

Document
public



Cartographie de l'aléa éboulement rocheux sur la commune de Bédarieux. Secteur des "douses"

Rapport final

BRGM/RP-68700-FR
Février 2019



Document
public

Cartographie de l'aléa éboulement rocheux sur la commune de Bédarieux. Secteur des "douses"

Rapport final

BRGM/RP-68700-FR
Février 2019

Projet AP18MPL016

B. Vignerot

Vérificateur :

Nom : C. Levy

Fonction : Ingénieure
Géotechnicienne

Date : 20/02/2019

Signature : 

Approbateur :

Nom : A. Blum

Fonction: Directrice BRGM
Occitanie

Date : 28/02/2019

Signature : 
Signature :

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



Mots-clés : CHUTE DE BLOCS, EBOULEMENT, MOUVEMENT TERRAIN, CARTOGRAPHIE ALEA, EXPERTISE, OCCITANIE, HERAULT, BEDARIEUX

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

B. Vignerot (2019) – Cartographie de l'aléa éboulement rocheux sur la commune de Bédarieux. Secteur des "douses" (2019). BRGM/RP-68700-FR, 63 p., 35 fig., 3 ann.

SYNTHESE

En 2017, un diagnostic réalisé par le bureau d'étude (BE) Hydrogéotechnique sur le risque de chute de blocs sur le secteur des « douses » a été communiqué à la DDTM de l'Hérault. La DDTM a saisi le BRGM Occitanie le 25 mai 2017 pour recueillir un avis sur ce diagnostic et les conclusions qui en découlaient au regard notamment de l'aménagement de la zone et de la modification éventuelle du PLU afin de densifier la zone d'urbanisation diffuse existante. Les conclusions de l'analyse du BRGM préconisaient une étude complémentaire apportant une cartographie plus fine de l'aléa basée sur les standards en vigueur.

Cette étude a été engagée par le BRGM dans le cadre d'une commande de la commune initiée en Juin 2018 pour apporter les éléments de réponse nécessaires à la réévaluation du zonage du PLU en vigueur.

Les résultats des travaux ont permis de proposer :

- une identification des zones de départs potentiels d'éboulements rocheux le long des falaises considérées en complément de l'étude réalisée par Hydrogéotechnique;
- une modélisation des propagations de blocs au niveau des zones de départs définies ;
- une évaluation de l'aléa « éboulement rocheux » résultant du croisement de l'aléa de départ (identification des zones de départ potentiel, qualification de l'activité de la falaise, intensité du phénomène) avec l'aléa de propagation.

L'ensemble de la falaise du secteur des douses peut être à l'origine de départ de blocs $>1\text{m}^3$ (volume de référence) (blocs isolés ou éboulement de chandelle, écaille ou coin de falaise se fragmentant et produisant des éléments unitaires de taille similaire). L'ensemble des falaises est concerné par une probabilité de départ faible à modérée.

Le volume des blocs pouvant se propager jusqu'aux enjeux conduit à considérer un **aléa de niveau fort sur l'ensemble de la zone d'exposition au phénomène de chute de blocs**, conformément aux développements en cours sur la thématique à l'échelle nationale (recommandations du groupe de travail national MEZAP : COLAS B., FAURE P., J. ROHMER (2017) – Valorisation des travaux réalisés dans le cadre du GT MEZAP (Année 1). Rapport d'avancement. BRGM/RP-66589-FR, 64 p., 57 fig., 1 ann.).

La traduction réglementaire de cette carte d'aléa pourrait conduire à des zones « Rouge » dans le PPR. Les enjeux impactés par ce zonage sont l'habitation parcelle 400, le chemin de randonnée et une portion de route départementale. L'habitation parcelle 408 est en limite de zonage. On notera la présence d'une barrière grillagée à l'arrière de l'habitation parcelle 400, permettant l'arrêt des blocs et pierre mais inadaptée pour parer une rupture d'écaille ou de dièdre correspondant au volume de référence.

Le croisement de la carte d'aléa éboulement et des enjeux identifiés montre les zones d'exposition qui pourraient être qualifiées de risque élevé. Sur ces zones, compte-tenu à la fois des caractéristiques du site et des événements prévisibles, des protections passive de type « écrans de filets » et/ou « barrière grillagée » apparaissent comme les plus adaptées pour réduire l'exposition au risque. Localement, l'emboîtement de zones de départ identifiées serait à proposer.

Sommaire

1	CONTEXTE GENERAL DU PROGRAMME	11
1.1	Contexte et Objectifs de l'étude	11
1.2	Contextes géographique et morphologique de la vallée de l'Orb	14
1.3	Géologie du versant étudié	15
2	CARTOGRAPHIE DE L'ALEA	19
2.1	Methodologie d'évaluation de l'alea chute de blocs/ eboulement	19
2.2	Collecte et acquisition de données	20
2.3	Etape 1 – Phénoménologie d'événements passés	20
2.4	Etape 2 - évaluation de l'aléa de départ	22
2.4.1	Définition de l'aléa de départ	22
2.4.2	Identification des zones de départ potentiel	23
2.4.3	Détermination du(des) scénario(s) de référence	24
2.5	Etape 3 - évaluation de l'aléa propagation	28
2.5.1	Distance de propagation des événements historiques	28
2.5.2	Estimation des distances propagation	29
2.5.3	Synthèse de l'aléa de propagation	34
2.6	Etape 4 – Cartographie de l'alea éboulement rocheux	35
3	PROPOSITION DE PARADES POUR LA MISE EN SECURITE DU SITE D'ETUDE	39
3.1	Identification des enjeux exposés	39
3.2	Travaux de sécurisation	39
4	CONCLUSION	45
5	BIBLIOGRAPHIE	47
6	ANNEXES	49

Liste des figures

Figure 1 – Secteur de l'étude réalisée par le BE Hydrogéotechnique en 2017 (sans échelle).....	12
Figure 2 – Extrait du PLU et zone en aléa éboulement UDHeb (plan transmis par la commune).....	13
Figure 3 – Zone d'étude sur fond de carte IGN (cercle rouge)	14
Figure 4 – Photo de l'affleurement présentant des traces de concrétions calcaires (BRGM)	15
Figure 5 – Alternance de dolomies au sommet et de marnocalcaires en pied (BRGM)	16
Figure 6 – Carte géologique au 1/50000 (http://infoterre.brgm.fr), report de la zone d'étude de 2017 (cercle rouge) et extension de la falaise (tiret jaune)	17
Figure 7 – Illustration de la cicatrice de l'éboulement de 2017	21
Figure 8 – Illustration de la propagation des blocs de l'éboulement de 2017	21
Figure 9 – Panoramique de la propagation des blocs de l'éboulement de 2017	21
Figure 10 : Profil topographique de l'éboulement de 2017.....	22
Table 11 – définition des niveau d'intensité de référence (MEZAP)	23
Table 12 – Tableau d'indice d'activité (MEZAP)	23
Figure 13 – Localisation des zones de départ d'éboulements ou chutes de blocs déterminée en fonction de la valeurs de la pente du MNT à 5 m (IGN) et de l'enquete de terrain.....	24
Figure 14 : Schéma des principaux mécanismes de rupture (Groupe Falaise, 2001).....	25
Table 15 : Tableau de synthèse du risque rocheux établi par le BE Hydrogéotechnique	26
Figure 16 – Illustration des zones de départ de blocs en surplomb.....	26
Figure 17 – Illustration des zones de départ potentiel (chandelle, écaille, dièdre rocheux)	27
Figure 18 – zones de propagation des blocs dans la forêt en pied d'escarpement.....	29
Figure 19 – Profils retenus pour l'analyse trajectographique et de ligne d'énergie	29
Figure 20 – Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β	30
Table 21 – 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).....	30
Table 22 – Valeurs d'angle de propagation retenues pour la méthode de la ligne d'énergie sur le secteur des douses	31
Figure 23 – Zones d'atteinte probable (probabilités d'atteinte forte, moyenne et faible).....	31
Table 24 – Types de sols considérés pour les simulations trajectographiques réalisées avec le logiciel Pierre98©.....	32
Figure 25 – Exemple de types de sol retenus pour le profil P5.....	32
Figure 26 –Exemple de trajectoires et histogramme de propagation pour le profil P5	33
Figure 27 – Résultats de trajectographie pour le profil P5	34
Table 28 – Angles d'énergies correspondants aux distances d'atteintes estimées par trajectographie avec le logiciel Pierre98©.....	34
Figure 29 – Résultats de analyses de propagation	35
Figure 30 – Probabilité d'occurrence du phénomène de référence (MEZAP)	35
Figure 31 – cartographie de la probabilité d'occurrence du phénomène de référence.....	36
Figure 32 – Définition des niveaux d'aléa (MEZAP).....	37
Figure 33 – Carte d'aléa « éboulements rocheux »	38
Figure 34 : Tableau récapitulatif des parades passives.....	40
Figure 35 : Tableau récapitulatif des parades actives.....	41

Liste des annexes

Annexe 1 Rendu cartographique.....	51
Annexe 2 Fiche descriptive du logiciel de trajectographie Pierre98©.....	53
Annexe 3 Analyse trajectographiques.....	59

1 Contexte général du programme

1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

La commune de Bédarieux, dans le département de l'Hérault, est fréquemment soumise à tous types de mouvements de terrain et au risque inondation.

Ces différents phénomènes naturels, pouvant avoir des conséquences diverses sur l'intégrité des biens et des personnes, représentent un risque reconnu. A ce titre, une étude de cartographie de l'aléa a été faite en 2007 par le bureau d'étude MICA Environnement dans le cadre d'une recommandation de zonage des dispositions d'urbanisation.

En 2017, un diagnostic réalisé par le Bureau d'étude (BE) Hydrogéotechnique sur le risque de chute de blocs sur le secteur des « douses » a été communiqué à la DDTM de l'Hérault. La DDTM a saisi le BRGM Occitanie le 25 mai 2017 pour recueillir un avis sur ce diagnostic et les conclusions qui en découlaient au regard notamment de l'aménagement de la zone et de la modification éventuelle du PLU afin de densifier la zone d'urbanisation diffuse existante. Les conclusions du BRGM (rapport BRGM/RP-67146-FR) préconisaient une analyse complémentaire apportant une cartographie plus fine de l'aléa avec :

- gel provisoire de la modification du PLU pour les parcelles en aval de la zone de falaise identifiée dans l'attente d'analyses plus précises ;
- re-définition du périmètre d'étude ;
- cartographie de l'aléa chute de bloc intégrant :
 - o l'identification des zones de départ potentielles pour des chutes de blocs et éboulements d'ampleur, notamment au voisinage de la zone de faille identifiée et la caractérisation de leur intensité potentielle ;
 - o la probabilité d'occurrence de chute de blocs résultant de la probabilité de rupture ET de la probabilité de propagation ;
 - o une évaluation de la propagation avec des méthodes adaptées selon le phénomène considéré (chute de bloc isolée ou éboulement d'ampleur).

Cette étude a été engagée par le BRGM dans le cadre d'une commande de la commune initiée en Juin 2018 pour apporter les éléments de réponse nécessaires à la réévaluation du zonage du PLU en vigueur. L'objectif du projet est d'établir, à l'échelle du secteur d'étude (Figure 1 et Figure 2**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), une cartographie détaillée de l'aléa éboulement / chute de blocs.

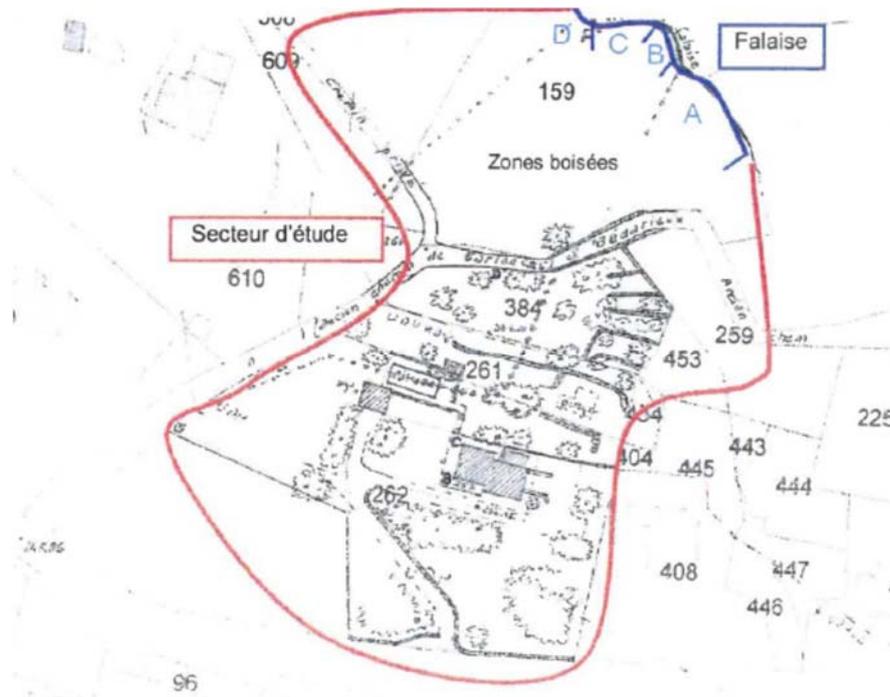


Figure 1 – Secteur de l'étude réalisée par le BE Hydrogéotechnique en 2017 (sans échelle)

pour la cartographie de cet aléa sur l'ensemble du territoire français. Elle est recommandée par le groupe de travail MEZAP, piloté par l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) et sous l'autorité du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie.

L'analyse a porté sur un linéaire de falaise de 470 m environ pour une hauteur d'escarpement variant de 3 à 15 m de hauteur.

1.2 CONTEXTES GEOGRAPHIQUE ET MORPHOLOGIQUE DE LA VALLEE DE L'ORB

Dans la vallée de Bédarieux, au fond de laquelle coule l'Orb et son affluent le ruisseau de Courbezou, la population (5800 habitants en 2016), est répartie sur la ville et différents hameaux. Les terrains affleurant rocheux forment les causses à une altitude de 300 m avec quelques reliefs plus élevés (Cadenas et du Mont Redon).

Ces formations sommitales rocheuses forment les causses d'une quinzaine de mètre de hauteur dont les bordures ont été entaillées par l'Orb et le ruisseau de Courbezou pour former des escarpements rocheux sous lesquels affleurent les talus de marnes grises un peu feuilletées dont les pentes n'excèdent pas 20%. Ces marnes sont notamment visibles en proximité ouest de la zone d'étude. Sur les causses la végétation est rase et de type maquis alors que les talus de marnes grises sont enherbés et quelques poches de forêts de chêne vert se localisent au pied des parois. L'habitat est dense autour du centre de Bédarieux mais clairsemé sur les talus marneux proche du secteur d'étude

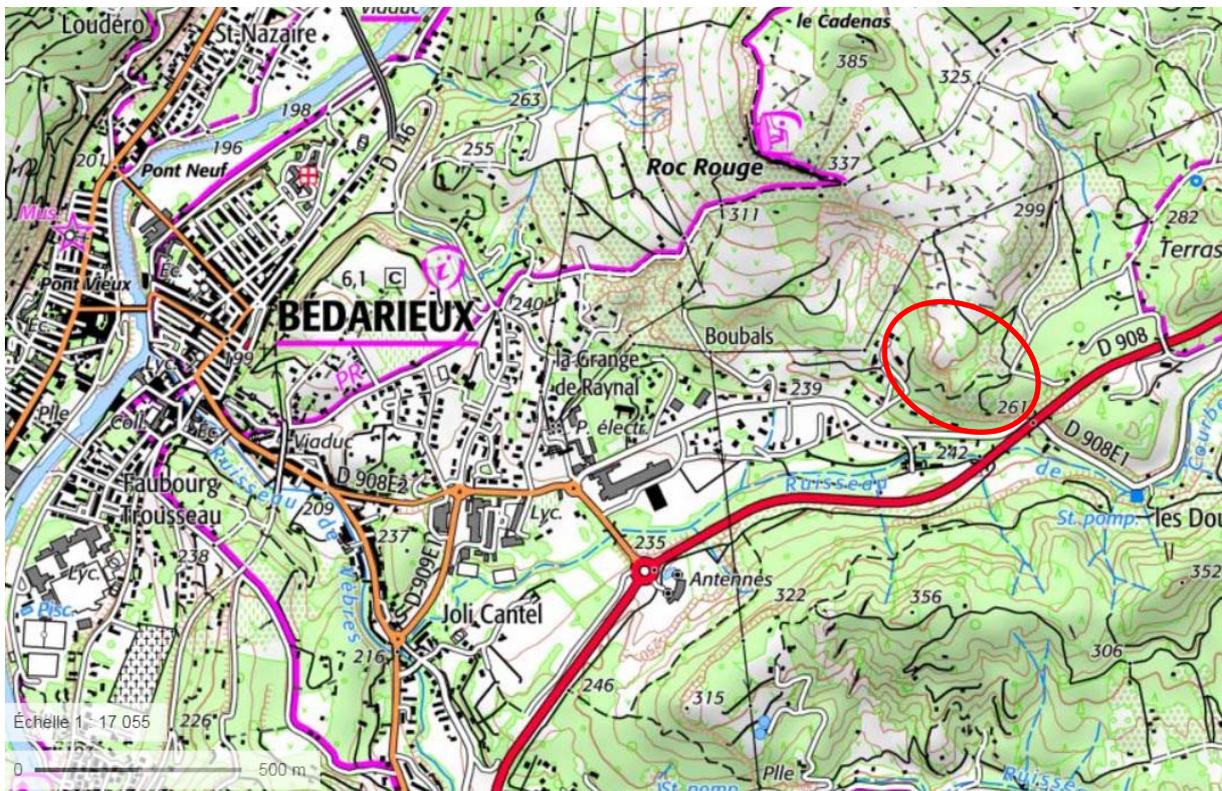


Figure 3 – Zone d'étude sur fond de carte IGN (cercle rouge)

1.3 GEOLOGIE DU VERSANT ETUDIE

Le site se trouve dans une zone de contact entre les formations tabulaires de dolomies saccharoïdes du Bajocien (J₁) constitutives du pan rocheux et les marno-calcaires du Lias (I_{5_8}) affleurant dans les terrains en contrebas (Figure 6).

Globalement grisâtres, les dolomies se caractérisent par un faciès assez massif présentant des fractures centimétriques longitudinales dans lesquelles des traces de dissolutions et de recristallisations importantes sont visibles leur conférant ainsi une couleur plus rougeâtre, signe d'oxydation et de remplissage karstique de type terra rossa. Localement des traces de concrétions calcaires sont également observées indiquant la présence d'un ancien réseau karstique (Figure 4).

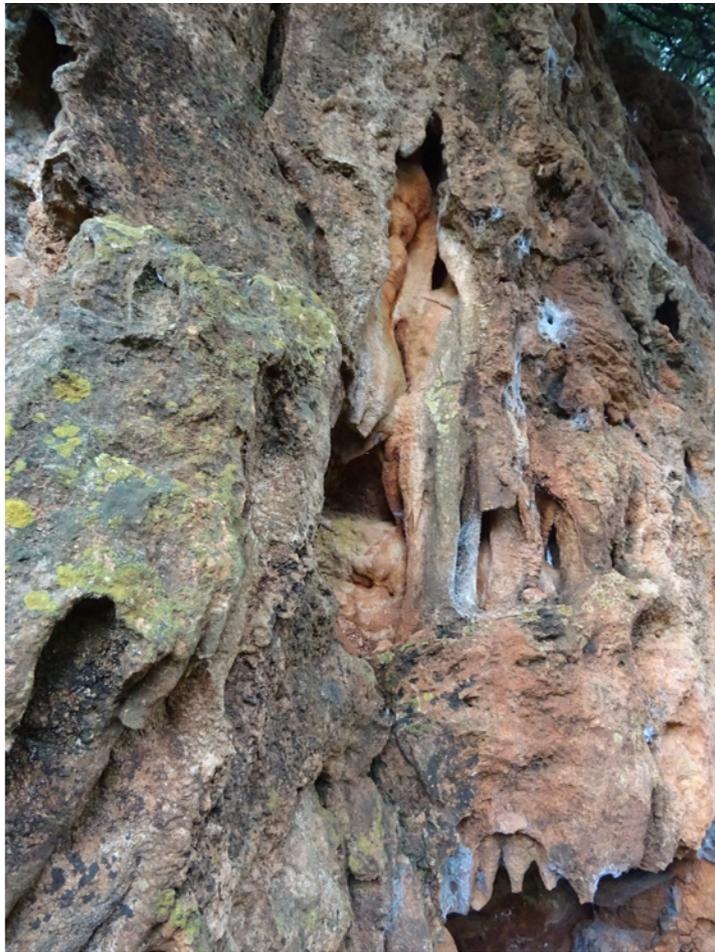


Figure 4 – Photo de l’affleurement présentant des traces de concrétions calcaires (BRGM)

En pied de falaise, sur environ 4 mètres, la roche présente un faciès plutôt calcaro-dolomitique (Figure 5), sous forme de bancs pluri-centimétriques à métriques massifs. Ces bancs sont affectés par des discontinuités qui découpent des masses parallélépipédiques dont certaines jonchent le pied de la falaise.

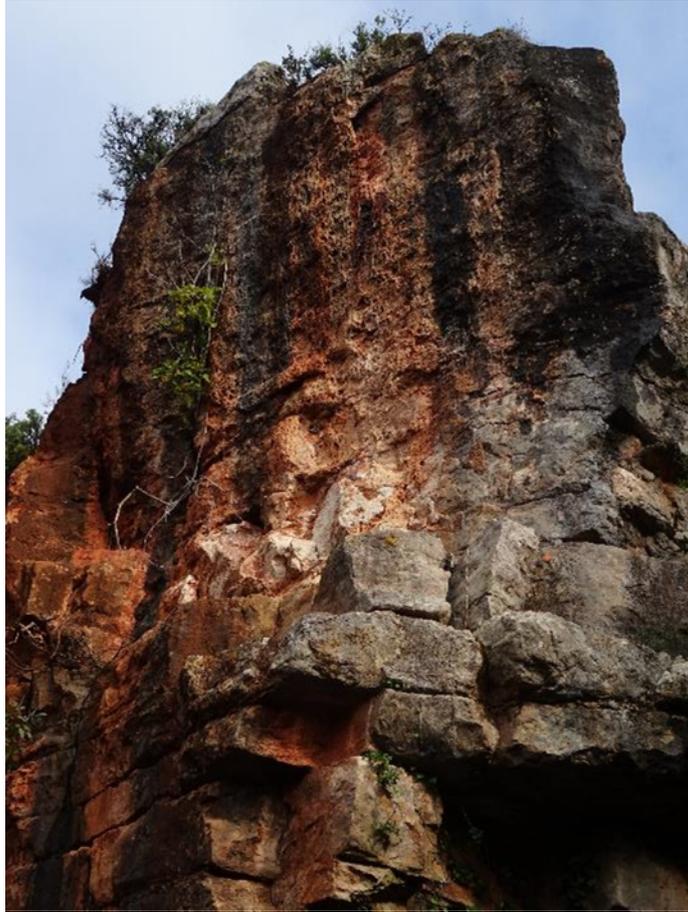


Figure 5 – Alternance de dolomies au sommet et de marnocalcaires en pied (BRGM)

Un dernier faciès est observé à la base de la falaise, visible uniquement en partie centrale du secteur d'étude (point le plus bas) sur une épaisseur de 50 cm. Il s'agit d'un calcaire gréseux, de couleur jaunâtre à rougeâtre, fortement fracturé, altéré et érodé. Les bancs ne dépassent pas les 20 centimètres d'épaisseur et se délitent en fines plaquettes.

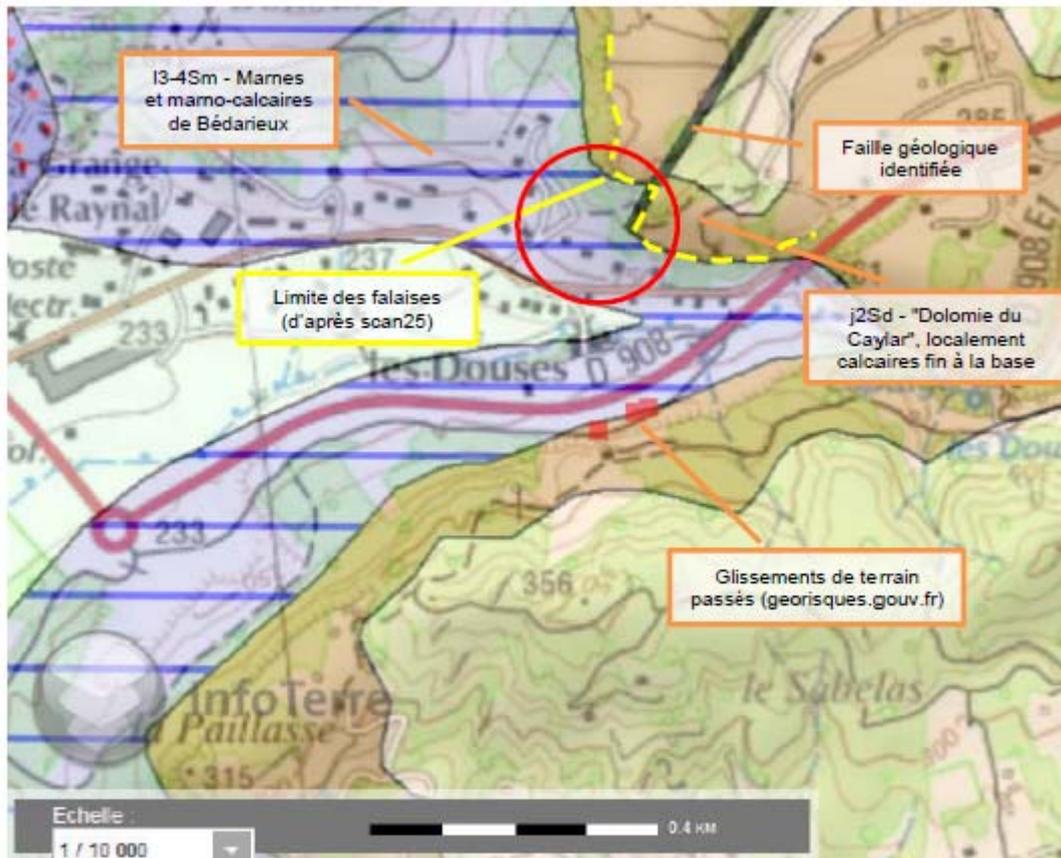


Figure 6 – Carte géologique au 1/50000 (<http://infoterre.brgm.fr>), report de la zone d'étude de 2017 (cercle rouge) et extension de la falaise (tiret jaune)

On notera la présence d'une faille géologique orientée N30° au niveau du passage du chemin de randonnée, découpant la falaise en deux éléments distincts.

Des formations superficielles sont plaquées sur les marnes et argiles du Lias. Ces formations sont:

- des éboulis de pente constitués d'éléments plus ou moins anguleux, emballés dans une matrice marneuse plus ou moins abondante. L'ensemble est plus ou moins consolidé et forme par endroit des cônes ou des couloirs d'éboulis. Ces matériaux, de tailles assez diverses, proviennent du démantèlement des falaises qui surplombent la vallée.
- des zones à gros blocs voire même des panneaux de falaises entiers détachés liés aux effondrements des falaises dolomitiques.

2 Cartographie de l'aléa

2.1 METHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE L'ALÉA CHUTE DE BLOCS/ÉBOULEMENT

Dans le cadre du projet, le BRGM valorise la Méthode d'Évaluation du Zonage de l'Aléa chutes de Pierres (MEZAP) [Colas et al. 2017] pour élaborer les cartes d'aléa « éboulement et chute de blocs ». La MEZAP est une approche qualitative et pragmatique du phénomène d'éboulement et chute de blocs, validée par la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (MTES). Elle permet de répondre aux questions : Quoi (quels volumes)? Où (zones de départ et de propagation)? et Quand (probabilité d'occurrence)?

La MEZAP impose de définir le (les) scénario(s) de référence susceptibles 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 de bloc susceptible de se propager jusqu'aux enjeux. Des effets particuliers de propagation de « masse » (c'est à dire, lorsqu'un nombre important de blocs se propage en même temps) peuvent être à intégrer lorsque la fragmentation d'un compartiment instable en de nombreux volumes lors de(s) impact(s) est envisageable.

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, degré d'altération...). La déclinaison de la méthode est basée sur quatre étapes successives et complémentaires :

- Étape 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, toutes les données disponibles concernant les chutes de blocs et éboulements survenus sur le site ou en contexte similaire. La compilation de ces données permet d'avoir un aperçu de l'historique de l'activité des parois rocheuses du site d'étude;
- Étape 2 - évaluation de l'aléa de départ :
 - o avec la définition du scénario de référence à l'échelle du site étudié. Il s'agit d'identifier, par le biais d'observations de terrain et de l'étude phénoménologique d'identifier les instabilités potentielles à prendre en compte (situation sur les parois et intensité des phénomènes redoutés) ;
 - o 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) ;
- Étape 3 - 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 (ici, avec le logiciel Pierre98©) ;

- Etape 4 - cartographie de l'aléa éboulement / chute de blocs. L'aléa résultant est 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 ;

2.2 COLLECTE ET ACQUISITION DE DONNEES

La phase documentaire est couplée par une reconnaissance de terrain afin de préciser la nature et la géométrie des mouvements historiques, mais également d'identifier les indices d'éventuels instabilités non reconnus lors de la phase documentaire. La collecte des informations disponibles (données et observations) s'appuie sur :

- la Banque de données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM (<http://infoterre.brgm.fr/>) ;
- les archives du BRGM (rapports, cartes géologiques) ;
- la base de données mouvement de terrain du portail Géorisque (<http://www.georisques.gouv.fr/>) ;
- une visite de terrain pédestre réalisée par le BRGM le 20/11/2018 ;
- les travaux d'analyse d'historicité réalisés dans le cadre du PLU (rapport MICA Environnement) ;
- des entretiens menés auprès de la commune et d'habitants sous l'escarpement.

Les principaux relevés effectués lors de la visite de terrain concernent :

- la caractérisation de l'activité des falaises, mécanismes de rupture, identification des cicatrices d'arrachement, découpage de la falaise, orientation et ouverture des fractures, venues d'eau et remplissages, végétation notamment ;
- l'identification, la géolocalisation et la caractérisation des zones de départ de blocs ou d'éboulement de façon la plus complète possible ;
- l'identification des distances d'arrêt des blocs éboulés sur les pentes (présence de blocs rocheux éboulés individualisés ou en zone diffuse).

2.3 ETAPE 1 – PHENOMENOLOGIE D'EVENEMENTS PASSES

La BD MVT recense 5 chutes de blocs et éboulements sur le territoire de la commune entre 1970 et 2006, principalement dans les marnocalcaires correspondant à un contexte différent de l'étude. Une chute de bloc est recensée dans les dolomies en 2014 (RP-64255-FR) sur les falaises du centre-ville.

Lors de notre visite, le secteur B de l'étude du BE Hydrogéotechnique s'était éboulé. La cicatrice fraîche d'éboulement montre aussi de nombreux blocs instables et une fracture ouverte délimitant une colonne de plusieurs dizaines de m³ (figure 7). Lors de l'éboulement, la partie sommitale (dolomie vacuolaire) s'est propagée sur une dizaine de mètres, Une masse de plusieurs dizaines de m³ ne s'est pas fragmentée ; les dalles basales calcaires se sont fragmentées en parallélépipèdes tabulaires et cubiques de dimension métrique, la propagation a atteint un maximum de 37 m depuis le pied actuel de la paroi, soit un angle équivalent de 27° (figures 8, 9 et 10). Le profil 2 dans l'étude qui suit a été choisi au droit de cet événement (voir section 2.5).



Figure 7 – Illustration de la cicatrice de l'éboulement de 2017



Figure 8 – Illustration de la propagation des blocs de l'éboulement de 2017



Figure 9 – Panoramique de la propagation des blocs de l'éboulement de 2017

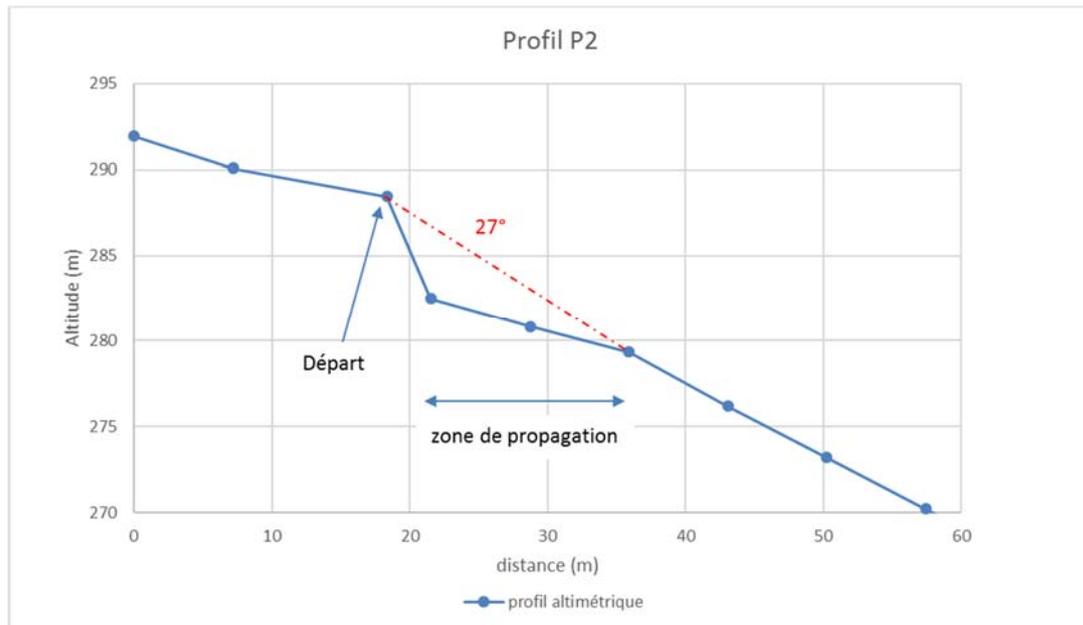


Figure 10 : Profil topographique de l'éboulement de 2017

Compte tenu du contexte géologique et du volume mis en jeu, cet événement a une probabilité d'occurrence très faible, correspondant à période de retour supérieure à 100 ans.

Par ailleurs, les méga-blocs observés dans le versant (jusque 50 m³) ne sont pas des phénomènes de scénario probable, il n'est en effet pas détecté de bloc en situation d'instabilité avérée sur la zone d'étude susceptible de se déclarer dans la période de retour considérée (ces événements ont une probabilité d'occurrence jugée trop faible, avec une période de retour estimée à plus de 100 ans)

2.4 ETAPE 2 - EVALUATION DE L'ALEA DE DEPART

2.4.1 Définition de l'aléa de départ

L'évaluation 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, après fragmentation, de roche pouvant se détacher et se propager ensuite (Table 11).
- l'**indice d'activité**, qui correspond à une fréquence d'occurrence avec laquelle les masses se mettent en mouvement (Table 12). Il s'agit d'une appréciation qualitative de la probabilité qu'un phénomène ait lieu.

Indices d'intensité	Description	Potentiels de dommages
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

Table 11 – définition des niveau d'intensité de référence (MEZAP)

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

Table 12 – Tableau d'indice d'activité (MEZAP)

2.4.2 Identification des zones de départ potentiel

L'inventaire exhaustif des zones de départs potentielles (falaises et barres rocheuses) lors de la reconnaissance *in situ* a été difficile à réaliser sur l'ensemble de la zone d'étude compte tenu des difficultés d'accessibilités mais surtout de la végétation particulièrement développée. Afin d'aboutir à un inventaire le plus complet possible, l'analyse est réalisée par couplage de méthodes : photo-interprétation, analyse morphologique à partir des données du MNT (pentes et ombrage) et expertise de terrain.

Des réflexions, par retour d'expérience de zones d'éboulement dans le massif alpin [Berger, 2009] ont été menées pour valoriser les données MNT au travers de la carte des pentes notamment. Sur cette base, un modèle permettant de calculer la valeur du seuil de pente propice aux départs de blocs en fonction de la résolution de MNT (avec RES résolution du MNT) est élaboré :

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

Ainsi, pour le MNT au pas de 5 m dont on dispose, une pente supérieure ou égale à 49° peut être considérée comme zone de départ potentielle (zone violette sur la figure 13).

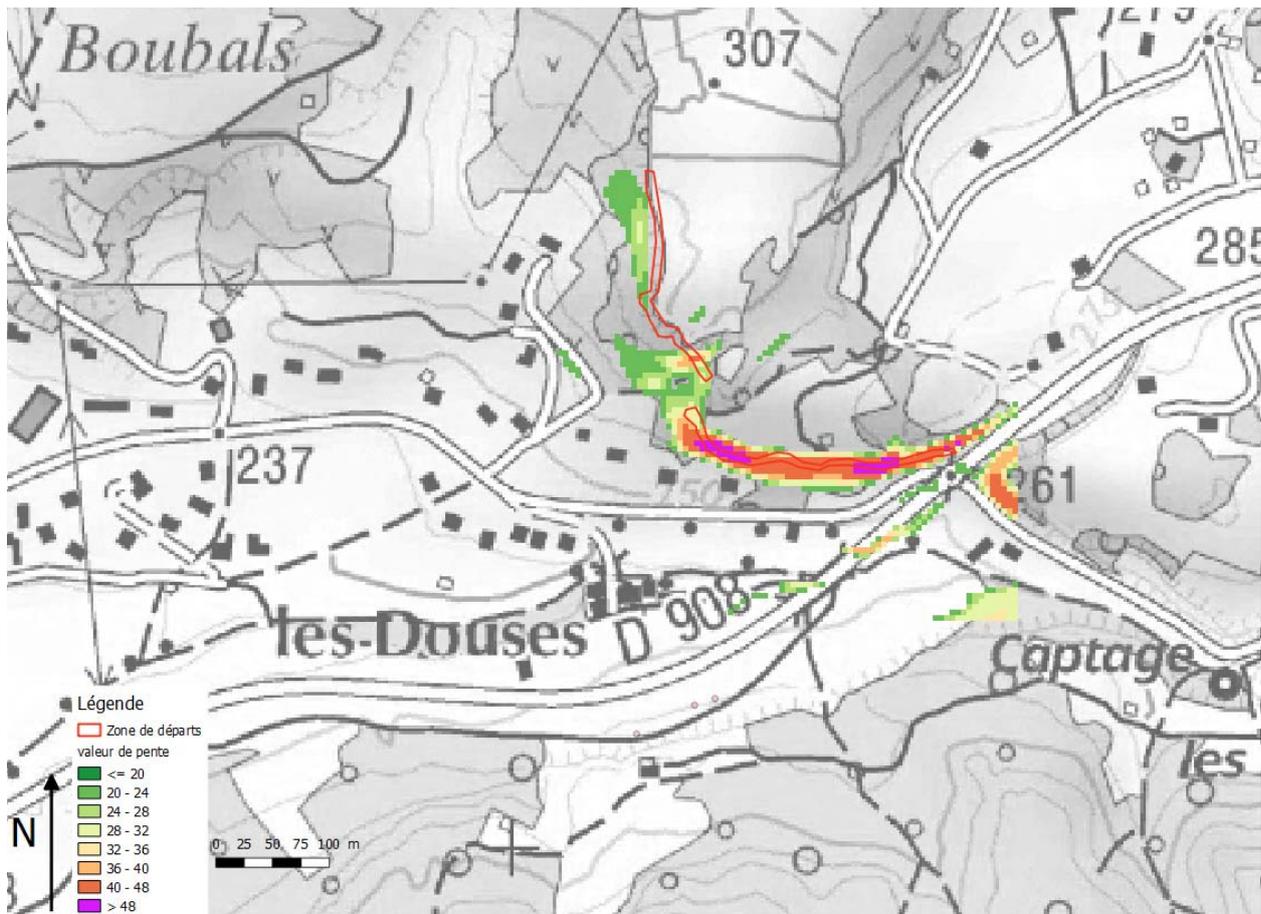


Figure 13 – Localisation des zones de départ d'éboulements ou chutes de blocs déterminée en fonction de la valeurs de la pente du MNT à 5 m (IGN) et de l'enquete de terrain

La confrontation de cette donnée avec les campagnes de terrain et l'analyse photo-interprétative ont incité à abaisser ce seuil de pente global à une valeur de 32° en première approche. Etant donné l'imprécision du MNT sur l'escarpement Nord (absence de falaise au MNT), une cartographie manuelle détaillée des zones de départ potentiel a été privilégiée pour cette zone, à partir notamment des données de photographies aériennes haute résolution (BDOrtho de IGN). Les zones de départ considérées pour la suite de l'étude sont encadrées en rouge en Figure 13.

2.4.3 Détermination du(des) scénario(s) de référence

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

- compartiments rocheux isolés qualifiés par leur volume total. Le type de rupture de ces masses peut engendrer une fragmentation plus ou moins importante qui est ici évaluée de façon experte;
- chutes de blocs isolés qualifiés de diffuses à l'échelle des parements rocheux (i.e., dans ce cas la fragmentation est négligeable).

Les observations réalisées sur le terrain et l'analyse des événements passés permettent de déterminer les principaux mécanismes de rupture (voir le schéma conceptuel des principaux mécanismes de rupture en figure 14).

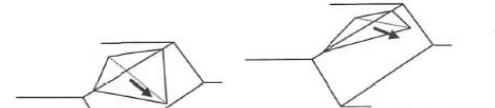
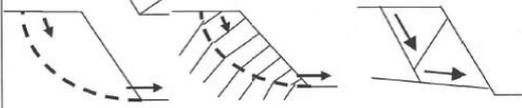
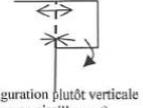
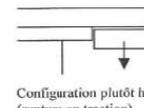
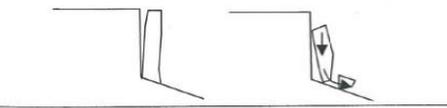
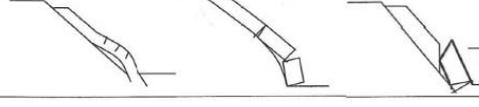
Configurations / mécanismes	Mécanisme d'instabilité
	Glissement plan Gp
	Glissement dièdre ou plan Gd
	Glissements rotationnel et fractionné Gr
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Configuration plutôt verticale (rupture en cisaillement)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Configuration plutôt horizontale (rupture en traction)</p> </div> </div>	Rupture de surplomb S
	Basculement de colonne ou de blocs Cb
	Rupture de colonne en pied Cp
	Rupture de banc (par flambage ou sur fracture) Bf

Figure 14 : Schéma des principaux mécanismes de rupture (Groupe Falaise, 2001)

L'inventaire des zones de départs potentielles établi par le BE Hydrogéotechnique (Diagnostic géotechnique et étude trajectographique. Etude de confortement rocheux. Bureau d'Etudes (BE) HYDROGEOTECHNIQUE (ref. CF15 FAL0014)) sur les zones A, C et D est complet et il est réutilisé pour cette étude. Nous résumons ci-dessous les caractéristiques principales de ces zones :



Figure 17 – Illustration des zones de départ potentiel (chandelle, écaille, dièdre rocheux)

Au vu de l'ensemble de la falaise du secteur, le scénario de référence pour l'ensemble du linéaire est représenté par des blocs de volume unitaire supérieurs à 1 m³. Ces évènements de référence sont liés à des chutes de blocs isolés ou à l'éboulement de chandelle, écaille ou coin de falaise se fragmentant en éléments de taille similaire.

L'ensemble de la falaise est concerné par une activité qualifiée de faible à modérée (1 blocs tous les 10 à 100 ans de plus de 1 m³ susceptibles de se propager en versant).

Les volumes mis en jeu atteignant voire dépassant le mètre cube, l'intensité du phénomène est donc forte.

2.5 ETAPE 3 - EVALUATION DE L'ALEA PROPAGATION

2.5.1 Distance de propagation des événements historiques

L'inventaire des blocs éboulés (blocs historiques) est réalisé à partir des photos aériennes, et des relevés de terrain (figure 18 et 29). Cet inventaire permet définir une enveloppe de propagation pour le site qui sera utilisé pour calibrer le modèle de trajectographie (voir section 2.5.2).

Les blocs les plus éloignés se trouvent à environ 90 m de la falaise actuelle. Cependant, cette distance ne correspond pas à priori à la distance de propagation des blocs depuis la falaise actuelle. En effet, du fait de leur géométrie (parallélépipède rectangle en général), de leur taille et la pente du versant en aval de la falaise, ces blocs ne peuvent pas s'être propagés depuis la zone de départ actuelle. Une telle propagation représenterait des angles d'énergie (Figure 20) de l'ordre de 17° ce qui est incompatible avec les retours d'expérience en la matière (angles d'énergie minimaux de l'ordre de 26°).

La présence de ces blocs éloignés peut s'expliquer par le fait que la falaise se trouvait proche de la position actuelle de ces blocs à l'époque de leurs écroulements. La succession de gros blocs depuis la position actuelle de la falaise jusqu'aux blocs les plus éloignés semble décrire une régression naturelle de la falaise.

L'événement de 2017 décrit en section 2.3 s'est propagée sur une dizaine de mètres, ce qui correspond à un angle d'énergie de 27° .

Le long de l'escarpement, la zone de propagation est évaluée entre 40 et 50 m maximum.





Figure 18 – zones de propagation des blocs dans la forêt en pied d'escarpement

2.5.2 Estimation des distances propagation

L'évaluation de la propagation de chutes de blocs en versant a été menée en suivant les étapes suivantes :

- analyse à partir de la méthode dite de la ligne d'énergie permettant la définition d'enveloppes de propagation selon des probabilités d'atteinte forte, moyenne ou faible en fonction des caractéristiques topographiques du site ;
- simulations trajectographiques en 2D avec le logiciel Pierre98©;
- cartographie de synthèse basée sur les résultats des méthodes précédentes enrichies d'une approche « experte ».

Méthode de la « ligne d'énergie »

Une généralisation des distances d'atteintes est réalisée avec la méthode de la ligne d'énergie. Selon la variabilité des profils de terrain et hauteur de falaise, six profils représentatifs ont été choisis le long des zones de départ pour caractériser la propagation de blocs (figure 19). Compte tenu du manque de précision du MNT, les profils ont été corrigés en se basant sur les levés topographiques simplifiés de l'escarpement réalisés lors de la visite de terrain.

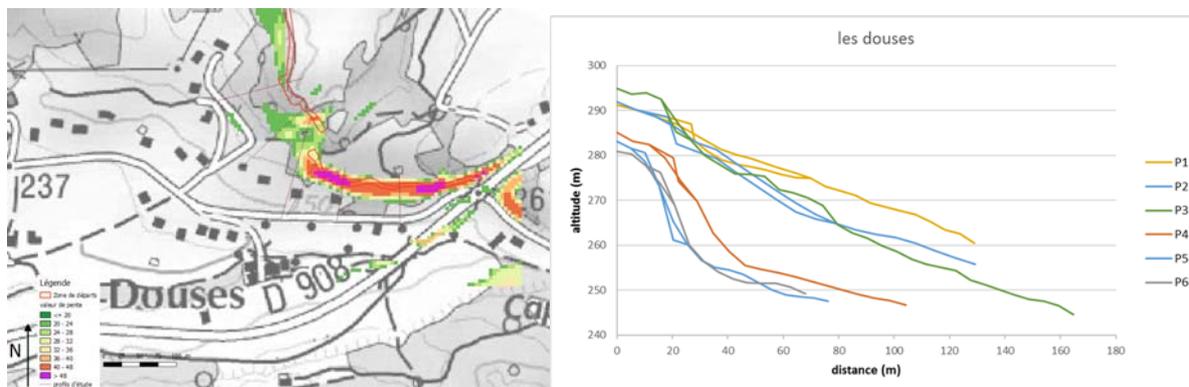


Figure 19 – Profils retenus pour l'analyse trajectographique et de ligne d'énergie

Le modèle empirique de la ligne d'énergie permet d'estimer à partir d'une zone de départ la localisation du point d'arrêt maximal probable d'un projectile. 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 (Figure 20). Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β , l'angle de la ligne d'énergie.

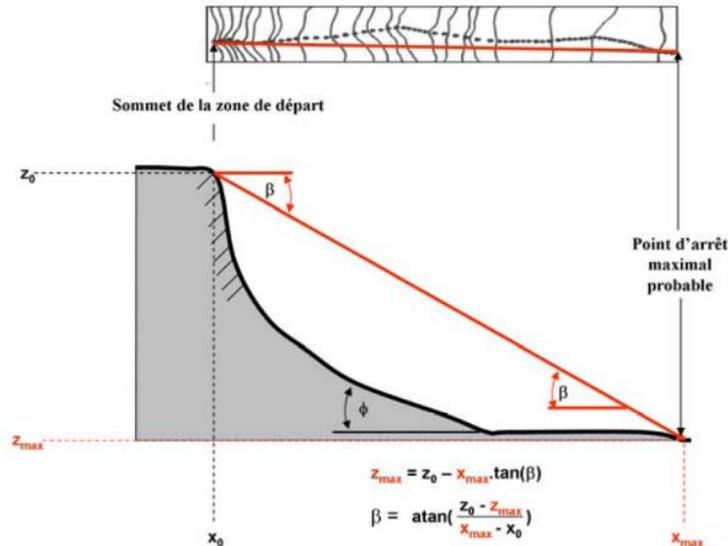


Figure 20 – Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β

La méthode 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). Une revue bibliographique d'évènements historiques couplée à une analyse statistiques réalisé par le groupe de travail MEZAP a permis de proposer des plages indicatives de valeurs d'angle de la ligne d'énergie (Table 21).

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°

Table 21 – 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)

Le choix de la valeur d'angle au sein de l'intervalle proposé est justifié en fonction de la connaissance du site et des retours d'expérience sur des sites équivalents. Le choix de la valeur d'angle doit être notamment modulé par les caractéristiques topographiques de la zone de propagation et de la forme des blocs propagés observés dans le versant. Le contexte de versants aux falaises de faibles hauteurs et aux pieds de talus assez plats incite à retenir plutôt les fourchettes hautes de ces valeurs d'angle. De plus, la forme des blocs éboulés, généralement allongée, est peu propice à des propagations de longues portées. Les valeurs d'angles retenues pour les six profils sont les suivantes :

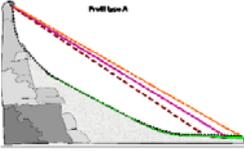
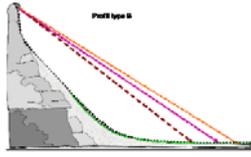
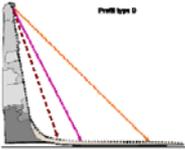
Probabilité d'atteinte d'un point	Profil de pente régulière en pied de zone de départ [P2-P3]	Profil de pente régulière en pied de zone de départ avec replat marqué en fin de trajectoire [P1]	Zone de départ type escarpement avec replat marqué à la base [P4-P5-P6]
Fort	36	42	45
Moyen	31	38	42
Faible	27	34	Non significatif
profil	 Profil de pente régulière en pied de zone de départ	 Profil de pente régulière en pied de zone de départ avec replat marqué en fin de trajectoire	 Falaise et replat marqué

Table 22 – Valeurs d'angle de propagation retenues pour la méthode de la ligne d'énergie sur le secteur des douses

Le report de ces angles de ligne d'énergie sur le MNT nous permet de positionner les distances de propagation pour des probabilités d'atteinte forte, moyenne et faible (Figure 23).

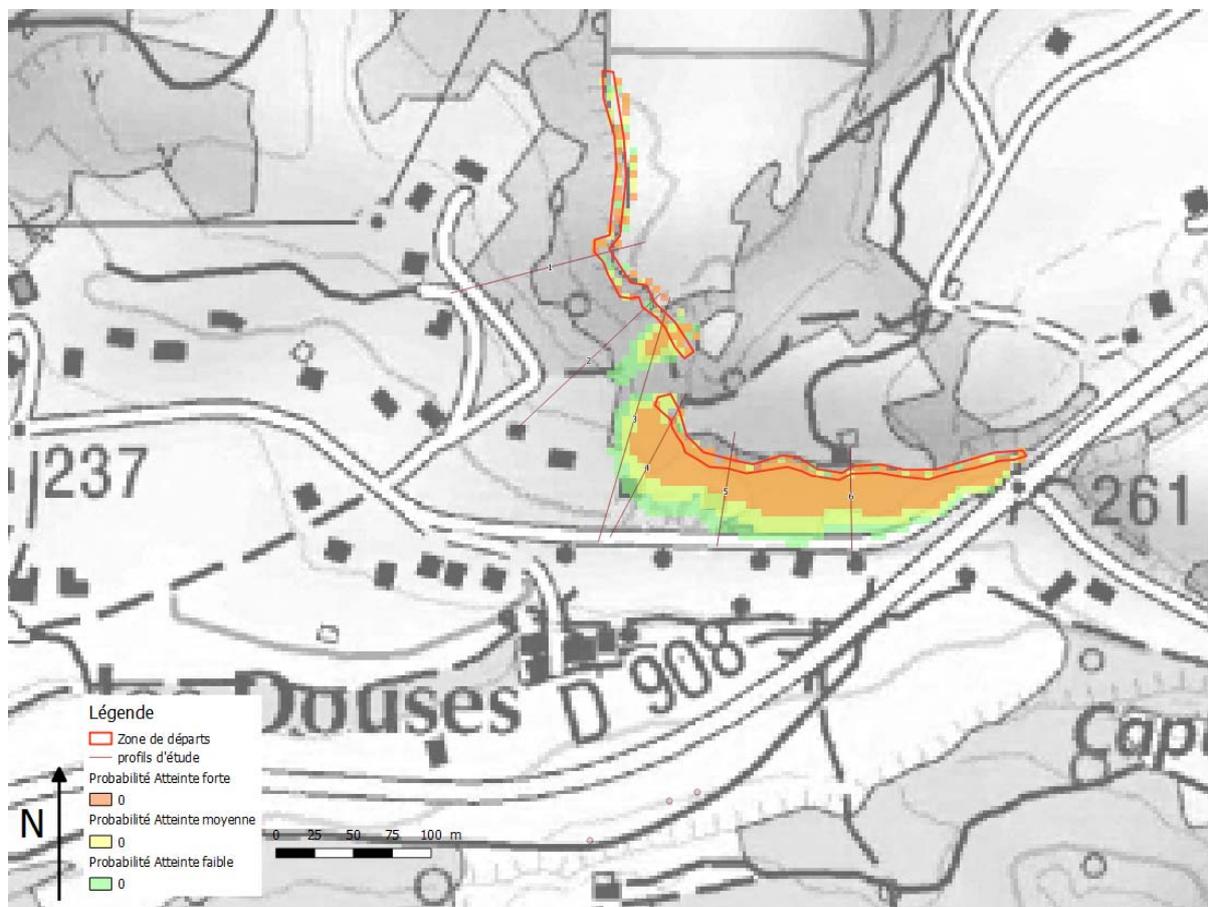


Figure 23 – Zones d'atteinte probable (probabilités d'atteinte forte, moyenne et faible)

On notera le manque de précision sur le MNT au niveau de l'escarpement nord n'apporte pas satisfaction pour cartographier convenablement la propagation au sein de la zone. Un pointage manuel des distance d'arrêt sur les profils de trajectographie 2D (ci-dessous) permet de s'affranchir de ce problème.

Trajectographie 2D

L'outil utilisé est PIERRE98©, logiciel probabiliste de trajectographie 2D de chute de bloc prenant en compte l'impact bloc / sol [Mella A. et Hungr, 1999]. Le calcul d'une trajectoire est effectué de manière déterministe en prenant potentiellement en compte la variabilité des paramètres liés au bloc, au sol et aux interactions sol/bloc (voir l'annexe 2). L'analyse probabiliste résulte de la multiplication des trajectoires calculées en simulant, pour chaque paramètre d'entrée, une réalisation possible d'une variable aléatoire et de l'analyse statistique qui résulte de l'ensemble des simulations.

Les profils de calcul jugés représentatifs des configurations rencontrées sur l'ensemble de la zone d'étude et ayant fait l'objet des simulations sont les profils P1 à P6 présenté ci-dessus.

Pour les simulations, les types de sols considérés sont (Table 24) :

2	sol fin (remblai meuble, prairie, colluvions fines...)
3	piste forestière, éboulis
4	éboulis grossier
5	couvert meuble peu épais (altérites)
6	roche mère
7	route goudron

Table 24 – Types de sols considérés pour les simulations trajectographiques réalisées avec le logiciel Pierre98©

Les types de sols son défini sur chaque intervalle au sein du profil (Figure 25 et annexe 3):

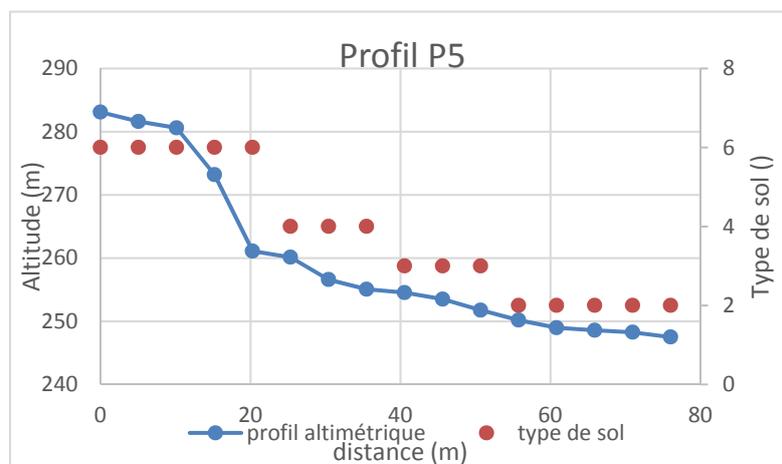


Figure 25 – Exemple de types de sol retenus pour le profil P5

Pour chaque profil, les trajectoires de 5000 blocs ont été simulés, dont les caractéristiques, guidées par les observations de terrain, sont les suivantes :

- 1000 blocs de forme cubique (volumes de bloc de 4 m³);
- 2000 blocs de forme tabulaire (volumes de bloc de 4 m³ : 2 x 2 x 1 m et 2,5 x 1,6 x 1 m) ;
- 2000 blocs de forme parallélépipédique (volumes de bloc de 4m³, 4 x 2 x 1 m et 2,5 x 1,6 x 1 m).

Le choix de cibler ces éléments, plutôt que ceux de 5 à 10 m³ (dans la même classe d'intensité) est issu de la représentativité plus forte de cette sous-classe de volume sur site.

Les trajectoires des blocs ainsi que les histogramme d'atteinte sont extrait pour obtenir la distribution des distances d'arrêt des blocs:

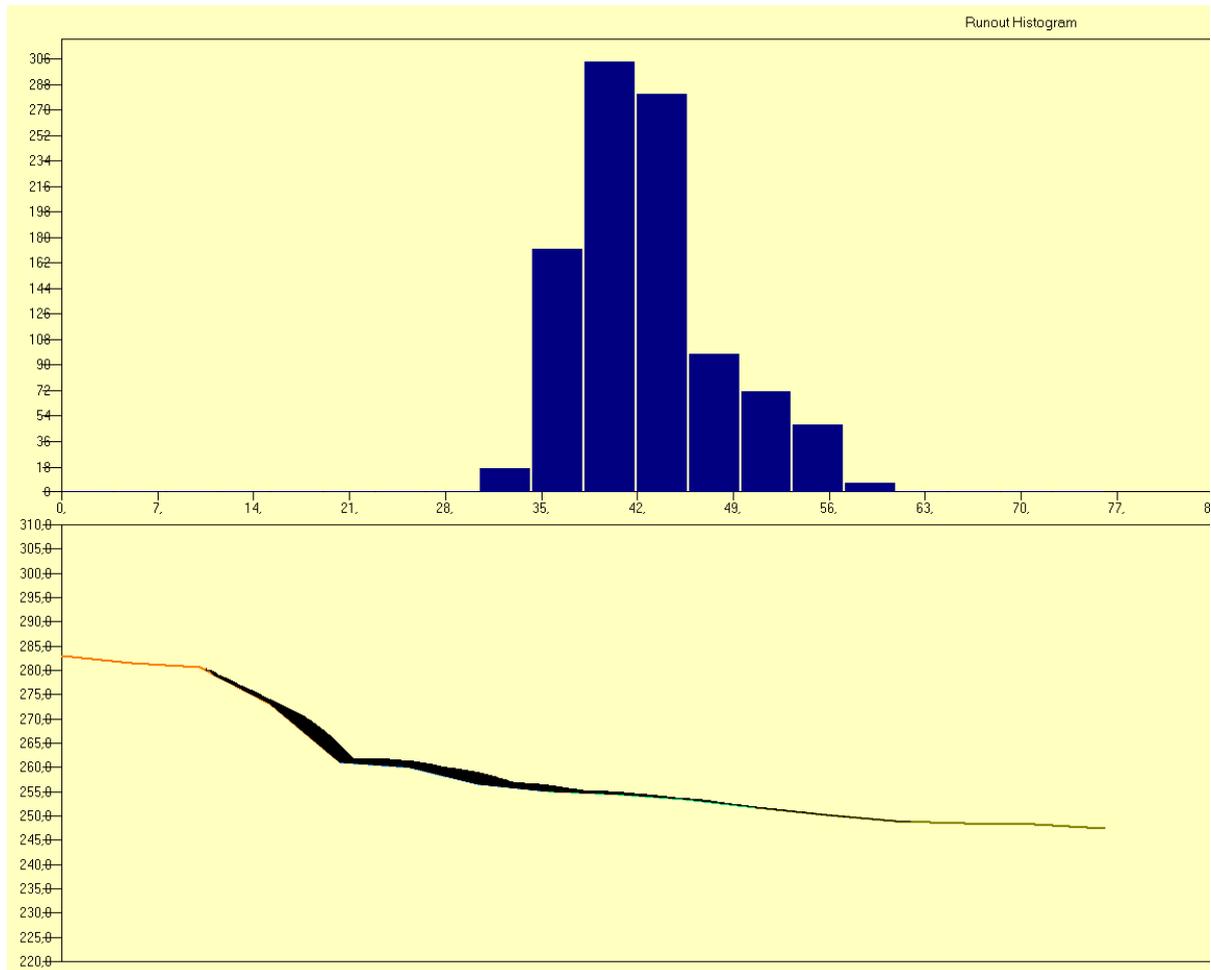


Figure 26 –Exemple de trajectoires et histogramme de propagation pour le profil P5

Les résultats se présentent comme une distribution des zones d'arrêt de blocs dans les versants. La donnée est valorisée comme une probabilité d'atteinte en chaque point du profil. La synthèse des analyses est présentée au tableau 20. Les classes de probabilité d'atteinte sont définies comme suit en référence aux valeurs communément admises (ADRGT, MEZAP) :

- $P > 10^{-2}$ (1 bloc sur 100 atteint l'enjeu) : probabilité forte ;
- $10^{-4} < P < 10^{-2}$ (1 bloc sur 10000 atteint l'enjeu) : probabilité moyenne ;
- $10^{-6} < P < 10^{-4}$ (1 bloc sur 1 000 000 atteint l'enjeu) : probabilité faible.

Un lâcher de 5 000 blocs permet d'atteindre une probabilité d'atteinte de 5×10^{-3} . L'estimation des distances d'arrêt pour une probabilité d'atteinte de 10^{-6} est menée par extrapolation (voir Figure 27 et annexe 2).

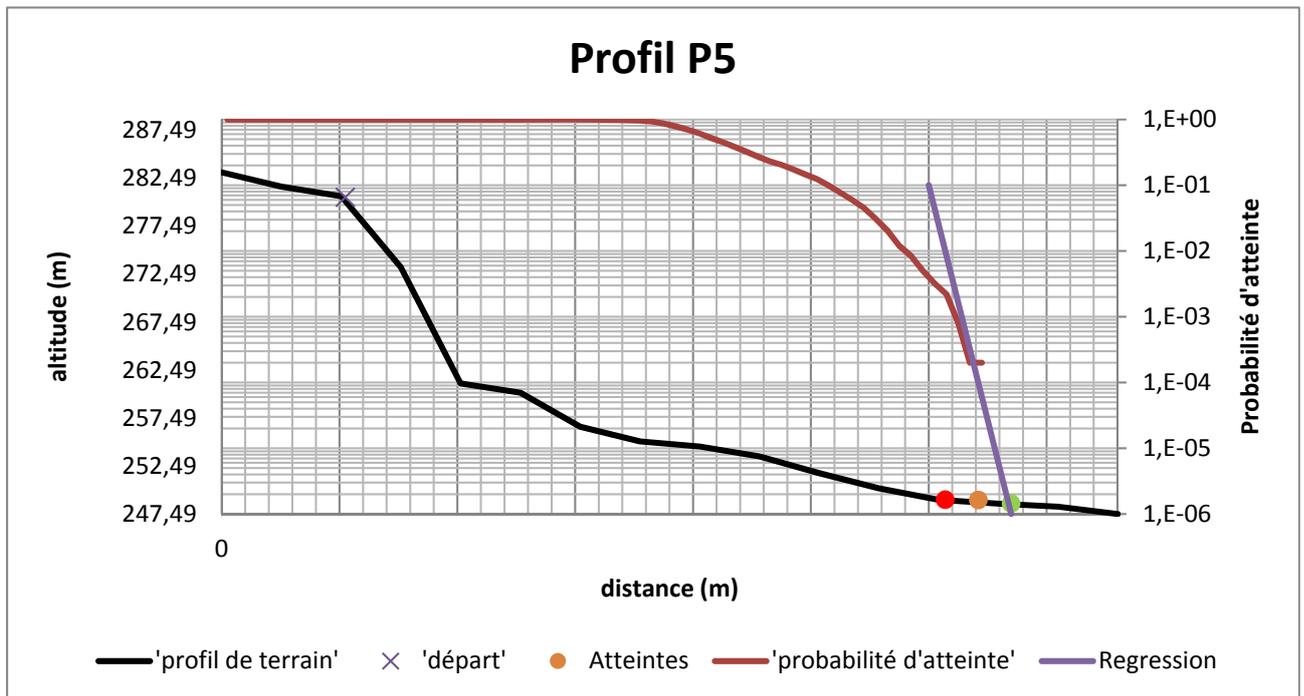


Figure 27 – Résultats de trajectographie pour le profil P5

Pour chaque distance d'atteinte calculée par trajectographie (probabilité d'atteinte forte, moyenne et faible), nous estimons quel est l'angle d'énergie correspondant (Table 28) :

	P1		P2		P3		P4		P5		P6	
Probabilité d'atteinte	Distance (m)	Angle β (°)										
Forte	13	31	14.1	31	26.4	32	40	31	50.9	32	41	31
Moyenne	16.2	29	17.3	28	29.2	30	44	30	53.7	30	45	29
Faible	19	25	20.5	28	32	28	50	28	56.5	29	49	27

Table 28 – Angles d'énergies correspondants aux distances d'atteintes estimées par trajectographie avec le logiciel Pierre98©.

2.5.3 Synthèse de l'aléa de propagation

Les distances de propagation estimées par trajectographie sont généralement plus grandes que celles estimées avec la méthode de la ligne d'énergie pour le secteur des douses. Nous choisissons donc de cartographier les zones d'atteinte avec des probabilités fortes, moyennes et faibles, en fonction des résultats des simulations trajectographiques et des observations de terrain.

La carte suivante synthétise les zones d'atteinte avec des probabilités fortes, moyennes et simulées et observées pour le site des douses.

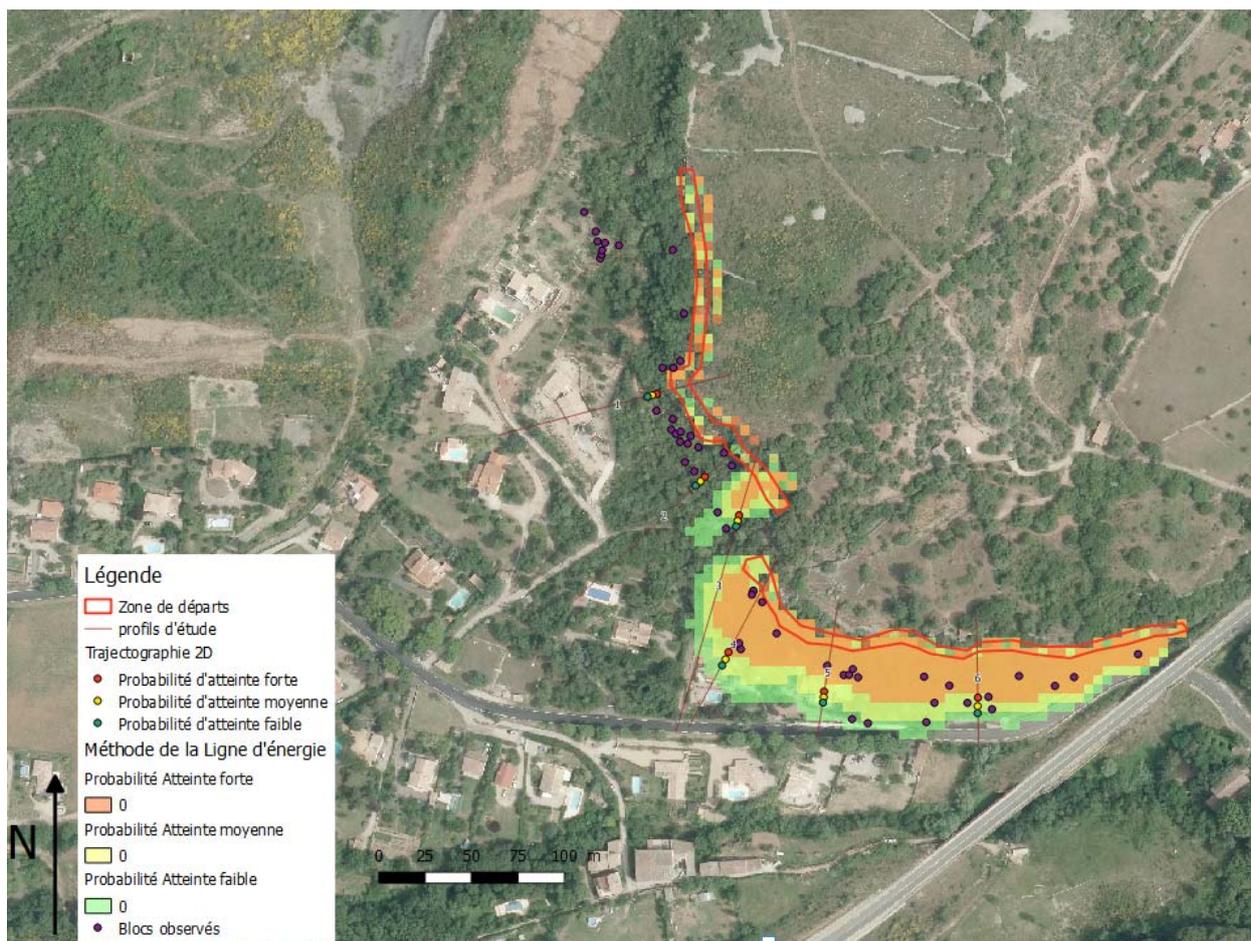


Figure 29 – Résultats de analyses de propagation

2.6 ETAPE 4 – CARTOGRAPHIE DE L’ALEA EBOULEMENT ROCHEUX

La cartographie de l'aléa éboulement / chute de blocs peut être réalisée à partir des conclusions précédentes suivant la méthode proposée par les recommandations MEZAP. La qualification de la **probabilité d'occurrence** est définie à partir de la matrice de Figure 30, en croisant la probabilité d'atteinte en un point et la probabilité de départ qualifiée par l'indice d'activité (qualifié de « moyen » à « faible »).

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

Figure 30 – Probabilité d'occurrence du phénomène de référence (MEZAP)

L'application de cette grille conduit à considérer des zones de probabilité d'occurrence « faible », « modérée » ou « élevée » du phénomène de référence.

La carte de probabilité d'occurrence ainsi obtenue est présentée en Figure 31.

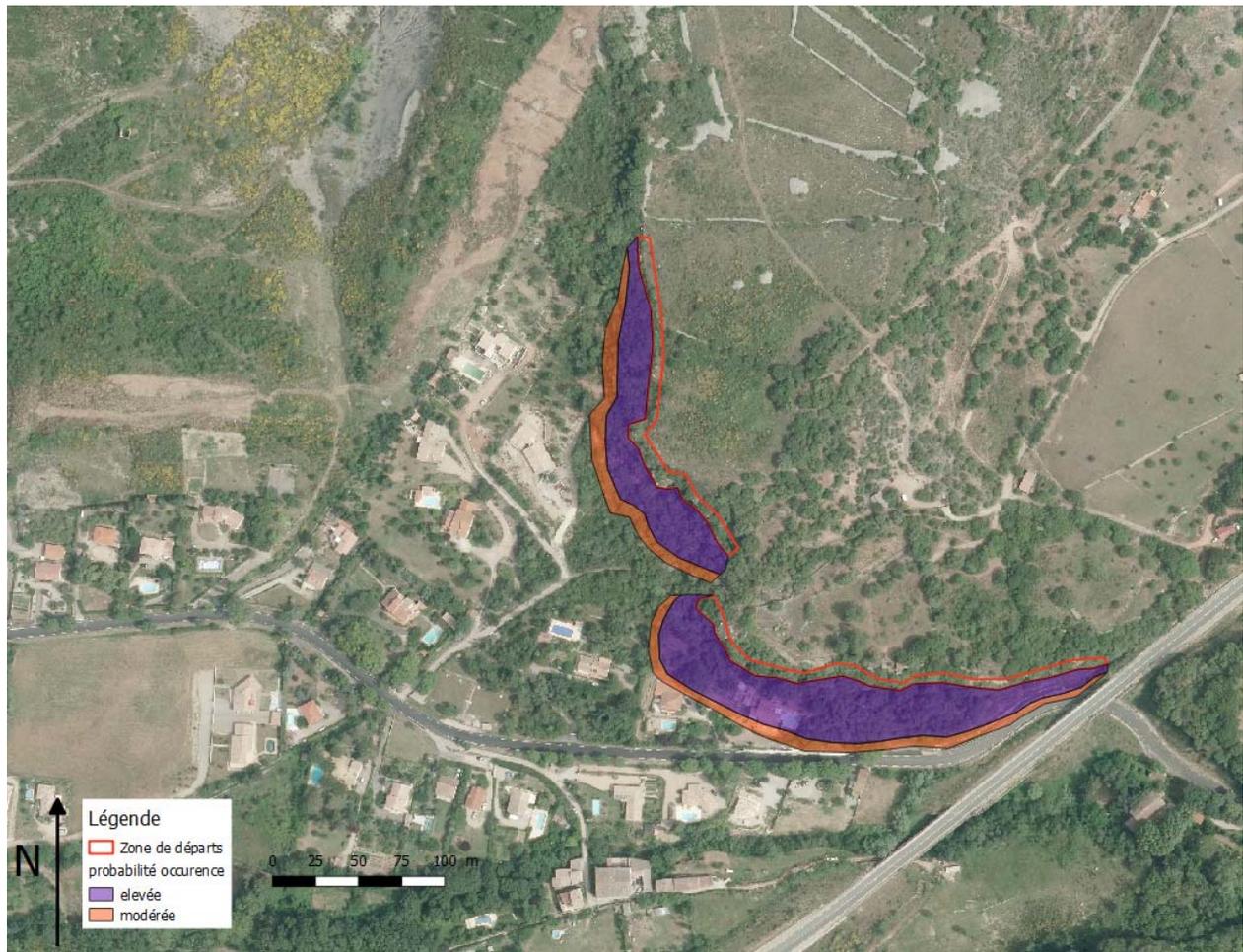


Figure 31 – cartographie de la probabilité d'occurrence du phénomène de référence

La carte d'aléa finale est issue du croisement des niveaux de probabilité d'occurrence avec l'indice d'intensité défini pour chaque scénario de référence est qualifié en tout point de la zone d'étude en utilisant la matrice ci-dessous (Figure 32).

		Intensité				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)
Probabilité d'occurrence	Faible	Faible	Modéré	Elevé	Elevé	
	Modérée	Faible	Modéré	Elevé	Elevé	
	Elevée	Modéré	Elevé	Elevé	Très élevé	
	Très élevée	Elevé	Elevé	Très élevé	Très élevé	

Figure 32 – Définition des niveaux d'aléa (MEZAP)

L'intensité des phénomènes redoutés (volumes se propageant de 1 à 10 m³ après fragmentation) majoritairement identifiés au niveau des zones de départ potentiel, conduit à un aléa résultant considéré systématiquement de niveau « élevé » dans les zones où des blocs sont susceptibles de se propager (l'intensité du phénomène - et donc son potentiel d'endommagement, y compris en fin de trajectoire – prenant le pas sur sa probabilité d'occurrence).

L'aléa est considéré comme fort sur l'ensemble de l'emprise des zones de propagation potentielles sur le secteur d'étude. La cartographie d'aléa est présentée en Figure 33 et fournie annexe 1 au 1/5000 ainsi qu'en format numérique.

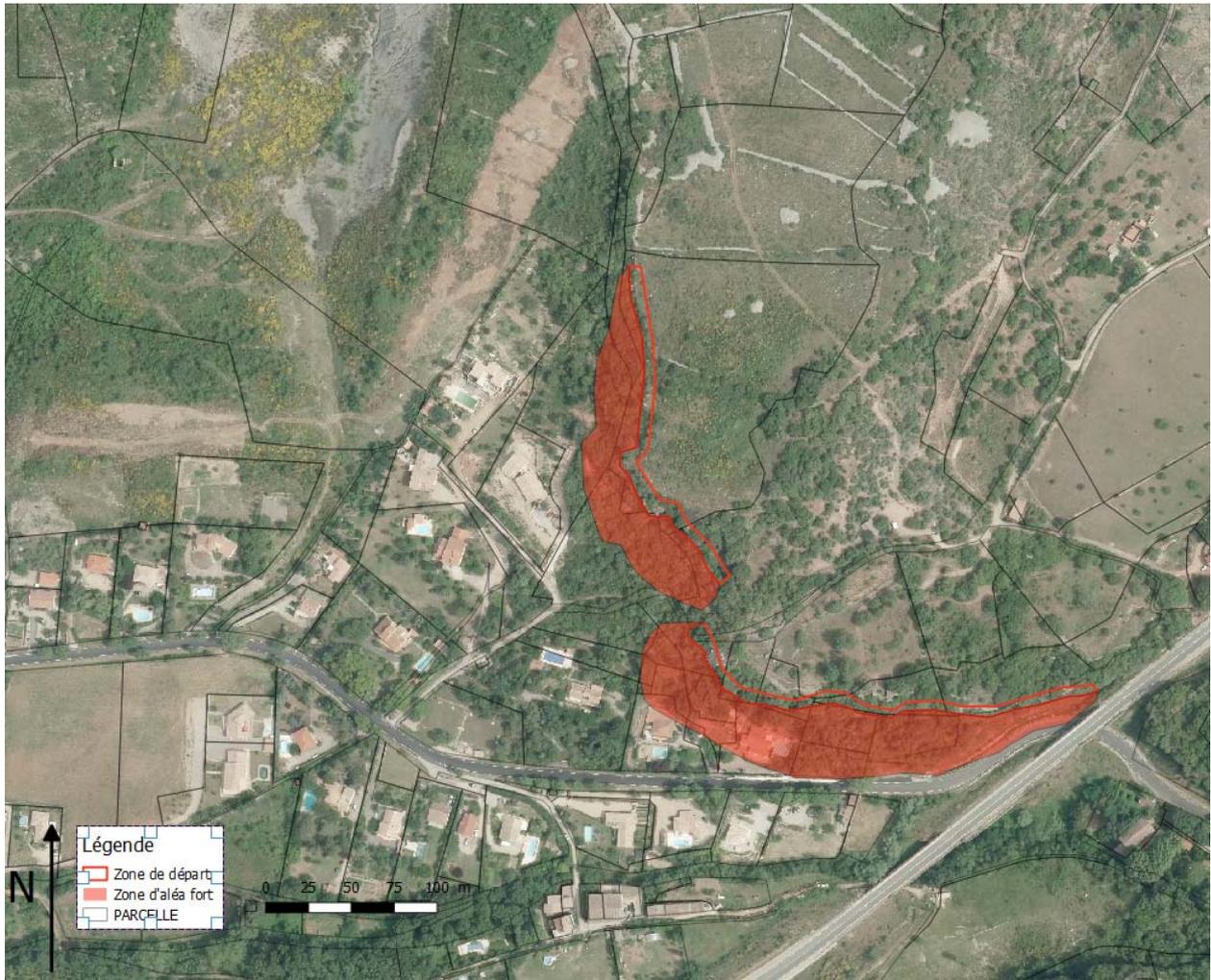


Figure 33 – Carte d'aléa « éboulements rocheux »

3 Proposition de parades pour la mise en sécurité du site d'étude

3.1 IDENTIFICATION DES ENJEUX EXPOSES

Le croisement de la carte d'aléa éboulement et des enjeux montre les zones d'exposition au 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...).

Sur le secteur des « Douses », les enjeux matériels (données issues des ortho-photos) sont :

- les habitations isolées en aval des barres rocheuses étudiées parcelles 400 et 408;
- la départementale D908;
- les chemins de randonnée et chemins privés.

Ces aménagements impliquent la présence d'enjeux humains à proximité de la falaise.

3.2 TRAVAUX DE SECURISATION

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 (Figure 34) ;
- les parades dites « actives » : leur but est d'intervenir au niveau de la paroi directement sur les masses instables (Figure 35).

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).

Cartographie de l'aléa éboulement rocheux sur la commune de Bédarieux – Secteur des Douses

Catégorie	Type de parades		Définition	But
Parades passives	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.
	Ecrans	<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.
		<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.
		<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.
	Dissipateurs d'énergie	<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.

Figure 34 : Tableau récapitulatif des parades passives

Cartographie de l'aléa éboulement rocheux sur la commune de Bédarieux – Secteur des Douses

Catégorie	Type de parades		Définition	But
Parades actives	Suppression de la masse	<i>Purge</i>	Elimination des pierres, blocs et masses les plus instables par des techniques adaptées n'entraînant pas un risque de déstabilisation des zones à préserver.	Réduire le risque de chutes de pierres et de blocs à court terme et permettre éventuellement des interventions complémentaires.
		<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.	Eliminer ce qui présente un risque direct ou indirect afin d'assurer la sécurité à court et moyen terme.
	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.
		<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.
	Végétalisation	<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.

Figure 35 : Tableau récapitulatif des parades actives

Pour le secteur des douses, il semble que les parades les mieux adaptées à la sécurisation du site soient des protections passive de type « écrans de filets » et/ou « barrière grillagée », avec vérification et entretien régulier de l'installation.

Localement, l'emmaillotage ou la purge de zones de départ identifiées serait à proposer.

4 Conclusion

Les résultats des travaux ont permis de proposer :

- une identification des zones de départ potentiel d'éboulement rocheux le long des falaises considérées en complément de l'étude réalisée par Hydrogéotechnique;
- une estimation des propagations de blocs au niveau des zones de départs définies ;
- une évaluation de l'aléa « éboulement / chute de blocs » à partir d'un croisement activité de falaise / probabilité d'atteinte en aval / intensité du phénomène.

Dans le cadre du projet, le BRGM valorise la Méthode d'Evaluation du Zonage de l'Aléa chutes de Pierres [Colas et al. 2017] pour élaborer les cartes d'aléa « éboulement et chute de blocs ». La MEZAP est une approche qualitative et pragmatique du phénomène d'éboulement et chute de blocs. La déclinaison de la méthode est basée sur quatre étapes successives et complémentaires : l'étude phénoménologique des événements passés, l'évaluation de l'aléa de départ, l'évaluation de l'aléa de propagation et la cartographie de l'aléa.

La définition du scénario de référence à l'échelle du site étudié consiste à établir une synthèse des événements redoutés. Au vu de l'ensemble de la falaise du secteur, le scénario de référence pour l'ensemble du linéaire est représenté par des blocs de volume unitaire supérieurs à 1 m³. Ces événements de référence sont liés à des chutes de blocs isolés ou à l'éboulement de chandelle, écaille ou coin de falaise se fragmentant en éléments de taille similaire.

L'aléa de départ est caractérisé sur le secteur par l'intensité des phénomènes et l'activité de la paroi. L'ensemble de la falaise est concerné par une activité qualifiée de faible à modérée (1 bloc de plus de 1 m³ tous les 10 à 100 ans susceptibles de se propager en versant). Les volumes mis en jeu atteignant voire dépassant le mètre cube, l'intensité du phénomène est donc forte.

L'aléa de propagation est analysé au travers des événements historiques et des simulations de distance de propagation selon la méthode de la ligne d'énergie et selon des trajectographies 2D.

L'aléa résultant considéré systématiquement de niveau « élevé » dans les zones où des blocs sont susceptibles de se propager (l'intensité du phénomène - et donc son potentiel d'endommagement, y compris en fin de trajectoire – prenant le pas sur sa probabilité d'occurrence).

La cartographie de l'aléa éboulement / chute de blocs peut être réalisée à partir des conclusions précédentes suivant la méthode proposée par les recommandations MEZAP. La qualification de la probabilité d'occurrence est définie à partir du croisement de la probabilité d'atteinte et de l'activité. La carte d'aléa finale est issue du croisement des niveaux de probabilité d'occurrence avec l'indice d'intensité défini pour le scénario de référence choisi. L'aléa est considéré comme fort sur l'ensemble de l'emprise des zones de propagation potentielles sur le secteur d'étude. La cartographie d'aléa est présentée en annexe 1 au 1/5000ème.

La traduction réglementaire de cette carte d'aléa pourrait conduire à des zones « Rouge » dans le PPR. Les enjeux majeurs que sont l'habitation parcelle 400, le chemin de randonnée et une portion de route départementale sont impactées par ce zonage. L'habitation parcelle 408 est en limite de zonage. On notera la présence d'une barrière grillagée à l'arrière de l'habitation parcelle 400,

permettant l'arrêt des blocs et pierre mais inadaptée a une rupture d'écaille ou de dièdre correspondant au volume de référence.

Sur les zones à enjeux, des propositions de parades sont faites. Compte-tenu à la fois des caractéristiques du site et des événements prévisibles, des protections passive de type « écrans de filets » et/ou « barrière grillagée » apparaissent comme les plus adaptées. Localement, l'emballotage ou la purge de zones de départ identifiées serait à proposer.

5 Bibliographie

Diagnostic géotechnique et étude trajectographique. Etude de confortement rocheux. Bureau d'Etudes (BE) HYDROGÉOTECHNIQUE (ref. CF15 FAL0014)

Berger, 2009. 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 territoire. Programme "Risque Décision Territoire".

Colas et al., 2017 Méthode d'Evaluation du Zonage de l'Aléa chutes de Pierres

Colas B. (2017) – Avis technique sur l'ouverture à la construction en aval d'une falaise. Commune de Bédarieux (Hérault). Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-67146-FR, 13 p., 9 ill. 2 ann.

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. Rédaction du groupe de travail MEZAP du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (BRGM, CETE, DGPR, DDT 06, DDT 38, DDT 74, IFSTTAR, Irstea, ONF-RTM). Version du 21/01/2014.

GROUPE FALAISES: Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises – Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin, Programme Interreg 2C, 2001 Guide d'Agrément Technique Européen n° 027 « Kits de protection contre les chutes de blocs rocheux » (ETAG 027), EOTA, février 2008, 53 p. & avril 2013, 58p.

Mellal, Hungr, 1998. PIERRE©: an interactive software for computer-aided rock fall analyses. The University of British Columbia, Department of Earth and Ocean Sciences, 6339 Stores Road, Vancouver, BC V6T 1Z4 Canada

NF P95-308 « Équipements de protection contre les éboulements rocheux – Écrans de filets », AFNOR, décembre 1996, 11p.

6 Annexes

Annexe 1

Rendu cartographique

Cartographie de l'aléa éboulement rocheux secteur « les Douses » (1/5000ème)

Annexe 2

Fiche descriptive du logiciel de trajectographie Pierre98©

Fiche outil 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:

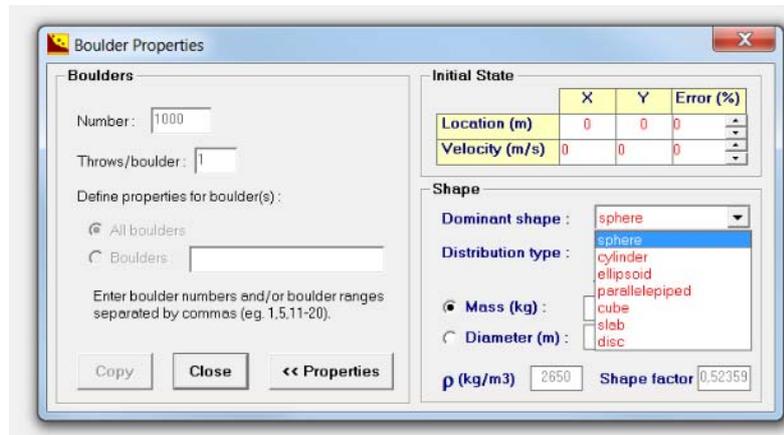
- ✓ Analyse en 2D selon profil topographique
- ✓ Paramètres de bloc (masse et forme)
- ✓ Paramètres de sol (rugosité, frottement, restitution)
- ✓ Différents modes de mouvement du bloc
- ✓ Intégration d'un modèle d'impact en plasticité pour définition des coefficients de restitution normal et tangentiel
- ✓ 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

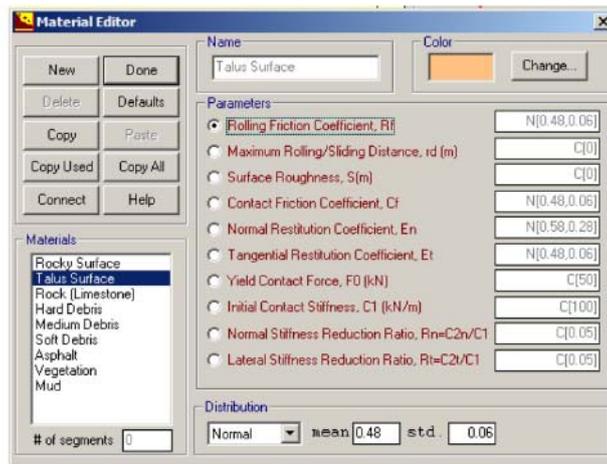
- ✓ Position et vitesse du bloc au départ



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 :

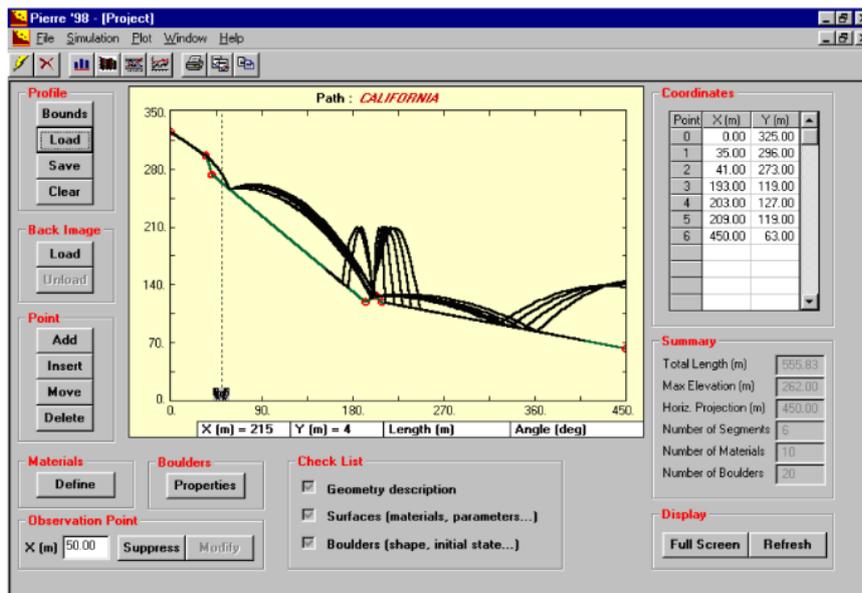
n° sol	Type de sol	Coefficient de frottement dynamique Rf (s.u.)	Coefficient de frottement Cf (s.u.)	Coefficient de restitution normal En (s.u.)	Coefficient de restitution tangentiel Et (s.u.)
1	autres (1)	-	-	-	-
2	sol fin (2)	0.6	1	0.3	0.7
3	piste, éboulis fin (3)	0.65	1	0.37	0.73
4	éboulis grossier (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.

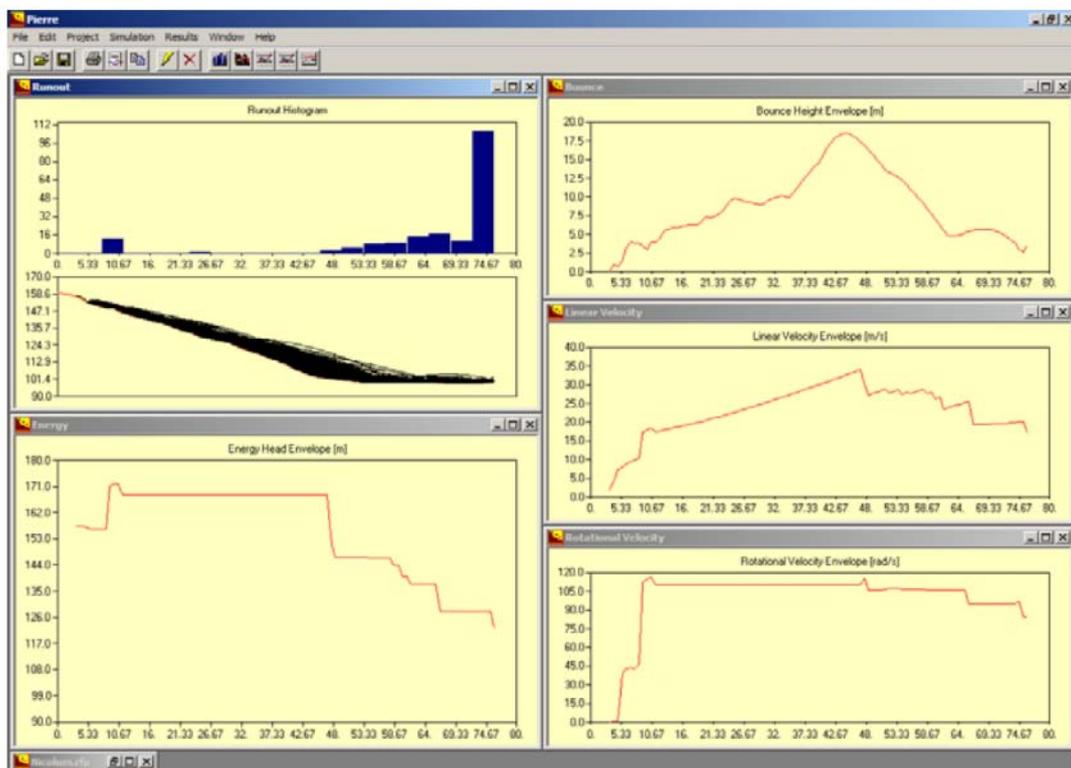
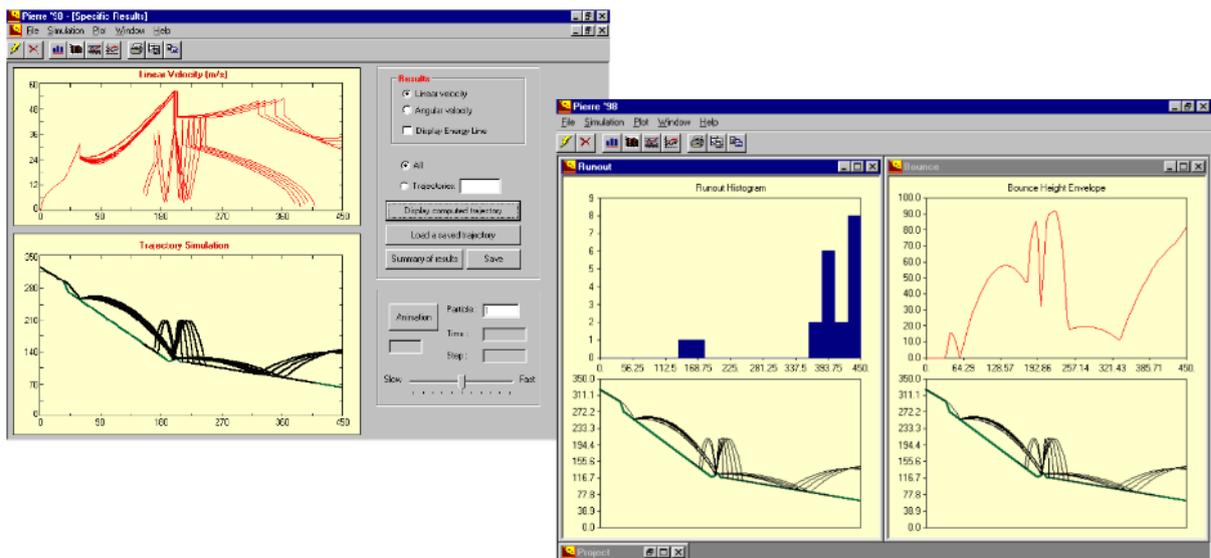
A l'heure actuelle, la réalisation de 1 000 000 simulations de trajectoires (ou plus) est trop gourmande en temps de calcul pour être envisagée dans le cadre d'une étude de cas appliquée.

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).

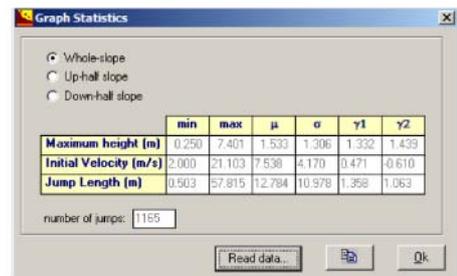
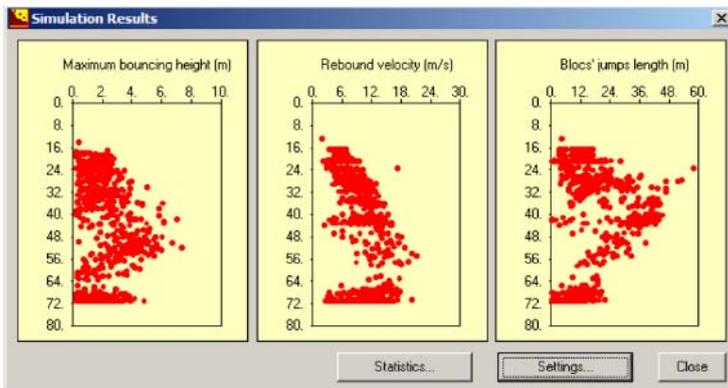
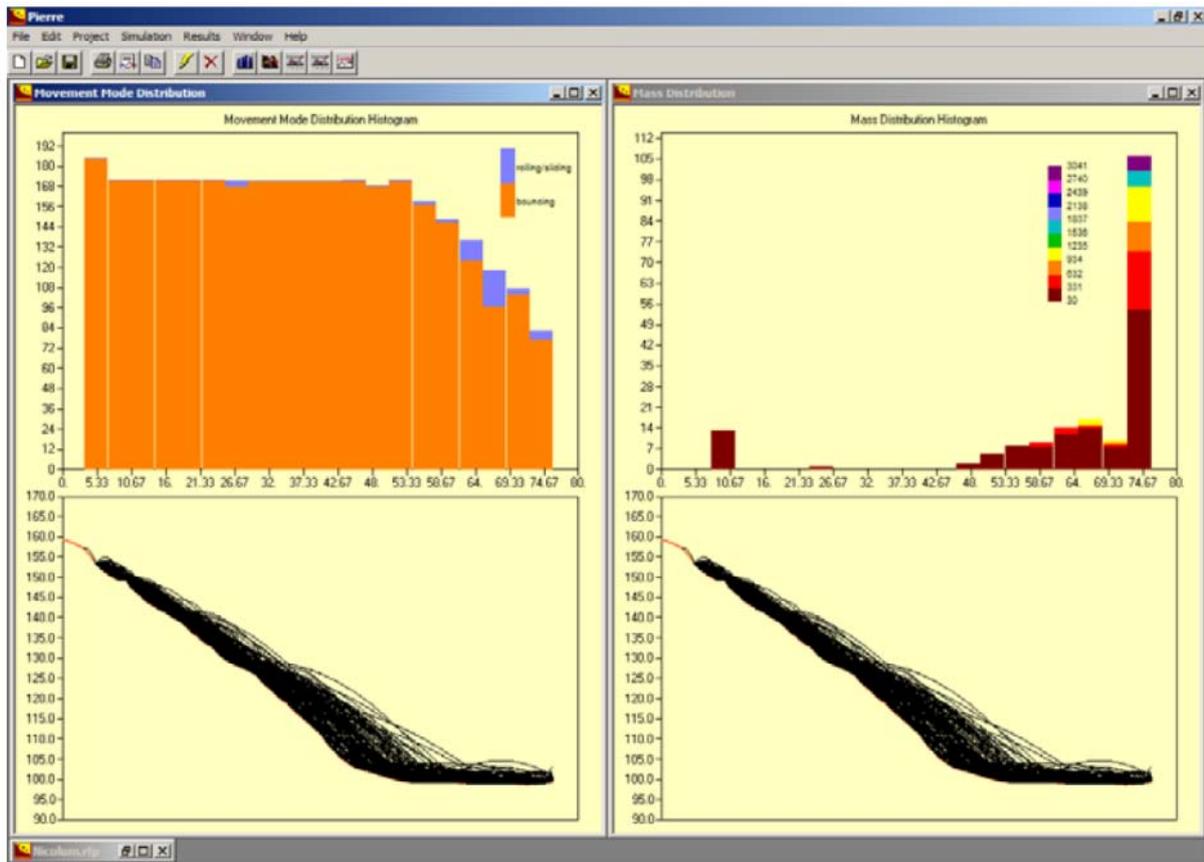
Pour des raisons pragmatiques, l'estimation des distances d'arrêt pour des probabilités d'atteinte de 10^{-4} à 10^{-6} est menée par extrapolation linéaire de l'évolution de la probabilité d'atteinte en fonction de la distance d'arrêt.

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.

Cartographie de l'aléa éboulement rocheux sur la commune de Bédarieux – Secteur des Douses



Cartographie de l'aléa éboulement rocheux sur la commune de Bédarieux – Secteur des Douses

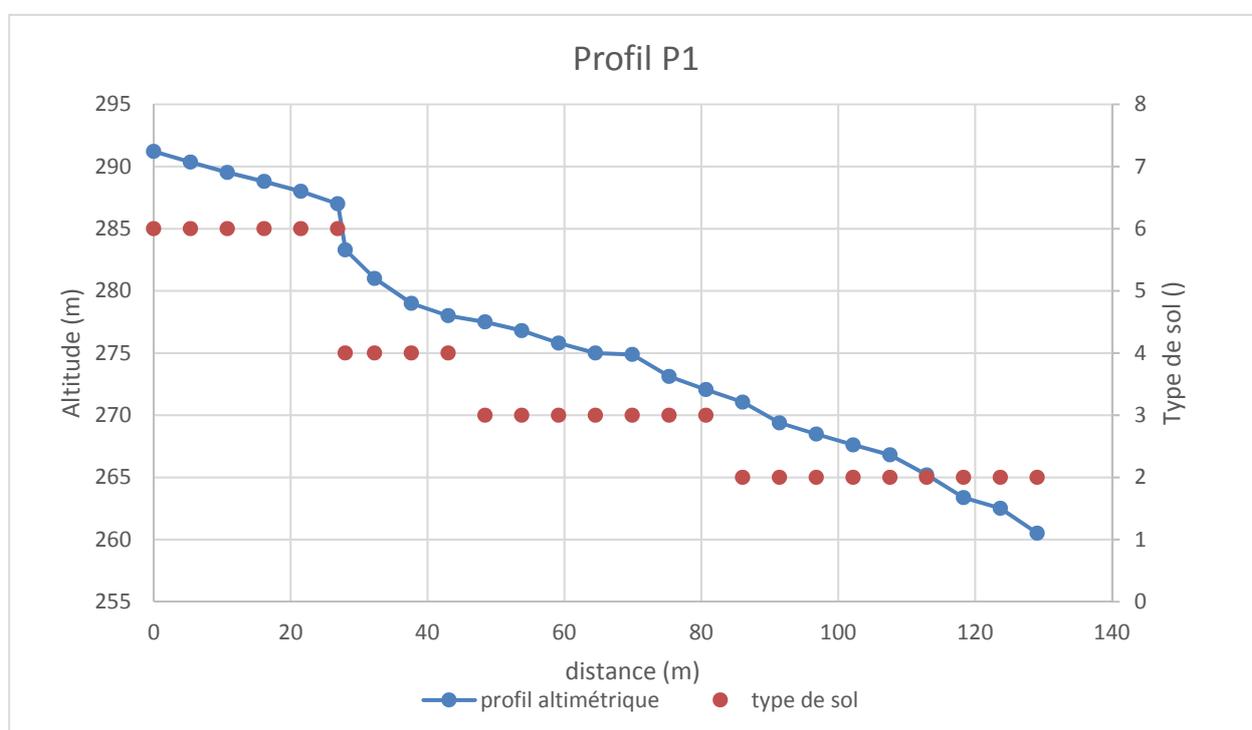


Annexe 3

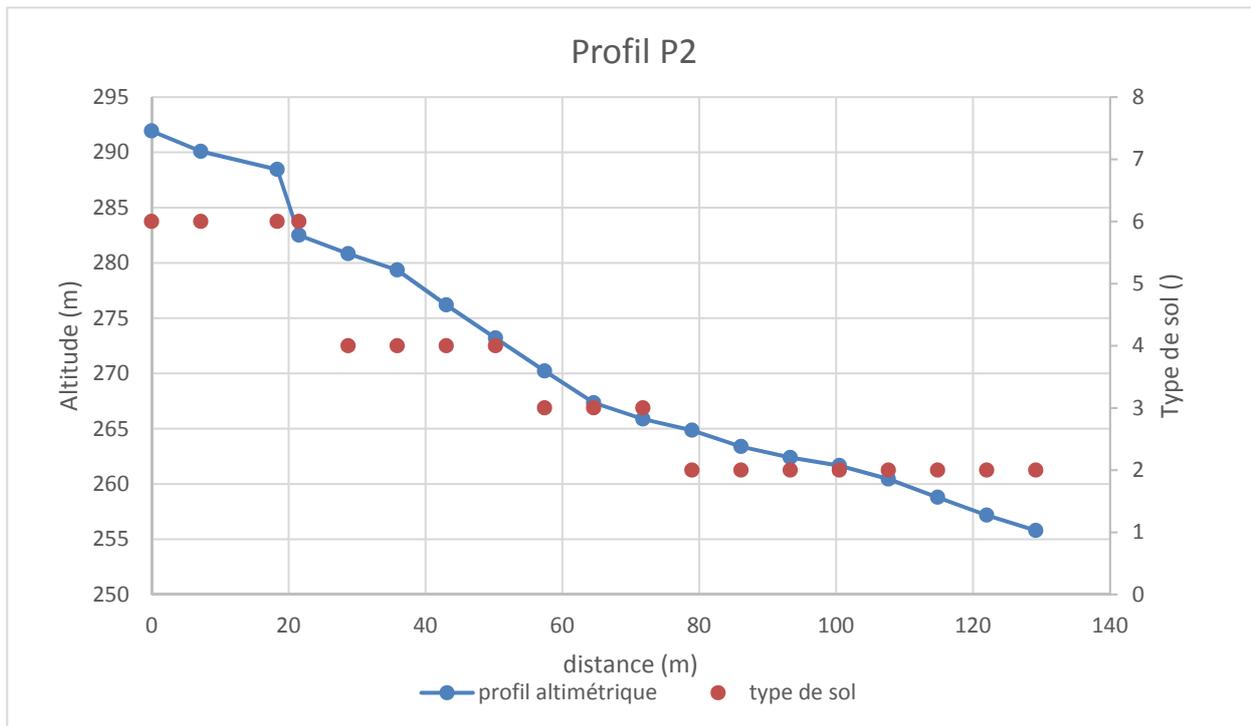
Analyse trajectographiques

Profils et sols considérés pour l'étude trajectographique

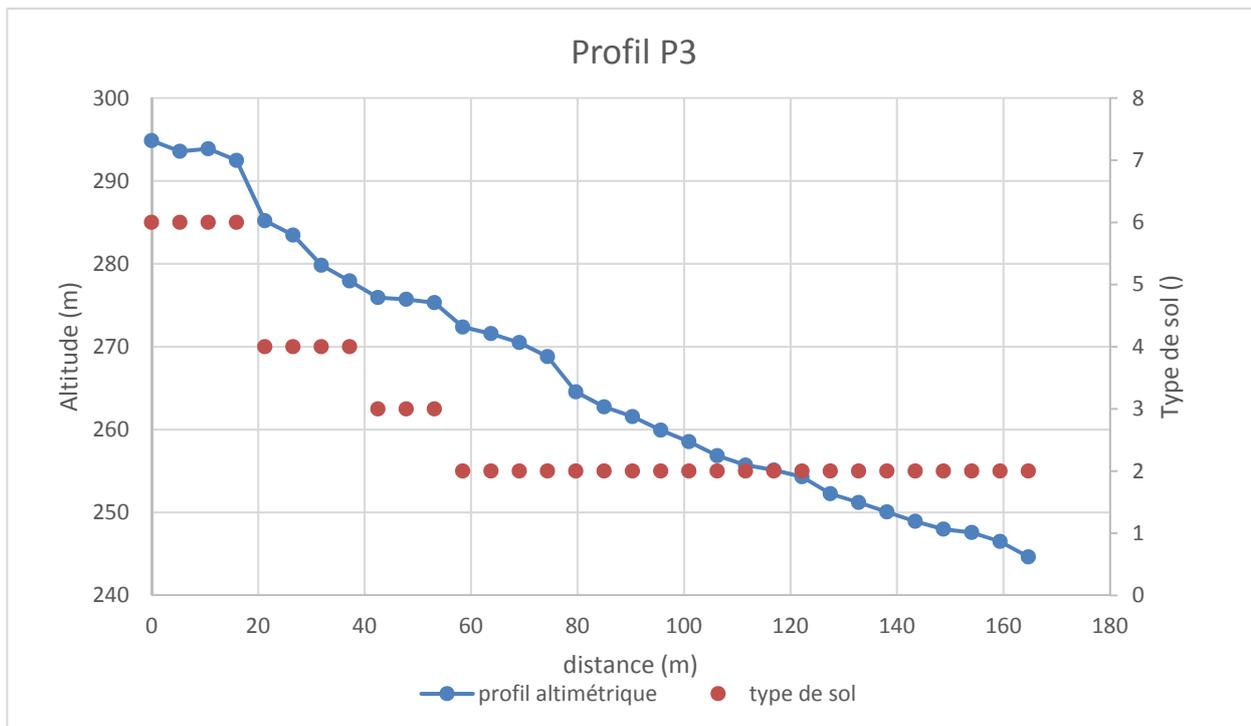
P1 :



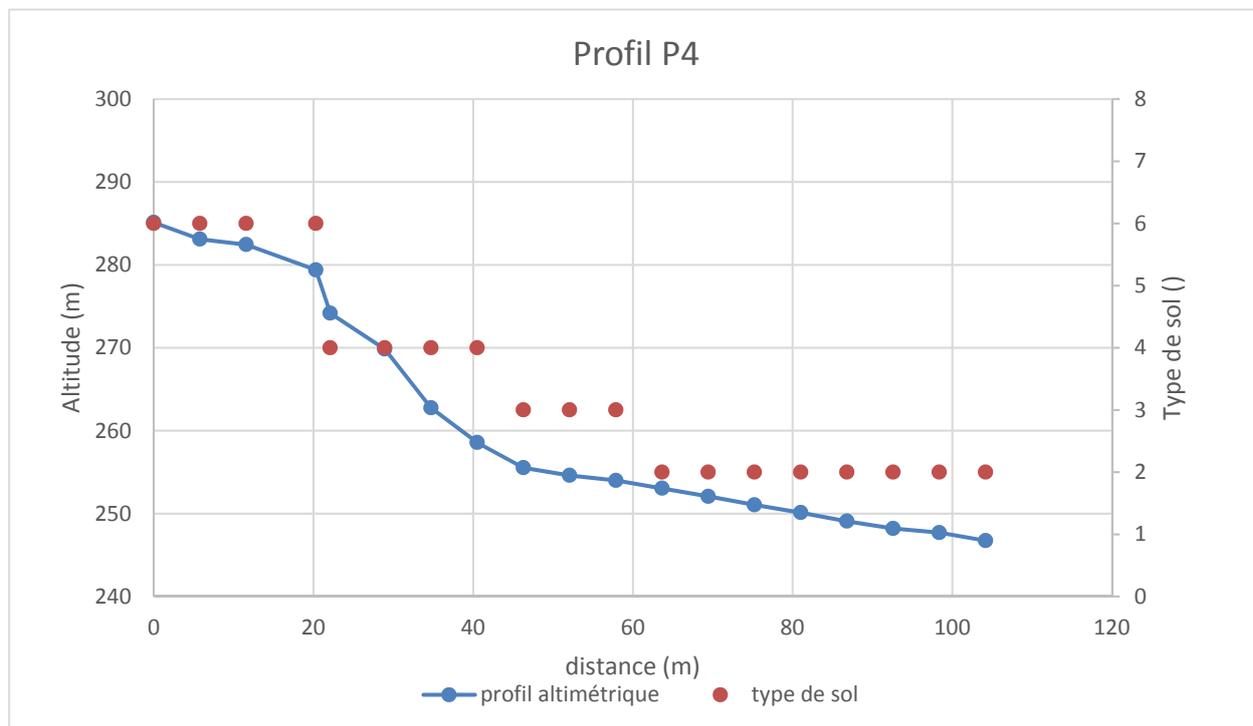
P2 :



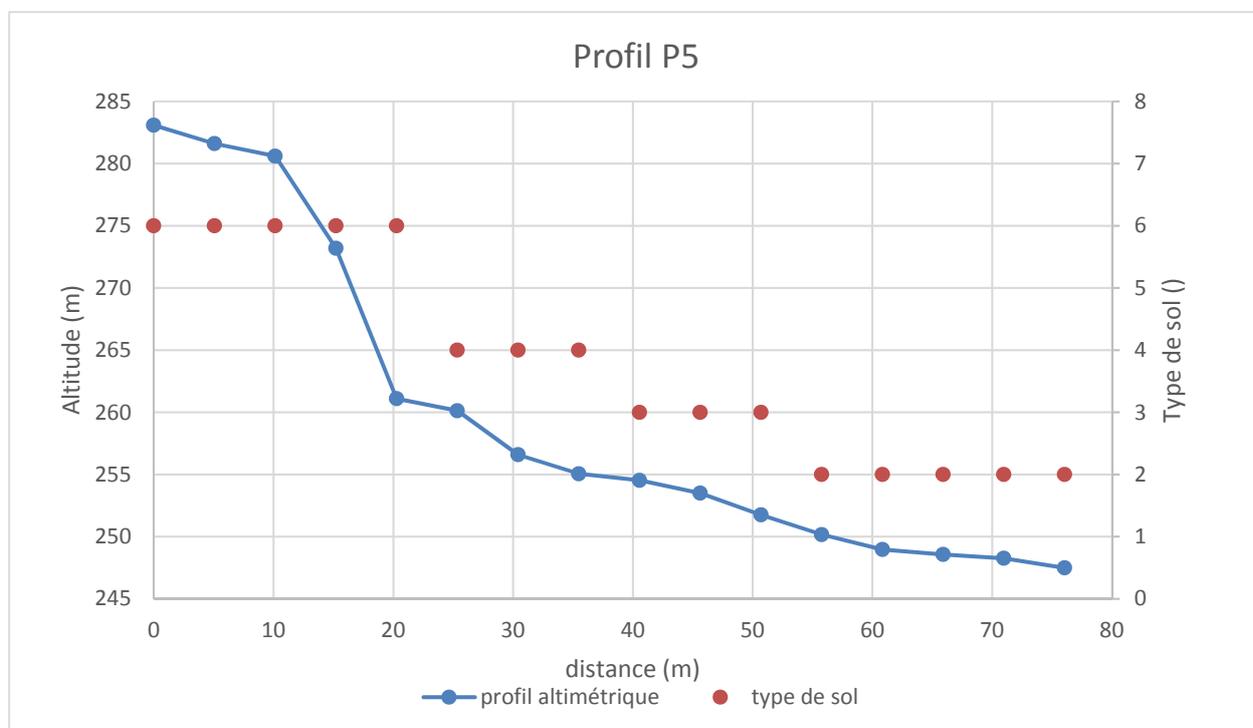
P3 :



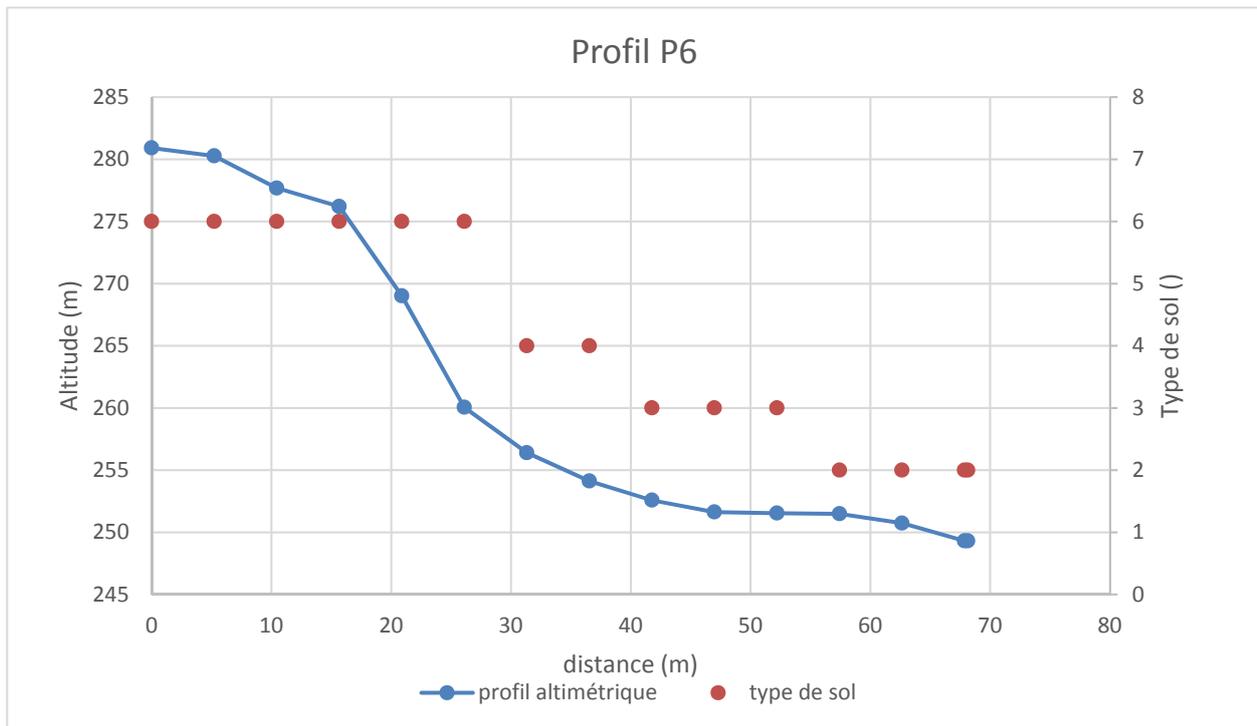
P4 :



P5 :



P6 :





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 Occitanie

1039 rue de Pinville
34000 – Montpellier – France

Tél. : 04 67 15 79 90