

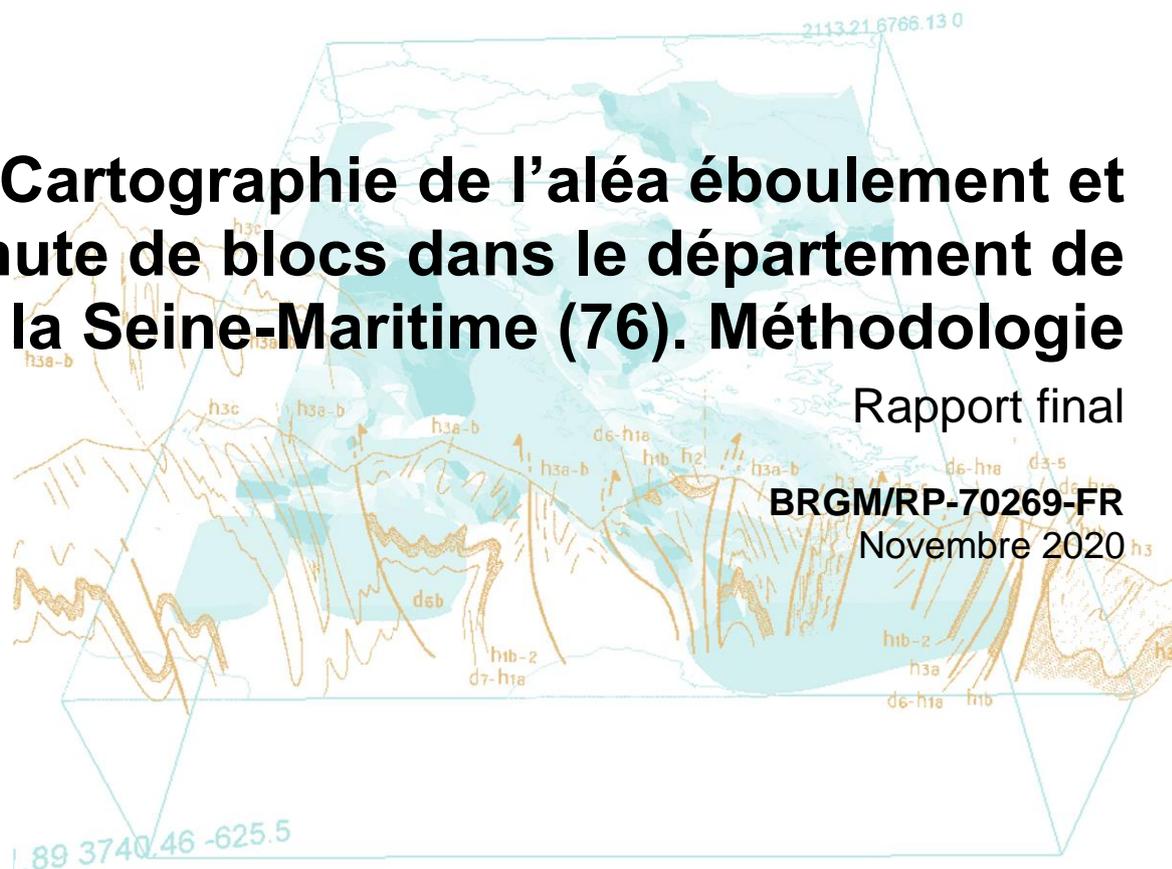
Document à
accès réservé

Cartographie de l'aléa éboulement et chute de blocs dans le département de la Seine-Maritime (76). Méthodologie

Rapport final

BRGM/RP-70269-FR

Novembre 2020



PRÉFET
DE LA SEINE-
MARITIME

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à
accès réservé

Cartographie de l'aléa éboulement et chute de blocs dans le département de la Seine-Maritime (76). Méthodologie

Rapport final

BRGM/RP-70269-FR

Novembre 2020

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

C. Myr

Avec la collaboration de
C. Plançon, L. Ridet, K. Batut, A. Hosni

Vérificateur :

Nom : C. Levy

Fonction : Ingénieure
géotechnicienne

Date : 14/12/2020

Signature :



Approbateur :

Nom : D. Pennequin

Fonction : Directeur régional
Normandie

Date : 05/01/2021

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



**PRÉFET
DE LA SEINE-
MARITIME**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès réservé

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur : la DDTM de Seine-Maritime, en 2 exemplaires conformément aux termes de la convention.

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

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

Mots-clés : Chute de blocs, éboulement, falaise, craie, aléa, cartographie, Seine-Maritime, Normandie

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

Myr C. (2020) – Cartographie de l'aléa éboulement et chute de blocs dans le département de la Seine-Maritime (76). Méthodologie. Rapport final. BRGM/RP-70269-FR, 82 p., 34 ill., 6 ann.

Synthèse

Le département de la Seine-Maritime est constitué d'un large plateau, essentiellement crayeux qui a été entaillé au cours du temps par les cours d'eau qui le traversent. Cette incision a généré des reliefs marqués, avec des vallées parfois profondes, de nombreux versants abrupts ainsi que des falaises de plusieurs dizaines de mètres de hauteur.

Ces parois crayeuses de caractéristiques géologiques, géotechniques et morphologiques spécifiques, soumises aux aléas climatiques engendrent régulièrement des instabilités. Ces instabilités se traduisent par des phénomènes de chute de pierres ou de blocs, et plus rarement par des éboulements.

Du fait de la configuration des fonds de vallées et du risque important de crue, les constructions et les espaces de vie se trouvent souvent au pied de ces versants potentiellement instables. La probabilité que des instabilités de versant impactent les zones urbanisées n'est pas à négliger.

Aussi, dans ce contexte la DDTM de Seine-Maritime a réalisé un recensement des secteurs de falaise sensibles et présentant des enjeux potentiellement exposés. Ce recensement préliminaire a identifié 75 sites à risques classés selon 5 niveaux de priorité (prioritaires, vigilance +, vigilance, vigilance -, et non prioritaires) :

- 24 sites « prioritaires » qui correspondent à environ 18 km linéaires de parois ;
- 10 sites en « vigilance + », qui correspondent à environ 6,5 km linéaires de parois ;
- 16 sites en « vigilance », qui correspondent à environ 7,4 km linéaires de parois ;
- 6 sites en « vigilance », qui correspondent à environ 1,7 km linéaires de parois ;
- 19 sites « non prioritaires », qui correspondent à environ 10 km linéaires de parois.

A la suite de ces travaux, le BRGM et la DDTM se sont accordés pour réaliser un programme de cartographie détaillée des aléas « éboulement et chute de blocs » sur l'ensemble des sites identifiés a minima comme « prioritaires » et en « vigilance ». Ce programme est prévu pour se réaliser en plusieurs phases sur plusieurs années. Dans chaque phase environ 10 km linéaires de falaises sont traités. A l'issue de chaque phase du programme, un rapport est produit et un bilan détaillé est effectué pour chaque secteur et chaque site concerné. Ce bilan comprend :

- un diagnostic de l'état actuel de la paroi au moment des visites de sites ;
- une carte de l'aléa chute de blocs et éboulement à l'échelle 1/5 000 ;
- des propositions de mise en place de parades pour la sécurisation des sites sur le long terme dans les cas d'enjeux en zone d'aléa « Fort ».

Dans le cadre de ce projet, le BRGM utilise la méthode MEZAP¹ pour élaborer les cartes d'aléa « éboulement et chute de blocs ». Cette méthode en cours de déploiement vise à uniformiser les pratiques pour la cartographie de l'aléa rocheux sur l'ensemble du territoire français. **Ce rapport expose les détails de la méthode (MEZAP) utilisée pour élaborer les cartes d'aléa « éboulement et chute de blocs ».**

¹ Méthode d'Evaluation du Zonage de l'Aléa chute de Pierres

Sommaire

1. Introduction	9
2. Contexte général	11
2.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE, CLIMATIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE.....	11
2.2. CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE	11
2.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE	12
2.3.1. Le Secondaire (terrains mésozoïques).....	13
2.3.2. Le Tertiaire (terrains cénozoïques)	14
2.3.3. Le Quaternaire.....	14
2.4. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE DETAILLE	15
2.4.1. Falaises anthropiques.....	16
2.4.2. Falaises naturelles	17
2.5. L'ALEA CHUTE DE BLOCS ET EBOULEMENT – QUELQUES RAPPELS	18
2.5.1. Terminologie	18
2.5.2. Evolution vers la rupture	19
2.5.3. Facteurs intervenant dans la chute de blocs	19
2.5.4. Typologie des ruptures	22
3. Méthodologie.....	29
3.1. METHODOLOGIE UTILISEE POUR LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA.....	29
3.2. ETAPE N°1 - RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SPECIFIQUE SUR LA PHENOMENOLOGIE DES EVENEMENTS	30
3.2.1. La Base de données Nationale des Mouvements de Terrain (BDMvt – BRGM) ...	30
3.2.2. La base de données de la DDTM de Seine-Maritime	30
3.2.3. Autres sources d'informations	31
3.3. ETAPE N°2 – DEFINITION DU(DES) SCENARIO(S) DE REFERENCE.....	34
3.4. ETAPE N°3 - EVALUATION DE L'ALEA DE DEPART	34
3.4.1. Définition de l'aléa de départ.....	34
3.4.2. Collecte des informations sur le terrain	35
3.4.3. Traitement des données	35
3.4.4. Synthèse de l'aléa de départ.....	38
3.5. ETAPE N°4 - EVALUATION DE L'ALEA DE PROPAGATION	38
3.5.1. La méthode de la « ligne d'énergie »	39

3.5.2. Trajectographie 2D, logiciel Pierre98	40
3.5.3. Choix de l'angle d'énergie final et tracé des enveloppes de propagation	41
3.5.4. Estimation de la propagation des événements de masse ($> 10 \text{ m}^3$).....	42
3.5.5. Cartographie de la probabilité d'atteinte	43
3.6. ETAPE N°5 - CARTOGRAPHIE DE L'ALEA CHUTE DE BLOCS ET EBOULEMENT ...	45
3.6.1. Probabilité d'occurrence de chute de blocs	45
3.6.2. Cartographie de l'aléa	47
3.7. ETAPE N°6 - PROPOSITION DE PARADES	49
3.8. PRISE EN COMPTE DES VERSANTS SOUS-CAVES	53
4. Conclusion	55
5. Bibliographie	57

Liste des figures

Illustration 1 : Secteurs d'étude retenus	10
Illustration 2 : Localisation du département de la Seine-Maritime	11
Illustration 3 : Localisation des différents bassins versants du département de Seine-Maritime.....	12
Illustration 4 : Carte géologique du département de Seine-Maritime au 1/250 000, réalisée à partir de la carte géologique 1/250 000 du BRGM	15
Illustration 5 : Plateaux et vallées du département de Seine-Maritime issus du MNT au pas de 50 m de l'IGN.....	16
Illustration 6 : Falaise artificielle de Duclair, qui correspond à un ancien front de taille ayant été retravaillé lors de l'installation de la route	17
Illustration 7 : Falaise naturelle en bord de Seine – Orival.....	18
Illustration 8 : Terminologie de l'aléa rocheux en fonction des volumes mobilisés (LCPC, 2004).....	18
Illustration 9 : Evolution temporelle des forces résistantes et des forces motrices pour un versant instable (Hantz, 2012)	19
Illustration 10 : Principaux processus d'évolution des compartiments rocheux, d'après LCPC (2004)	22
Illustration 11 : Schéma des principaux mécanismes de rupture (Dussauge-Peisser, 2002).....	23
Illustration 12 : Glissement plan – Secteur de Duclair	24
Illustration 13 : Surplomb – Secteur de Tancarville.....	25
Illustration 14 : Basculement de colonne – Secteur de Duclair.....	26
Illustration 15 : Rupture de colonne en pied – Secteur de Tancarville.....	27
Illustration 16 : Tableau récapitulatif des événements de type chute de blocs recensés sur la commune de Belbeuf.....	33
Illustration 17 : Indices d'intensité définis par la MEZAP (source : MEZAP).....	34
Illustration 18 : Indices d'activité définis par la MEZAP (source : MEZAP).....	35
Illustration 19 : Exemple de code nominatif pour les communes d'Orival et de Tancarville	36
Illustration 20 : Panorama annoté de la paroi rocheuse – Exemple secteur de Duclair	37
Illustration 21 : Exemple de caractérisation du scénario de référence et du scénario exceptionnel pour chaque site sur la commune de Duclair	38
Illustration 22 : Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β (Berger, 2009b).....	39
Illustration 23 : Plages de valeurs indicatives des angles géométriques pour la méthode des cônes issues de l'analyse statistique des valeurs publiées à ce jour (source : document MEZAP, version de 2014)	40
Illustration 24 : Exemple de restitution Pierre98 (brgm – cas de 20 trajectoires simulées)	41
Illustration 25 : Principe d'évaluation des enveloppes de propagation dans le cas d'événements en masse	43
Illustration 26 : Exemple de carte de probabilité d'atteinte – Secteur de Belbeuf.....	44
Illustration 27 : Définition de la probabilité d'occurrence (MEZAP)	45
Illustration 28 : Carte des probabilités d'occurrence – Secteur de Belbeuf	46
Illustration 29 : Définition du niveau d'aléa (MEZAP).....	47
Illustration 30 : Carte d'Aléa Eboulement et chute de blocs – Secteur de Belbeuf – Echelle 1 : 5 000.....	48
Illustration 31 : Tableau récapitulatif des parades passives (LCPC, 2001)	50

Illustration 32 : Tableau récapitulatif des parades actives (LCPC, 2001)	51
Illustration 33 : Photographie d'un merlon (Source : LCPC)	52
Illustration 34 : Photographie de parade active : ancrage (Vatteville (27)).....	52

Liste des annexes

Annexe 1 - Nomenclature des sites.....	59
Annexe 2 - Fiches outils Méthode des cônes.....	61
Annexe 3 - Fiche outils du logiciel Pierre98	65
Annexe 4 - Fiche d'évaluation de l'aléa de départ.....	73
Annexe 5 - Fiche de description des terrains de réception	77
Annexe 6 - Géométrie des blocs & discontinuités dans UDEC.....	79

1. Introduction

Le département de Seine-Maritime est constitué d'un large plateau, essentiellement crayeux qui a été entaillé au cours du temps par les cours d'eau qui le traversent. Cette incision a généré des reliefs marqués, avec des vallées parfois profondes, de nombreux versants abrupts ainsi que des falaises de plusieurs dizaines de mètres de hauteur.

Ces parois crayeuses de caractéristiques géologiques, géotechniques et morphologiques spécifiques, soumises aux aléas climatiques engendrent régulièrement des instabilités. Ces instabilités se traduisent par des phénomènes de chute de pierres ou de blocs, et plus rarement par des éboulements.

Du fait de la configuration des fonds de vallées et du risque important de crue, les constructions et les espaces de vie se trouvent souvent au pied de ces versants potentiellement instables. La probabilité que des instabilités de versant impactent les zones urbanisées n'est pas à négliger, pour témoin les événements récents survenus à Villequier (BRGM/RP-67197-FR), Tancarville (BRGM/RP-67621-FR), Orival (BRGM/RP-69313-FR) ou plus anciennement sur la commune de Duclair (BRGM/RP-51152-FR).

Aussi, dans ce contexte la DDTM de Seine-Maritime (DDTM76) a réalisé un recensement des secteurs de falaise sensibles et présentant des enjeux potentiellement exposés. Ce recensement préliminaire a identifié 75 secteurs à risques classés selon 5 niveaux de priorité (prioritaires, vigilance +, vigilance, vigilance -, et non prioritaires) :

- 24 secteurs « prioritaires » qui correspondent à environ 18 km linéaires de parois ;
- 10 secteurs en « vigilance + », qui correspondent à environ 6,5 km linéaires de parois ;
- 16 secteurs en « vigilance », qui correspondent à environ 7,4 km linéaires de parois ;
- 6 secteurs en « vigilance », qui correspondent à environ 1,7 km linéaires de parois ;
- 19 secteurs « non prioritaires », qui correspondent à environ 10 km linéaires de parois.

A la suite de ces travaux, le BRGM et la DDTM76 se sont entendus pour réaliser la cartographie détaillée des aléas « éboulement » et « chute de blocs » sur l'ensemble des secteurs identifiés a minima comme étant « prioritaires » et en « vigilance ». Ce programme est prévu pour se réaliser en plusieurs phases. Dans chaque phase environ 10 km linéaires de falaises sont traités. A l'issue de chaque phase du programme, un rapport est produit et un bilan détaillé est effectué pour chaque secteur et chaque site concerné. Ce bilan comprend :

- un diagnostic de l'état actuel de la paroi au moment des visites de secteurs ;
- une carte de l'aléa chute de blocs et éboulement à l'échelle 1/5 000 ;
- des propositions de mise en place de parades pour la sécurisation des secteurs sur le long terme dans les cas d'enjeux en zone d'aléa « Fort ».

L'échéancier de ce programme (phases et secteurs à traiter) à ce stade est établi comme suit :

Années	Nombre de secteurs traités et nombre de communes concernées	Communes	Priorité / Nb de secteurs
Phase 1 (2019/2020)	19 secteurs prioritaires 6 communes	Belbeuf Duclair Freneuse Orival Tancarville Villequier	Prioritaire / 1 secteurs Prioritaire / 4 secteurs Prioritaire / 2 secteurs Prioritaire / 7 secteurs Prioritaire / 1 secteurs Prioritaire / 4 secteurs
Phase 2 (2020/2021)	Fin des secteurs classés en Prioritaires et début des secteurs classés en Vigilance +		
Phase 3	Suite des secteurs classés en Vigilance +, Vigilance et Vigilance -, à définir avec la DDTM de Seine-Maritime		
Phase 4			

Illustration 1 : Secteurs d'étude retenus

Le présent rapport réalisé dans le cadre de la phase 1 du programme (années 2019/2020) présente en détail la méthodologie mise en œuvre pour aboutir à la cartographie de l'aléa « éboulement » et « chute de blocs » qui est effectuée dans chaque phase. Un rapport propre aux secteurs étudiés faisant la synthèse des résultats obtenus dans chacune des phases est réalisé par ailleurs.

2. Contexte général

2.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE, CLIMATIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

La Seine-Maritime est un département de la région Normandie, situé dans le nord-ouest de la France. Le département s'étend sur une superficie de 6278 km². Paysage de plateaux, il est situé sur la marge nord-ouest du bassin parisien et délimité au nord par le département de la Somme (80), à l'est par le département de l'Oise et au sud par ceux de l'Eure et du Calvados (Illustration 2).



Illustration 2 : Localisation du département de la Seine-Maritime

L'altitude moyenne du département de la Seine-Maritime avoisine les 100 m NGF, avec une altitude d'environ 240 m NGF pour les zones les plus élevées (notamment à l'est du département à la frontière avec la Somme et l'Oise) et une altitude proche du 0 NGF au niveau des vallées et aux abords de la Seine. Le plateau est profondément entaillé par plusieurs vallées. On notera la Seine et ses affluents s'écoulant principalement du nord vers le sud, la Bresle, la Béthune, la Scie, la Saône, la Durdent qui coulent essentiellement du sud vers le nord où le département est bordé par la Manche (Illustration 3). La vallée de Seine marque la frontière avec le département de l'Eure.

Le département connaît un climat océanique. Les vents dominants proviennent de l'ouest. La pluviométrie annuelle moyenne est d'environ 800 mm par an.

2.2. CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Le département est marqué par un réseau hydrographique peu dense, une partie des écoulements se déroulent en milieu souterrain du fait de l'activité karstique intense (Illustration 3).

Dans le détail, on distingue d'ouest en est (soit vers le centre du Bassin parisien) et de bas en haut (du plus ancien au plus récent), les terrains suivants :

2.3.1. Le Secondaire (terrains mésozoïques)

Le Jurassique supérieur

Les terrains du Jurassique supérieur affleurent, dans le département de Seine-Maritime, uniquement dans le secteur de la « boutonnière du Pays de Bray ». Il s'agit d'un pli anticlinal érodé, laissant apparaître les terrains sous-jacents au Crétacé. La Boutonnière du Pays de Bray a une orientation nord-est/sud-ouest, elle s'étend sur environ 60 km de Beauvais à Dieppe et a une largeur de 2 à 20 km. Elle est délimitée par une cuesta festonnée composée de matériaux du Crétacé supérieur et laisse affleurer les argiles et calcaires du Kimméridgien (j8), et des argiles et sables du Portlandien (j9).

Le Crétacé inférieur

En bordure de la Boutonnière du Pays de Bray on retrouve les terrains datés du Crétacé inférieur, à savoir les formations sablo-argileuses du Wealdien (n₁₋₃), les argiles panachées du Barrémien ainsi que les sables verts de l'Albien inférieur (n_{7a}) et les argiles du Gault de l'Albien moyen (n_{7b}). L'Albien se termine par un niveau de gaize (n_{7c-d}), composée de marnes silteuses, parfois glauconieuses (Couëffé et Arnaud, 2007).

Le Crétacé supérieur

Le substratum de la majeure partie des plateaux de Seine-Maritime est constitué par la puissante série des faciès crayeux du Crétacé supérieur (Cénomaniens – Turonien – Coniacien – Santonien – Campanien), traditionnellement découpés en trois groupes : une craie glauconieuse et sableuse jusqu'au Cénomaniens moyen, une craie grise argileuse jusqu'au Turonien moyen et une craie blanche à silex jusqu'à la fin du Crétacé supérieur (Lasseur, 2007).

Le Cénomaniens (c₁₋₂) en Seine-Maritime est classiquement représenté par deux faciès (par ordre stratigraphique) :

- *la Craie glauconieuse*, caractérisée par une craie grise glauconieuse à cordons de silex à la base, dont la proportion en glauconie se réduit vers le haut de la série ;
- *la Craie de Rouen* : craie de texture plus fine pouvant contenir des cordons de silex et quelques niveaux glauconieux.

Les faciès du Turonien (c₃) sont globalement caractérisés par une craie gris blanchâtre à grise, marneuse, noduleuse, généralement pauvre en silex. La teneur en argile peut atteindre 10 à 20%, notamment dans sa partie inférieure.

Les craies sénoniennes (Coniacien (c₄) – Santonien (c₅) – Campanien (c₆)) correspondent à des craies plus massives, blanchâtres à jaunâtres, notamment dans le Coniacien où elles sont parfois dolomitisées. A l'affleurement, les craies sénoniennes sont marquées par de nombreuses diaclases verticales, selon une maille décimétrique (LCPC, 1969). Généralement, ce sont ces formations qui constituent les abrupts et les escarpements situés sur les versants.

Cette unité crayeuse, qui peut atteindre plus de 150 m de puissance, repose sur les faciès détritiques du Crétacé inférieur par l'intermédiaire d'une surface d'érosion.

Malgré la prédominance de la craie dans le département, les affleurements sont relativement peu nombreux, et n'apparaissent qu'au niveau des ruptures de pentes localisées sur les versants des vallées. En effet :

- sur les plateaux, les formations crayeuses sont recouvertes par :
 - o une couche plus ou moins épaisse d'altérites à silex, sub-autochtones (les Formations Résiduelles à silex, RS), formées par décarbonatation de la craie ou/et ;
 - o des dépôts tertiaires ou/et ;
 - o des formations à dominante limoneuse (les Limons des Plateaux, LP)
- en fond de vallée, les formations mésozoïques sont recouvertes par les complexes alluvionnaires (Fx-y).

2.3.2. Le Tertiaire (terrains cénozoïques)

Le Tertiaire affleure à l'ouest de la boutonnière du Pays de Bray, sur le plateau découpé par la vallée de la Varenne et par la vallée de la Scie, ainsi que sur la frange littorale dans le secteur de Dieppe/Pourville-sur-mer.

L'Eocène

Le Thanétien (e_2) correspond à la base du Tertiaire dans la région. Son extension géographique est limitée, en Seine-Maritime à la région de Dieppe – Quiberville, à l'arrière-pays de St-Valery-en-Caux et localement sur le plateau découpé par les vallées de la Varenne et de la Scie. Ce sont des calcaires lacustres qui passent ensuite à des sables à silex.

Le Sparnacien (e_3) fait suite au Thanétien. Il est représenté par deux faciès, à savoir les sables et argiles à Ostracodes et Mollusques puis les argiles à lignite.

Le Cuisien (e_4) composé d'argiles glauconieuses calcaires, de couleur gris verdâtre, d'une alternance d'argiles et sablons verdâtres et de sables fauves quartzeux.

2.3.3. Le Quaternaire

L'ensemble de ces formations a subi les glaciations successives du Quaternaire. Les plateaux ont été recouverts par des lœss (dépôts éoliens, LP) pendant les périodes froides et les vallées ont été creusées par les rivières, à l'origine des dépôts alluviaux qui forment les terrasses fluviales successives (complexe alluvionnaire Fx-y-z). Lors des périodes de réchauffement, les limons ont été remaniés pour être colluvionnés dans les vallées (CV). Le Quaternaire a façonné le paysage jusqu'à son apparence actuelle.

Carte géologique au 1/250 000 du département de Seine-Maritime

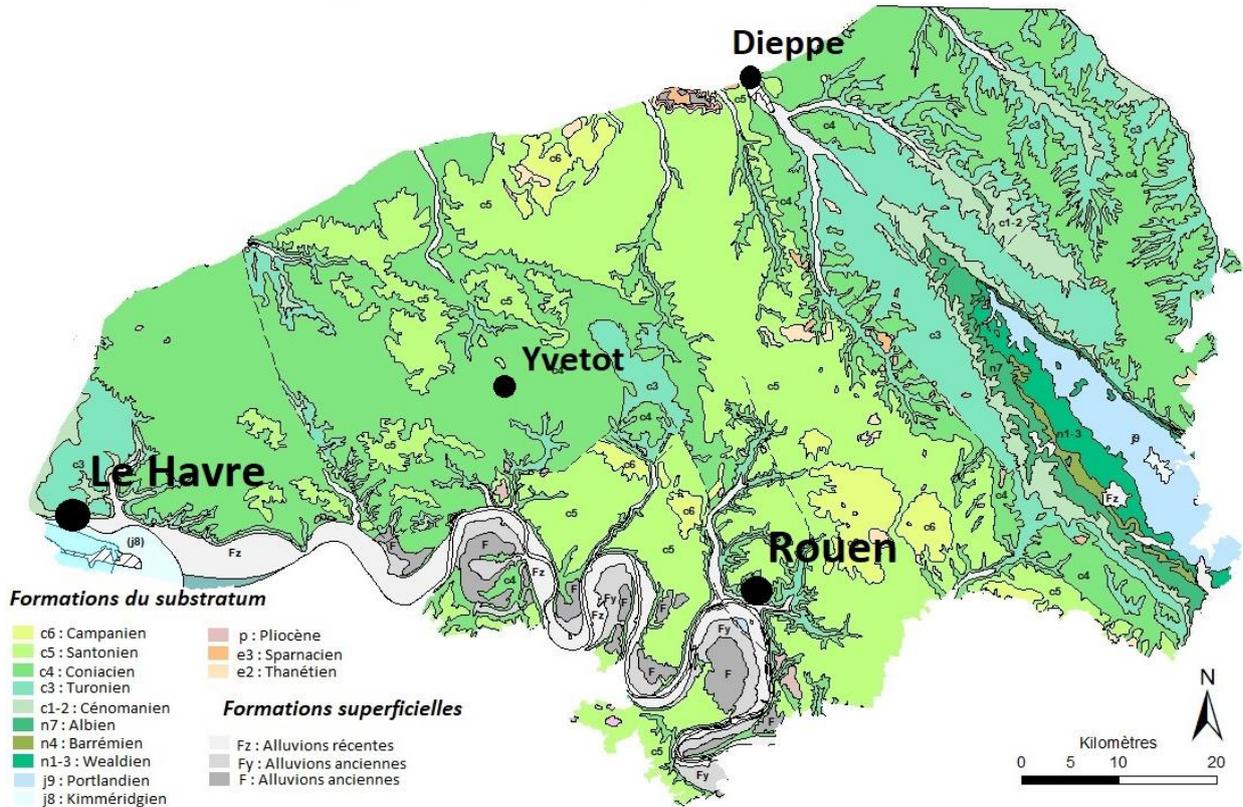


Illustration 4 : Carte géologique du département de Seine-Maritime au 1/250 000, réalisée à partir de la carte géologique 1/250 000 du BRGM

2.4. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE DETAILLE

L'altitude moyenne du département de la Seine-Maritime avoisine les 100 m NGF, avec une altitude d'environ 240 m NGF pour les zones les plus élevées (notamment à l'est du département à la frontière avec la Somme et l'Oise) et une altitude proche du 0 NGF au niveau des vallées et aux abords de la Seine (Illustration 5). Le plateau est profondément entaillé par plusieurs vallées. On notera la Seine et ses affluents s'écoulant principalement du nord vers le sud, la Bresle, la Béthune, la Scie, la Sâne, la Durdent qui coulent essentiellement du sud vers le nord où le département est bordé par la Manche. La vallée de Seine marque la frontière avec le département de l'Eure.

**Carte d'altitude réalisée avec les données MNT du département de Seine-Maritime (76)
au pas de 50 m**

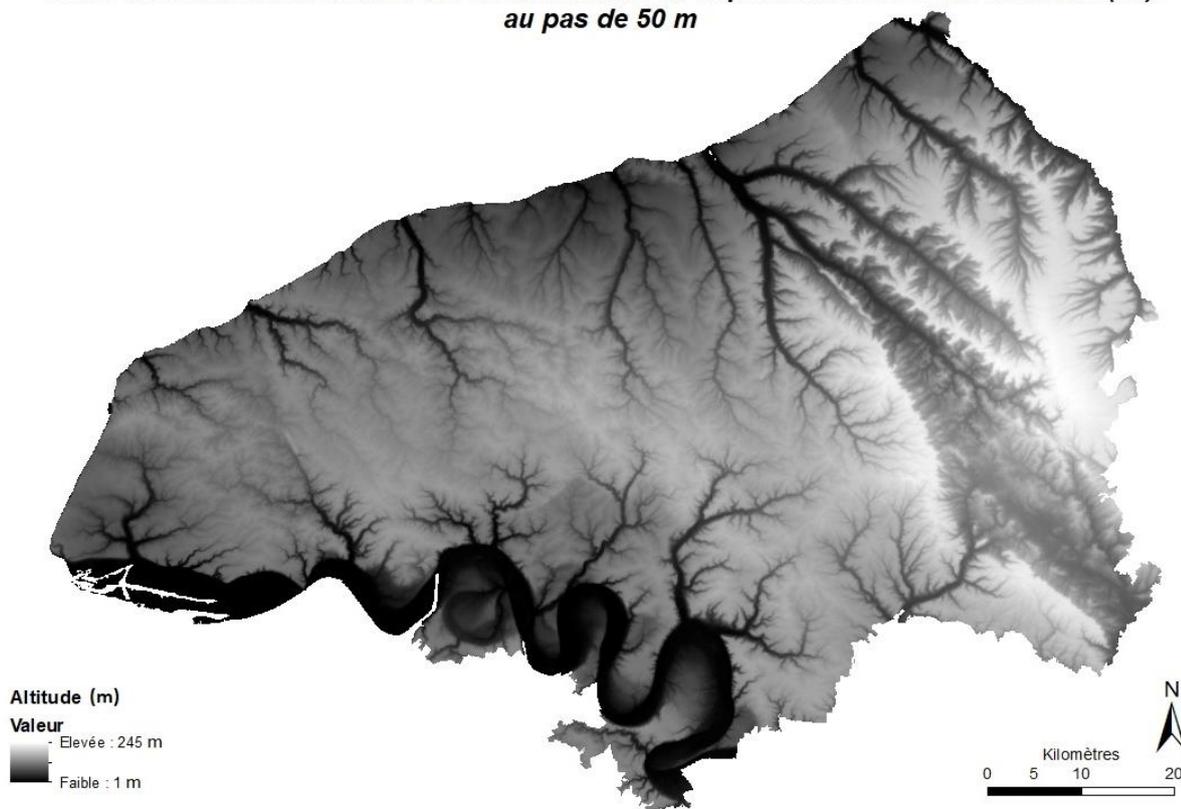


Illustration 5 : Plateaux et vallées du département de Seine-Maritime issus du MNT au pas de 50 m de l'IGN

Les sites étudiés peuvent être divisés en deux catégories :

- les falaises artificielles (ou anthropiques), qui sont des falaises façonnées par l'Homme et qui correspondent à d'anciens fronts de taille d'exploitation à ciel ouvert ;
- les falaises naturelles, sculptées par l'érosion.

2.4.1. Falaises anthropiques

Les falaises anthropiques correspondent majoritairement à d'anciens fronts de taille d'exploitations à ciel ouvert (Illustration 6). Il s'agissait essentiellement d'exploitations de chaux qui servait notamment dans la construction ou pour l'amendement des terres agricoles. Dans les départements de Seine-Maritime et de l'Eure, certaines carrières ont ainsi été exploitées jusque dans les années 1960.

Les falaises et abrupts ainsi formés sont qualifiés de « jeunes », nouvellement formées à l'échelle des temps géologiques par des processus destructifs et brutaux. De fait, contrairement aux falaises naturelles façonnées par les cours d'eau depuis des temps immémoriaux, les falaises anthropiques sont sujettes à un rééquilibrage actif à l'origine, dans la plupart des cas, de nombreuses chutes de pierres, de blocs voire d'éboulements (exemple les événements de Villequier 2017, et de Tancarville 2018).

En pied de falaise, les terrains de réception² sont généralement plats. Cette morphologie plane facilitait l'exploitation des fronts de taille ainsi que le transport des matériaux. Des entrées de cavités souterraines sont parfois visibles en pied.



Illustration 6 : Falaise artificielle de Duclair, qui correspond à un ancien front de taille ayant été retravaillé lors de l'installation de la route

2.4.2. Falaises naturelles

Les falaises naturelles sont issues de l'érosion des coteaux par les cours d'eau durant le Quaternaire (Illustration 7). Il s'agit donc de reliefs assez récents à l'échelle géologique créés lors de la dernière période glaciaire. Bien que qualifiés d'« anciens » au regard des falaises anthropiques, ces reliefs sont encore considérés comme évolutifs. A ce titre, des chutes de blocs et/ou éboulements peuvent se produire, ponctuellement en fonction des événements climatiques.

Contrairement aux falaises artificielles, les terrains de réception sont des versants pentés qui traduisent l'accumulation d'éboulements successifs au cours des temps géologiques. Les pentes peuvent être fortes (généralement plus de 20°) sur plusieurs centaines de mètres jusqu'à la Seine. Ces « pieds de falaise » ont été façonnés de manière naturelle par érosion des terrains meubles sous-jacents à la craie mais également par le dépôt des éboulements passés.

² Terrains en pied de falaise servant de zones de réception pour les blocs chutés de la paroi

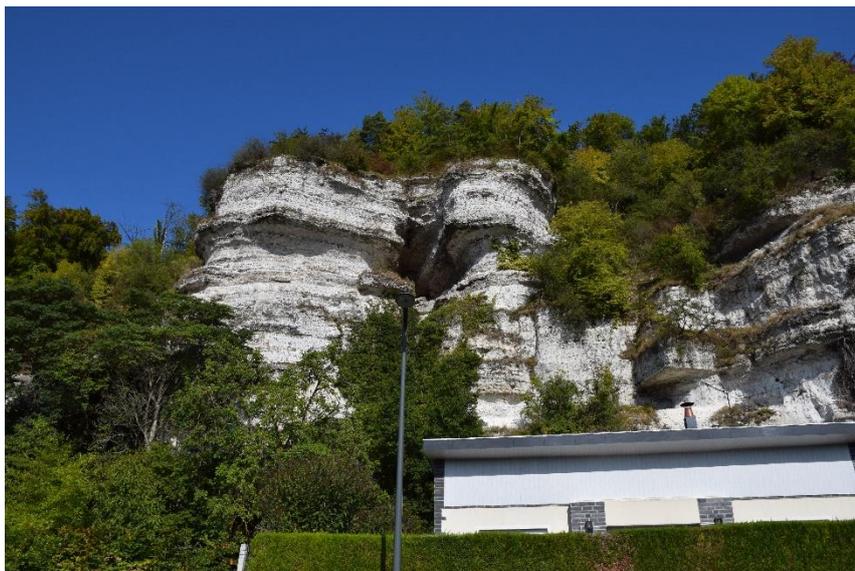


Illustration 7 : Falaise naturelle en bord de Seine – Orival

2.5. L'ALEA CHUTE DE BLOCS ET EBOULEMENT – QUELQUES RAPPELS

2.5.1. Terminologie

Les chutes de blocs, de pierres, les éboulements ou les écroulements sont des mouvements gravitaires avec une cinétique rapide (rupture généralement brutale et propagation à vitesse élevée). Ces mouvements sont toujours liés à une situation de déséquilibre gravitaire entraînant un réajustement. Les phénomènes sont décrits au regard des volumes mobilisés. Une classification admise (LCPC, 2004) est la suivante :

Écroulement en grande masse	Écroulement en masse	Chute de bloc	Chutes de pierres
10^4 m^3	$10^4 \text{ à } 10^2 \text{ m}^3$	$10^2 \text{ à } 0.1 \text{ m}^3$	$< 0.1 \text{ m}^3$

Illustration 8 : Terminologie de l'aléa rocheux en fonction des volumes mobilisés (LCPC, 2004)

Il faudrait également distinguer volume unitaire et volume total mobilisé pour définir une nomenclature complète. Ce travail est en cours dans le cadre du groupe de travail MEZAP³ piloté par le Ministère de l'Ecologie et de la Transition Solidaire (METS). Les chutes de pierres ou de masses rocheuses de petite taille se produisent sous l'action de la gravité et de l'altération d'une paroi rocheuse par différents agents d'érosion. Les chutes régulières de pierres mènent à la formation d'éboulis (accumulations de matériel détaché de l'abrupt en amont).

Les chutes de blocs correspondent à un mécanisme gravitaire se manifestant de manière rapide et brutale, et qui affecte des matériaux rigides et fracturés. Il concerne principalement les affleurements rocheux, souvent redressés, voire subverticaux. Les éléments éboulés sont des

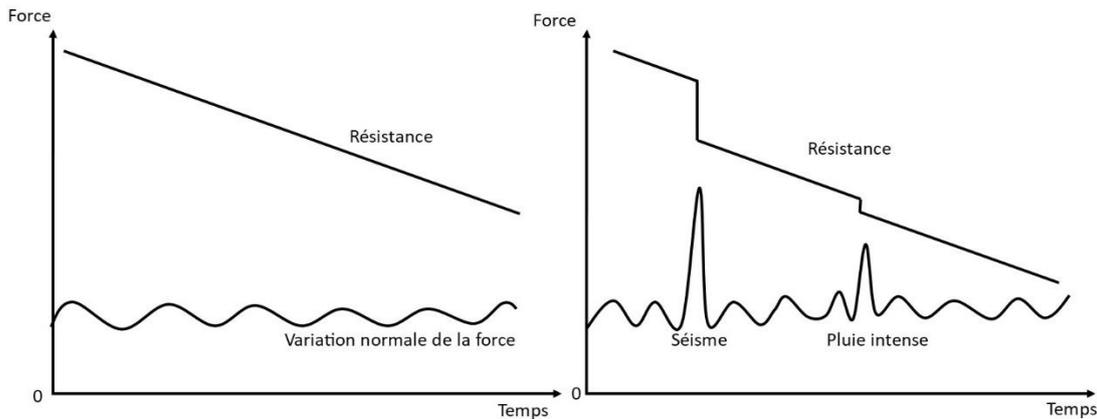
³ Méthode d'Evaluation du Zonage de l'Aléa chute de Pierres

blocs rocheux de volumes variables pouvant se propager en pied de falaise. Le volume de l'éboulement ne dépasse généralement pas quelques dizaines de m³ (Vincent et al., 2001).

Les écroulements en masse (aussi nommés éboulements en masse) et les écroulements en grande masse, concernent des volumes totaux importants pouvant représenter jusqu'à plusieurs millions de mètres-cubes de matériel. La distinction entre ces deux phénomènes se base globalement sur le volume mobilisé (éboulement en masse -ou écroulement en masse- quand le volume éboulé est compris entre 100 m³ et 10 000 m³, écroulement en grande masse au-delà de 10 000 m³) mais également sur les modes de propagation (forte interaction entre blocs pour les écroulements en grande masse).

2.5.2. Evolution vers la rupture

L'évolution progressive d'un compartiment rocheux jusqu'à sa rupture peut être exprimée par le rapport entre les forces résistantes qui s'opposent au mouvement (résistance à la rupture des matériaux, friction, etc.) et les forces motrices qui participent à la mise en mouvement (gravité, séismes, effets de la pression interstitielle, etc.). Sans intervention humaine, les forces de résistance diminuent au cours du temps sous l'influence progressive et/ou brutale de facteurs externes (lessivage des matériaux de remplissage d'une fissure avec la pluie, endommagement brutal de la roche sous sollicitation sismique, gel d'eau favorisant l'expansion d'une fissure, etc.). La stabilité du versant perdure tant que les forces résistantes sont supérieures aux forces motrices. Dès qu'elles deviennent plus faibles, passant en-dessous du seuil de stabilité, la masse concernée décroche de son support et se met en mouvement.



Cas A : conditions environnementales normales

Cas B : Diminution significative de la résistance en fonction d'événements exceptionnels

Illustration 9 : Evolution temporelle des forces résistantes et des forces motrices pour un versant instable (Hantz, 2012)

(Cas A. les augmentations ponctuelles des forces motrices (événements type gel, séismes, pluie, etc.) n'ont pas entraîné une diminution immédiate des forces résistantes de la force motrice = facteur déclenchant non dégradant. Cas B : augmentation de force motrice = facteur déclenchant et dégradant)

2.5.3. Facteurs intervenant dans la chute de blocs

Chaque mouvement de terrain résulte du rééquilibrage gravitaire d'un versant. Les versants présentant une prédisposition au déséquilibre ont une pente généralement forte. Des périodes

de stabilité provisoires, plus ou moins longues, séparent les périodes brèves de déséquilibre. Le déclenchement d'un mouvement de terrain est toujours lié à une situation de déséquilibre gravitaire entraînant un réajustement.

Pour les éboulements, on identifie rarement un facteur de déclenchement unique. C'est généralement la répétition des sollicitations dans le temps (mise en charge par les eaux souterraines, cycles gel/dégel, etc.) qui permet la fatigue du matériau et une évolution vers la rupture. On présente généralement les facteurs de prédispositions en deux catégories : 1) les facteurs intrinsèques au massif rocheux (résistance de la roche, familles de fractures, relief, etc.) et 2) les facteurs environnementaux (gel, pluie, séismes...). On désigne, lorsqu'on l'identifie, l'ultime sollicitation qui permet la rupture sous le terme de facteur déclenchant.

On distingue les facteurs environnementaux qui induisent une évolution lente des forces résistantes (sollicitations cycliques du vent, de la houle, de la température, etc.), des facteurs qui provoquent une diminution soudaine des forces résistantes (tempête, séismes, etc.).

Les facteurs de prédisposition intrinsèques au massif rocheux

La première condition est l'existence de blocs au sein d'un massif fracturé. Il y a par ailleurs des facteurs favorables à la mobilisation des blocs (*Marcot et Girard, 2013*) :

- **Une topographie⁴** en falaise ou l'existence de reliefs rocheux fissurés. Elle conditionne l'essentiel de la fréquence des chutes de blocs. Les bassins sédimentaires présentent des mouvements de terrains liés le plus souvent à des conditions géomorphologiques, lithologiques ou anthropiques locales tels que l'encaissement du réseau hydrographique dans la craie (vallées de la Seine, de l'Eure, de l'Iton, etc.).
- **La géologie :**
 - o La lithologie⁵. Elle contribue au déséquilibre gravitaire à l'origine des mouvements de terrains. Certains calcaires fissurés forment des surplombs instables qui peuvent se détacher de leur support et s'écrouler brutalement. Dans le cas des alternances marne-calcaire, ces deux types de matériaux ne s'érodent pas de la même façon et cela entraîne un recul de la paroi au niveau des marnes. Cela prend la forme de sous-cavages (aussi appelés abris sous-roche) dominés par un surplomb calcaire.
 - o La structure (la fracturation, le pendage, la présence de joints de stratification, de plis, de schistosité qui constituent des zones de faiblesse dans un massif).

Les facteurs de prédisposition environnementaux

La mise en mouvement des blocs est liée à un changement des conditions de stabilité qui peut avoir plusieurs origines, combinées ou non. Ainsi, les facteurs environnementaux favorisant le déclenchement d'un événement sont nombreux.

Le climat joue un rôle important dans le déséquilibre des versants, surimposant son action aux autres causes potentielles. Il influence la stabilité des versants par ses composantes hydriques et thermiques et mécaniques et leurs conséquences sur les propriétés mécaniques des sols.

⁴ Se dit de la disposition ou du relief d'un lieu

⁵ Nature des roches d'une formation géologique

- Influence de la température : la cryoclastie (alternance de phases de gel/dégel) est le facteur climatique principal dans la chute de blocs, au moins pour ce qui concerne l'occurrence des phénomènes les moins intenses. L'eau passe de l'état liquide à celui de solide avec une augmentation de volume de 9%. Elle entraîne ainsi l'éclatement de la roche et crée de nouvelles fissures. Par ailleurs, les fortes variations de température modifient l'état de contrainte du massif et favorisent la propagation des fissures ;
- Influence de l'eau : l'infiltration d'eau dans un terrain (pluies, fontes des neiges, crues de cours d'eau à proximité, etc.) a des conséquences sur la cohésion du matériel. Elle entraîne une diminution de la résistance au cisaillement. Avec une importante présence d'eau, des surpressions peuvent se produire sous des blocs ou sous le terrain lui-même. L'alternance de périodes pluvieuses et sèches constitue un agent climatique déterminant sur les déséquilibres des versants ;
- Influence du vent et de la houle : le vent et la houle provoquent une sollicitation mécanique du versant qui entraîne une dégradation des propriétés mécaniques de la roche.

D'autres facteurs naturels influencent la stabilité des versants :

- La sismicité/ les vibrations ;
- La modification de la répartition des masses par érosion en pied de versant par une rivière par exemple ou par surcharge en haut d'une pente (*Société Suisse de Géomorphologie, 2009*) ;
- La croissance de la végétation. La croissance des racines des arbres insinuées dans les fissures participe activement à l'augmentation de taille de ces dernières. De plus, à la mort des arbres, les passages des racines ainsi libérées constituent des lieux de circulation préférentielle des eaux de ruissellement qui continuent d'agrandir les fissures par dissolution de la roche. Enfin, lorsque le couvert végétal est très dense, le poids est plus important, ce qui augmente les forces motrices.

Enfin, outre les différents facteurs de déséquilibre naturels précédemment examinés, il y a lieu de signaler que l'homme est un puissant agent de déstabilisation des versants par les aménagements qu'il leur impose : déblais ou remblais, fondations de maisons, réduction de l'emprise forestière, modification des écoulements de surface et sub-surface...

Processus	Agents	Effets	Dynamique
Action physico-chimique et dissolution	Eau Cycle hydroclimatiques Acides humiques	Altération matricielle Destruction de ponts rocheux Altération des caractéristiques mécaniques	Lente et souvent masquée
Dislocation	Effets gravitaires Racines Fluage d'une assise Gel, faible profondeur	Destruction mécanique des ponts rocheux Ouverture de fissuration	Lente sous nos latitudes

Erosion mécanique, mise en surplomb	Écoulement d'eau Abrasion Erosion éolienne	Mise en équilibre par suppression d'appui Perte de cohésion	Variable, peut être rapide
Action mécanique de l'eau (pression hydraulique)	Infiltrations Circulations internes du massif	Déstabilisation par des poussées hydrauliques	Variable, peut être rapide, cyclique
Gélifraction	Gel	Réduction des surfaces d'appui par ablation Décohésion et dislocation des fractures	Lente
Fatigue mécanique	Sollicitation physique et niveau de contraintes élevées	Ecaillage, dégradation mécanique des ponts rocheux Progression des fissures	Rarement processus significatif à l'échelle humaine, sauf contextes extrêmes
Application de forces extrêmes	Variation d'effort Déstabilisation anthropique Modification des conditions hydrauliques Séismes	Déstabilisation, activation de nouveaux mécanismes de rupture	Variable, éventuellement rapide Peut être accidentel

Illustration 10 : Principaux processus d'évolution des compartiments rocheux, d'après LCPC (2004)

2.5.4. Typologie des ruptures

Les observations sur le terrain et l'analyse des événements passés mettent en évidence différents mécanismes de rupture (Illustration 11).

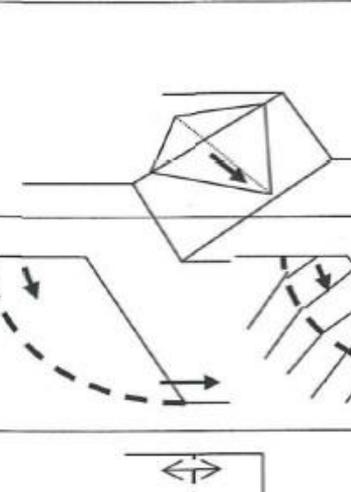
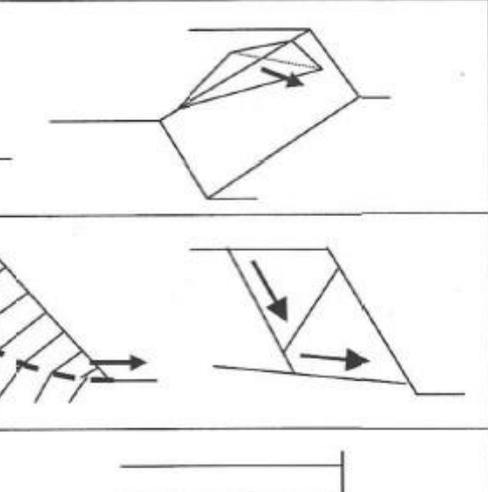
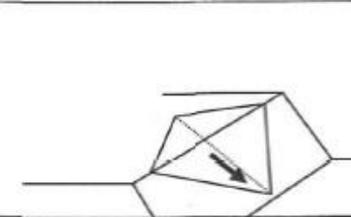
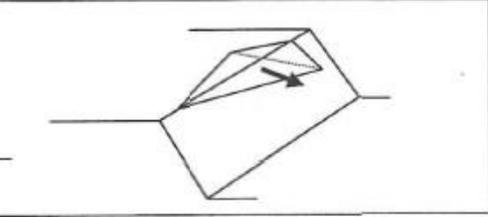
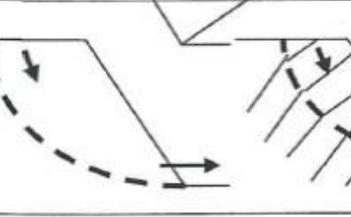
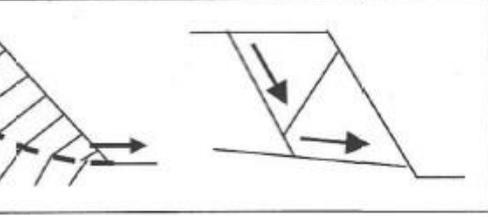
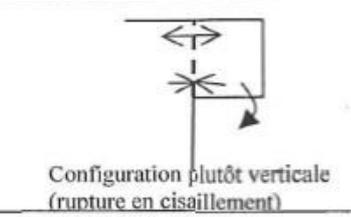
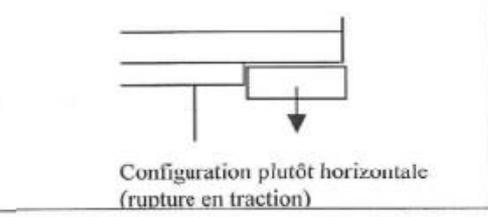
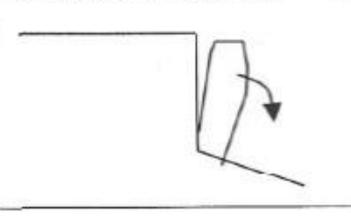
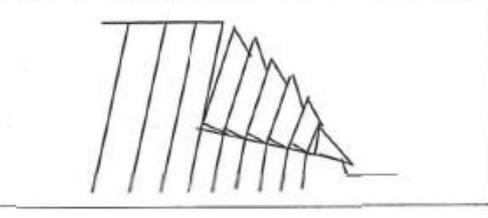
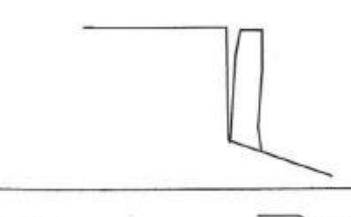
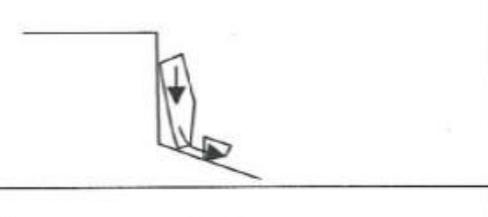
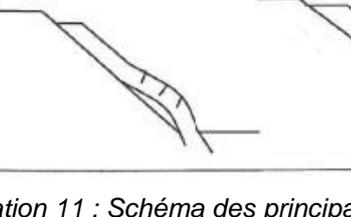
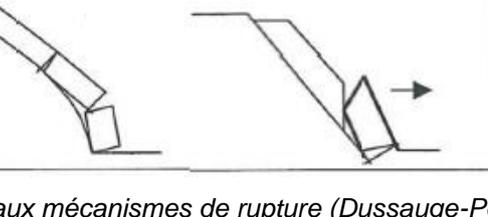
Configurations / mécanismes	Mécanisme d'instabilité
 	<p>Glissement plan Gp</p>
 	<p>Glissement dièdre ou plan Gd</p>
 	<p>Glissements rotationnel et fractionné Gr</p>
 <p>Configuration plutôt verticale (rupture en cisaillement)</p>  <p>Configuration plutôt horizontale (rupture en traction)</p>	<p>Rupture de surplomb S</p>
 	<p>Basculement de colonne ou de blocs Cb</p>
 	<p>Rupture de colonne en pied Cp</p>
 	<p>Rupture de banc (par flambage ou sur fracture) Bf</p>

Illustration 11 : Schéma des principaux mécanismes de rupture (Dussaige-Peisser, 2002)

La typologie des phénomènes concernés en Seine-Maritime identifie quatre grands types de ruptures :

- Les glissements plans ou dièdres ;
- Les ruptures de surplombs ;

- Les basculements de colonnes ou blocs ;
- Les ruptures de colonnes en pied.

Les glissements plans ou dièdres

Ce type de rupture se produit selon un ou deux plans de discontinuité dans le massif rocheux (Illustration 12). Les glissements dièdres font intervenir deux plans ou plus alors que les glissements plans n'en font intervenir qu'un. Le facteur de prédisposition aux glissements plans et dièdres est la fracturation. La taille des blocs impactés par ce type de rupture est variable, elle est déterminée par la fréquence de la fracturation et de la stratification.

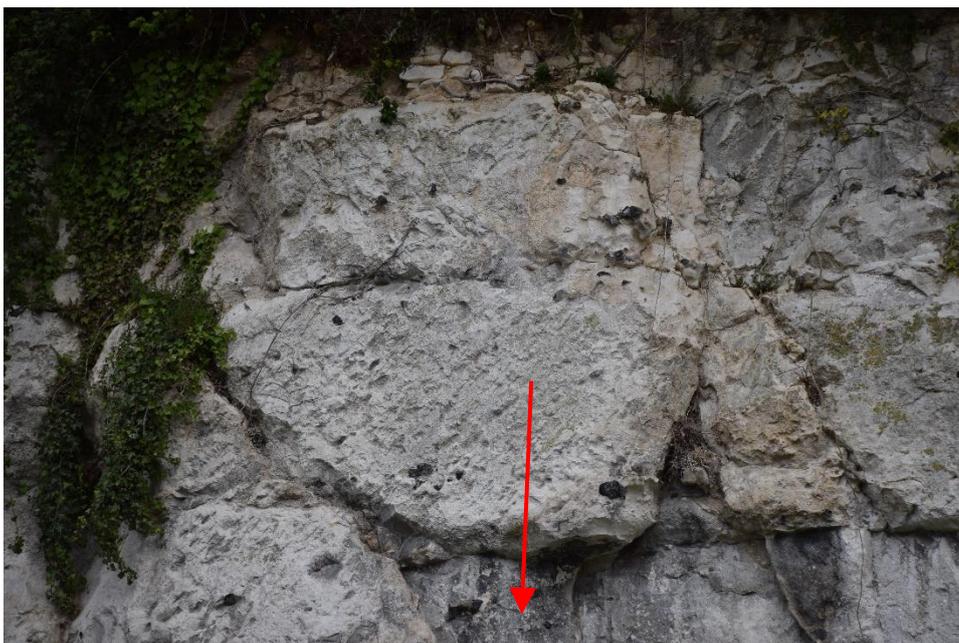


Illustration 12 : Glissement plan – Secteur de Duclair

Les ruptures de surplombs

L'érosion différentielle des parois dégage fréquemment des masses dites en surplomb (Illustration 13). Les volumes concernés par ce type de rupture sont très variables et sont fonction de l'organisation du réseau de fractures et de la stratification. L'orientation des discontinuités et les départs de matériaux depuis le pied des abrupts créent un appel au vide.



Illustration 13 : Surplomb – Secteur de Tancarville

Les basculements de colonnes

Les ruptures par basculement de colonnes sont liées à la présence d'instabilités pluri-métriques désolidarisées de la paroi par des discontinuités majeures qui affectent, souvent, l'ensemble du massif crayeux (Illustration 14). Ces discontinuités correspondent essentiellement à de grosses diaclases d'origine tectonique dans le secteur d'étude, ou à des fractures de détentes sub-parallèles au versant.



Illustration 14 : Basculement de colonne – Secteur de Duclair

Les ruptures de colonnes en pied

Ce mécanisme a la même origine que les basculements, il s'agit d'un découpage de masse rocheuse par la fracturation. Il n'y a cependant pas de décollement le long d'un plan, mais une fragilisation progressive du pied de la colonne qui peut engendrer à terme la rupture du pied qui

entraîne une rupture avec glissement le long de la discontinuité du reste de la colonne (Illustration 15).



Illustration 15 : Rupture de colonne en pied – Secteur de Tancarville

3. Méthodologie

Les illustrations présentées dans la suite de ce rapport servent d'exemple. Les études détaillées, par site / commune, sont présentées dans des rapports séparés intégrant des « fiches de sites » construites à partir de la méthodologie décrite ci-après. Ces fiches reprendront le contexte géographique, géomorphologique et géologique du site, l'historique du site (événement, usage), la présentation de l'aléa de départ, de l'aléa de propagation ainsi que les cartes de probabilité d'atteinte, de probabilité d'occurrence et la carte finale d'Aléa « chute de blocs et éboulement ». Dans le cas de sites à enjeux concernés par un aléa « Elevé », des propositions de parades sont présentées.

Note : dans la suite du rapport le qualificatif « élevé » peut se substituer au qualificatif « fort ».

3.1. METHODOLOGIE UTILISEE POUR LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

Dans le cadre du projet, le BRGM valorise la méthode MEZAP⁶ pour élaborer les cartes d'aléa « éboulement et chute de blocs ». Cette méthode en cours de déploiement vise à uniformiser les pratiques pour la cartographie de cet aléa sur l'ensemble du territoire français.

La MEZAP est une approche qualitative et pragmatique du phénomène d'éboulement et chute de blocs. Elle permet de répondre aux questions Quoi ? Où ? et Quand ?. Cette méthode se décompose en 3 temps.

La MEZAP impose de définir le (les) scénario(s) de référence susceptible(s) de se produire sur les secteurs étudiés dans une période de 100 ans (période de référence pour la réalisation de PPR). Ce scénario est caractérisé par le plus gros volume du bloc susceptible de se propager jusqu'aux enjeux. Des effets particuliers de « masse » peuvent être à intégrer dans le cas de fragmentation extrême de compartiments de volumes importants.

La définition du(des) **scénario(s) de référence est essentielle** dans la démarche car il conditionne les intensités de phénomènes (potentiel destructeur) et les distances de propagation des blocs en cas de chute depuis une paroi rocheuse. Le choix du scénario de référence se fait sur des portions de paroi homogène (orientation, état de la craie...). La déclinaison de la méthode est basée sur cinq étapes successives et complémentaires :

- Etape 1 : analyse « phénoménologique » : il s'agit de rechercher à travers la bibliographie, les différentes bases de données et les informations transmises par les organismes détenteurs d'informations (mairies, DDT(M), bureaux d'études etc.), toutes les données disponibles concernant les chutes de blocs et éboulements survenus dans le département de Seine-Maritime. La compilation de ces données permet d'avoir un aperçu de l'historique de l'activité des parois rocheuses du département, et particulièrement sur les sites étudiés ;
- Etape 2 : définition du scénario de référence à l'échelle des sites étudiés. Il s'agit d'identifier, par le biais d'observations de terrain et de l'étude phénoménologique, les instabilités potentielles à prendre en compte : situation sur les parois et intensité de phénomènes redoutés ;

⁶ Méthode d'Evaluation du Zonage de l'Aléa chute de Pierres

- Etape 3 : évaluation de l'aléa de départ : sur la base des constats et de la définition des facteurs de prédisposition notamment, il s'agit ici d'identifier pour le(s) scénario(s) de référence, l'activité des phénomènes redoutés selon les zones homogènes décrites (délai pressenti de rupture). Cette étape permet également de définir la zone de départ (zone de rupture) ;
- Etape 4 : évaluation de l'aléa propagation : il s'agit de déterminer les zones qui seront potentiellement impactées par des chutes de blocs en cas d'occurrence. Cette analyse est indépendante de la caractérisation de la rupture. La propagation est évaluée en fonction des observations de terrain (inventaire des blocs éboulés, historique) et d'outils d'aide à la décision : méthode empirique dite de la ligne d'énergie et/ou modélisation via une analyse de trajectographie (Pierre98©) ;
- Etape 5 : cartographie de l'aléa rocheux : défini à partir des résultats obtenus aux étapes 2 et 3. Les niveaux d'aléa sont définis pour chaque scénario attendu (défini par son intensité notamment) par couplage de l'aléa de propagation avec l'aléa de départ ;

En complément, une étape 6 avec des propositions de parades est réalisée pour les sites concernés par un aléa élevé. Il pourra s'agir de parades dites « actives » ou de parades dites « passives ». Leur dimensionnement devra toutefois faire l'objet d'études spécifiques et n'est pas prévu dans cette étude.

3.2. ETAPE N°1 - RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SPECIFIQUE SUR LA PHENOMENOLOGIE DES EVENEMENTS

Plusieurs bases de données ont été consultées pour récupérer des informations relatives aux phénomènes de chute de blocs et/ou d'éboulement dans le département de Seine-Maritime :

3.2.1. La Base de données Nationale des Mouvements de Terrain (BDMvt – BRGM)

La recherche bibliographique des événements passés se fait principalement par la consultation de bases de données. La base de données nationale des mouvements de terrains (BDMvt) (www.georisques.gouv.fr), gérée par le BRGM, recense une grande partie des mouvements de terrain ayant eu lieu sur le territoire français. Elle est mise à jour grâce aux données disponibles dans les rapports et notes de synthèse réalisés pour chaque événement.

La BDMvt a été consultée pour chaque site du secteur d'étude. Cet inventaire permet de mettre en évidence l'exposition des zones d'étude aux phénomènes de mouvements de terrain (chutes de blocs, éboulements, glissements de terrain) et d'obtenir, dans les meilleurs des cas, des informations sur le déroulement de ces événements (volume chuté, intensité, occurrence, propagation...).

3.2.2. La base de données de la DDTM de Seine-Maritime

Les informations obtenues dans la BDMvt ont été recoupées avec les informations disponibles à la Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Seine-Maritime. Cela a permis d'étoffer cet inventaire des mouvements de terrain, afin de le rendre le plus exhaustif possible.

3.2.3. Autres sources d'informations

Les enquêtes de terrain (repérage des blocs chutés sur les terrains en pied de falaise), et le recueil de témoignages chez les riverains et dans les mairies des communes concernées par l'étude ont permis d'enrichir l'historique sur certains secteurs.

Certains sites ont également été déjà expertisés par des bureaux d'études, comme c'est le cas du secteur de la Croix Dussault à Villequier ou encore d'une partie du linéaire de falaise de Tancarville ou de Duclair.

A l'issue des recherches, un tableau synthétique des événements est créé pour chaque secteur (Illustration 16). Il rassemble les caractéristiques disponibles pour chaque événement, à savoir sa localisation, sa date d'occurrence, son intensité, sa propagation, la géométrie et la géologie des terrains d'origine et de réception, les causes de déclenchement, les dégâts engendrés ainsi que les fiches, notes et rapports de synthèse s'y référant.

Les informations rassemblées lors de ces recherches permettent notamment de valider la cohérence des résultats obtenus à l'issue de l'étude (notamment les données de propagation), par comparaison avec des événements factuels.

Code site : 4-S2		Etude phénoménologique à Belbeuf - St Adrien				
IDENTIFICATION	Indice	11103485	11100141	11100838	11100837	
	Type	Eboulement	Eboulement sporadique	Chute de pierres	Eboulement	
	Date	23/01/2001	Visite le 04/11/1998	01/03/1995	10/03/2001	
	Lieu	Belbeuf - St Adrien	Belbeuf - St Adrien	Belbeuf - St Adrien	Belbeuf - St Adrien	
	Coordonnées	Système de projection	Lambert 2 (centre étendu)	Lambert 1 Nord	Lambert 2 (centre étendu)	Lambert 2 (centre étendu)
		Longitude	1.12781930995507	1.12809376909057	1.12781930995507	1.12781930995507
		Latitude	49.3700977672362	49.370127478192	49.3700977672362	49.3700977672362
	Arrêté	-	-	-	Périmètre de sécurité	
	Caractéristique lithologie	Volume blocs Volume cône Pente Dénivelé Propagation	Craie très friable	Craie avec bancs de silex, friable en surface	Craie	Craie
			-	centimétrique à décimétrique	< 1 dm3 (pierre)	-
-			-	-	Dépôt crayeux de 5 m3	
-			-	-	-	
-			30 m	-	-	
-			-	Jusqu'à la RN 15 (env. 25 m)	Jusqu'à la RN 15 (env. 25 m)	
DESCRIPTION	Géomorphologie	-	Présence de surplomb	-	-	
	Cause(s)	-	Pluie, érosion, autre (non renseigné)	Pluie, érosion	Pluie, érosion	
		Personnes	-	Non	-	-
	Dommages	Biens	-	Non	-	-
		Occurrence	zone régulièrement soumise à ce genre d'événement	zone régulièrement soumise à ce genre d'événement	-	-
	Installations compensatoires	-	-	Confortement réalisé (Remblai armé sur 40 m de longueur et 14 m de hauteur)	-	
		BRGM	Novembre 1998	Stabilité de la falaise des "Roches Blanches" Hameau de Saint-Adrien (R 40 302)		
	Informations complémentaires :	Photo		Oui		
		Autre				

Illustration 16 : Tableau récapitulatif des événements de type chute de blocs recensés sur la commune de Belbeuf

3.3. ETAPE N°2 – DEFINITION DU(DES) SCENARIO(S) DE REFERENCE

La définition du scénario de référence à l'échelle des sites étudiés consiste à établir une synthèse des évènements redoutés selon les zones à cartographier (terminologie et caractérisation de l'intensité de phénomène notamment). Il pourra s'agir de :

- compartiments rocheux isolés qualifiés par leur volume total. La rupture de ces masses peut engendrer une fragmentation plus ou moins importante qui est évaluée de façon experte au moins ;
- chutes de blocs qualifiées de diffuses à l'échelle des parements rocheux.

3.4. ETAPE N°3 - EVALUATION DE L'ALEA DE DEPART

3.4.1. Définition de l'aléa de départ

L'évaluation de l'aléa de départ (ou aléa de rupture) consiste à définir ce qui peut être mis en mouvement sur une paroi. C'est répondre aux questions : qu'est-ce qui est susceptible de tomber ? depuis quelle zone ? à quelle échéance ? L'aléa de départ correspond à la spatialisation de deux indices :

- l'**indice d'intensité**, qui est défini en fonction du volume unitaire de roche, après fragmentation, pouvant se détacher et se propager. Dans le cas d'évènements en masse (>10 m³), l'indice d'intensité va dépendre de la propagation :
 - o en « zone proche » de la paroi l'évènement considéré est l'éboulement en masse qui induit un indice d'intensité élevé voire très élevé engendrant potentiellement des dommages importants au bâti ;
 - o au-delà de la « zone proche » l'évènement considéré correspondra à la zone de propagation de blocs isolés dont l'intensité est liée aux volumes unitaires fragmentés après la chute initiale.

Il est à noter que pour des évènements de grande ampleur, la propagation en « zone proche » peut concerner des emprises importantes du fait de l'étalement des volumes détachés (exemple des falaises de craie littorales).

<i>Indices d'intensité</i>	<i>Description</i>	<i>Potentiels de dommages</i>
Faible	Le volume unitaire pouvant se propager est inférieur à 0,25 m ³	Pas de dommage au gros œuvre, peu ou pas de dommages aux éléments de façade.
Modérée	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur ou égal à 0,25 m ³ mais inférieur à 1 m ³	Domage 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	Domage 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 17 : Indices d'intensité définis par la MEZAP (source : MEZAP)

- l'**indice d'activité**, qui correspond à une fréquence d'occurrence avec laquelle les masses se mettent en mouvement (Illustration 18). Il s'agit d'une appréciation qualitative de la probabilité qu'un phénomène ait lieu.

Indice d'activité par zone d'homogène	Description
<i>Faible</i>	De l'ordre d'un bloc du scénario de référence tous les 100 ans
<i>Moyen</i>	De l'ordre d'un bloc du scénario de référence tous les 10 ans
<i>Fort</i>	De l'ordre d'un bloc du scénario de référence tous les ans

Illustration 18 : Indices d'activité définis par la MEZAP (source : MEZAP)

3.4.2. Collecte des informations sur le terrain

L'évaluation de l'aléa de départ se fait par des observations sur le terrain. Les indices d'intensité et d'activité sont évalués « à dire d'expert » et peuvent être confirmés par les informations recueillies lors de l'étude phénoménologique. Chaque site fait l'objet de visites de terrain afin d'identifier les instabilités visibles en paroi, et de collecter les informations nécessaires à l'évaluation de l'aléa de départ. Le recensement des zones d'instabilités se fait par l'intermédiaire de fiches de terrain :

- une fiche « Evaluation des zones de départ » (Annexe 4), qui contient les informations caractérisant la falaise (stratification, fracturation, végétation, altération) ainsi que les informations nécessaires à l'établissement des indices d'intensité et d'activité des blocs susceptibles de tomber. Cette fiche permet notamment de déterminer le bloc de référence qui sera utilisé ultérieurement pour modéliser l'aléa de propagation. Les zones de départ sont identifiées en fonction de la morphologie de la falaise, de l'identification des compartiments rocheux potentiellement instables et des mécanismes de rupture mis en jeu. Des zones de départ dites « diffuses » peuvent également être identifiées. Elles correspondent à des zones où la craie est altérée et délitée en petits blocs de faible volume (inférieur à quelques dm³). Elles sont souvent localisées en tête de falaise, là où la craie est la plus altérée mais peuvent aussi être généralisées à l'ensemble de la paroi ;
- une fiche « Description des terrains de réception » (Annexe 5), qui identifie la nature et la géométrie des terrains de réception et recense également les blocs présents en contre-bas de la falaise. Ces derniers peuvent aider à la qualification de la propagation.

3.4.3. Traitement des données

Compte tenu du nombre de sites à étudier et des variabilités morphologiques visibles au sein d'un même site, la mise en place d'une nomination rigoureuse s'est avérée nécessaire pour archiver les données. Un code nominatif a été établi pour désigner chaque secteur, site et sous-site, ainsi que pour chaque instabilité et bloc chuté repéré sur le terrain (Illustration 19 et annexe).

Orival	17	Orival Centre	S1			17-S1
			S2			17-S2
		Le Catelier	S3			17-S3
		La Roche Foulon	S4			17-S4
			S5			17-S5
		La Roche Fouet	S6			17-S6
		Les Roches d'Orival	S7			17-S7
Tancarville	24	Les Alluvions	S3		A	24-S3-A
					BC	24-S3-BC
					D	24-S3-D
					E	24-S3-E

Illustration 19 : Exemple de code nominatif pour les communes d'Orival et de Tancarville

Une fois les données triées selon le code précédent, un traitement approfondi des photographies est effectué et les profils topographiques sont créés à partir des données collectées sur le terrain.

Les photographies de la paroi ont été utilisées, dans la mesure du possible, pour effectuer un panorama des falaises. Ces panoramas sont annotés afin **de localiser** précisément les instabilités repérées sur le terrain. Cette démarche permet de synthétiser, à l'échelle d'un site ou d'un sous-site, les différentes observations faites sur la paroi et les terrains de réception (Illustration 20).

Légende

- - - FRACTURATION
 - - - STRATIFICATION
- Indices d'intensité des instabilités
- / / Aléa diffus chute de pierres
 - FAIBLE
 - MOYEN
 - ELEVEE



Illustration 20 : Panorama annoté de la paroi rocheuse – Exemple secteur de Duclair

3.4.4. Synthèse de l'aléa de départ

Pour chaque site, une synthèse de l'aléa de rupture est effectuée. Elle identifie le scénario de référence avec ses indices d'intensité et d'activité (Illustration 21) qui permet d'aboutir à la carte d'aléa finale.

Localement, il est possible de retrouver des instabilités de volume supérieur au scénario de référence défini précédemment. Ces instabilités n'étant pas représentatives de l'ensemble du linéaire de paroi, elles sont traitées indépendamment du scénario de référence sous forme d'un « scénario exceptionnel » au droit duquel le niveau d'aléa est majoré sur la carte finale. Le scénario exceptionnel est également synthétisé pour chaque site dans le tableau dédié (exemple en Illustration 21 : Exemple de caractérisation du scénario de référence et du scénario exceptionnel pour chaque site sur la commune de Duclair).

Site	Scénario exceptionnel			Scénario de référence		
	Volume scénario exceptionnel	Indice d'intensité en « zone proche »	Volume scénario de référence	Indice d'intensité	Indice d'activité	Cavité
8-S1	70	TRES ELEVE	0,75	MOYEN	MOYEN	Oui
8-S2	16	TRES ELEVE	0,5	MOYEN	MOYEN	Oui
8-S3	51	TRES ELEVE	0,5	MOYEN	MOYEN	Oui
8-S4-A	-	-	Maj <1 mais plusieurs >1m3	MOYEN/ELEVE	MOYEN	Oui
8-S4-B	225	TRES ELEVE	Maj <1 mais plusieurs >1m3	MOYEN/ELEVE	MOYEN	Oui

Illustration 21 : Exemple de caractérisation du scénario de référence et du scénario exceptionnel pour chaque site sur la commune de Duclair

3.5. ETAPE N°4 - EVALUATION DE L'ALEA DE PROPAGATION

L'aléa de propagation vise à définir des probabilités d'atteinte de blocs sur la zone étudiée, et donc de répondre à la question : si un bloc chute, jusqu'où va-t-il aller ? La propagation est déterminée pour le(s) scénario(s) de référence défini(s) lors de l'évaluation de l'aléa de départ. La géométrie et la nature des terrains de réception est importante dans la détermination des zones de probabilité d'atteinte car elle va être déterminante pour la propagation des blocs qui suivent généralement la ligne de plus grande pente. Les méthodes utilisées dans le cadre du projet pour définir ces zones sont :

- la méthode dite de « la ligne d'énergie » ;
- des analyses trajectographiques (à partir de l'outil BRGM Pierre98©).

La cartographie des zones d'atteinte est définie à partir des résultats obtenus par les méthodes précédentes avec confrontation des événements passés. Le résultat final est qualifié par expertise (position du trait délimitant les zones d'atteinte sur la carte).

3.5.1. La méthode de la « ligne d'énergie »

Il s'agit d'un modèle statistique qui permet d'estimer à partir d'une zone de départ la localisation du point d'arrêt maximal probable d'un projectile. Cette méthode de détermination de la probabilité d'atteinte dépend du profil topographique falaise / terrains de réception. Elle est issue de la méthode dite des « cônes » développée par HEIM A. en 1932. Ce modèle repose sur un principe simple et trivial : un bloc ne peut progresser sur une pente que si celle-ci est suffisamment raide :

- 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'horizontale (Illustration 22). Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β , l'angle de la ligne d'énergie.

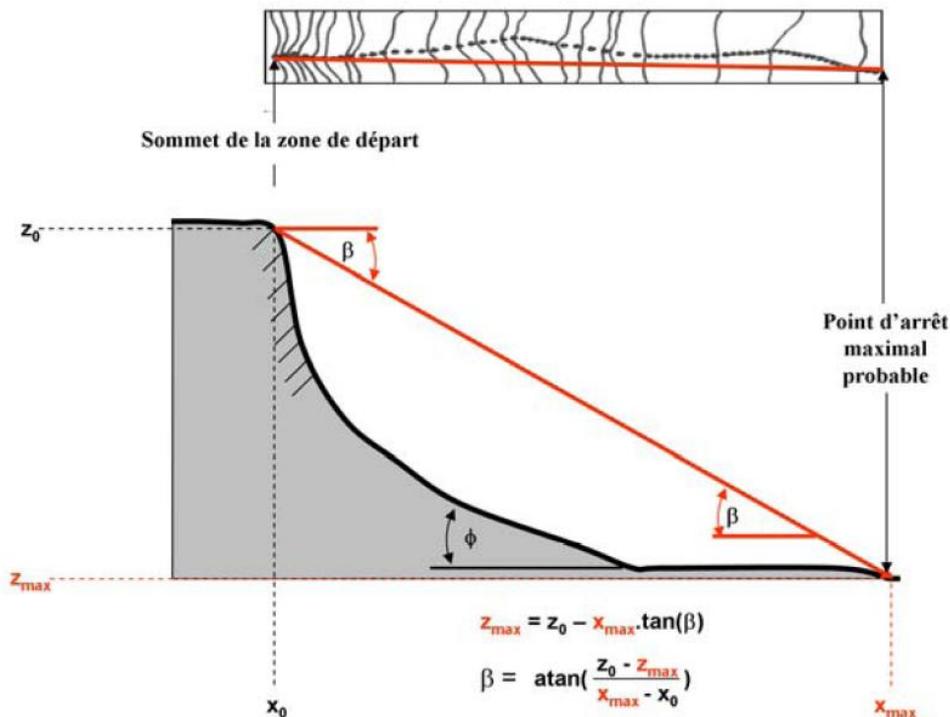


Illustration 22 : Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β (Berger, 2009b)

La méthode des lignes d'énergie permet de définir l'extension prévisible des emprises de propagation par le choix de valeurs d'angles d'énergie en fonction notamment de la morphologie des sites étudiés. Les choix des valeurs d'angle retenues pour qualifier la propagation sont justifiés en fonction de la connaissance du site et des retours d'expérience sur des sites équivalents.

La méthode des lignes d'énergie permet d'obtenir une bonne estimation des enveloppes de propagation en cas de chute de blocs, cependant elle présente quelques limites :

- La méthode fait l'hypothèse que l'angle d'énergie est constant tout le long du trajet du bloc, ce qui revient à faire l'hypothèse que la perte d'énergie se fait de manière constante au cours de la propagation. Or, dans la réalité, la perte d'énergie varie au cours de la propagation en fonction du relief, de la lithologie des terrains de réception, etc.
- La méthode ne prend pas strictement en compte la géométrie et le volume des blocs susceptibles de se propager. C'est pourtant une donnée importante à prendre en compte car un gros bloc aura généralement tendance à se propager plus loin qu'un bloc de plus petite taille. Dans l'absolu, pour des scénarios de rupture différents on pourra être amené à proposer des valeurs d'angles variables, dans un même contexte géomorphologique.

La méthode des cônes permet donc de cartographier l'extension prévisible de l'aléa rocheux par le choix de valeurs d'angle variables en fonction de singularités locales (topographie, végétation dont la forêt). L'observation et la mesure d'angles sur plusieurs phénomènes permet de présenter des plages statistiques de valeurs permettant une quantification de la probabilité d'atteinte (Illustration 23).

Probabilité d'atteinte d'un point	Intervalle d'angles de la méthode du cône
Très fort	35° et plus
Fort	33°-35°
Moyen	30°-33°
Faible	26°-30°

Illustration 23 : Plages de valeurs indicatives des angles géométriques pour la méthode des cônes issues de l'analyse statistique des valeurs publiées à ce jour (source : document MEZAP, version de 2014)

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. A ce titre, le BRGM dans le cadre de développements récents du GT MEZAP a mis en évidence une relation 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 définies pour chaque profil.

3.5.2. Trajectographie 2D, logiciel Pierre98

L'outil de simulation utilisé est un logiciel probabiliste de trajectographie en 2D de chutes de blocs prenant en compte l'impact entre un bloc et le sol (Hungry et al., 1999). Le calcul d'une trajectoire est effectué de manière déterministe en prenant en compte la variabilité des paramètres liés au bloc, au sol et aux interactions sol/bloc. L'analyse probabiliste résulte de la multiplication des trajectoires calculées dans cette simulation (Garnier, Colas et Gutierrez, BRGM/RP-66819-FR 2017).

Le logiciel prend en entrée les caractéristiques du bloc (géométrie, dimension, densité...) et les caractéristiques des terrains de réception (profil topographique, lithologie, rugosité...). Pour chaque profil topographique, les calculs de trajectoire peuvent être menés un grand nombre de fois. Les résultats se présentent comme une distribution des zones d'arrêt de blocs dans le

versant, ce qui permet d'accéder à une probabilité d'atteinte en chaque point du profil. Les classes de probabilité d'atteinte suivant les recommandations du JTC1 (2008)⁷ et reprises dans la MEZAP :

- $P > 10^{-2}$ (1 bloc sur 100 atteint l'enjeu) : probabilité forte ;
- $10^{-4} < P < 10^{-2}$ (1 bloc sur 10 000 atteint l'enjeu) : probabilité moyenne ;
- $10^{-6} < P < 10^{-4}$ (1 bloc sur 1 000 000 atteint l'enjeu) : probabilité faible.

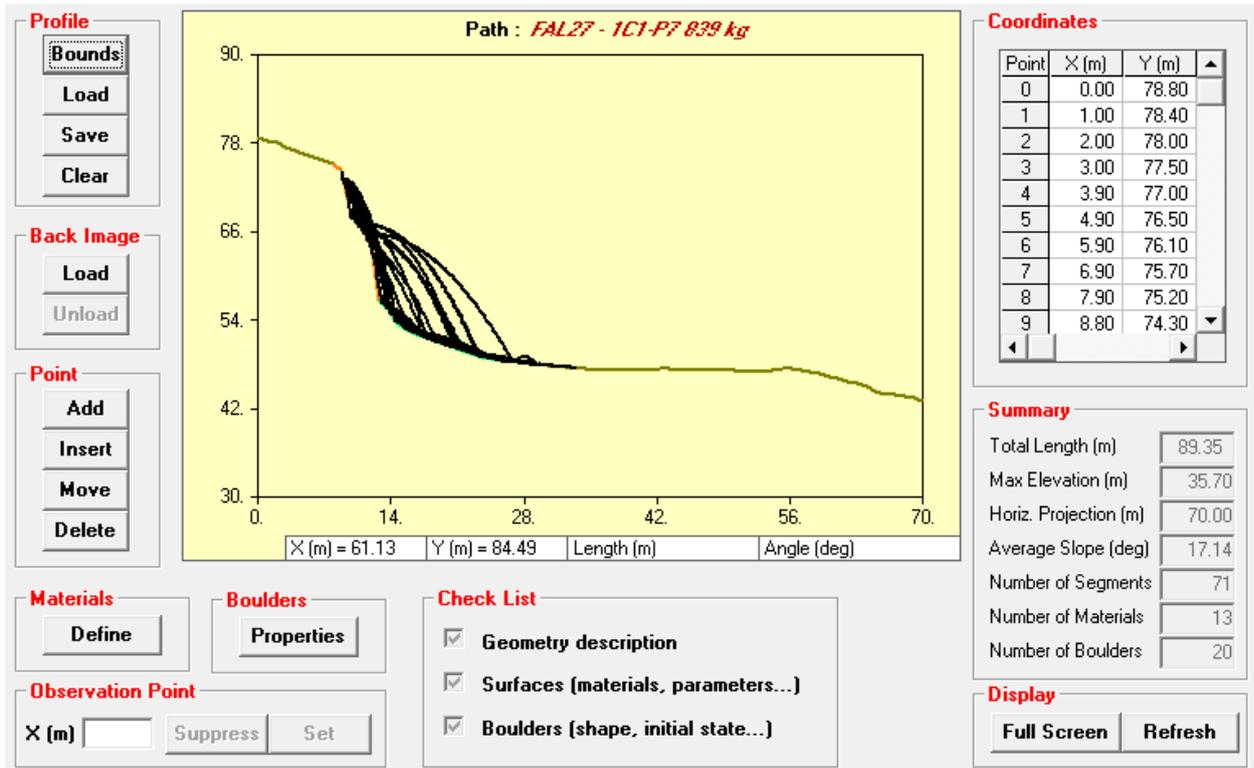


Illustration 24 : Exemple de restitution Pierre98 (brgm – cas de 20 trajectoires simulées)

3.5.3. Choix de l'angle d'énergie final et tracé des enveloppes de propagation

L'approche statistique de la méthode des lignes d'énergie a été utilisée sur chacun des sites, puis complétée de manière systématique par l'approche probabiliste de la trajectographie (Pierre98). Deux séries de 3 angles d'énergie (faible, moyen, et fort) ont donc été obtenues pour chaque site.

Une analyse au cas par cas, à dire d'expert, a permis de déterminer les angles finalement appliqués pour chaque secteur.

Plusieurs profils topographiques ont été tracés pour chaque site à partir du MNT de l'IGN au pas de 1 m. Les enveloppes de propagation finales sont tracées :

- Soit à partir des limites d'atteintes par profil (si la densité de profil le permet), en tenant compte de la topographie ;
- Soit avec un outil d'aide à la cartographie (CONEFALL©) qui permet de tracer le contour des enveloppes de propagation en calculant l'intersection des lignes d'énergie avec la

⁷ ADRGT : Association Développement Recherche Glissement de Terrain

topographie. Cet outil permet d'introduire une dispersion latérale des trajectoires potentielles fournissant ainsi une représentation en 3D des enveloppes de propagation.

3.5.4. Estimation de la propagation des événements de masse (> 10 m³)

La propagation des événements de masse est évaluée en deux temps :

- Dans un premier temps il s'agit d'évaluer les propagations de l'éroulement dans la zone dite « proche », correspondant à des intensités élevées à très élevées (fort pouvoir destructeur) ;
- puis après estimation du cône d'éboulis formé il s'agit d'évaluer la propagation des blocs isolés pouvant se propager plus loin (Illustration 25).

Dans la « zone proche », la masse va s'érouler et s'étaler en pied de paroi pour former un cône d'éboulis. L'évaluation de cette zone est fonction :

- du volume total éboulé et du coefficient de foisonnement de la craie, pris égal à 1,5 (recommandations GTR, fournissant une valeur de 1,5) ;
- de la morphologie initiale des terrains de réception ;
- des caractéristiques géotechniques des masses éboulées (angle de frottement, etc.), qui dépendent notamment de la lithologique. Dans le cas de la craie, d'après les retours d'expérience et l'étude de la géomorphologie des formations superficielles issues d'éboulements de craie (type « head »), la pente de stabilité des cônes d'éboulis crayeux est comprise entre 25 et 35°. L'intersection de cette pente avec la topographie permet d'obtenir l'enveloppe de propagation du cône. Le choix de prendre en compte une hauteur de cône maximale pour limiter l'emprise de cette zone peut s'envisager ($h_{\text{éboulis}}$ de l'illustration 25).

La zone de propagation des blocs isolés est estimée par la méthode de la ligne d'énergie (et/ou de trajectographie) comme explicité § 3.5.1, depuis la zone de départ en intégrant la nouvelle topographie induite par la formation du cône d'éboulis dans la « zone proche ».

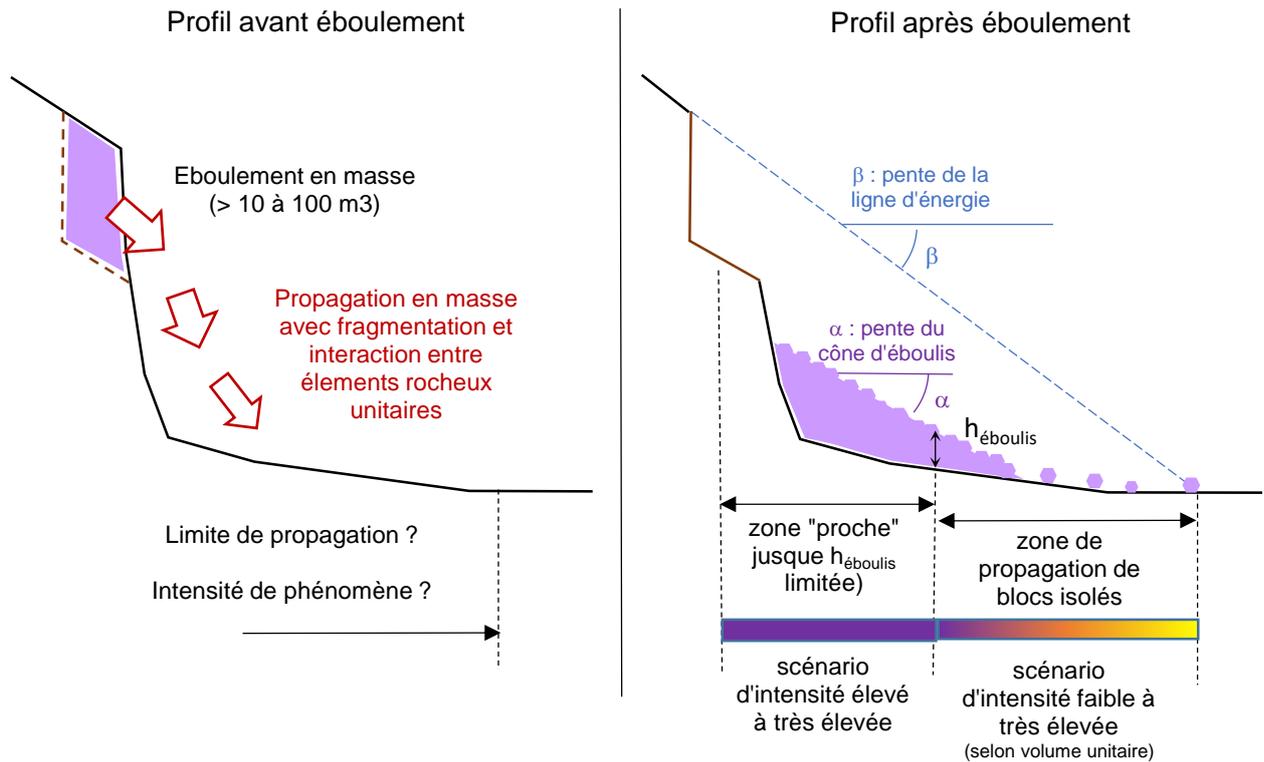


Illustration 25 : Principe d'évaluation des enveloppes de propagation dans le cas d'événements en masse

3.5.5. Cartographie de la probabilité d'atteinte

Les cartes de probabilité d'atteinte sont issues des simulations réalisées précédemment (Illustration 26). L'étude de phénoménologie et la position des blocs chutés repérés dans la pente et la connaissance du terrain permettent de donner une première validation de cette carte. Elle est ensuite de nouveau confirmée par des visites de contrôle in-situ. Le résultat cartographique demeure soumis à l'expertise qui positionne in-fine le « trait de crayon » en justifiant ses choix de manière explicite.

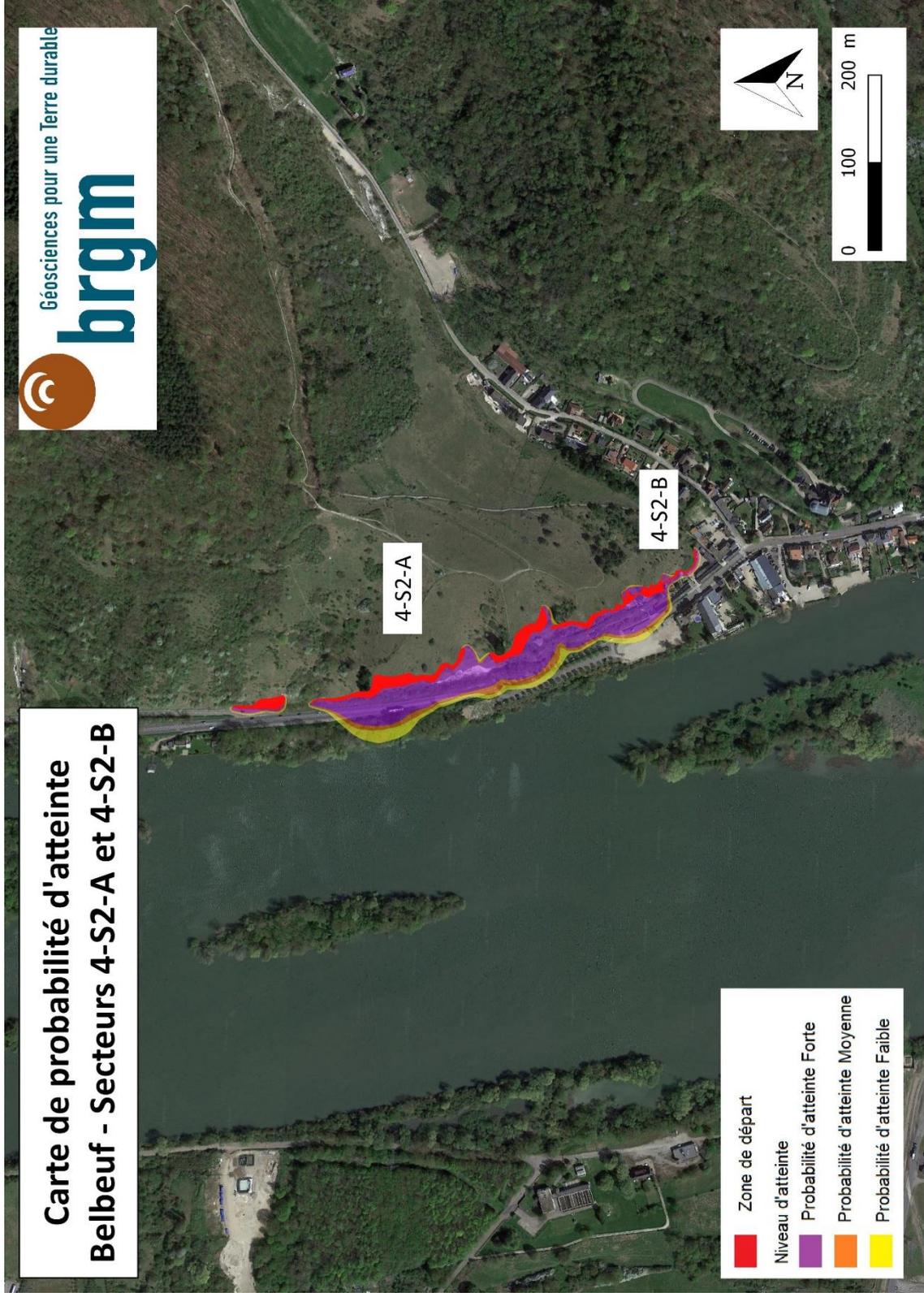


Illustration 26 : Exemple de carte de probabilité d'atteinte – Secteur de Belbeuf

3.6. ETAPE N°5 - CARTOGRAPHIE DE L'ALEA CHUTE DE BLOCS ET EBOULEMENT

L'aléa éboulement et chute de blocs résulte du croisement de l'indice d'intensité et de la probabilité d'occurrence de l'événement de référence.

3.6.1. Probabilité d'occurrence de chute de blocs

La probabilité d'occurrence est définie par croisement des probabilités d'atteinte simulées avec l'indice d'activité de l'événement de référence selon la matrice suivante (Illustration 27).

		<i>Probabilité d'atteinte</i>			
		Faible	Moyenne	Forte	Très Forte
<i>Indice d'activité</i>	Faible	Faible	Modérée	Elevée	Très Elevée
	Moyen	Modérée	Modérée	Elevée	Très Elevée
	Fort	Modérée	Elevée	Elevée	Très Elevée

Illustration 27 : Définition de la probabilité d'occurrence (MEZAP)

Cela conduit à une carte des zones de probabilité d'occurrence du phénomène de référence (Illustration 28).

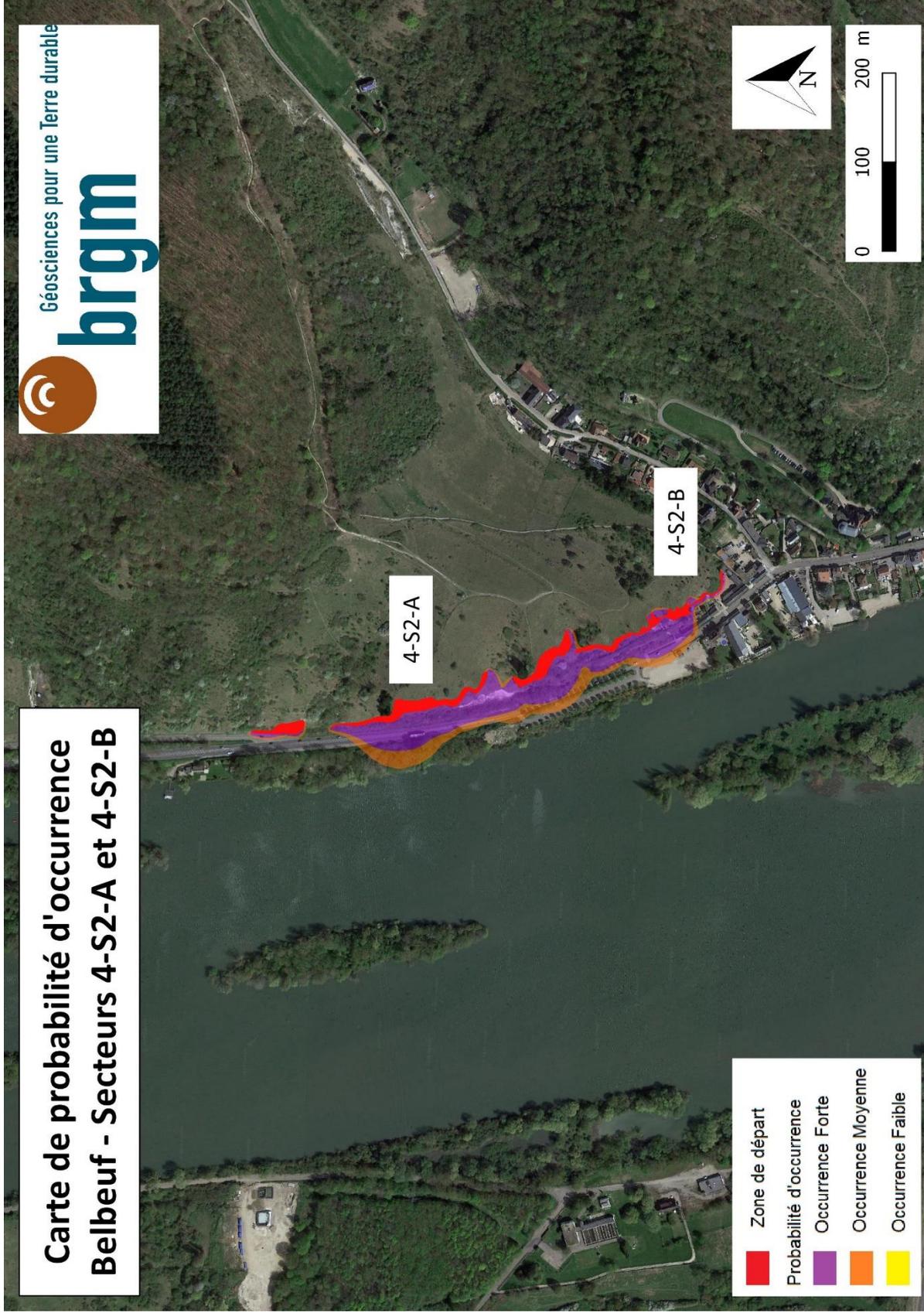


Illustration 28 : Carte des probabilités d'occurrence – Secteur de Belbeuf

3.6.2. Cartographie de l'aléa

L'aléa éboulement et chute de blocs est défini par le croisement de la probabilité d'occurrence, obtenue précédemment, avec l'indice d'intensité du scénario de référence (Illustration 29).

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

Illustration 29 : Définition du niveau d'aléa (MEZAP)

Des zones d'aléa allant d'un aléa faible à très élevé peuvent ainsi être déterminées et cartographiées (Illustration 30). L'échelle réglementaire d'une carte d'aléa est 1/5 000.

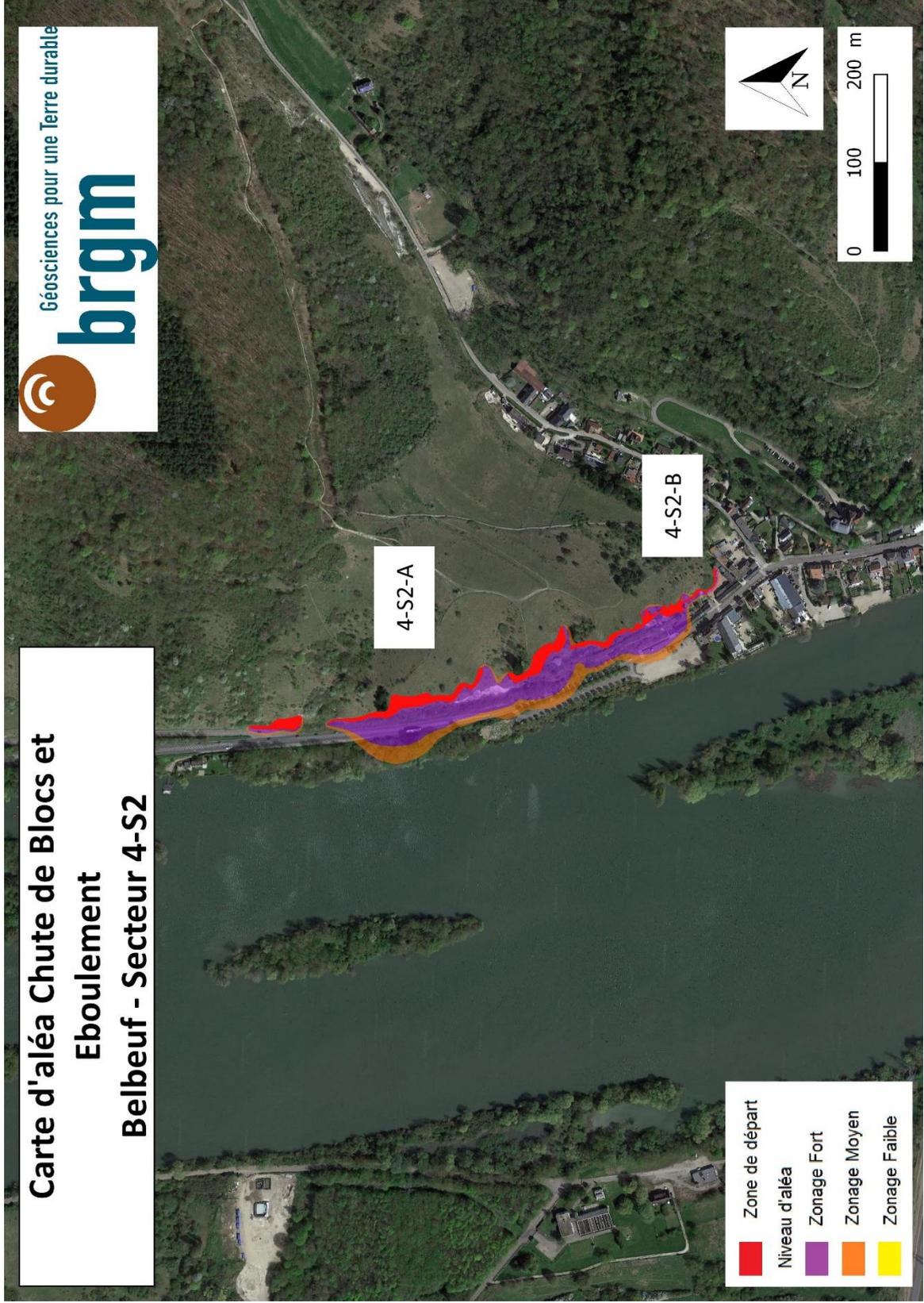


Illustration 30 : Carte d'Aléa Eboulement et chute de blocs – Secteur de Belbeuf – Echelle 1 : 5 000

Un événement de type écroulement en grande masse n'est pas à exclure sur certains des sites d'étude, cependant un tel phénomène présente a priori une probabilité d'occurrence trop faible sur la période de référence considérée (100 ans) pour la carte d'aléa. Si ce type de scénario devait être pris en compte, des précisions méthodologiques seront intégrées dans les rapports de site.

3.7. ETAPE N°6 - PROPOSITION DE PARADES

La cartographie de l'aléa rocheux sur chacun des sites d'étude couplée à la vulnérabilité des enjeux permet d'identifier des zones « à risque ». Dans ces secteurs identifiés « à risque » les phénomènes redoutés (chutes de pierres, chutes de blocs, éboulements) peuvent mettre en danger les personnes et les infrastructures (habitations, industries etc.), aussi il peut être nécessaire de les prendre en compte.

Cette mise en sécurité peut passer par :

- la réalisation de travaux d'aménagement dans le but de sécuriser les enjeux existants par suppression ou réduction des aléas ;
- la diminution de la vulnérabilité des sites (diminution des fréquentations – suppression de parkings, restriction d'occupation de bâtis...).

Dans le cadre du projet, les propositions de parades sont traitées dans les fiches de site en annexe et concerneront les sites à enjeux en aléa « chute de blocs et éboulement » qualifié de niveau élevé. Seules les solutions de protection sont formulées.

Globalement deux familles de parades sont préconisées pour la protection contre les éboulements rocheux :

- les parades dites « passives » : leur rôle est de protéger les enjeux en cas de déclenchement d'événement (Illustration 31 et Illustration 33).
- les parades dites « actives » : leur but est d'intervenir au niveau de la paroi directement sur les masses instables (Illustration 32 et Illustration 34).

Le choix de la parade la plus appropriée se fait en fonction des instabilités constatées sur la paroi, de la configuration du site, de sa faisabilité et de son coût. Le dimensionnement des ouvrages de protection doit faire l'objet d'une mission géotechnique normalisée (type G2-PRO selon la nomenclature de la norme P94-500 de nov. 2013).

Catégorie	Type de parades	Définition	But
Barrages	<i>Merlon</i>	Ouvrage massif en surélévation situé à l'amont de la structure à protéger.	Stopper les blocs ou les masses de grande dimension se propageant dans un versant avec des énergies très importantes.
	<i>Ecran à structure rigide</i>	Structure d'arrêt rigide ou faiblement déformable dont la capacité est principalement liée à la résistance et/ou à la masse des matériaux utilisés.	Intercepter des pierres ou des blocs dévalant une pente.
Ecrans	<i>Barrières fixe de grillage ou de filet</i>	Ecran constitué de grillage ou de filet, doté de certaines possibilités d'amortissement des chocs, assurant la dissipation d'énergie d'impact principalement par diffusion dans la structure et dans le sol.	Stopper la propagation de pierres ou de petits blocs ayant assez peu d'énergie cinétique, en crête de talus ou en pied de versant.
	<i>Ecran déformable de filet</i>	Ecran d'arrêt souple caractérisé par une dissipation d'énergie d'impact essentiellement par déformation.	Freiner et stopper la propagation de blocs rocheux pouvant avoir une grande énergie cinétique.
Fosses	<i>Fosse de réception</i>	Ouvrage en excavation par rapport à la structure à protéger et situé à l'amont de celle-ci.	Capter et stocker des pierres, des blocs isolés ou des éboulements en masse.
Déviateurs	<i>Grillage ou filet pendu</i>	Nappe de grillage ou de filet amarrée en crête du talus ou quelques mètres en arrière de celle-ci, suspendue contre la paroi et assurant ainsi le guidage des chutes de pierres jusqu'au pied.	Contrôler les trajectoires des pierres ou blocs issus d'un talus ou du versant directement à l'amont, les guider vers une zone de réception à la base du relief et éviter les rebonds aériens et la prise de vitesse.
	<i>Déviateur latéral</i>	Ouvrage destiné à infléchir la trajectoire en plan d'un éboulement à l'aide d'obstacles biais.	Dévier latéralement (vers une zone à moindre risque) la trajectoire de blocs ou masses rocheuses dévalant une pente.
Dissipateurs d'énergie	<i>Casquette ou galerie pare-blocs</i>	Ouvrage de transit assurant le passage des éboulements au-dessus de l'élément à protéger.	Protéger totalement, contre les blocs isolés ou des éboulements en masse, des secteurs d'itinéraires routiers ou ferroviaire, sans chercher à les stopper.
	<i>Dispositif amortisseur</i>	Dispositif déformable mis en place au contact d'une structure exposée à des impacts de blocs, permettant d'amortir les chocs.	Amortir les chocs causés par les blocs et masses sur les ouvrages rigides, et donc éviter les désordres engendrés par des impacts directs et encaisser une partie de l'énergie dynamique des chocs.
	<i>Boisement</i>	Renforcement de la protection naturelle des versants par la création ou l'aménagement du couvert végétal principalement constitué d'arbres.	Réduire l'énergie cinétique des blocs au cours de leur trajectoire et stabiliser les blocs dans le versant.

Parades passives

Illustration 31 : Tableau récapitulatif des parades passives (LCPC, 2001)

Catégorie	Type de parades	Définition	But	
Parades actives	Suppression de la masse	<i>Purge</i>	Élimination des pierres, blocs et masses les plus instables par des techniques adaptées n'entraînant pas un risque de déstabilisation des zones à préserver.	
		<i>Reprofilage et abattage</i>	Modifier le profil d'un talus ou d'un versant rocheux par ablation de volumes rocheux défavorables et/ou potentiellement instables.	
	Stabilisation / Confortement	<i>Soutènement</i>	Structure massive assurant, seule ou associée à d'autres dispositifs, le confortement de volumes rocheux présentant un risque d'instabilité.	Maintenir en place une masse instable bien délimitée afin de bloquer tout mouvement de glissement ou de basculement et assurer une protection contre la poursuite de l'érosion régressive.
		<i>Ancrage</i>	Dispositif de confortement constitué par une ou plusieurs armatures scellées dans le rocher, assurant la solidarisation d'un volume potentiellement instable avec le massif stable situé en arrière.	Empêcher la chute de masses rocheuses localisées, par décollement ou glissement le long de discontinuités marquées, en les fixant au massif stable.
		<i>Béton projeté</i>	Dispositif de renforcement et de protection de surface constitué d'une coque de béton mise en place par projection.	Protéger une paroi rocheuse, déjà stable dans son ensemble, vis-à-vis des agents d'érosion, de façon à éviter toute dégradation superficielle pouvant engendrer des sous-cavages, des chutes de pierres ou de blocs.
	Végétalisation	<i>Filets et grillages plaqués</i>	Nappe de filets ou de grillages métalliques plaquée contre le rocher et assurant la stabilité superficielle ou locale de la paroi rocheuse.	Eviter tout départ de pierres ou de blocs.
		<i>Végétalisation</i>	Etablissement ou reconstitution d'un couvert végétal herbacé ou arbustif dans un talus de terrain meuble.	Limiter l'érosion superficielle qui déchausse les pierres ou petits blocs des talus à matrice meuble et provoque des coulées boueuses lors de fortes précipitations.
	Drainage	<i>Drainage de surface</i>	Collecte et évacuation des eaux superficielles en amont et au droit des zones à traiter.	Limiter le ruissellement et les infiltrations d'eau dans le massif et donc réduire l'érosion superficielle, éviter l'éclatement de la roche sous l'effet du gel, et limiter les pressions interstitielles.
		<i>Drainage profond</i>	Collecte et évacuation des eaux à l'intérieur du massif et dans la masse instable.	Diminuer les pressions d'eau dans le massif et améliorer les caractéristiques de résistance des discontinuités, éviter les mises en charge brutales dans les discontinuités.

Illustration 32 : Tableau récapitulatif des parades actives (LCPC, 2001)

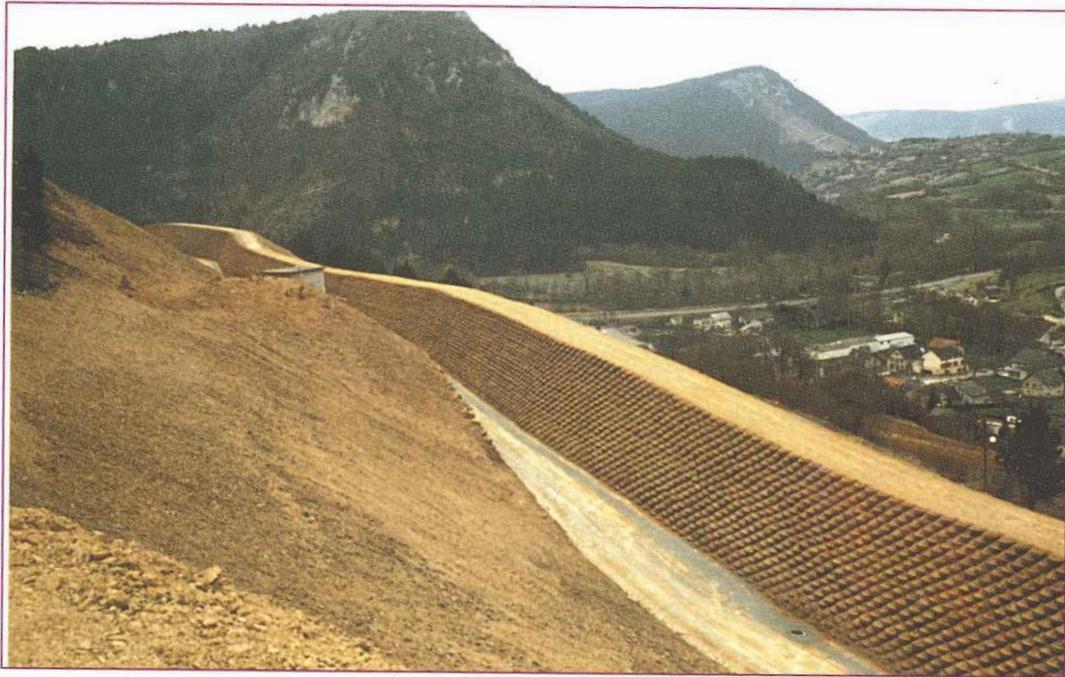


Fig. 4 - Merlon avec parement en pneutex, associé à un piège à cailloux obtenu par reprofilage du talus naturel (Barjac, Lozère) : protection d'un lotissement. Pente du talus amont du merlon : 65°. Pente du talus aval : 33°. Largeur en tête : 5 m.

Illustration 33 : Photographie d'un merlon (Source : LCPC)



Illustration 34 : Photographie de parade active : ancrage (Vatteville (27))

3.8. PRISE EN COMPTE DES VERSANTS SOUS-CAVES

Nombreux secteurs à falaises sont concernés par la présence de cavités en pied de paroi. Il s'agit souvent de cavités ayant été creusées pour l'exploitation de la craie au cours du XIX^{ème} siècle, qui ont pu servir de refuge pendant la guerre et qui aujourd'hui sont parfois utilisées comme caves et/ou garages. L'influence de celles-ci sur la stabilité du massif est souvent difficilement appréciable par le seul « dire d'expert ». Des guides méthodologiques existent pour caractériser l'aléa « Versant Rocheux Sous-cavé », toutefois ceux-ci permettent une prise en compte globale des cavités mais ne permettent pas de conclure sur le degré d'influence de chacune des cavités sur le massif selon leurs caractéristiques propres.

Aussi, une approche de modélisation des contraintes dans le massif rocheux semble pertinente pour conclure de manière plus systématique sur l'influence de la présence de cavités sur le massif.

Les cavités rencontrées peuvent être divisées en deux classes :

- Les chambres isolées qui sont le plus souvent disposées perpendiculairement au front de taille et dont la largeur varie de 3 à 5 m, la longueur peut être variable entre 2 et 10 m environ et la hauteur varie entre 2 et 3 m. Il n'est pas rare de trouver plusieurs cavités de ce type côte-à-côte espacées de 4 à 5 m environ ;
- Les cavités en chambre et piliers qui ont des superficies nettement plus grandes que les précédentes. On les trouve principalement sur les communes de Caumont et Vernon dans le département de l'Eure où elles peuvent couvrir plusieurs dizaines d'hectares et dont les galeries ont de larges portées (20 à 25 m de large pour environ 20 m de hauteur). Dans le département de Seine-Maritime, on retrouve quelques-unes de ces cavités en vallée de secteur dans le secteur d'Orival. Elles ont alors des dimensions inférieures de l'ordre d'une à quelques centaines de m² et restent assez rares.

Les modélisations réalisées sont de type milieu discontinu, basées sur la méthode des éléments distincts. Cette méthode permet de simuler une falaise comme un massif rocheux fracturé, composé d'une superposition de bancs distincts séparés explicitement par des discontinuités, d'épaisseurs différentes, et obéissant à une loi de comportement élastoplastique avec un critère de rupture.

Le code de calcul bidimensionnel UDEC a été choisi pour réaliser cette étude. Ce code permet de simuler explicitement la fracturation. Les fractures obéissent à un comportement rhéologique défini, à minima pour les épontes, par des raideurs normales et tangentielles, une cohésion et un angle de frottement. Des lois de comportement élastoplastique sont proposées pour gérer les déformations des blocs et des discontinuités, et des critères de ruptures (Mohr-Coulomb, Von Mises, etc.) sont également implantés dans le code. Ce dernier permet également à l'utilisateur de prendre en compte ses propres lois de comportement grâce à un outil de programmation intégré, basé sur un langage « Fish » propre au code UDEC.

En pratique, un modèle dans UDEC est décrit par un assemblage de blocs séparés par des discontinuités (cf. Annexe 6). Le bloc est traité indépendamment comme un milieu continu et supposé totalement déformable. Il est discrétisé en éléments continus (mailles) triangulaires internes, dans lesquels la déformation est constante. Une répartition linéaire des déplacements dans l'élément est assurée.

L'application de la méthode des différences finies au niveau de chaque bloc permet de déterminer les contraintes et les déplacements au niveau de tous les nœuds du maillage.

L'idée recherchée derrière ces calculs est d'identifier les conditions principales qui pourraient être considérées comme aggravantes vis-à-vis de la stabilité de la falaise, ce qui pourrait se traduire dans cette situation par un surclassement du niveau de l'aléa qui aurait été qualifié par une méthode standard.

Plusieurs paramètres pourraient influencer la stabilité d'une falaise, comme par exemple l'épaisseur du recouvrement surplombant la cavité, les dimensions de la galerie, sa position par rapport au front de falaise (perpendiculaire ou parallèle etc.), la géologie du massif hébergeant la cavité à travers le comportement mécanique des formations qui le composent, la fracturation naturelle du massif, l'épaisseur des bancs au toit, etc. Les modèles mis en œuvre ont permis d'étudier le comportement de l'édifice composé de la falaise et des cavités en fonction de ces paramètres et apportent une aide précieuse pour évaluer, qualitativement leur influence sur le comportement mécanique d'une falaise à moyen et long terme.

Le travail a été réalisé sur plusieurs cas et mérite d'être approfondi pour pouvoir caractériser l'ensemble des configurations rencontrées, y compris les plus complexes. Au stade actuel des modélisations, deux principes peuvent être avancés :

- La présence au toit immédiat de la cavité d'un banc solide, épais (> 1 m) et doté de bonnes résistances mécaniques en compression et notamment en traction, conduirait à une influence négligeable de la cavité sur la stabilité de la falaise située à proximité. Les situations modélisées, généralement représentatives de nombreux cas recensés in situ, à savoir des falaises de 20 à 25 mètres de haut au maximum, des cavités de 2 à 4 m de large, et 2 à 4 mètres de haut, indiquent que des bancs au toit d'épaisseur supérieure à 1 m, dotés d'une résistance à la traction significative (plus de 1 MPa), seraient suffisants pour garantir une stabilité à long terme de la galerie ;
- En corollaire, si toutes ces conditions ne sont pas vérifiées simultanément sur le site, la présence de la cavité pourrait être considérée comme un facteur aggravant vis-à-vis de la stabilité de la falaise. Un surclassement de l'aléa retenu sur la falaise pourrait être appliqué. Toutefois, en cas de banc solide au toit immédiat de la cavité d'épaisseur approchant le mètre, la mise en place d'un confortement pourrait suffire à atteindre le seuil de non-influence de la cavité sur la stabilité de la falaise.

Les détails de la méthodologie appliquée, du code UDEC et des modèles testés sont décrits dans le rapport BRGM/RP-70050-FR.

4. Conclusion

Les falaises crayeuses du département de Seine-Maritime génèrent des instabilités rocheuses qui dans un contexte de fonds de vallées fortement urbanisés engendrent un risque pour les personnes et pour les biens. La DDTM a réalisé il y a quelques années, un recensement qui a permis d'identifier 75 secteurs sensibles hiérarchisés du point de vue des priorités d'intervention. Les cartographies des secteurs classés, a minima comme prioritaires ou en « vigilance » sont envisagées dans le cadre d'un programme qui se déroule en plusieurs phases.

Le présent document fixe le cadre méthodologique retenu pour établir les zonages de l'aléa rocheux sur ces secteurs. En 1^{ère} phase, 19 sites sont traités à partir de cette méthode.

La cartographie de l'aléa « chute de blocs et éboulement » est réalisée selon la méthode définie par le groupe de travail MEZAP (Méthodologie de Zonage de l'Aléa chute de Pierres) qui vise à harmoniser les pratiques au niveau national. La méthode est fondée sur :

- une étude phénoménologique avancée, basée sur la bibliographie disponible et sur les témoignages des riverains visités ;
- l'identification d'un scénario de référence propre à chaque site établi suite aux visites effectuées sur le terrain (définition d'un indice d'intensité et d'activité pour chaque site sensible) ;
- l'évaluation et la modélisation de la propagation réalisée avec deux méthodes différentes (méthode de la ligne d'énergie et analyse trajectographique) afin de définir les limites d'atteinte en aval pour le scénario de référence identifié à l'étape précédente ;
- la cartographie finale de l'aléa réalisée manuellement, à dire d'expert, en prenant en compte l'ensemble des résultats obtenus, et des observations et données recueillies précédemment.

Il est important de préciser que, sur certains secteurs observés, l'occurrence d'événements de grande ampleur, non retenus comme scénario de référence, ne peut être exclue à très long terme.

Pour finir, des recommandations de sécurisation ont été proposées pour les sites concernés par un niveau d'aléa chute de blocs et éboulement élevé. Les propositions de parades ne sont données qu'à titre indicatif et devront faire l'objet d'études spécifiques de conception et de dimensionnement des dispositifs de protection.

5. Bibliographie

BERGER F. (2009b) – Pour une meilleure prise en compte des forêts à fonction de protection vis-à-vis des risques naturels dans les plans de prévention des risques naturels prévisibles les aménagements forestiers et les chartes forestières de territoires.

BESSON L., DURVILLE JL., GARRY G., GRASZK E., HUBERT T., TOULEMONT M. (1999) – Plans de prévention des risques naturels (PPR), Risques de mouvements de terrain, guide méthodologique, La documentation française, Paris. 71p.

BRGM (1999) – Réseau piézométrique Haute-Normandie Eure – Situation de la nappe de la craie à la fin de l'année 1998. Rap. BRGM R 40439.

BRGM, CETE, DGPR, DDT 06, DDT 38, DDT74, IFSTTAR, IRSTEA, ONF-RTM (2014) – MEZAP - Proposition d'une note technique à l'attention des services déconcentrés de l'Etat en charge des procédures PPRn. Méthodologie de l'élaboration du volet « aléa rocheux » d'un PPRn.

COLAS B., FAURE P., ROHMER J. (2017) – Valorisation des travaux réalisés dans le cadre du GT MEZAP (Année 1). Rapport d'avancement. BRGM/RP-66589-FR.

COUEFFE R., ARNAUD L. (2007) – Pour une identification de l'aquifère albo-aptien en forages dans le cadre de recherche d'eau en Haute-Normandie. Propositions du BRGM. BRGM/RP-55338-FR, 54 p., 10 fig.

DURIEZ M., LERECULEY A., avec la collaboration de KOSTECKI J., LEVESQUES J-C., PLAT E. (2008) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de l'Eure. BRGM/RP-56485-FR, 120 p., 26 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t.

DUSSAUGE-PEISSER (2002). Evaluation de l'aléa éboulement rocheux : développements méthodologiques et approches expérimentales ; application aux falaises calcaires du Y grenoblois. Thèse Université Joseph-Fourrier (Grenoble)

EQUILBEY E., NORMAND M., SCHOMBURGK S. (2004) – Atlas hydrogéologique numérique de l'Eure. Volet bilan quantitatif de l'aquifère de la craie. Rap. BRGM/RP-52988-FR, 148 p., 44 fig., 17 tabl., 3 ann.

FELL R. et al. (JTC 1 – 2008) – Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes.

GARNIER C., COLAS B., GUTIERREZ. T. (2017) – Cartographie de l'aléa chute de blocs depuis les falaises du Gozzi, communes d'Appietto, Afa et Sarrola-carcopino (2A). Rapport final. BRGM/RP-66819-FR. 102 p., 70 ill., 4 ann.

GREFFIE C., PANNET P., LEROY M., BOULET. M. (2015) – Identification et hiérarchisation des zones prédisposées au risque de chutes de blocs et éboulements. Département de l'Eure (27). Rapport final. BRGM/RP-64252-FR, 54 p., 35 ill., 1 ann. H.T., 1 CD.

GEO3 (Laboratoire de Géotechnique, Hydrogéologie, Prospection Géophysique. Université de Liège), postérieur à 2005. Stabilité des parois rocheuses, méthodologie d'étude et modes de confortement. Rapport réalisé pour la DGATLP (Direction Générale de l'Aménagement du Territoire, du Logement et de Patrimoine, Ministère de la Région Wallone). 91p.

HANTZ D. (2012). Gestion de l'incertitude et de l'ignorance, dans l'évaluation de la probabilité de déclenchement des éboulements rocheux. "Fiabilité des matériaux et des structures, Chambéry : France (2012)".

HEIM A. (1932) 6 Landslides an Humain Lives (« Bergsturz und Menschenleben ») Translated by Skermer N. Vancouver Canada.

HUNGR O. et al. (1999) – Magnitude and frequency of rocj falls and rock slides along the main transportation corridors of southwest British Columbia. Canadian Geotechnical Journal.

LASSEUR E. (2007) – La craie du Bassin de Paris (Cénomaniens – Campaniens, Crétacé supérieur). Sédimentologie de faciès, stratigraphie séquentielle et géométrie 3D.

LCPC (2004) – Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux. Guide technique, coll. Environnement –les risques naturels, LCPC, Paris. 86 p.

LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées). (2001) – Parades contre les instabilités rocheuses : chutes de pierres, chutes de blocs, éboulements.

LCPC (1969), Agglomération Rouennaise : étude géotechnique de site. Rapport P.V.4144, 96 p.

LCPC (1976) - Guide Technique SETRA – Recommandations pour les Terrassements routiers (« RTR 1976 »).

MARCOT N., GIRARD A. (2013) – Projet Massa Alcotra n°65 (Medium and Small Size rock fall hazard Assessment) : Evaluation de l'aléa lié aux chutes de blocs et aux éboulements de volume intermédiaire. 186 p.

Société Suisse de Géomorphologie (Août 2009) – Fiches géomorphologique de la montagne, les mouvements gravitaires – 15 p.

VINCENT M., ZORNETTE N. (2001) – Projet PACTES – Modules cartographique du risque potentiel de mouvement de terrain. BRGM/RP-51327-FR, 44p., 24 fig.

Annexe 1

Nomenclature des sites

Commune	Code	Secteur		Site		Code
		Nom	Code	Nom	Code	
Belbeuf	4	Saint Adrien	S2		A	4-S2-A
					B	4-S2-B
Duclair	8		S1			8-S1
			S2			8-S2
			S3			8-S3
			S4		A	8-S4-A
				B	8-S4-B	
Freneuse	9		S2		A	9-S2-A
				B	9-S2-B	
Orival	17	Orival Centre	S1			17-S1
			S2			17-S2
		Le Catelier	S3			17-S3
		La Roche Foulon	S4			17-S4
			S5			17-S5
		La Roche Fouet	S6			17-S6
		Les Roches d'Orival	S7			17-S7
Tancarville	24	Les Alluvions	S3		A	24-S3-A
					BC	24-S3-BC
					D	24-S3-D
					E	24-S3-E
Villequier	26		S1		A	26-S1-A
				B	26-S1-B	
				C	26-S1-C	
			S2			26-S2
			S3		A	26-S3-A
				B	26-S3-B	
				C	26-S3-C	
				D	26-S3-D	
			S4			26-S4

Annexe 2

Fiches outils Méthode des cônes

METHODE DES CONES

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 (cf. Fig. 1). Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β , l'angle de la ligne d'énergie.

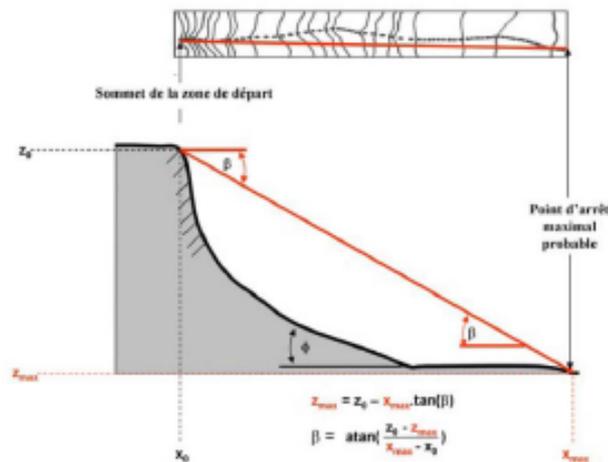


Fig. 1 – Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie

Pour une zone de départ et avec le profil en long de la pente, on peut alors, si on connaît la valeur de l'angle β , proposer le point maximal probable qu'atteindra tout projectile qui se détachera de la zone de départ.

Compte tenu de la possibilité de déviation des trajectoires des blocs, que ce soit à cause de leur forme ou des obstacles rencontrés, les blocs peuvent donc progresser dans un cône, appelé cône de propagation. Ce cône a une pente β et son sommet est placé au niveau de la zone de départ A, d'où le nom de méthode des cônes.

Plusieurs auteurs ont travaillé sur la détermination de l'angle β de la ligne d'énergie selon le principe de Heim (1932). L'observation et la mesures d'angles sur plusieurs phénomènes permet de présenter des plages statistiques de valeurs (cf. Fig. 2) permettant une quantification de la probabilité d'atteinte :

Probabilité d'atteinte d'un point	Intervalle d'angles de la méthode du cône
Très fort	35° et plus
Fort	33°-35°
Moyen	30°-33°
Faible	26°-30°

Fig. 2 – Plages de valeurs indicatives des angles géométriques pour la méthode des cônes issues de l'analyse statistique des valeurs publiées à ce jour¹

La méthode des cônes permet donc de cartographier l'extension prévisible de l'aléa rocheux par le choix de valeurs d'angle variables en fonction de singularités locales (topographie, végétation dont la forêt). Le choix de la valeur d'angle au sein de l'intervalle exposé est pratiqué et justifié par l'opérateur en fonction de sa connaissance du site, de son expérience sur des sites équivalents.

¹ Recommandations MEZAP (à paraître) : groupe de travail réuni sous l'autorité du MEDDE pour la détermination d'une Méthodologie de Zonage de l'Aléa chute de Pierres, piloté par IRSTEA

Annexe 3

Fiche outils du logiciel Pierre98



Propagation de blocs rocheux en versant Trajectographie

PIERRE98© est un logiciel de simulation de trajectoires de chutes de blocs. Le modèle numérique est basé sur des concepts mécaniques rigoureux matérialisant les interactions sol-bloc notamment et sur des retours d'expérience d'observations in-situ.

Caractéristiques du modèle

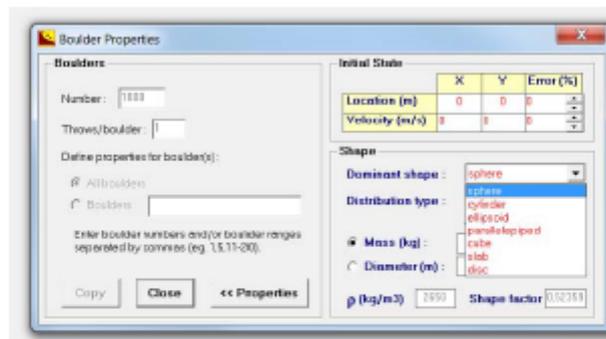
Les simulations de trajectoires de chutes de blocs intègrent les aspects suivants:

- ✓ Analyse en 2D selon profil topographique
- ✓ Paramètres de bloc (masse et forme)
- ✓ Paramètres de sol (rugosité, frottement, restitution)
- ✓ Différents modes de mouvement du bloc
- ✓ Intégration d'un modèle d'impact en plasticité pour définition des coefficients de restitution normal et tangentiel
- ✓ Analyse probabiliste des résultats à partir de variation des paramètres d'entrée des calculs suivant des fonctions de densité de probabilité

Paramètres de bloc

La définition des blocs au départ se fait sur 3 paramètres principaux :

- ✓ Masse ponctuelle, diamètre équivalent et densité de matériau
- ✓ Prise en compte des formes de blocs selon 7 formes dominantes : sphère, cylindre, ellipsoïde, parallélépipède, cube, dalle, disque. Le coefficient de forme peut être rentré manuellement
- ✓ Position et vitesse du bloc au départ



Paramètres de sols

Sauf cas particulier la définition des types de sols le long des profils est contraint. Il est couramment distingué 7 sols dont les principaux paramètres de frottement et de restitution sont les suivants :

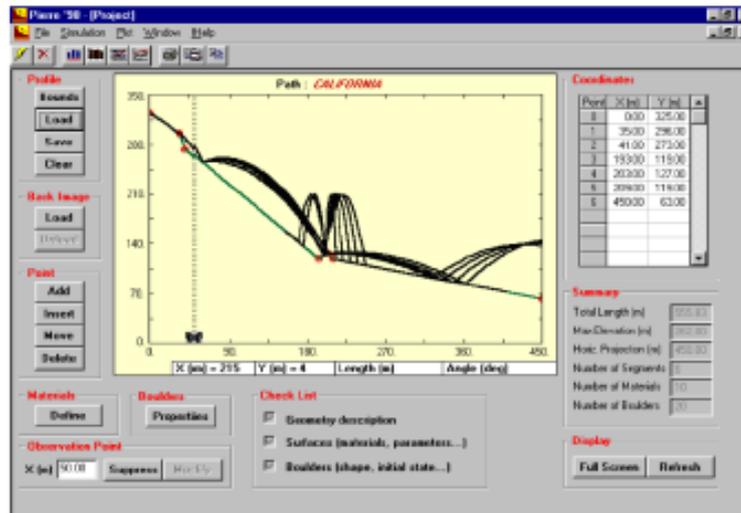
n° sol	Type de sol	Coefficient de frottement dynamique	Coefficient de frottement	Coefficient de restitution normal	Coefficient de restitution tangentiel
		Rf (s.u.)	Cf (s.u.)	En (s.u.)	Et (s.u.)
1	autres (1)	-	-	-	-
2	sol fin (2)	0.6	1	0.3	0.7
3	piste, éboulis fin (3)	0.65	1	0.37	0.73
4	éboulis grossier (4)	0.65	0.7	0.35	0.8
5	couvert fin (5)	0.6	1	0.6	0.8
6	roche (6)	0.55	0.8	0.7	0.9
7	route goudronnée (7)	0.58	0.58	0.4	0.58



Modes de mouvement

Les modes de mouvements considérés pour la propagation des blocs sont :

- ✓ Vol libre, sans perte de moment : trajectoire parabolique, résistance de l'air négligée
- ✓ Glissement / roulement : perte d'énergie par frottement (statique et/ou dynamique)
- ✓ Rebond : modélisation à l'impact des pertes d'énergie suivant le modèle de Falchetta
- ✓ Transition entre différents modes : rebond → roulement / roulement / glissement vers rebond



Analyse probabiliste de propagation

La formule $N=1/(P \times 0.1^2)$ indique le nombre théorique de simulations nécessaires pour estimer un événement à la probabilité d'occurrence P avec une erreur visée de 10% (convergence de l'estimation de la probabilité P par simulation Monte-Carlo).

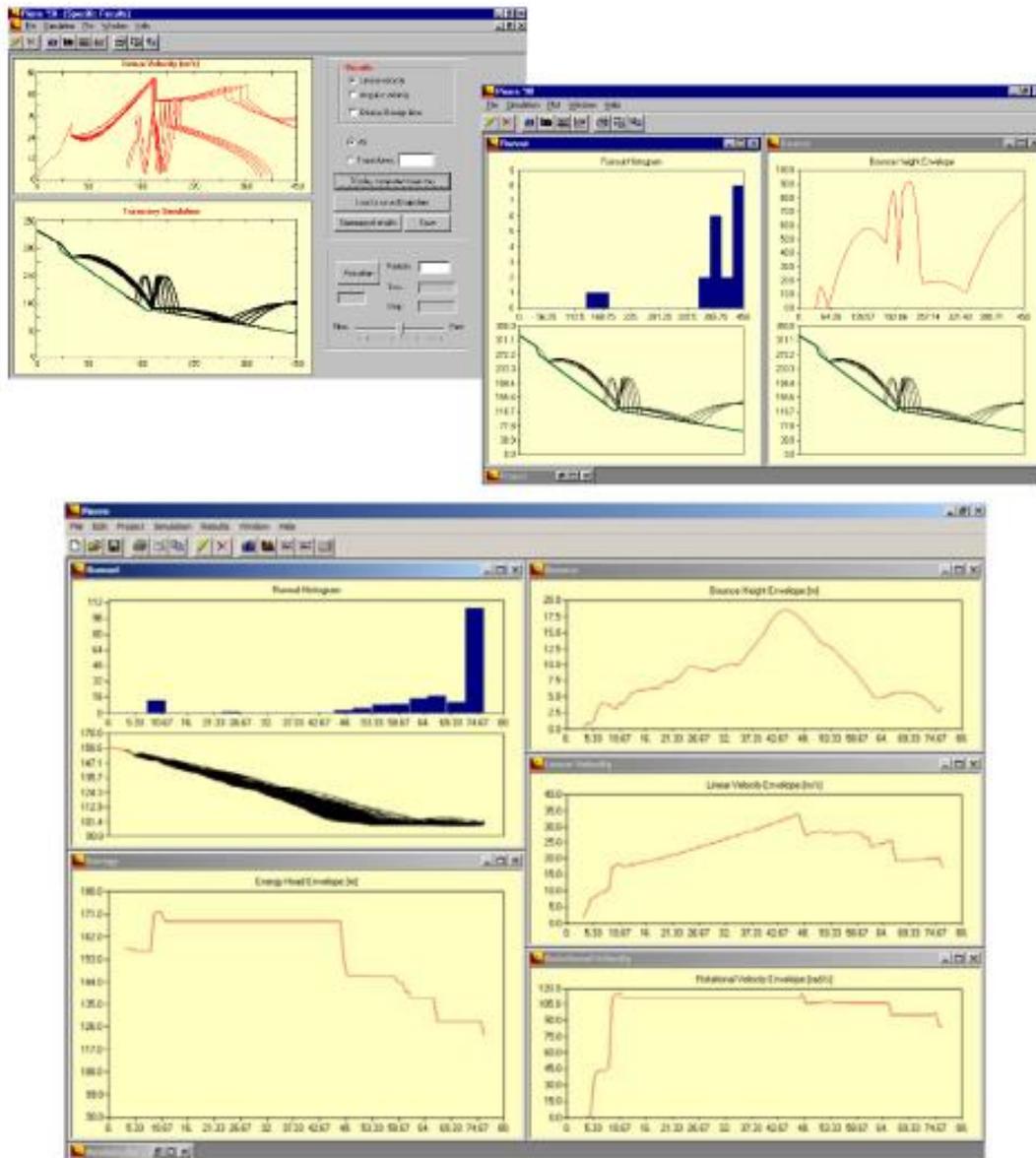
Ceci impliquerait la réalisation d'au moins 10 000, 1 000 000 et 100 000 000 simulations de trajectoires pour estimer les distances d'arrêt pour des probabilités d'atteinte de $P=10^{-2}$, $P=10^{-4}$ et $P=10^{-6}$, respectivement.

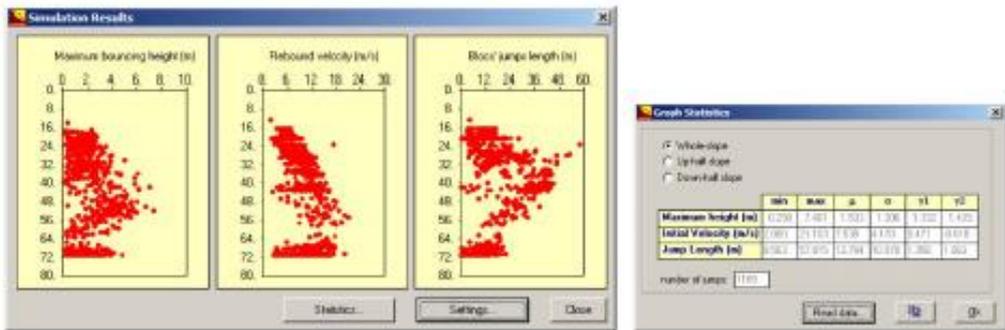
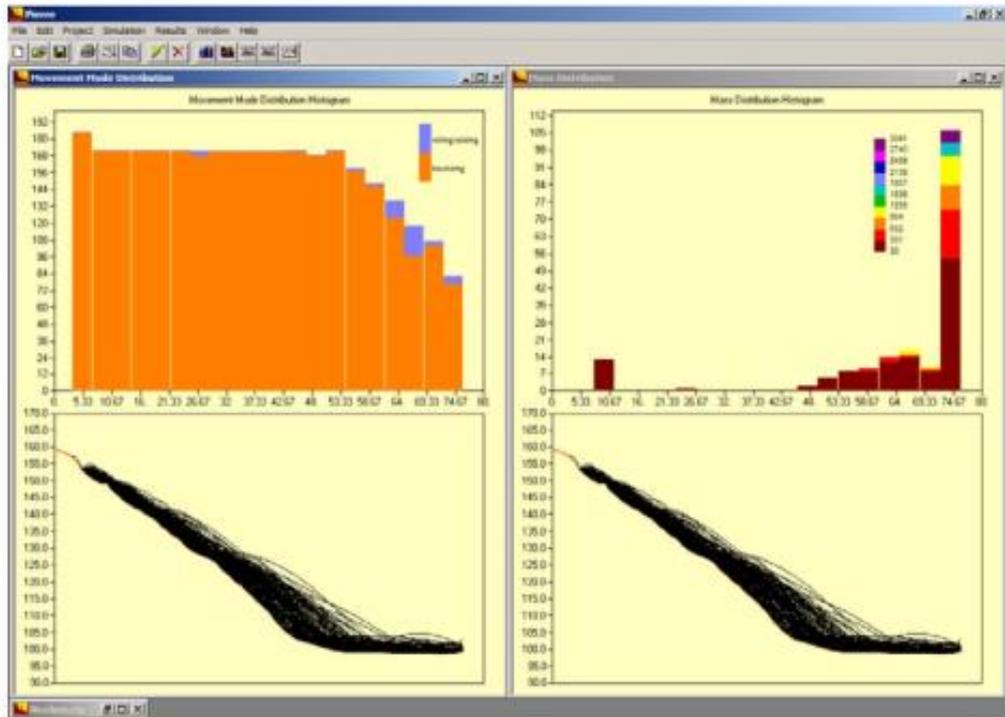
A l'heure actuelle, la réalisation de 1 000 000 simulations de trajectoires (ou plus) est trop gourmande en temps de calcul pour être envisagée dans le cadre d'une étude de cas appliquée.

Il est couramment réalisé entre 5 000 et 10 000 simulations de trajectoires avec Pierre98, ce qui constitue un nombre de simulations nécessaire pour évaluer les distances d'arrêt pour une probabilité d'atteinte de $P=10^{-2}$. Ce nombre de simulation permet également d'estimer l'ordre de grandeur de probabilité d'atteinte de l'ordre de 10^{-4} (1 bloc sur 10000).

Pour des raisons pragmatiques, l'estimation des distances d'arrêt pour des probabilités d'atteinte de 10^{-4} à 10^{-6} est menée par extrapolation linéaire de l'évolution de la probabilité d'atteinte en fonction de la distance d'arrêt.

La validité de cette démarche a été confirmée pour une dizaines de sites aux profils topographiques très différents. Les tests menés ont consisté à modéliser la queue de distribution des probabilités d'atteinte par une loi de Pareto généralisée pour extrapoler les distances d'arrêt pour des petites probabilités. Les deux approches (extrapolation linéaire et loi de Pareto généralisée) conduisent à une estimation des distances d'arrêt à $P=10^{-6}$ assez proches, la démarche utilisant la loi de Pareto généralisée étant généralement la plus pessimiste.





Annexe 4

Fiche d'évaluation de l'aléa de départ

EVALUATION DES ZONES DE DEPART	
DATE :	SITE :
N° photos :	
LOCALISATION / DESCRIPTION DE LA PAROI	
ORIENTATION :	HAUTEUR :
NATURE : NATURELLE / ARTIFICIELLE	USAGE (si artificielle, si connu) :
FRACTURATION : Orientation, nature, remplissage	
<i>STRATIFICATION</i>	
<i>FRACTURATION N°1</i>	
<i>FRACTURATION N°2</i>	
<i>FRACTURATION N°3</i>	
<i>FAILLES / DIACLASES</i>	
VEGETATION EN TÊTE : OUI / NON	TYPE DE VEGETATION :
VEGETATION EN PAROI : OUI / NON	TYPE DE VEGETATION :
PARADE EXISTANTE : OUI / NON	TYPE DE PARADE :
SOUS-CAVAGES / SURPLOMBS : OUI / NON	DIMENSIONS / PROFONDEURS :
ETAT D'ALTERATION : FAIBLE / MOYEN / FORT	COMMENTAIRE :
KARST / EAU : OUI / NON	COMMENTAIRE :

INDICE D'ACTIVITE					
<i>Taille de bloc le plus représenté et susceptible de tomber</i>		FAIBLE / MOYEN / FORT		Identifiant(s) :	
<i>Plus gros bloc susceptible de tomber</i>		FAIBLE / MOYEN / FORT		Identifiant(s) :	
COMMENTAIRE GENERAL / SCHEMA :					
GEOMETRIE / DIMENSIONS DU BLOC OU DE L'ECAILLE					
IDENTIFIANT ⁸	N°PHOTO	DIMENSIONS	HAUTEUR / PIED	TYPE RUPTURE	INDICE D'INTENSITE
					FAIBLE/MOYEN/FORT/TRES FORT
					FAIBLE/MOYEN/FORT/TRES FORT
					FAIBLE/MOYEN/FORT/TRES FORT
					FAIBLE/MOYEN/FORT/TRES FORT
					FAIBLE/MOYEN/FORT/TRES FORT

⁸ Identifiant du bloc ou de l'écaille : 2-B1-01 (2 = indice du site (2 = La Roquette) ; B = indice du sous-site ; 01 = identifiant écaille)

					FAIBLE/MOYEN/FORT/TRES FORT
					FAIBLE/MOYEN/FORT/TRES FORT

Annexe 5

Fiche de description des terrains de réception

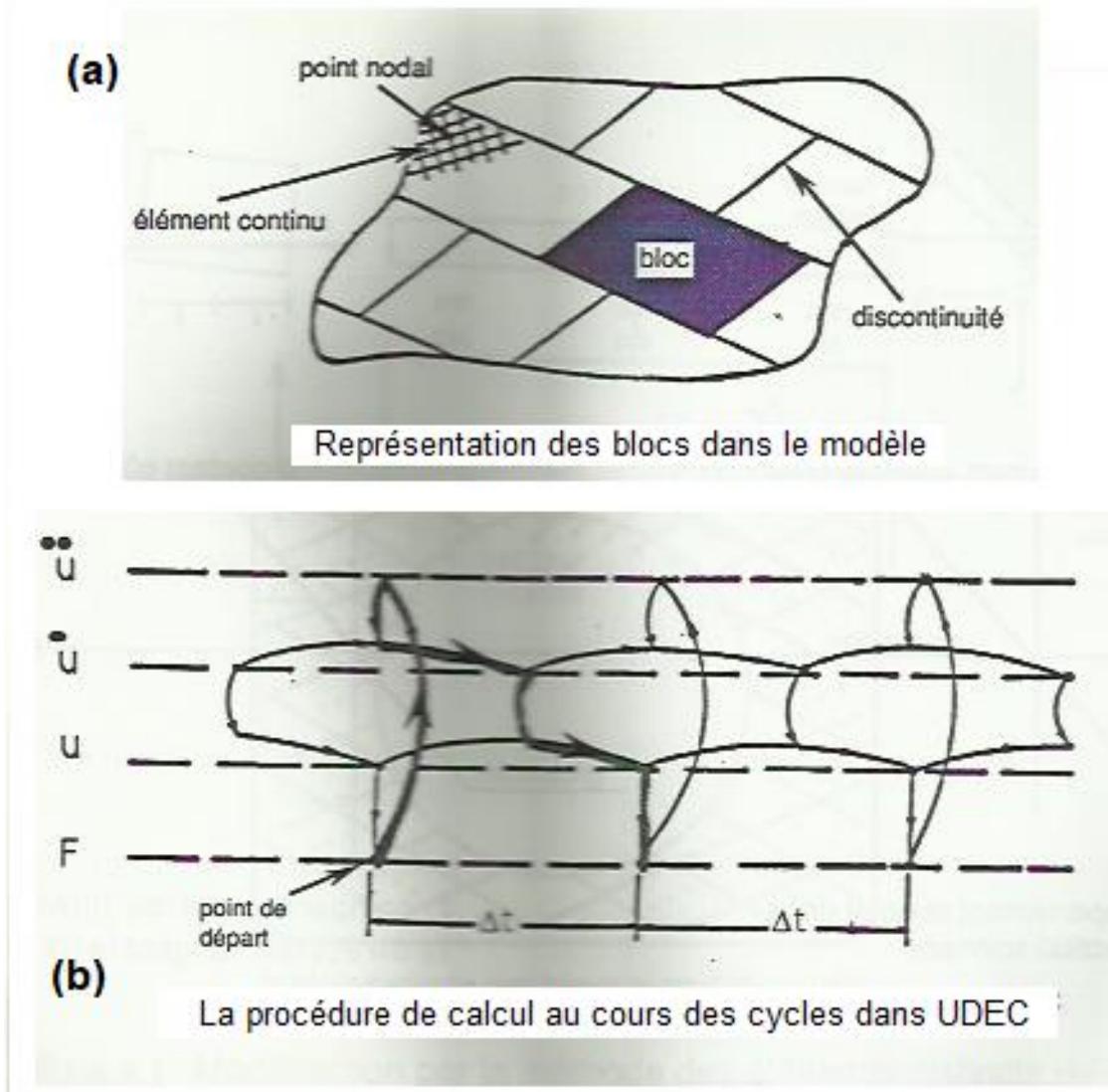
DESCRIPTION DES TERRAINS DE RECEPTION		
DATE :	SITE :	N° PHOTOS :
IDENTIFIANT DU PROFIL GPS :		
NATURE DES TERRAINS DE RECEPTION		
TYPE DE TERRAIN : DUR / MEUBLE	NATURE :	
BOISEMENT : OUI / NON	TYPE DE BOISEMENT :	
PRESENCE D'ÉBOULIS : OUI / NON	NATURE / GRANULOMETRIE :	
PARADES PASSIVES : OUI / NON		
COMMENTAIRES :		
GEOMETRIE DES TERRAINS		
SCHEMA DU PROFIL :		
IDENTIFIANT BLOCS GPS :		
<i>BLOCS DE REFERENCE⁹</i>		

⁹ Blocs situés en pied de falaise, liés à des chutes +/- récentes

<i>IDENTIFIANT</i>	<i>ID POINT GPS</i>	<i>DIMENSIONS / VOLUME</i>	<i>GEOMETRIE / FORME</i>	<i>N°PHOTO</i>	<i>CAUSE ARRET</i>	<i>DATE OCCURENCE</i>

Annexe 6

Géométrie des blocs & discontinuités dans UDEC



(a) Schéma d'un modèle dans le code UDEC, composé de blocs séparés par des discontinuités

(b) Schéma de la procédure de calcul au cours d'un cycle dans UDEC



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Normandie

Parc de la Vatine

14 route d'Houpeville

76130 – Mont Saint-Aignan – France

Tél. : 02 35 60 12 00