux) une transposition directe en niveaux de risque qui soient a minima significatifs.

⁶ L'intensité a une seconde entrée possible, l'énergie d'impact (cf § 5). Le passage de l'énergie à un volume équivalent peut être fait, soit de manière globale (comme par défaut avec MEZAP), soit dans le contexte spécifique d'une étude dans un site donné.

⁷ Cette méthode est présentée un peu plus loin, ci-après § 4.3 (avec la propagation).

⁸ Les réseaux d'infrastructures restent sinon très souvent un enjeu communément présent sur le territoire, mais la vulnérabilité varie beaucoup selon le type d'infrastructures (routes/autoroutes/rail, gaz, électricité...) et la gestion du risque face aux aléas naturels reste directement de la responsabilité du gestionnaire d'infrastructures, seul acteur compétent sur le sujet sur les aspects juridiques, techniques et financiers.

4.2. CARACTÉRISATION DES ZONES DE DÉPART HOMOGENES

Les levés de terrains ont au final permis d'identifier 37 zones de départ homogènes réparties en 3 types :

- instabilités rocheuses ponctuelles (aléa localisé) sur les falaises, au nombre de 18 ;
- section des mêmes falaises rocheuses, avec zone de rupture potentielle non repérée (aléa diffus), au nombre de 12 ;
- zones d'épandage rocheux, au nombre de 5.

Pour aider à cartographier précisément les contours de ces zones homogènes de départ, les données altimétriques acquises par le SHOM et l'IGN du litto3D sont valorisées. La formule suivante permet de définir un seuil de pente à partir duquel la présence de zones de départ est probable.

$$\alpha = 55^\circ * RES^{-0,075}$$

Avec RES = la résolution du MNT

Illustration 25 - Estimation de la pente minimale α d'un possible départ rocheux en fonction de la résolution RES⁹.

Le Modèle Numérique de Terrain litto3D au pas de 1 m indique une pente de l'ordre de 55°. L'analyse de terrain (cf. § 3) montre que les pentes du MNT supérieures à 48° (α) sont bien représentatives des zones de falaises verticales présentes, soit une résolution des contrastes altimétriques locales (végétation comprise) proche de 5 m.

L'intensité retenue pour la cartographie d'aléa est fonction du volume unitaire du plus gros bloc susceptible de se propager (scénario de référence, Illustration 26). Tel qu'indiqué sur la carte informative (Illustration 24) et reporté dans le tableau synthétique ci-après (Illustration 34), les intensités attendues, dans une période de 100 ans, se répartissent comme suit :

- classe d'intensité de niveau faible (propagation de blocs inférieur à 250 l) : 19 zones ;
- classe d'intensité de niveau moyen (propagation de blocs entre 250 l et 1 m³) : 14 zones ;
- classe d'intensité de niveau fort (propagation de blocs supérieure à 1 m³¹⁰) : 4 zones (M12, M13, M15 et M17).

Niveaux d'intensité	Description	Endommagement
Faible	Le volume unitaire pouvant se propager est inférieur à 0,25 m ³	Peu ou pas de dommage au gros œuvre, perturbation des activités humaines.
Modérée	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur ou égal à 0,25 m ³ mais inférieur à 1 m ³	Dommage au gros œuvre sans ruine. Intégrité structurelle sollicitée.
Elevée	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur ou égal à 1 m ³ mais inférieur à 10m ³	Dommage important au gros œuvre. Ruine probable. Intégrité structurelle remise en cause.
Très élevée	Le volume unitaire pouvant se propager dépasse 10 m ³	Destruction du gros œuvre. Ruine certaine. Perte de toute intégrité structurelle

Illustration 26 - Classes d'intensité de l'aléa rocheux en fonction du volume du bloc unitaire.

⁹ Formules établies par l'IRSTEA, notamment sur le site de Veyrier-Le-Lac (74) après une série d'études d'expertises d'évaluations d'aléa rocheux.

¹⁰ Rappel : 1m³ = 1 000 l.

L'activité rocheuse est définie par MEZAP comme suit (Illustration 27) :

Indice d'activité par zone homogène	Description
Faible	De l'ordre d'un bloc de l'aléa de référence ou moins par siècle
Moyen	De l'ordre d'un bloc de l'aléa de référence par décennie
Elevé	De l'ordre d'un bloc de l'aléa de référence ou plus par année

Illustration 27 - Activité rocheuse.

Pour 3 des zones de départ examinées (M2, M4 et VRD), aucune rupture rocheuse n'est envisagée à court et moyenne terme (rien avant 20 ans), mais un évènement rocheux n'est pas totalement exclu sur 100 ans.

Au vu de l'activité historique réduite, de l'absence assez fréquente de gel hivernal, il n'est guère attendue dans le cas général des zones de départ diffus en falaise qu'au plus 1 évènement rocheux sur 100 ans (au pire 2), soit une activité faible (13 zones).

Pour les autres zones présentant une instabilité ponctuelle déjà présente et identifiée, il est attendu au moins 1 évènement sur 100 ans, et jusqu'à plusieurs sur cette période (sans atteindre un rythme décennal), soit une activité faible à moyenne (16 zones).

Enfin, pour les zones d'éboulis, la remobilisation d'éléments éboulés (jamais signalée) reste également possible a priori et l'activité rocheuse est estimée comme étant faible à moyenne (5 zones).

4.3. ÉVALUATION DE LA PROPAGATION ROCHEUSE

Plusieurs approches existent pour caractériser la propagation rocheuse. L'une des plus connues est l'usage de la modélisation numérique trajectographique mais cette dernière solution demande, pour un emploi pertinent, le calibrage de nombreux paramètres qui n'est possible et réaliste que si on dispose d'un nombre certains d'évènements rocheux à rétrocaler.

À défaut de cela, une approche simplifiée de la propagation rocheuse reste possible grâce au concept de la ligne d'énergie (ou méthode des cônes).

Principe de la ligne d'énergie :

Il existe un type de modèle dit statistique qui permet d'estimer à partir d'une zone de départ la localisation du point d'arrêt maximal probable d'un projectile et qui ne nécessite pas à proprement parlé de détermination des coefficients de réponse des sols. Ce modèle est basé sur le principe de la ligne d'énergie développée par HEIM A. en 1932 qui a donné naissance à la méthode dite des "cônes". Ce modèle repose sur un principe simple et trivial : un bloc ne peut progresser sur une pente que si celle-ci est suffisamment raide.

Ainsi, si la pente est supérieure à un angle limite β , il accélère. Si elle est inférieure à β , il ralentit. En partant de ce constat, un bloc peut aller d'une zone de départ A jusqu'à B, point d'intersection du relief avec une ligne imaginaire partant de la zone de départ et formant un angle β avec l'horizontal (Illustration 28). Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β , l'angle de la ligne d'énergie.

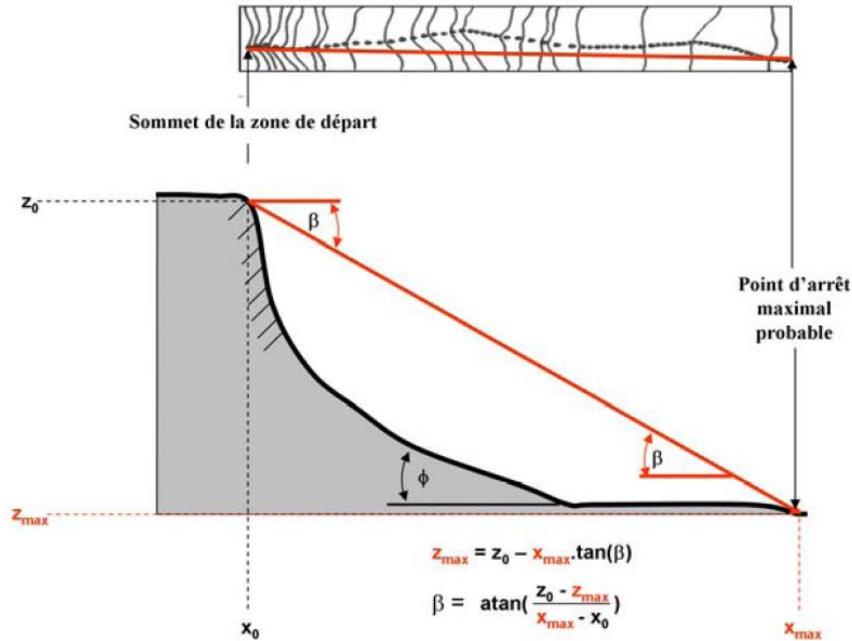


Illustration 28 - Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β .

La méthode des cônes permet donc de cartographier l'extension prévisible de l'aléa rocheux (zone d'atteintes rocheuses) par le choix de valeurs d'angle variables en fonction de singularités locales (topographie, végétation dont la forêt) et à l'aide du relief de versant matérialisé par le MNT (Illustration 29).

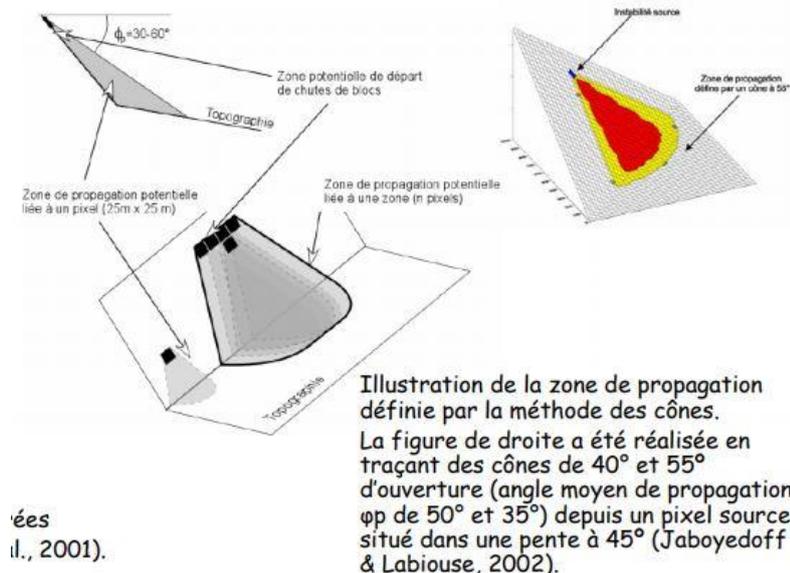


Illustration 29 - Représentation de la zone de propagation rocheuse concernée dans le versant pour différents angles d'énergie différent.

L'observation et la mesure d'angles sur plusieurs phénomènes permet de présenter des plages statistiques de valeurs permettant l'évaluation des emprises de propagation. Le choix de la valeur d'angle au sein de l'intervalle exposé est pratiqué et justifié en fonction de la connaissance du site et des retours d'expérience sur des sites équivalents.

À ce titre, le BRGM et l'IRSTEA dans le cadre de développements récents dans le cadre du GT MEZAP ont mis en évidence une relation particulièrement étroite entre la morphologie des versants et les valeurs de ligne d'énergie. Cette relation empirique est basée sur la valorisation de plusieurs milliers d'évènements de chute de blocs [Colas *et al.*, 2017]. C'est sur la base de cette relation que les valeurs d'angles sont approchées de manière statistique pour chaque profil de versant différent (Illustration 32).

Compte tenu des fortes variations géomorphologiques existants du versant le long du mouillage, il a été extrait du MNT Litto3D un nombre de coupes de profil de versants assez conséquents, 36 en tout (Illustration 31).

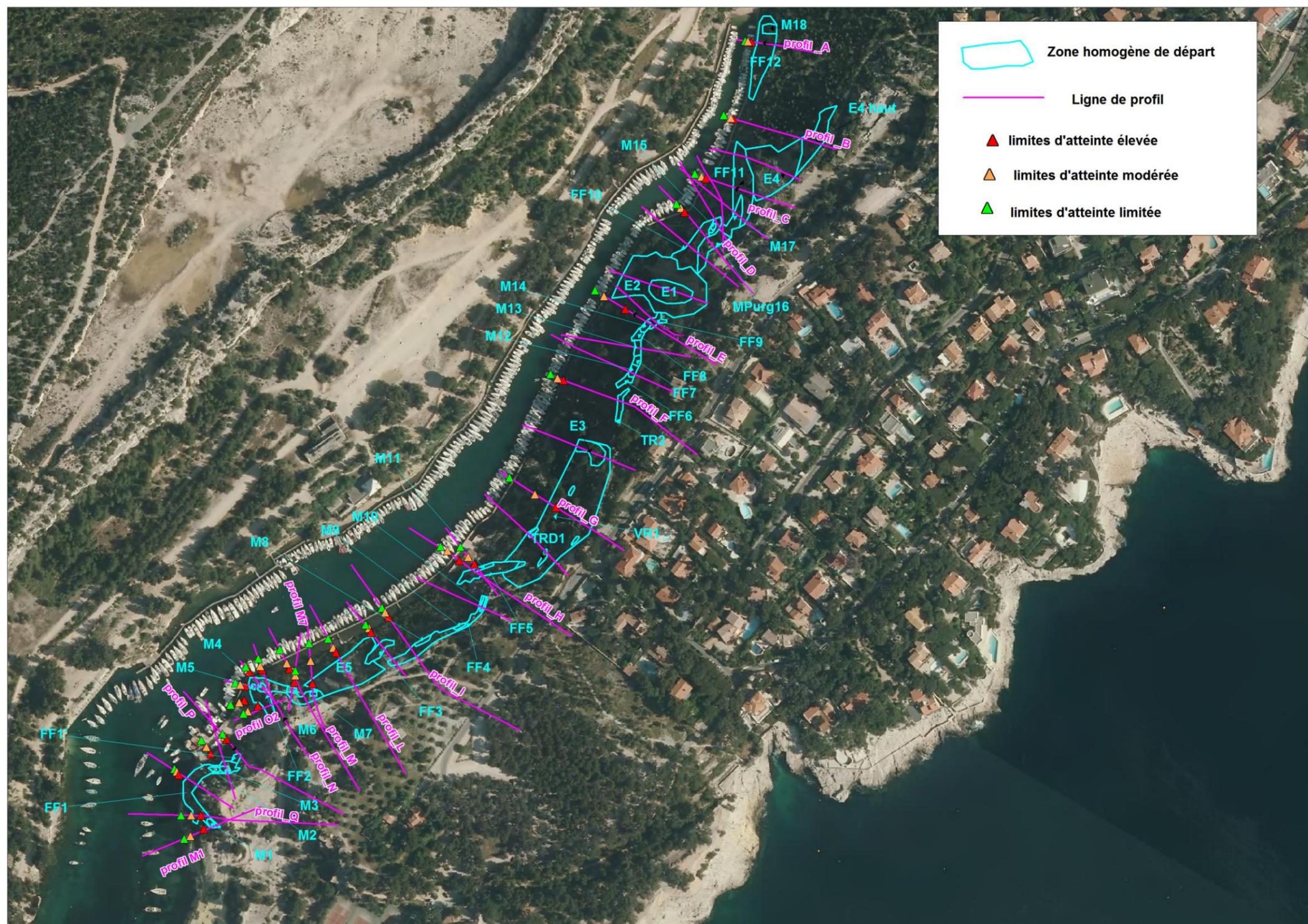


Illustration 30 - Coupes de profils de versant sur lesquels la propagation rocheuse a été évaluée sur le flanc Est de la Calanque de Port Miou à Cassis (13).

Pour chacune de ces coupes, les levés de terrains permettent de déterminer la hauteur précise de la zone de rupture en falaise et l'aide du MNT litto3D, et de prédéfinir des valeurs d'angles d'énergie pour les atteintes présumées fortes, moyennes et faibles¹¹. Ces valeurs sont confrontées à l'évènementiel (blocs éboulés, phénomènes historiques) et permettent pour chacune des zones homogènes de départ de tracer les zones de propagation correspondantes.

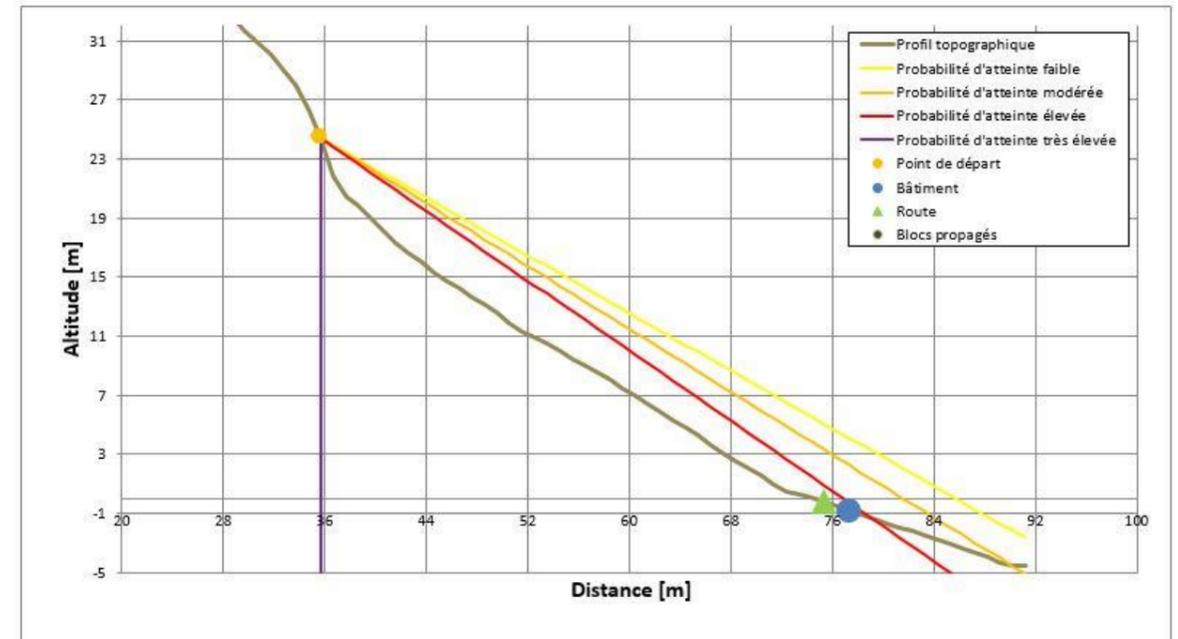


Illustration 31 - Détermination des angles d'énergie d'atteinte forte, modérée et faible (ici le point pour la route représente le ponton et celui du bâtiment un bateau au mouillage).

Un exemple de zonage de propagation est donné pour la zone homogène de départ M12 où les valeurs d'angles d'atteintes sont respectivement 41, 28 et 26° (Illustration 33).

¹¹ Cette détermination des angles par approche statistique reste ici un peu sécuritaire. En effet, dans le cas présent, la propagation rocheuse s'achèvera ici en milieu aquatique la plupart du temps et non en milieu aérien où les valeurs statistiques sont issues. Dans l'eau, les forces de frottement sont bien plus importantes que dans l'air et ralentissent beaucoup plus vite un bloc en roulement. Par contre la zone entre les pontons et le pied de versant reste peu profonde et des rebonds aériens ultimes en pied de versant restent possibles, donc en terme de risques, l'estimation reste valide (atteinte des enjeux dans tous les cas).



Illustration 32 - Zonage de propagation en rapport avec la zone homogène de départ M12.

Pour chacune des 37 zones homogènes de départ, les angles d'atteinte ont ainsi été déterminés à l'aide de nos 36 coupes et reportés dans le tableau de synthèse de caractéristiques des zones homogènes de départ (Illustration 34).

La superposition des reports des zones de propagation issues de chacune des zones de départ homogènes permet d'établir une carte des atteintes à l'échelle du périmètre étudié (Illustration 35).

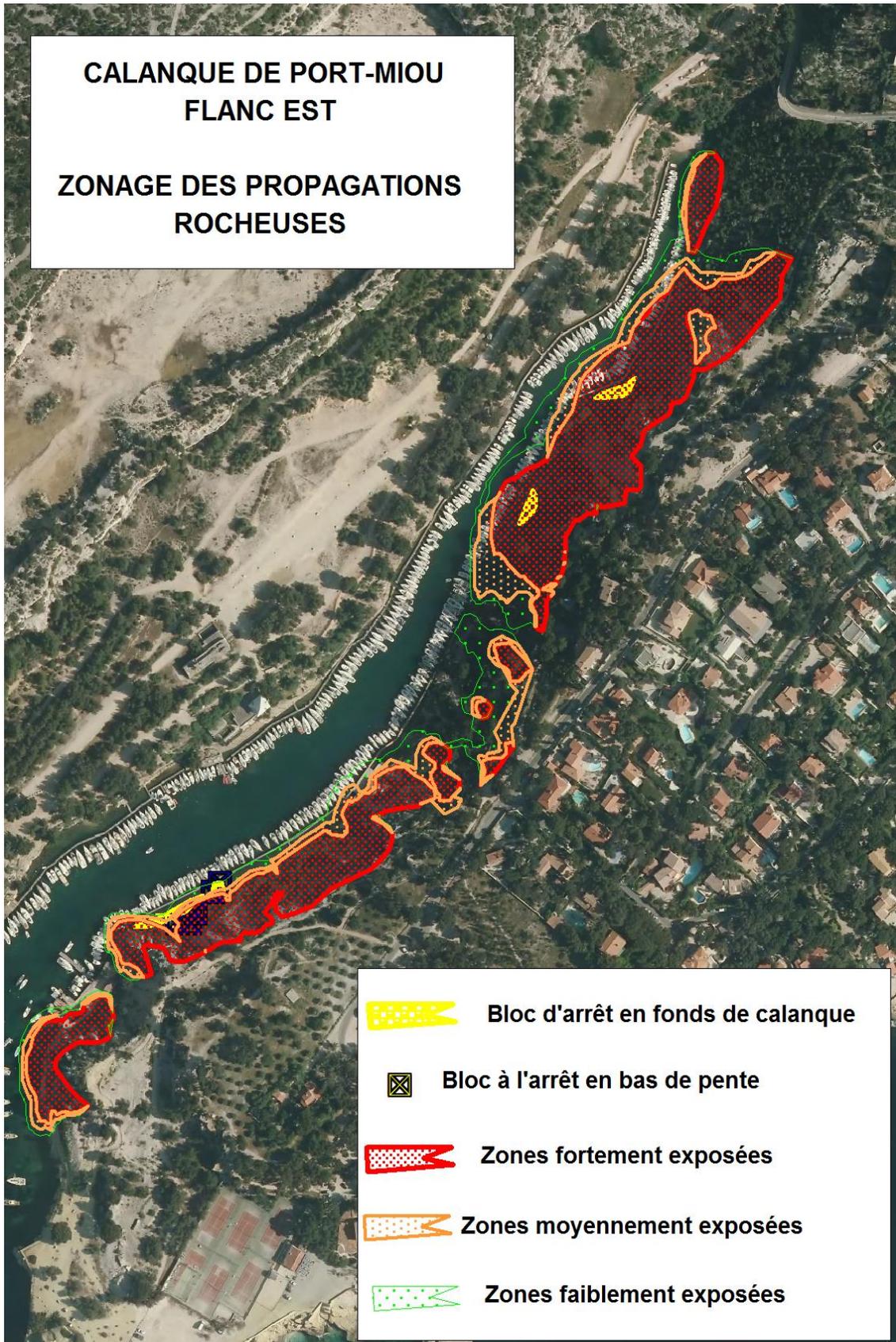


Illustration 33 - Zonage de propagation rocheuse pour l'ensemble du flanc est de la Calanque de Port-Miou.

ZH	Volume unitaire bloc 100 ans	Classe d'intensité 100 ans	Activité 100 ans	Niveau alea MEZAP	Volume unitaire bloc 20 ans	Classe d'intensité risques 20 ans	Activité 20 ans	Niveau risques bateau 10/20 ans	Niveau risques piéton 10/20 ans	Angle d'atteinte en °		
										fort	moyen	faible
M1	<1001	(très) faible	faible à moyen	faible à élevée	<1001	moyen	faible	modérée à élevée	élevée	30,5	28	26
M2	<10001	moyen	faible	modérée à élevée	sans objet	nul	nul	nul	nul	38	36	32
M3	<2501	faible	faible à moyen	faible à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	38	36	32
M4	<10001	moyen	faible à moyen	modérée à élevée	<10001	(très) élevée	faible	élevée	élevée	46	42	37
M5	<10001	moyen	faible	modérée à élevée	sans objet	nul	nul	nul	nul	41	37	32
M6	<10001	moyen	faible	modérée à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	46	40	34
M7	<1001	(très) faible	faible à moyen	faible à élevée	<1001	moyen	faible	modérée à élevée	élevée	34	30	26
M8	<2501	faible	faible à moyen	faible à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	30	28	26
M9	<2501	faible	faible à moyen	faible à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	30	28	26
M10	<2501	faible	faible à moyen	faible à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	30	28	26
M11	<10001	moyen	faible à moyen	modérée à élevée	<10001	(très) élevée	faible	élevée	élevée	46	40	31
E3	<10001	moyen	faible à moyen	modérée à élevée	<10001	(très) élevée	faible	élevée	élevée	30	28	26
M12	>10001	élevée	faible à moyen	élevée	<10001	(très) élevée	faible	élevée	élevée	44	28	26
M13	>10001	élevée	faible à moyen	élevée	<10001	(très) élevée	faible	élevée	élevée	31	28	26
M14	<2501	faible	faible à moyen	faible à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	37	29	26
E1	<10001	moyen	faible à moyen	modérée à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	30	28	26
M15	>10001	élevée	faible à moyen	élevée	>10001	(très) élevée	faible	élevée	élevée	30	28	26
Mpurge16	<10001	moyen	faible à moyen	faible à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	37	34	31
M17	>10001	élevée	faible à moyen	élevée	<10001	(très) élevée	faible	élevée	élevée	38	35	31
M18	<2501	faible	faible à moyen	faible à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	45	42	38
FF1	<2501	faible	faible à moyen	faible à élevée	<1001	moyen	faible	modérée à élevée	élevée	40	36	32
FF2	<2501	faible	faible	faible à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	44	38	34
FF3	<1001	(très) faible	faible	faible à élevée	<1001	moyen	faible	modérée à élevée	élevée	39	36	33
FF4	<2501	faible	faible à moyen	faible à élevée	<1001	moyen	faible	modérée à élevée	élevée	30	28	26
FF5	<2501	faible	faible à moyen	faible à élevée	<1001	moyen	faible	modérée à élevée	élevée	38	36	27
TRD1 (VRD)	<1001	(très) faible	faible	faible à élevée	sans objet	nul	nul	nul	nul	30	28	26
TR2	<2501	faible	faible	faible à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	41	38	33
FF6	<2501	faible	faible	faible à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	40	28	26
FF7	<10001	moyen	faible	modérée à élevée	<10001	(très) élevée	faible	élevée	élevée	34	28	26
FF8	<10001	moyen	faible	modérée à élevée	<10001	(très) élevée	faible	élevée	élevée	34	28	26
FF9	<10001	moyen	faible	modérée à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	34	28	26
F10	<10001	moyen	faible	modérée à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	45	42	39
F11	<10001	moyen	faible	modérée à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	41	38	36
F12	<10001	moyen	faible	modérée à élevée	<2501	élevée	faible	élevée	élevée	45	42	38
E2	<2501	faible	faible à moyen	faible à élevée	<1001	moyen	faible	modérée à élevée	élevée	30	28	26
E4	<501	(très) faible	faible à moyen	faible à élevée	<501	faible	faible	faible à élevée	élevée	37	33	31
E5	<501	(très) faible	faible à moyen	faible à élevée	<501	faible	faible	faible à élevée	élevée	30	28	26

Illustration 34 - Tableau de synthèse des principales caractéristiques des zones de départ (pour l'alea comme pour la suite pour les risques).

Pour déterminer les différents niveaux d'aléa puis cartographier les zonages d'aléa, il reste à spécifier d'abord dans une étape intermédiaire la probabilité d'occurrence. Celle-ci est obtenue par simple croisement de l'activité rocheuse d'une part et des probabilités d'atteinte d'autre part, comme suit (Illustration 36) :

Probabilité d'occurrence		Probabilité d'atteinte			
		Faible	Moyenne	Forte	Très Forte
Indice d'activité	Faible	Faible	Modérée	Elevée	Très Elevée
	Moyen	Modérée	Modérée	Elevée	Très Elevée
	Fort	Modérée	Elevée	Elevée	Très Elevée

Illustration 35 - Détermination des probabilités d'occurrence.

Sur les 21 zones estimées les plus actives (indice d'activité faible à moyen) évoquées en fin du sous-chapitre 3.2), les probabilités d'occurrence seront élevées en zones fortement exposées (zones d'atteinte forte) sinon modérées dans le reste de leurs zones de propagation (ellipse noire).

Pour les 16 autres zones, le niveau de probabilité d'occurrence est identique à celui de la zone d'atteinte et varie donc, de faible à élevé (ellipse verte).

Ensuite, à nouveau par simple croisement entre les probabilités d'occurrence et de l'intensité, le niveau d'aléa est directement déduit (Illustration 37).

Niveau d'aléa		Intensité				
		$V \leq 0,25 \text{ m}^3$	$0,25 < V \leq 1 \text{ m}^3$	$1 < V \leq 10 \text{ m}^3$	$V > 10 \text{ m}^3$	Phénomène de grande ampleur (écoulement turbulent)
Probabilité d'occurrence	Faible	Faible	Modéré	Elevé	Elevé	Cartographie avec un niveau d'aléa unique: très élevé (Cf 3.1)
	Modérée	Faible	Modéré	Elevé	Elevé	
	Elevée	Modéré	Elevé	Elevé	Très élevé	
	Très élevée	Elevé	Elevé	Très élevé	Très élevé	

Illustration 36 - Détermination du niveau d'aléa.

Les 16 zones d'activité faible (ellipse verte) sont avec un aléa de niveau faible ou modérée, et même parfois en niveau élevé en zones fortement exposées.

Les 21 zones d'activité faible à moyenne (ellipse noire) sont d'intensité modérée ou élevée, et même parfois en niveau faible en zones faiblement exposées.

La carte MEZAP résultant de l'aléa rocheux sur le flanc Est de la calanque de Port-Miou est donnée sur l'illustration 38.

Cette carte d'aléa rocheux (selon la nouvelle norme MEZAP en cours de généralisation nationale) est pertinente en matière d'aménagement puisque l'intensité conditionnant l'aléa élevé est définie pour des blocs de 1 m³ et plus (blocs de 2,5 tonnes) et la période de référence prise égale à 100 ans.

Pour les enjeux concernés (bateaux sur des emplacements avec renouvellement reproductible tous les 15 ans), une analyse plus fine peut être proposée en prenant comme période de référence une durée de 20 ans compatible avec les occupations et en reclassifiant les niveaux d'intensité vis-à-vis de la vulnérabilité spécifique des bateaux, plus vulnérables que des habitations.

Pour qualifier cette exposition (et celle des piétons sur le secteur), certaines adaptations sont proposées.

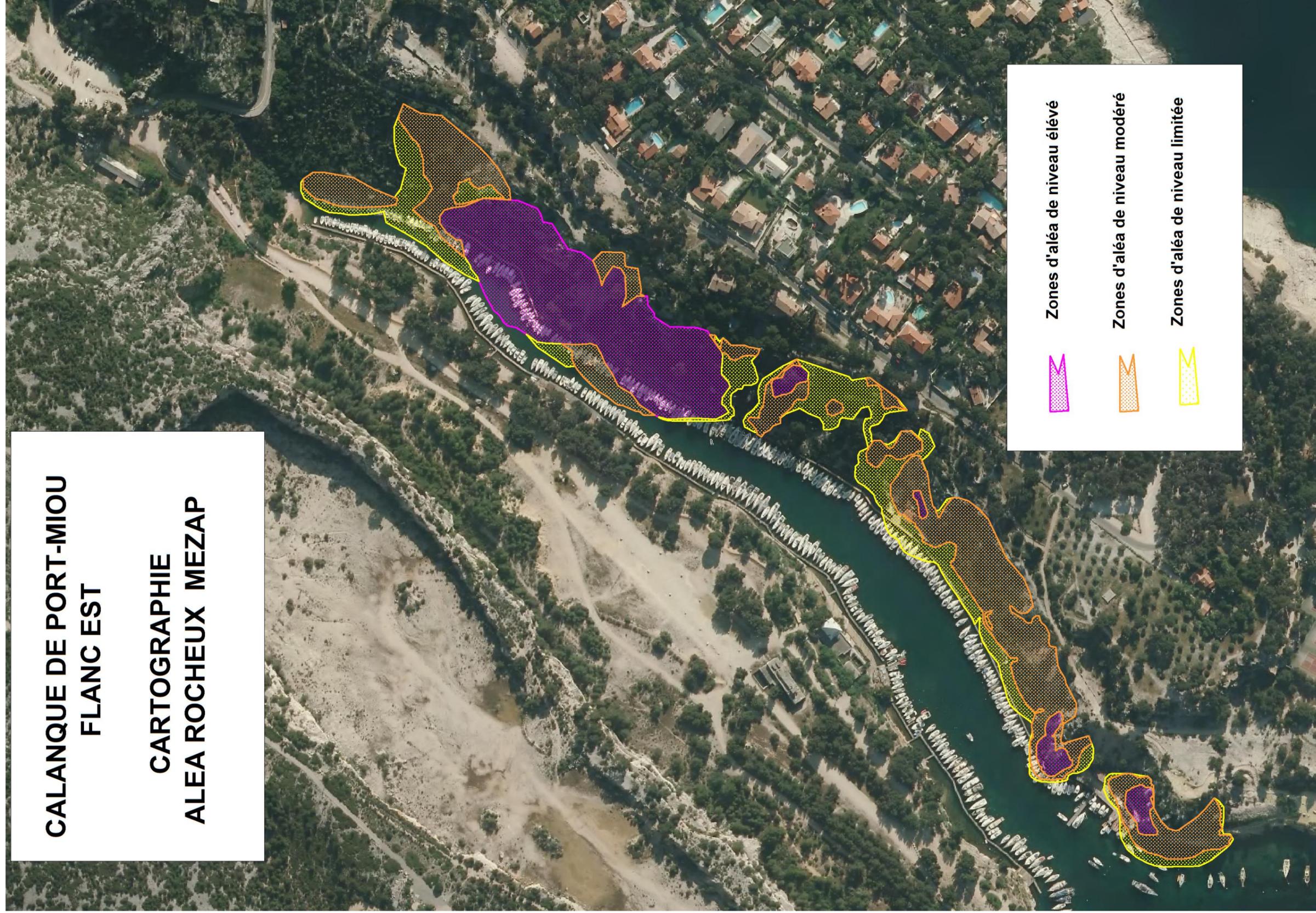


Illustration 37 - Cartographie MEZAP de l'aléa rocheux sur le flanc est de la calanque de Port-Miou.

5. Adaptation du zonage d'aléa au regard de la vulnérabilité des enjeux (approche de type « risque »)

5.1. PRISE EN COMPTE DANS LE ZONAGE D'ALÉA DU CHANGEMENT D'ÉCHELLE TEMPORELLE

Les adaptations attendues vont donc être doubles :

- changement d'échelle temporelle ;
- changement des niveaux d'intensité destructeurs (vulnérabilité des enjeux).

Pour 3 des 37 zones homogènes de départ caractérisées, l'échéance de rupture était en deçà de 100 ans mais au-delà de 20 ans (M2, M5, VRD). Leur activité devient nulle sur cette nouvelle période et plus aucun aléa n'est donc à considérer pour le renouvellement d'occupation temporaire du domaine maritime.

Pour les 34 zones homogènes de départ restantes, l'activité estimée reste au plus faible. Chacune des 34 zones homogènes de départ ont ainsi un niveau de probabilité d'occurrence en correspondance directe avec le niveau du zonage d'atteintes¹².

Ces adaptations sont reportées dans le tableau de synthèse de l'illustration 34.

5.2. PRISE EN COMPTE DANS LE ZONAGE D'ALÉA DE LA VULNÉRABILITÉ DES ENJEUX

En théorie le zonage d'aléa n'intègre pas la présence d'enjeux et leur vulnérabilité. Ceci étant l'approche MEZAP (développé pour des PPRN), dans sa définition des niveaux d'aléa fort, moyen ou faible intègre la notion d'intensité en la hiérarchisant au regard de son potentiel de destruction d'habitation. À ce titre, une adaptation de la méthode au regard des enjeux effectivement présents est proposée, une intensité qualifiée de « modérée » vis-à-vis d'une habitation (blocs de 0,5 m³, soit plus d'une tonne » doit être qualifiée de « forte » vis-à-vis d'un bateau au mouillage.

5.2.1. Enjeux bâtis

La carte d'aléa MEZAP reste la référence pour ce type d'enjeux. Seuls deux enjeux bâtis sont présents dans la zone d'étude :

- la cabane de la police municipale, non affectée par l'aléa rocheux ;
- la cabane du club nautique de Port-Miou (CNPM), affectée par un aléa fort pour sa moitié amont et par un aléa moyen sur sa moitié aval d'emprise au sol. Certains blocs (M11) présents en tête de falaise (FFR) matérialisent tout particulièrement cette potentialité d'endommagement (Illustration 14). Pour ce seul enjeu bâti, on peut donc considérer au final une unique zone de risque élevée pour l'ensemble du bâtiment.

¹² Probabilité d'occurrence élevée sur les zones de fortes exposition, modérée sur les zones de moyenne exposition et faible pour les zones faiblement exposées.

5.2.2. Enjeux bateaux

Pour les bateaux présents en situation durable, quasi permanente dans les zones de propagation rocheuses (en mouillage plus ou moins permanent), la vulnérabilité de ce types d'enjeux à un impact rocheux est sensiblement plus forte que pour les enjeux bâtis.

Il n'a pas été trouvé dans la littérature de valeurs moyennes de référence de résistance, des bateaux de plaisance à des impacts de ce type. Par analogie avec les valeurs d'impact déterminées pour les maisons d'habitation dans MEZAP et avec certaines autres valeurs de références établies et diffusées par les suisses de résistance à un impact rocheux pour diverses parois (bois, béton, béton armé), il est proposé en première estimation¹³ les ordres des grandeurs suivants d'énergie d'impact et de degré d'endommagement (Illustration 39).

Type d'enjeu	Classe faible	Classe moyenne	Classe forte
	peu de dommages	dommages conséquents	ruine
Bateau au mouillage	<7.5 kJ	> 7.5 kJ et < 15 KJ	> 35 KJ

Illustration 38 - Estimation des énergies d'impact en lien avec le degré d'endommagement pour les bateaux.

Les fichiers de ligne d'énergie qui déterminent les angles d'atteintes à partir du profil de versant, génèrent aussi tout le long du versant en propagation des profils de vitesse et d'énergie (en entrant la masse du bloc unitaire). Sur les zones de départs rocheux limités qu'aux faibles à très faible volumes (moins de 200 l environ), on a pu retenir la coupe où les énergies sont les plus importantes, puis on a regardé les variations d'énergies le long du profil de propagation rocheuse.

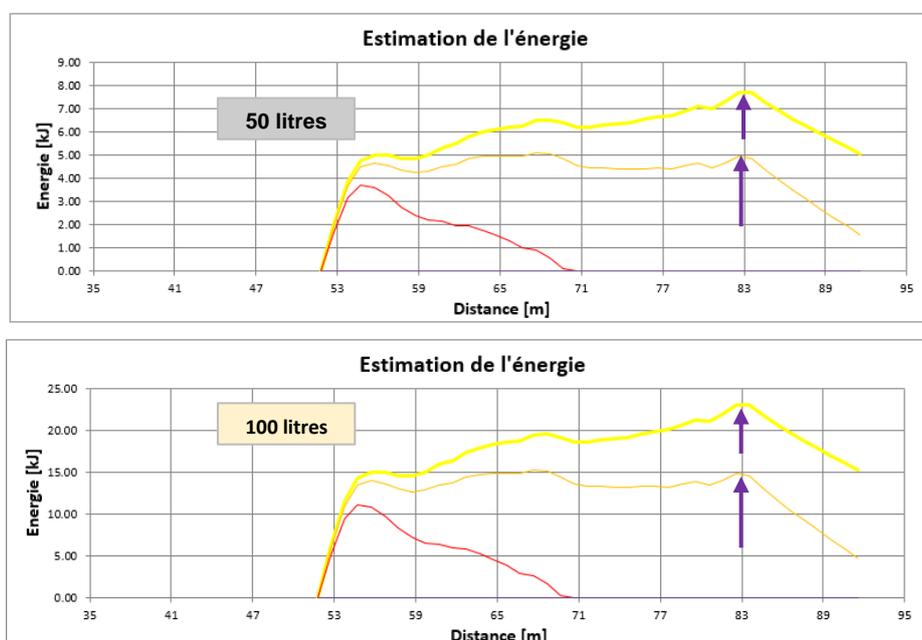


Illustration 39 - Estimation des énergies d'impact en fonction des volumes des blocs unitaires sur les zones de départs rocheux de faible à très faibles volumes.

¹³ Tout travail d'approfondissement ultérieur de l'aléa et du risque mériterait sans doute d'enquêter directement auprès de fabricants nautiques sur une valeur moyenne de résistance au choc déclarative, même approchée.

Pour les bateaux au mouillage, les seuils d'intensité pour le niveau de risque ont été retenus (dans le cas spécifique ici de la calanque de Port-Miou).

- classe faible : < 50 l ;
- classe moyenne : > 50 l et < 100 l ;
- classe élevée : > 100 l.

Les différentes zones homogènes de dépôts rocheux se répartissent donc dans les différentes classes de risque comme suit :

- classe faible (Cat 1) : 4 Zones homogènes de départ ;
- classe moyenne (Cat 2) : 9 Zones homogènes de départ ;
- classe élevée (Cat 3) : 21 zones homogènes de départ.

Pour déterminer le niveau d'aléa pour un zonage de risque pour les bateaux, il suffit alors de croiser ces classes de risques avec la probabilité d'occurrence (Illustration 41).

Zone de Risques Usage Bateaux au Mouillage		Seuils d'Intensité (Risques)				Ecrolement en masse ou grande masse (écoulement turbulent)
		V≤50 l	50 l<V≤100 l	100 l <V≤250 l	V>250 l	
		Faible	Modérée	Elevée	Très élevée	
Probabilité d'occurrence	Faible	Faible	Modéré	Elevé	Elevé	Cartographie avec un niveau de risque unique: très élevé
	Modérée	Faible	Modéré	Elevé	Elevé	
	Elevée	Modéré	Elevé	Elevé	Très élevé	
	Très élevée	Elevé	Elevé	Très élevé	Très élevé	

Illustration 40 - Évaluation du niveau d'aléa pour un zonage de risque adapté aux enjeux de type « bateaux au mouillage ».

À l'aide de ce tableau, on obtient la carte du risque rocheux suivant (Illustration 42).

5.2.3. Enjeux piétons

Pour le piéton, chacun des impacts rocheux peut avoir une issue fatale. La carte du risque piéton attribue un niveau de risque élevé sur toute la zone de propagation rocheuse retenue (Illustration 43). Cette approche sécuritaire ne prend pas en compte la fréquentation des pontons (flux de passage selon les saisons notamment).

Compte tenu des fréquentations faibles, une approche quantifiée du risque pourrait être engagée en croisant les probabilités d'atteinte de blocs et les probabilités de présence de personnes sur les pontons. Cette approche nécessite des données plus abouties sur les conditions de propagation (analyse trajectographique) et des données de flux d'occupation des pontons. Compte tenu de l'activité relativement faible et des conditions d'atteinte (présence de l'eau à un niveau plus bas que les pontons notamment) cette approche, notamment applicable pour des sentiers de randonnée exposés aux éboulements rocheux, aboutirait nécessairement à des résultats plus favorables.

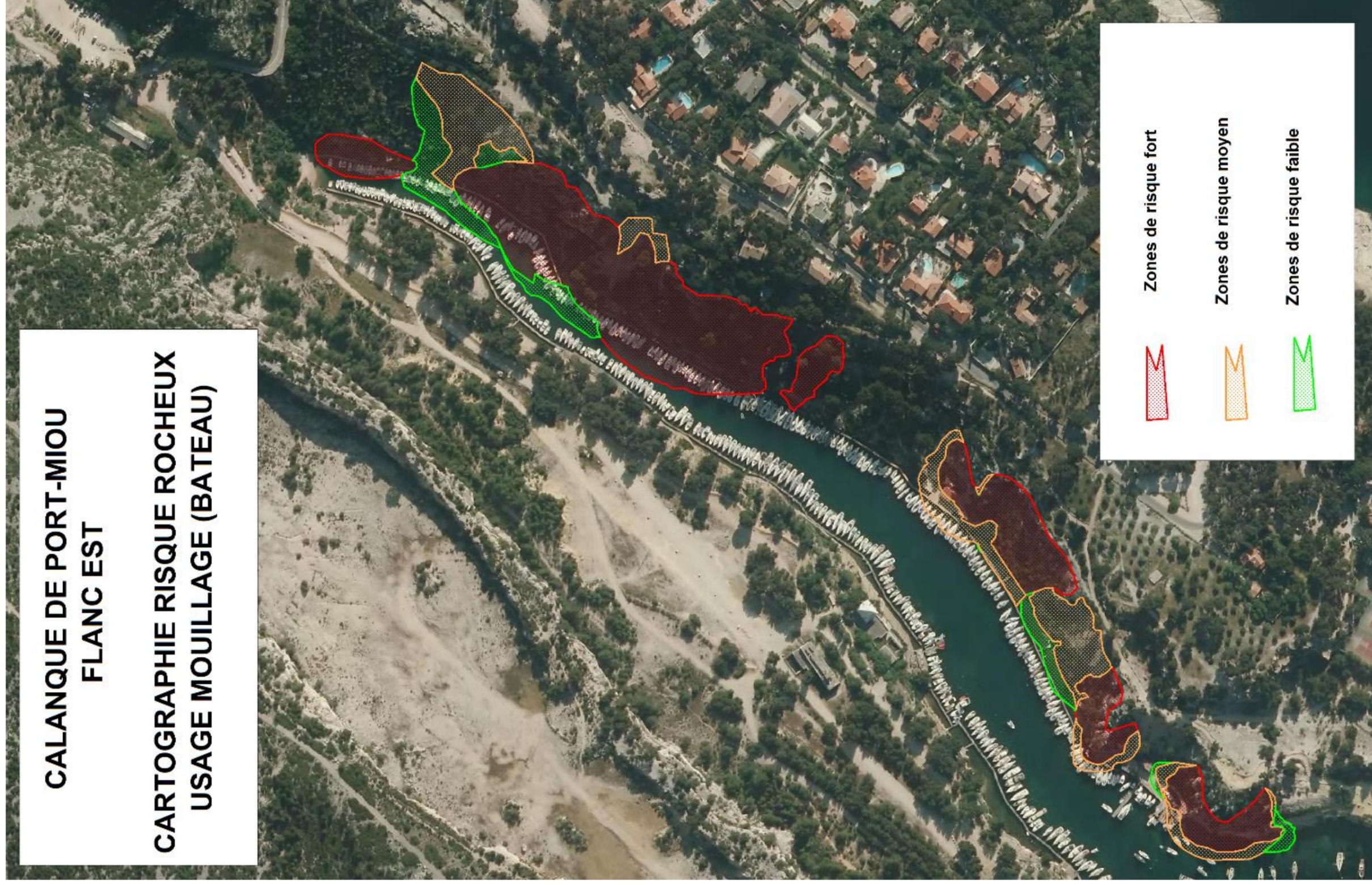


Illustration 41 - Cartographie du risque rocheux pour les bateaux au mouillage sur le flanc est de la calanque de Port-Miou à Cassis (13).

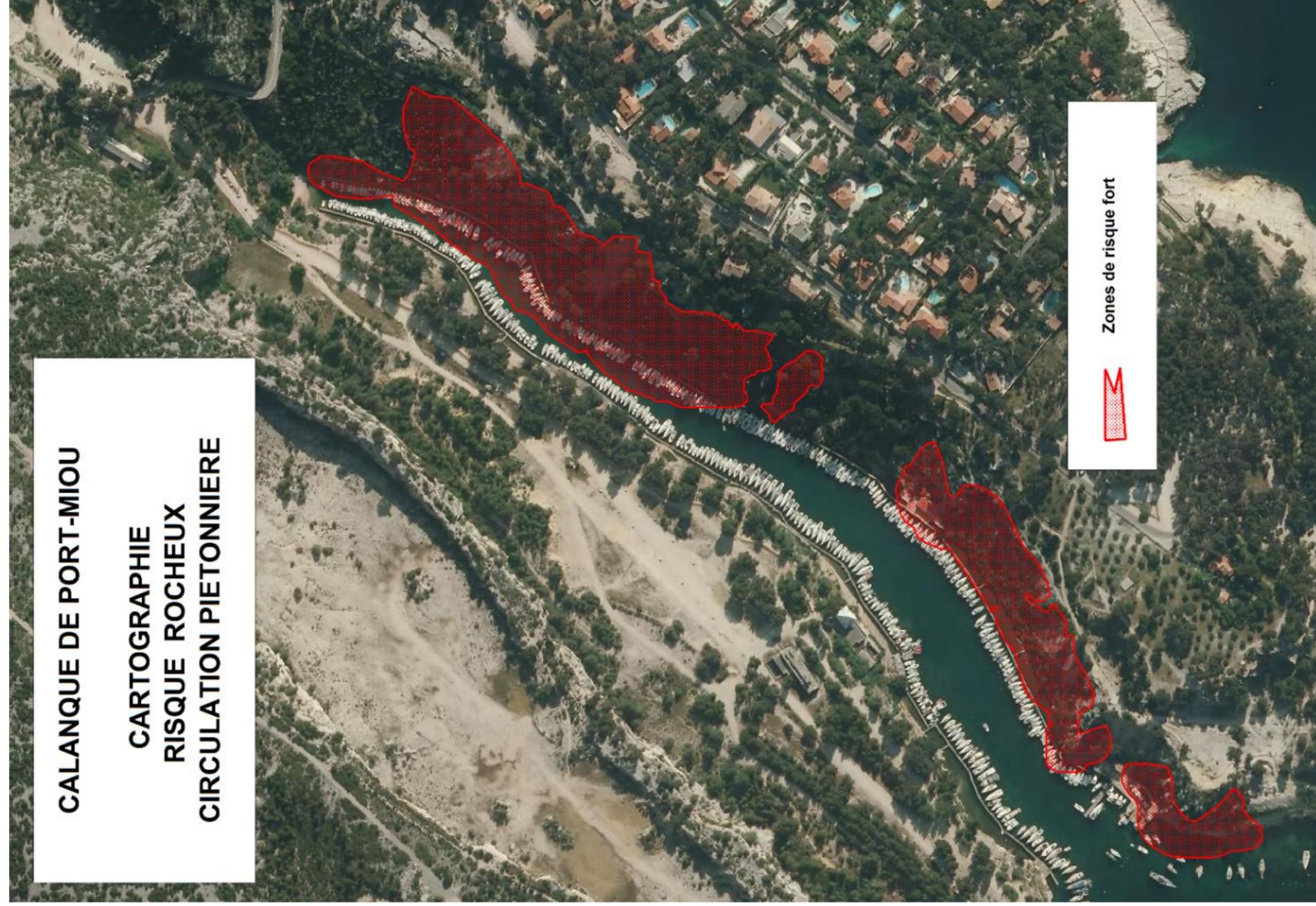


Illustration 42 - Cartographie du risque rocheux pour les piétons sur le flanc est de la calanque de Port-Miou à Cassis (13)

Le porter-à-connaissance de cette carte d'aléa rocheux et des deux cartes de risques a été fait le 17 juillet 2019, par la DDTM13 avec le soutien du BRGM, en mairie de Cassis (13) lors d'une réunion du Comité de Pilotage pour le renouvellement de l'autorisation d'Occupation Temporaire du Domaine Maritime dans la calanque de Port-Miou.

6. Conclusion

L'évaluation de l'aléa rocheux sur le flanc Est de la calanque de Port-Miou a été menée suivant la nouvelle méthode MEZAP (utilisée pour les PPRN) et adaptée au contexte local en termes d'échéance et d'intensité pour prendre en compte la vulnérabilité spécifique des enjeux.

Cette approche complémentaire adaptée à la problématique posée de décision renouvellement d'Autorisation d'Occupation Temporaire du Domaine Public Maritime (durée de 15 ans, bateaux en mouillage et la circulation piétonne sur les pontons), dans un contexte de zone exposée aux éboulements rocheux est novatrice.

En termes de problématique circulation piétonnière en fond de calanque, la cartographie du risque confirme la pertinence de l'arrêté d'interdiction de l'accès au public, avec seulement 120 m de ponton non concerné par un zonage de risque élevé (à mi-parcours).

En termes de problématique des bateaux au mouillage, 4 secteurs sont identifiés comme présentant un niveau de risque élevé :

- au droit de la zone de falaise la plus active, la plus instable *a priori* (et de plus particulièrement haute, y compris à plus de 25 m), avec un ensemble d'environ 18 emplacements de bateaux ;
- 60 m plus au sud, sur un linéaire de falaise là encore haute (20 /25 m de dénivelé), avec un ensemble d'environ de 24 emplacements de mouillage ;
- aux extrémités du mouillage et pour des hauteurs de falaises plus courtes (10 -12 m) deux zones, avec 6 emplacements au sud et 13 emplacements au nord.

Un des rares bâtiments fixes présents (Club Nautique de Port-Miou) est également concerné par du risque de niveau élevé.

Il est à rappeler qu'il s'agit là à l'échelle du site que d'un premier diagnostic de risques rocheux, basé avant tout sur une observation visuelle à distance. De plus, certains facteurs difficilement quantifiables (comme la prise en compte de la végétation) n'ont pas été pris en compte. La méthode employée reste majoritaire, sécuritaire (calée sur l'endommagement potentiel avant tout) et les niveaux obtenus restent à relativiser au vu de l'activité rocheuse basse du site. Aucun risque visible immédiat ou imminent n'a été de plus constaté visuellement.

Sur les secteurs de zones de risque élevé identifiés, il est vivement conseillé d'engager un diagnostic rocheux ponctuel plus détaillé (notamment encordé) pour confirmer la pertinence du risque et d'affiner les conditions de propagation dans ces secteurs. Cette approche permettra en outre de proposer des solutions d'aménagement adaptées, a priori parmi les suivantes :

- gel des emplacements fortement exposés (suppression des enjeux) ;
- recul de la ligne de mouillage plus en aval (déplacement des enjeux) ;
- mise en place de parades rocheuses adaptées (suppression de l'aléa ou du risque). Dans le cas ici, cela pourrait passer par des méthodes (purge, ancrages) ne laissant pas ou peu d'impact visuel conséquent sur cette zone du Parc National des Calanques.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
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 9 - France

Tél. : 04 91 17 74 77