



Guide technique

Aléa rocheux

Méthode « MEZAP »

Caractérisation de l'aléa rocheux
dans le cadre d'un Plan de Prévention
des Risques Naturels (PPRn)
ou d'un Porter à connaissance (PAC)

Note technique MEZAP

Méthodologie de caractérisation de l'aléa rocheux dans le cadre d'un PPR ou d'un PAC

Rédaction et validation par le groupe de travail MEZAP
(BRGM, CEREMA, DDTM 06, DDT 38, DDT 73, DDT74,
INERIS, INRAE, MTE/DGPR, ONF-RTM, Univ. G. Eiffel)



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE



INERIS



**Direction
Départementale
des Territoires**



Groupe de travail MEZAP (Méthode de Zonage de l'Aléa chute de Pierres) :

BRGM, CEREMA, Direction Départementale des Territoires de la Haute-Savoie, INERIS, INRAe, Ministère de la Transition Écologique, ONF-RTM, Université G. Eiffel.

Rédacteurs :

Bastien Colas (BRGM)
Frédéric Berger (INRAe)
Rémy Martin (ONF-RTM)

Relecteurs :

Pierre Azémard, Stéphanie Detourbe, Benoît Nagel, Reynald Flahaut, Yan Guirriec (Cerema)
Pierre Dupire (ONF-RTM)
Stéphanie Brenier (DREAL PACA)
Christian Franck (INERIS)
Anthony Rey, Clara Levy (BRGM)
Marion Bost (Université G. Eiffel)
Christian Tracol (DDT Savoie)
Angélique Godart, Christophe Parat (DDT Isère)
Margaret Herbaux (Ministère de la Transition Écologique/DGPR)
Ariane Stephan (DDT Haute-Savoie)

Crédits iconographique : Les photographies figurant dans cet ouvrage appartiennent respectivement au BRGM (p.14), à l'ONF-RTM (couverture et pp.14, 15, 36) ainsi qu'à l'IRMa (pp.14, 15).

Couverture : Éboulement (Les Mées), 2019

Édition : Frédéric Simien (responsable BRGM Éditions) et Amanda Hoffbourg

Réalisation : Agence Chromatiques, Paris

ISBN : 978-2-7159-2760-5

Comment citer cet ouvrage : Collectif (groupe de travail MEZAP). Guide technique MEZAP. Caractérisation de l'aléa rocheux dans le cadre d'un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRn) ou d'un Porter à connaissance (PAC). BRGM, 2021. Collection scientifique et technique. ISBN : 978-2-7159-2760-5

©BRGM éditions, 2021
3, avenue Claude Guillemin
BP 36009
45060 Orléans Cedex 2, France



Imprimé avec des encres végétales sur du papier provenant d'une forêt durablement gérée par un imprimeur certifié PEFC et qui, conformément à la marque Imprim'Vert®, n'utilise pas de produits toxiques, sécurise le stockage des produits et déchets dangereux et organise leur collecte.

Synthèse

En 2013, un groupe de travail a réuni, sous l'égide du ministère en charge de la prévention des risques, les opérateurs publics et certains services déconcentrés de l'État pour définir une méthodologie de caractérisation de l'aléa rocheux (MEZAP : Méthodologie d'Évaluation du Zonage de l'Aléa chute de Pierre). Ce groupe de travail représenté par le BRGM, le Cerema, le Ministère de la Transition Écologique (Direction Générale de la Prévention des Risques, MTE/DGPR), la DDTM des Alpes-Maritimes, la DDT de l'Isère, la DDT de Haute-Savoie, l'INRAE (ex. IRSTEA), l'ONF-RTM et l'Université Gustave Eiffel (ex. IFSTTAR) a produit en 2014 une note non diffusée officiellement à l'échelle nationale.

En 2017, le ministère a relancé ce groupe de travail pour finaliser ce guide méthodologique qui doit servir de base à la cartographie de l'aléa rocheux dans le cadre de Plan de Prévention des Risques naturels (PPRn) ou de Porté à connaissance (PAC) des aléas. Le présent guide technique MEZAP actualise le document de 2014.

La méthode proposée est rédigée en l'état des connaissances au moment de sa réalisation (janvier 2021). Elle répond à la volonté de l'État de conserver une approche proportionnée aux attentes et aux moyens dédiés à la cartographie de l'aléa rocheux dans le cadre de PPRn ou de PAC.

Sommaire

❶	Préambule	7
1.1	Objectifs et champs d'applications de cette note	7
1.2	Définitions	8
1.2.1	Aléa rocheux	8
1.2.2	« Scénario de référence » et « Aléa de référence »	8
1.2.3	Intensité d'un phénomène	9
1.2.4	Atteinte – Occurrence d'un phénomène	10
1.3	Notion d'échelle	11
❷	MEZAP – PRINCIPES GÉNÉRAUX	12
2.1	Démarche de qualification de l'aléa rocheux	12
2.2	Scénarios types à identifier	12
2.3	Démarche MEZAP	16
❸	MEZAP : Mise en application	18
3.1	Identification des zones potentiellement exposées	19
3.1.1	Identification des zones de départs potentiels	19
3.1.2	Délimitation de l'emprise des propagations potentielles	20
3.1.3	Analyse du besoin – Cahier des charges pour la cartographie d'aléa rocheux	22
3.2	Carte informative des phénomènes	22
3.2.1	Collecte et examen des données existantes	23
3.2.2	Acquisition de données spécifiques	23
3.3	Choix du(des) scénario(s) par zone homogène de départ pour la construction de l'aléa de référence	25
3.3.1	Zone homogène de départ	25
3.3.2	Scénario(s) pour la proposition de l'aléa de référence	27
3.3.3	Aléa de référence	28
3.4	Intensité du phénomène	29
3.5	Activité : probabilité de départ sur une période de référence de 100 ans	31
3.5.1	Application : cas de l'aléa diffus	32
3.5.2	Application : cas d'un aléa localisé	33
3.6	Probabilité de propagation	34
3.6.1	Zone de propagation : hiérarchisation	36
3.6.2	Cas particulier des obstacles à la propagation	39

3.7 Probabilité d'atteinte	39
3.8 Qualification du niveau d'aléa.....	41
4 Contenu de l'offre, restitution et livrables	42
4.1 Offre : Éléments de contenu	42
4.2 Livrables	43
5 Glossaire et liste des acronymes	44
5.1 Glossaire	44
5.2 Liste des acronymes utilisés	45
6 Bibliographie.....	46
7 Annexes	48
Annexe 1 : Notion de précision, de résolution et d'échelle de travail	49
Annexe 2 : Intensité des phénomènes.....	53
Annexe 3 : Ligne d'énergie.....	56
Annexe 4 : Format, structuration et champs descriptifs de la base de données évènementielle.....	66

Table des illustrations

illustration 1 : Terminologie proposée pour les volumes totaux mobilisés	8
illustration 2 : Terminologie proposée pour les volumes unitaires mobilisés	8
illustration 3 : Exemple d'échelle d'intensité (inspiré du guide PPRn mouvement de terrain de 1999).....	10
illustration 4 : Définition de l'atteinte d'un phénomène dans la MEZAP.....	10
illustration 5 : Recommandations du JTC-1 pour la qualification du risque	10
illustration 6 : Proposition de la MEZAP pour la qualification de l'atteinte (couplant départ et propagation).....	11
illustration 7 : Principe de définition de l'aléa dans la MEZAP	12
illustration 8 : Schéma des scénarios des phénomènes redoutés (Cas type 1)	14
illustration 9 : Schéma des scénarios des phénomènes redoutés (Cas type 2).....	15
illustration 10 : Logigramme simplifié de la MEZAP	16
illustration 11 : Logigramme simplifié MEZAP pour cartographie de l'aléa rocheux	17
illustration 12 : Logigramme détaillé de la MEZAP.....	18
illustration 13 : Principe de la ligne d'énergie (angle d'atteinte β)	21
illustration 14 : Identification des zones homogènes de départ définies à partir de croisement des zones de granite affleurant et de conditions morphologiques (BRGM, Balogna, Corse du Sud)	26
illustration 15 : Zones de départ de blocs à partir de critères de pente (INRAE, Veyrier du Lac, Haute-Savoie)	26
illustration 16 : Typologie des instabilités rocheuses (Guide LCPC, 2004)	27
illustration 17 : Illustration des indices d'intensité de l'aléa rocheux en fonction du volume, exemples d'endommagement associé.....	29
illustration 18 : Indices d'intensité de l'aléa rocheux au regard des parades adaptées	30
illustration 19 : Indices d'intensité au regard du volume de bloc	30
illustration 20 : Définition de l'indice d'activité	32
illustration 21 : Proposition de la MEZAP pour la qualification de la probabilité de propagation ...	34
illustration 22 : Mode de qualification de la probabilité de propagation.....	37
illustration 23 : Définition de la probabilité d'atteinte de l'aléa de référence en un point	39
illustration 24 : Définition du niveau de l'aléa de référence par zone homogène	41

1 Préambule

1.1 Objectif et champs d'applications du guide

Ce guide technique s'adresse aux services de l'État amenés à faire réaliser des études de l'**aléa rocheux**¹ dans le cadre de la réalisation d'un PAC ou d'un PPRn, ainsi qu'aux opérateurs (bureaux d'études, organismes publics) amenés à réaliser ces études. Il intéresse également les collectivités qui peuvent dans certains cas diligenter ce type de cartes d'aléa.

Il propose une méthode de caractérisation de l'aléa rocheux applicable et homogène pour toutes les configurations du territoire français. L'aléa rocheux couvre toute la gamme des phénomènes : de la pierre isolée jusqu'au phénomène de grande ampleur.

Ce document est le fruit des réflexions menées au sein du groupe de travail MEZAP² et s'appuie notamment sur les documents suivants :

Guides méthodologiques :

- *Plan de Prévention des risques naturels (PPRn). Risques de mouvements de terrain* (1999) ;
- *Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux* (LCPC, 2004) ;
- *Guide pratique versants rocheux* (Cerema-INERIS ; 2014).

Les approches et méthodes proposées répondent à la fois à la volonté de l'État de conserver une approche proportionnée aux attentes (une emprise des phénomènes compatible avec les projets d'urbanisme), et aux moyens dédiés à la cartographie de l'aléa rocheux (financiers, humains et temporels). Dans ce contexte, il n'est pas concevable de déployer pour chaque site une analyse scientifique poussée qui pourrait pallier à un manque de données sur des événements passés par exemple.

La MEZAP propose une approche pragmatique, de fait facilement reproductible entre sites, pour aboutir in-fine à une **caractérisation de l'aléa rocheux répondant aux objectifs de connaissance de l'exposition aux risques imposés dans le cadre de la réalisation d'un PAC ou d'un PPRn**.

La MEZAP propose une démarche permettant de garantir la cohérence des productions d'un territoire à l'autre. Cette démarche s'appuie sur une base commune de caractérisation de l'aléa rocheux et d'un vocabulaire commun. La MEZAP n'impose pas les moyens suffisants à mettre en œuvre qui sont laissés à l'appréciation des experts sur la base du cahier des charges.

La MEZAP assume des choix qui peuvent être, sortis du contexte, critiquables. Cependant, c'est au travers de ces choix qu'une démarche commune, proportionnée et répondant aux attentes de l'État, a pu être trouvée.

En complément, la MEZAP fournit une liste non-exhaustive de données et d'outils accessibles pour l'aide à la caractérisation de l'aléa rocheux.

¹ Les termes **en bleu** à leur première apparition dans le document sont définis au glossaire.

² MEZAP : METHode de Zonage de l'Aléa chute de Pierres. Groupe de travail représenté par INRAE (IRSTEA), BRGM, Cerema, Univ. Eiffel (IFSTTAR), RTM, représentants des services déconcentrés de l'État notamment, sous pilotage du Ministère de l'Écologie.

1.2 Définitions

1.2.1 Aléa rocheux

L'aléa rocheux est défini comme un « évènement de chute de blocs, d'**occurrence** et d'**intensité** données » (JTC-1³, 2008, C²ROP⁴, 2019). Dans le cas d'un évènement rocheux, le phénomène en question est l'arrivée d'un bloc ou d'une masse rocheuse en un point. Il résulte de la conjonction d'un **aléa de départ** (ou de rupture) et d'un **aléa de propagation** et s'exprime comme un **aléa résultant**. La description théorique de l'aléa de départ doit inclure la localisation, le volume et la forme du compartiment rocheux, le mécanisme de rupture et sa probabilité spatio-temporelle d'occurrence dans une période donnée (période d'intérêt). La description théorique de l'aléa résultant en un point donné doit tenir compte, outre les paramètres décrivant l'aléa de départ, de la propagation (fragmentation éventuelle, vitesse de rotation et de translation exprimée aussi par une énergie), et probabilité spatiale d'occurrence.

La **classification des phénomènes** à l'origine de l'aléa rocheux est élaborée à **partir du volume** total d'un évènement et du volume élémentaire le plus gros éboulé (LCPC, 2004, Guide PPRn 1999) :

illustration 1 – Terminologie proposée pour les volumes totaux mobilisés

Écroulement en grande masse	Éboulement en grande masse	Éboulement en masse limitée	Chute de pierres ou de blocs
Million de mètres cubes et plus > 1 000 000 m ³	Dizaine à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes 10 000 à 1 000 000 m ³	Quelques centaines à milliers de mètres cubes 100 à 10 000 m ³	Jusqu'à une centaine de mètres cubes < 100 m ³

illustration 2 – Terminologie proposée pour les volumes unitaires mobilisés

Pierres	Petits Blocs	Blocs	Gros blocs
Inférieur à quelques décimètres cubes < 0,01 m ³ (10 l)	Quelques décimètres à un mètre cube 0,01 m ³ à 1 m ³	Du mètre cube à quelques mètres cubes 1 à 10 m ³	Dizaine de mètres cubes et plus > 10 m ³

1.2.2 « Scénario de référence » et « Aléa de référence »

Selon le guide PPRn *Risques de mouvement de terrain*, afin de prévoir au mieux le phénomène qui pourrait se produire et dont il faut protéger les populations et les biens concernés, il convient de déterminer l'**aléa de référence** dans un secteur homogène donné.

L'aléa de référence est défini comme le phénomène naturel servant de référence pour définir la réglementation du PPRn. Pour la cartographie de l'aléa rocheux il s'agit du phénomène d'**occurrence**

³ Joint Technical Committee (JTC-1) : Le Joint International Societies Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes (ISSMGE, ISRM, IAEG) a préparé des directives cadrant les définitions et terminologies à utiliser sur le plan international ainsi que les méthodes, moyens et résultats attendus pour la cartographie des aléas et le zonage de risques associés aux mouvements de terrain (*Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*. Fell et al., 2008).

⁴ C²ROP : Le projet C²ROP (Chutes de Blocs, risque et ouvrages de protection) est un Projet National (PN), dispositif spécifique de mise en œuvre de la R&D collaborative dans le cadre du RGC&U. En autres résultats, le projet a conduit à l'établissement d'un glossaire du risque rocheux.

et d'intensité données susceptible de se propager vers les enjeux, sur la **période de référence**. La période de référence se définit comme la période pour laquelle sont caractérisés les aléas. Une période de référence de X ans signifie que la probabilité d'atteinte des enjeux par les instabilités est évaluée pour les X prochaines années. Pour la cartographie de l'aléa rocheux dans le cadre de la MEZAP, **la période de référence est le siècle**.

Il est retenu d'approcher l'aléa de référence au travers de scénarios dits « de référence ». Un **scénario de référence** correspond au phénomène ou à l'évènement retenu pour qualifier l'aléa de référence d'un PPRn.

Plusieurs scénarios de référence peuvent être proposés pour construire l'aléa de référence qui est déterminé **pour chaque grande zone de départ jugée homogène**.

1.2.3 Intensité d'un phénomène

L'intensité (de l'aléa de référence) est théoriquement qualifiée par une grandeur physique représentative du phénomène. Pour les chutes de blocs, il est considéré leur volume, ainsi que la vitesse ou l'énergie des projectiles en un point donné de leur trajectoire. En effet les dommages à des structures dépendent pour partie de ces variables, de la résistance de ces structures et des conditions d'impact. Compte tenu de la difficulté à traduire directement les caractéristiques physiques du phénomène en intensité, le guide national PPRn mouvement de terrain préconise de déterminer l'intensité :

- soit à partir du potentiel de dommage engendré par l'aléa de référence sur un bâti standard⁵ ;
 - soit à partir de l'importance des mesures de protection qui pourrait être nécessaire pour s'en prémunir.
- La hiérarchisation des aléas par l'intensité cadre la stratégie de valorisation des cartes produites pour des PPRn et les principes d'inconstructibilité en zone d'aléa fort notamment. La MEZAP s'inscrit dans cette logique en qualifiant d'intensité « élevée » les phénomènes **occasionnant des dommages importants au gros œuvre**.

Important !

Il est nécessaire de noter que la référence au bâti standard implique de fait que la MEZAP s'intéresse à la vulnérabilité du bâtiment (et des personnes dans le bâtiment) et non des personnes en dehors des bâtiments. La MEZAP n'est de ce fait pas adaptée pour d'autres applications que la cartographie des aléas dans le cadre de PPRn ou de PAC.

Le parti pris de qualifier l'intensité par le potentiel de dommage à un bâti standard intègre de facto la vulnérabilité du bâti dans l'évaluation de l'aléa. L'approche n'est donc pas strictement de l'aléa mais s'apparente à une cartographie d'endommagement pour du bâti courant, effectivement présent ou non. C'est une des limites de la MEZAP qui, en revanche permet d'enrichir la carte des phénomènes d'une appréciation de l'intensité sur la base d'une description de dommages associés.

⁵ Cette notion peut s'apparenter à celle de bâti courant défini pour la prévention du risque sismique (Arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal » - maison individuelle), sans présumer de la vulnérabilité physique du bâti. En référence, il s'agit de bâtiment d'habitation, de type maison individuelle, en maçonnerie.

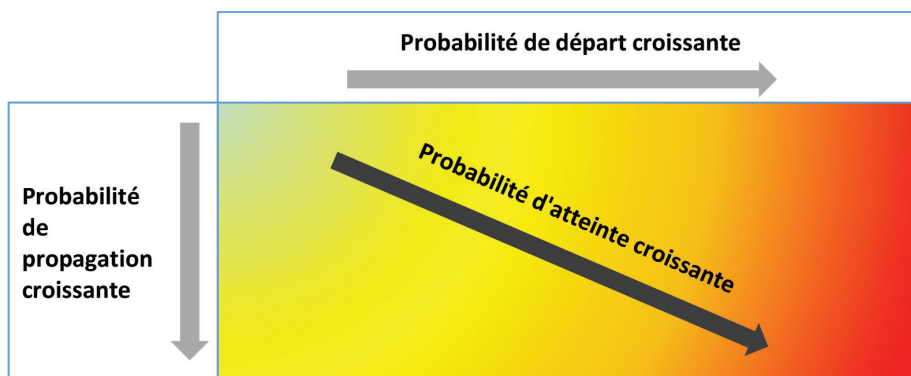
illustration 3 – Exemple d'échelle d'intensité (inspiré du guide PPRn mouvement de terrain de 1999)

Niveau d'intensité	Niveau d'endommagement
Légère I1	Peu de dommage au gros œuvre.
Modérée I2	Dommage au gros œuvre sans ruine. Intégrité structurelle sollicitée.
Élevée I3	Dommage important au gros œuvre. Ruine probable. Intégrité structurelle remise en cause.
Très élevée I4	Destruction du gros œuvre. Ruine certaine. Perte de toute intégrité structurelle.

1.2.4 Atteinte – Occurrence d'un phénomène

La MEZAP définit l'**atteinte d'un phénomène** par le croisement de l'aléa de départ, caractérisé dans sa composante spatiale et temporelle et de l'aléa de propagation caractérisé dans sa composante spatiale. L'atteinte est définie comme une probabilité qui qualifie le degré de réalisation du phénomène, exprimée quantitativement (valeur entre 0 et 1) ou qualitativement (faible, moyenne forte).

illustration 4 – Définition de l'atteinte d'un phénomène dans la MEZAP



Afin de faire rentrer dans un **cadre théorique partagé** les approches définissant l'aléa, et dans le soucis d'homogénéisation future de cartes multi-aléa, la MEZAP définit une relation entre qualification et quantification des atteintes. Le JTC-1, prenant en considération la probabilité de décès annuelle inférieure à 10^{-6} comme acceptable, fournit une relation entre quantification du risque (basée sur une probabilité annuelle de réalisation d'un phénomène engendrant un décès) et qualification du risque.

illustration 5 – Recommandations du JTC-1 pour la qualification du risque (basée sur la probabilité annuelle de décès d'une personne exposée)

Probabilité annuelle de décès	Niveau de risque
$> 10^{-3}$	Très fort
10^{-4} à 10^{-3}	Fort
10^{-5} à 10^{-4}	Moyen
10^{-6} à 10^{-5}	Faible
$< 10^{-6}$	Très faible

La caractérisation de l'atteinte dans la MEZAP reprend les limites proposées par le JTC-1 en considérant que l'aléa rocheux est assimilé au risque rocheux. Ceci est réalisé sous **les hypothèses conservatrices** suivantes :

- le taux d'occupation des bâtiments est considéré comme permanent (exposition continue des personnes) ;
- en cas d'atteinte au bâti, et de ruine (totale ou partielle), il est considéré des victimes potentielles, compte tenu de la vulnérabilité extrême des personnes aux phénomènes rocheux considérés comme destructeurs.

illustration 6 – Proposition de la MEZAP pour la qualification de l'atteinte (couplant départ et propagation)

Qualification de l'atteinte	Probabilité d'atteinte annuelle
Très forte	$> 10^{-3}$
Forte	10^{-4} à 10^{-3}
Moyenne	10^{-5} à 10^{-4}
Faible	10^{-6} à 10^{-5}
Très faible	$< 10^{-6}$

Remarque

Ces seuils de qualification du risque peuvent apparaître conservateurs au regard d'autres phénomènes naturels dont notamment les inondations où l'aléa est considéré sur l'emprise totale de la crue centennale (probabilité annuelle « d'atteinte » de 10^{-2}). Pour les chutes de bloc cette probabilité annuelle d'atteinte n'est absolument pas transposable en raison du caractère destructeur et imprévisible du phénomène, d'où la valorisation des grilles de qualification du risque du JTC-1.

1.3 Notion d'Échelle

Le pré requis à tout travail cartographique est la maîtrise par l'opérateur des notions d'échelle, de résolution et de précision. Dans la pratique, les opérateurs travaillent avec des documents d'échelles différentes (carte géologique à l'échelle 1 :50 000°, IGN 1 :25 000°, MNT au pas de 25 m, cadastre allant de l'échelle 1 :500° ou 1 :5 000°...) pour réaliser une **carte des aléas** à l'échelle du 1 :10 000° (cf. page 29 du *Guide PPRn* Mouvements de terrain).

La précision des limites des zones cartographiées à l'échelle du 1 :10 000° pour l'aléa est de 10 m considérant un trait de 1 mm d'épaisseur. Cela est vrai si la précision de l'étude et les données disponibles et/ou acquises (par exemple le nombre de points pour un levé lidar ou la résolution d'un MNT) sont cohérentes avec cette échelle de restitution. Pour la cartographie, une attention particulière sur ces points est donc nécessaire. En annexe 1, une note définit plus précisément les notions d'échelle, de résolution et de précision.

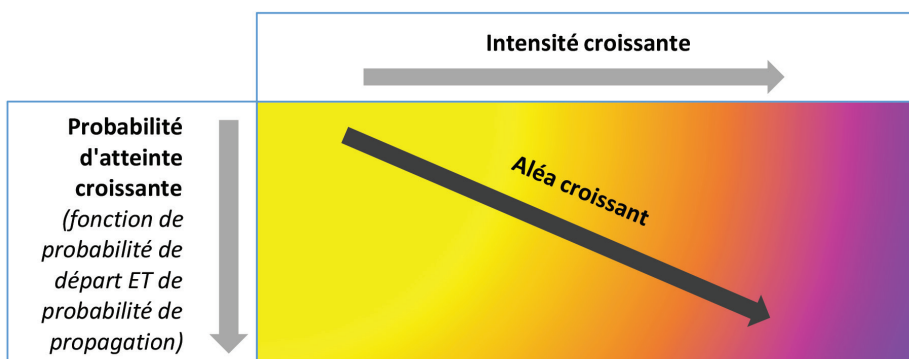
Dans les zones présentant de nombreux enjeux ou si la précision attendue de l'étude et la qualité de la donnée exploitable le permettent, il peut être utile de cartographier l'aléa au 1 :5000°. Il est important de rappeler que pour une échelle à 1 :5000° seules la BD Topo, la BD Ortho sont garanties compatibles par l'IGN. Vouloir cartographier l'aléa avec plus de précision sur ces fonds est illusoire.

2 MEZAP – PRINCIPES GÉNÉRAUX

2.1 Démarche de qualification de l'aléa rocheux

La caractérisation de l'aléa rocheux dans la MEZAP est basée sur le croisement d'une intensité de phénomène de mobilisation de masse rocheuse et d'une probabilité d'atteinte de cette masse rocheuse en tout point du territoire à cartographier. L'atteinte se définit comme la résultante d'une **probabilité de départ** et d'une **probabilité de propagation**.

illustration 7 – Principe de définition de l'aléa dans la MEZAP



La MEZAP préconise d'utiliser cinq niveaux dont quatre significatifs pour la définition de l'aléa : nul à négligeable non significatif, faible, moyen, fort et très fort.

La MEZAP est construite sur la définition d'un ou plusieurs scénario(s) de référence qui détermine(nt) l'aléa de référence. Le choix du (des) scénario(s) de référence, quel(s) qu'il(s) soi(en)t, et celui de l'aléa de référence constituent des points d'arrêts avec concertation entre la MOA (le cas échéant appuyé par son AMO) et le prestataire.

2.2 Scénarios types à identifier

Pour définir les scénarios, deux cas types sont distingués en fonction des contextes des événements redoutés (illustration 8 et illustration 9) :

■ Cas type n° 1 – l'intensité du phénomène est dépendante du volume unitaire se propageant vers les enjeux. Il peut s'agir de :

- scénario A : chute de bloc isolé depuis une zone de versant. Propagation sur des distances longues ;
- scénario B : chute d'un compartiment isolé depuis une zone de versant. Propagation sur des distances longues. Fragmentation du compartiment à l'impact et individualisation de trajectoires indépendantes ;
- scénario C : chute de bloc isolé ou d'un compartiment avec fragmentation depuis une zone de talus ou de petite falaise. Propagation sur des distances courtes. Individualisation de trajectoires indépendantes ;
- scénario D : éboulement en masse depuis une zone de versant. Propagation sur des distances longues et individualisation de trajectoires en fin de parcours.

■ Cas type n° 2 – l'intensité du phénomène est fortement dépendante du volume total éboulé. Il peut s'agir de :

- scénario E : chute d'un compartiment rocheux depuis un talus ou une petite falaise, avec fragmentation pendant la propagation. Propagation sur des distances courtes avec interactions probables entre les éléments rocheux. Peu ou pas d'individualisation des trajectoires ;
- scénario F : éboulement en masse depuis une zone de versant. Propagation sur des distances longues avec interactions entre éléments potentiellement importantes. Peu ou pas d'individualisation des trajectoires dans les zones à enjeux.

Pour exemple, sur un secteur donné, un scénario (cas type 1 – scénario B) peut être décrit comme suit : « *Rupture brusque en falaise déportée dans un massif calcaire avec mobilisation d'un volume de l'ordre de 10 à 20 m³ conduisant après fragmentation à des volumes unitaires se propageant de l'ordre de 0,5 à 1 m³ et d'élancement faible.* ».

Lors de la phase de définition du (des) scénario(s) de référence par zones, l'hypothèse ou non de prendre en compte un scénario de type E ou F doit être spécifiée avec justification à partir d'éléments factuels. Ces cas précis pressentis constituent un point d'arrêt à la cartographie de l'aléa rocheux telle qu'initialement projetée. En effet, l'analyse de la rupture et de la propagation de tels phénomènes répond à des processus particuliers et complexes (conditions de départ, propagation avec interactions fortes entre blocs, écoulement « turbulent ») pour lesquels des études spécifiques peuvent être nécessaires pour déterminer l'emprise du phénomène (rupture et propagation). Dans ces conditions, la concertation entre maître d'ouvrage (MOA Etat), assistance à maîtrise d'ouvrage (AMO) et prestataire est à formaliser.

Remarque : aléa de recul

Il est précisé que l'**aléa de recul**, souvent associé à l'aléa rocheux, n'est pas abordé dans la MEZAP. Si ces phénomènes concernent principalement les falaises et versants côtiers, des problématiques similaires se posent régulièrement le long des plateaux bordant les vallées en domaine continental (Val de Seine par exemple). Cette problématique est abordée en partie par le guide « Plan de Prévention des risques littoraux ».

L'aléa de recul est appréhendé généralement en fonction des conditions géologiques, hydrogéologiques et des conditions hydrodynamiques (mer ou cours d'eau). L'évaluation de l'aléa dans ce cas repose sur deux approches complémentaires : i) l'exploitation des événements passés à partir de leur type, leur date et leurs caractéristiques géométriques ; ii) l'extrapolation du recul sur la période de référence en tête de falaise.

Le guide technique « Aléa versant rocheux sous-cavé. Caractérisation et évaluation (INERIS – Cerema) » traite aussi pour une large part de cette problématique suivant des approches différentes basées sur l'influence de cavités souterraines sur les possibilités d'éboulements de falaise.

illustration 8 – Schéma des scénarios des phénomènes redoutés (cas type 1)

CAS TYPE 1

INTENSITÉ DÉPENDANTE DU VOLUME UNITAIRE

Scénario A

Chute de bloc isolé (versant)
Propagation sur distances LONGUES
Intensité dépendante du volume unitaire

=> concertation MOA / prestataire pour application de la MEZAP



Scénario B

Chute d'un compartiment isolé (versant)
Propagation sur distances LONGUES
Fragmentation et trajectoires indépendantes
Intensité dépendante du volume unitaire

=> concertation MOA / prestataire pour application de la MEZAP



Scénario C

Chute de bloc isolé ou d'un compartiment avec fragmentation
Propagation sur des distances COURTES
Intensité dépendante du volume unitaire

=> concertation MOA / prestataire pour application de la MEZAP



Scénario D

éboulement en masse (versant)
Propagation sur distances LONGUES
trajectoires de blocs isolés en fin de parcours
Intensité dépendante du volume unitaire

=> concertation MOA / prestataire pour application de la MEZAP



illustration 9 – Schéma des scénarios des phénomènes redoutés (cas type 2)

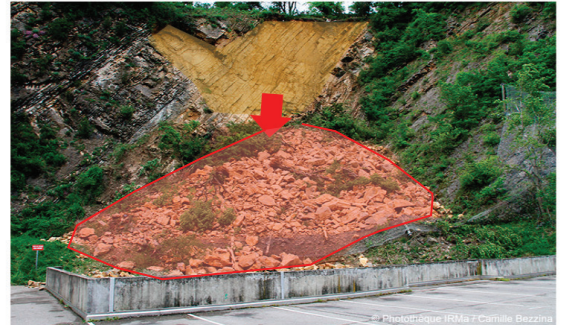
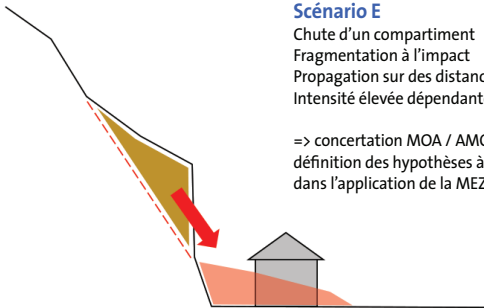
CAS TYPE 2

INTENSITÉ DÉPENDANTE DU VOLUME TOTAL

Scénario E

Chute d'un compartiment
Fragmentation à l'impact
Propagation sur des distances COURTES
Intensité élevée dépendante du volume total

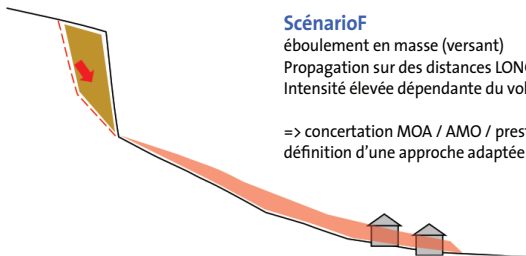
=> concertation MOA / AMO / prestataire pour
définition des hypothèses à prendre en compte
dans l'application de la MEZAP



Scénario F

éboulement en masse (versant)
Propagation sur des distances LONGUES
Intensité élevée dépendante du volume total

=> concertation MOA / AMO / prestataire pour
définition d'une approche adaptée



Remarque : particularités des scénarios D, E et F

Le volume total d'un éboulement rocheux a des influences sur les propagations du fait notamment de l'interaction entre blocs et conditionne naturellement l'aléa de référence. Les anglo-saxons parlent d'avalanche rocheuse (rock avalanche). La temporalité de tels éboulements conduit à distinguer plusieurs phases : i) Rupture en masse d'un volume total se propageant de façon « globale » avec une très forte intensité ; ii) individualisation des trajectoires en cours de propagation. Les questions qui se posent, outre la qualification de la rupture de tels phénomènes, sont : comment évaluer leur propagation ? quelles particularités dans l'approche MEZAP pour évaluer l'aléa ?

La propagation globale de tels éboulements nécessite a priori une étude spécifique soit à partir de modèles adaptés prenant en compte l'interaction entre blocs ou basés sur une rhéologie la simulant, soit sur la base de modèles empiriques.

En pied de versant, des trajectoires isolées serviront de cadrage à la définition de l'aléa de référence en intégrant, le cas échéant, le cas particulier d'ejectas (blocs « sortis » de l'éboulement dont la propagation n'est pas strictement régie par les approches trajectographiques traditionnelles).

En tête de propagation, au voisinage au moins des zones de ruptures, sur des distances à préciser, l'aléa de référence peut être considéré comme différent, d'intensité nécessairement plus élevée. La prise en considération de cet aspect sera à préciser de façon claire dans le choix d'aléa de référence : i) Faut-il considérer une intensité différente du phénomène en zone proche de la rupture ? ; ii) Sur quelle emprise prendre en compte cette variation d'intensité au cours de la propagation ?

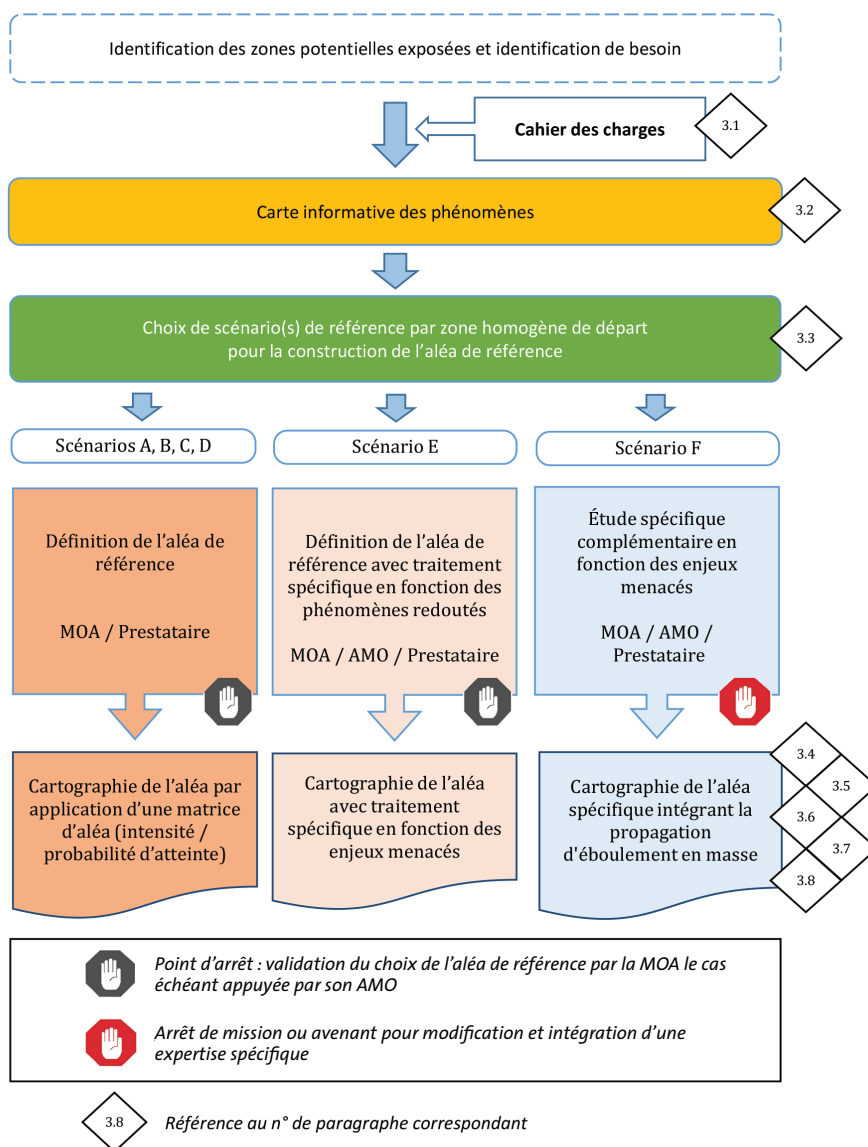
Enfin, ces phénomènes peuvent également être des précurseurs d'activité de type coulée boueuse voire de lave torrentielle (cas du Granier, cas du Char d'Osset, etc.). Cela correspond alors aux effets domino ou cascade. Les matériaux déposés par l'éboulement sont susceptibles d'être remobilisés par des coulées par exemple, qui se propageront bien au-delà des atteintes de l'éboulement. En cas de suspicion de tels phénomènes, un arrêt de la mission telle qu'initialement projetée doit être envisagé et une expertise spécifique engagée.

Pour compléter cette typologie de scénarios, dans des contextes bien spécifiques, il n'est pas rare que des phénomènes d'éboulement génèrent des éléments isolés de faible volume liés à des projections ou éclats, avec des trajectoires tendues et potentiellement de fortes vitesses. Ce point particulier ne constitue pas un scénario au sens strict mais devra impérativement être signalé au MOA si le cas se présente. Ce phénomène particulier justifiera d'un traitement adapté en accord entre MOA/AMO et prestataire. Il est rappelé que le zonage des emprises associées à ces éclats demeure très délicat et est essentiellement basé sur les retours d'expérience (exemple des sites de la Passerelle, commune de Saint-Joseph à la Réunion).

2.3 Démarche MEZAP

La MEZAP respecte le logigramme de l'illustration 10. Chacune des étapes de la cartographie est détaillée dans le chapitre 3 qui précise les attentes, moyens et résultats. Le chapitre 4 décrit les contenus de l'offre et les restitutions attendues.

illustration 10 – Logigramme simplifié de la MEZAP



La phase de cartographie de l'aléa proprement dite se décline suivant les grands principes suivant :

■ l'aléa de référence est caractérisé à partir des scénarios de référence évalués, pour chaque **zone de départ homogène** spatialisée, par la **double caractérisation** suivante :

- intensité du phénomène choisi : volume susceptible de se propager vers les enjeux (selon les scénarios type après fragmentation éventuelle) ;
- probabilité de départ définie par la suite comme l'**activité** du phénomène (§ 3.5).

■ la cartographie des propagations est réalisée à partir de chaque zone de départ pour les intensités associées ;

■ la carte d'atteinte est réalisée en couplant probabilité de départ et de propagation ;

■ la carte d'aléa est réalisée en croisant atteinte et intensité.

Au final, la carte de l'aléa rocheux résulte de la superposition des cartes d'aléa issues des différents scénarios considérés.

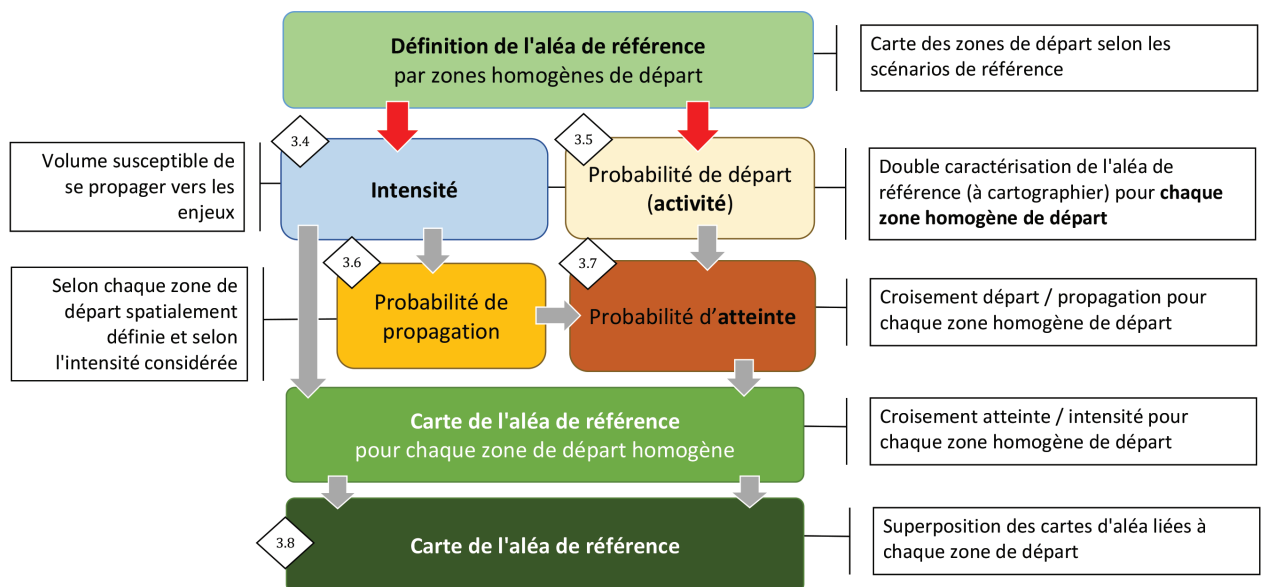
Pour mémoire, la précision des résultats obtenus, pour caractériser l'aléa, dépend de plusieurs paramètres dont :

- la qualité des données descriptives du territoire (MNT, occupation du sol, géologie) ;
- l'existence et la connaissance des événements historiques⁶ ;
- le choix des hypothèses et la définition des scénarios de référence. Les hypothèses faites doivent donc être explicitées et les résultats accompagnés d'un niveau d'incertitude en fonction d'une analyse des deux premiers paramètres.

La MEZAP impose l'expression des résultats, au moins au niveau des limites des zones d'atteinte, dans les zones à enjeux, sous la forme de valeurs d'angle de la ligne d'énergie, et ce, quelle que soit l'approche utilisée en amont (§ 3.6).

Elle respecte le logigramme suivant :

illustration 11 – Logigramme simplifié de la MEZAP pour la cartographie de l'aléa rocheux par scénario de référence retenu

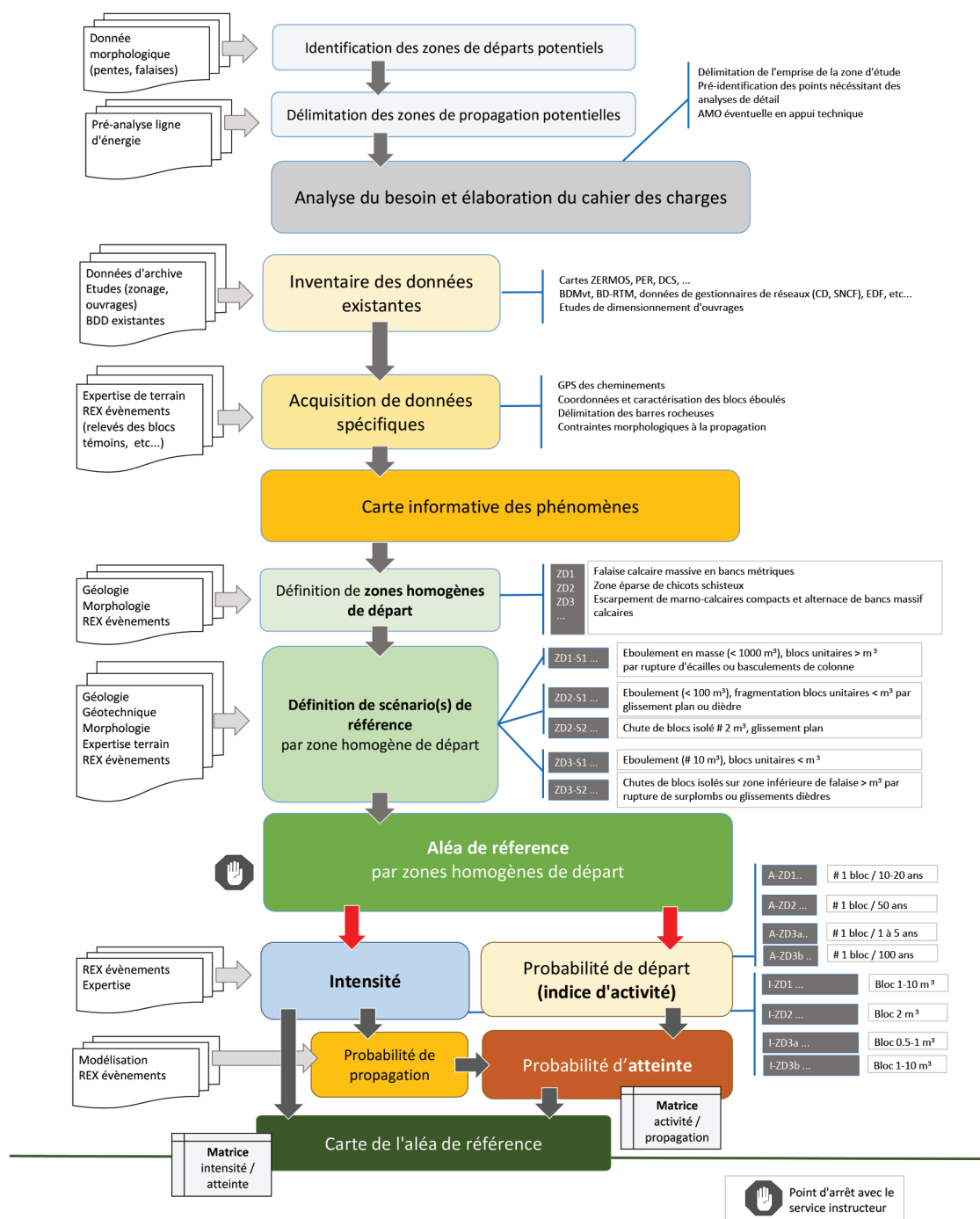


⁶ Les événements historiques désignent tous les événements, et pas uniquement les extrêmes ou les dommageables. De façon globale, les inventaires existants (bases de données nationale notamment) privilégient la saisie d'événements remarquables (avec atteinte aux enjeux) qui bénéficient de remontée d'information. Ce parti pris engendre un effet de seuil essentiel qui doit être intégré en cas de traitement statistique.

3 MEZAP : Mise en application

Le présent chapitre décline, étape par étape la mise en application de la MEZAP en pointant les points de vigilance et de contrôle tout au long du processus. La méthode globale peut être résumée pratiquement sur le logigramme de l'illustration 12.

illustration 12 – Logigramme détaillé de la MEZAP



Rappel de définitions

Rappel de définitions

Aléa : Manifestation d'un phénomène ou évènement naturel (inondation, mouvement de terrain, séisme, avalanche, etc...) ou anthropique d'occurrence et d'intensité données
Aléa de référence : Phénomène naturel servant de référence pour définir la réglementation du PPRn
Période de référence : Durée pour laquelle sont évalués les aléas. Une période de référence de X ans signifie que la probabilité d'atteinte des enjeux par les instabilités est évaluée pour les X prochaines années
Scénario de référence : (synonyme de phénomène de référence) : Phénomène ou évènement retenu pour qualifier l'aléa de référence d'un PPRn

A-ZD1 Bloc 1-10 m³ : exemple (non exhaustif) de caractérisation

A-ZDx Activité retenue pour la zone de départ x

I-ZDx Intensité retenue pour la zone de départ x

3.1 Identification des zones potentiellement exposées

Cette étape doit permettre de préciser l'emprise potentielle des phénomènes et par croisement, d'identifier les enjeux potentiellement exposés. Il est conseillé de réaliser cette identification **en amont de l'élaboration du cahier des charges**, par le maître d'ouvrage et/ou son assistance technique.

Il est **proposé de mettre en application** une méthode empirique simple, peu consommatrice de temps et d'énergie, pour délimiter les emprises potentielles des zones soumises à l'aléa rocheux. Deux étapes sont nécessaires :

- identification des zones de départs potentiels ;
- délimitation des zones de propagation potentielle.

3.1.1 Identification des zones de départs potentiels

Il s'agit, au sein des bassins versants dominant les secteurs à enjeux de délimiter (même de façon sommaire) les emprises des parois, escarpements rocheux, ressauts topographiques susceptibles de produire, *a priori*, des éboulements rocheux de quelque nature que ce soit.

Dans le cadre des PPRn, la délimitation de ces zones de départ est considérée comme « globale » (**aléa de départ diffus**), c'est-à-dire que les compartiments susceptibles de se détacher ne sont pas **systématiquement** identifiés (**aléa de départ localisé**). Ces zones homogènes seront ensuite décrites **en fonction de critères géologiques** (lithologie, structure, etc.) et **morphologiques** et du point de vue des **mécanismes de rupture** pour justifier en particulier de l'intensité de phénomène.

À ce stade, la MEZAP recommande de coupler des approches automatisées (ou semi-automatisées) et des méthodes expertes (relevés sur site ou sur photographies aériennes par exemple) pour évaluer la présence de zone de départ. Globalement la définition des zones de départ est fondée sur les données morphologiques (pentes principalement) mais peuvent être enrichies en intégrant des critères géologiques par exemple.

Remarque : un modèle de détermination des zones de départ probable à partir d'un MNT

L'emploi d'un MNT offre la possibilité d'avoir une vision estimative des zones de départ probable présentes sur l'ensemble d'un site. Dans un MNT, les falaises et les barres rocheuses peuvent être identifiées soit par visualisation en trois dimensions du secteur d'étude soit à partir du plan dérivé du MNT qu'est la carte des pentes.

À partir de l'analyse des zones de départ de plusieurs sites d'étude situés en France, Suisse et Autriche, INRAE, dans le cadre du projet Interreg PROVIALP, (2008) a proposé un modèle permettant de calculer la valeur seuil de pente (angle α) conditionnant la présence de zone de départ. La formule de ce modèle mathématique est la suivante :

$\alpha = 55^\circ \times \text{RES}^{-0,075}$ avec RES = la résolution en mètres du MNT
(par exemple si la résolution est de 25x25 m alors RES = 25 et $\alpha = 43^\circ$)

Comme pour tout modèle, les résultats obtenus avec cette valeur d'angle doivent être impérativement validés par comparaisons avec la réalité du terrain, notamment dans les zones de faible pente avec des ressauts topographiques ponctuels et les données relatives aux phénomènes passés.

Les retours d'expérience montrent que l'utilisation brute de cette formule tend à sous-estimer localement les zones de départ et renforce la nécessité d'un contrôle expert des résultats. Des ajustements ponctuels du seuil de pente doivent être réalisés selon les contextes morphologiques et la précision du MNT valorisé.

D'autres travaux menés à partir d'analyses des distributions des pentes au sein d'ensembles géomorphologiques homogènes (Loye *et al.*, 2009) proposent des fourchettes de classes de pentes, et non un seuil unique, pour localiser les zones de départs. Cette approche donne *a priori* des valeurs de seuils plus cohérentes avec la réalité du terrain, car graduées notamment.

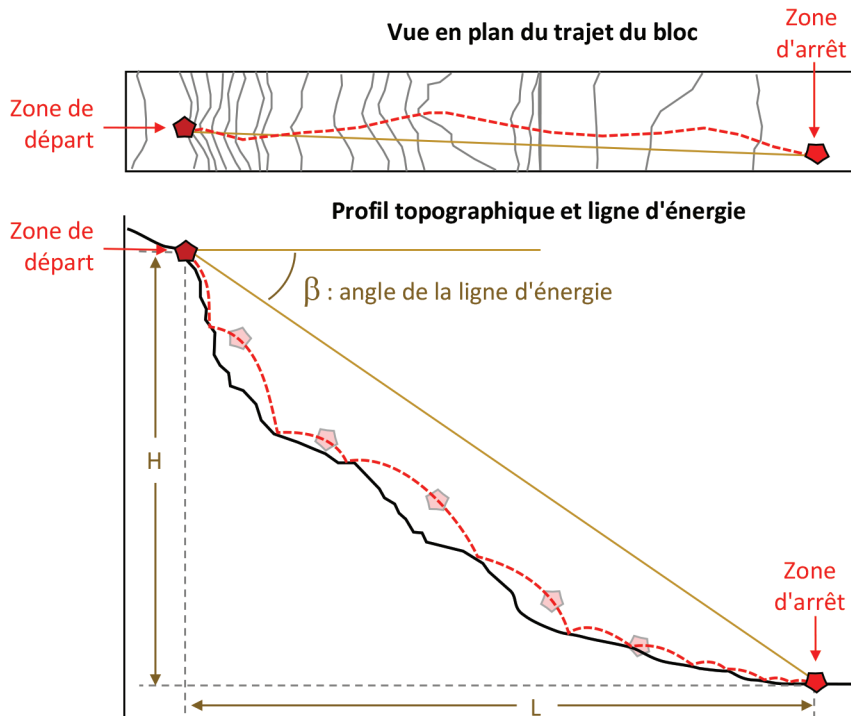
Dans la mesure où dès le cahier des charges un scénario de type F est pressenti (éboulement en masse depuis une zone de versant), il est recommandé d'envisager immédiatement une première étude exploratoire de la zone concernée sur la base d'une expertise géologique afin de valider ou non ce type de scénario.

3.1.2 Délimitation de l'emprise des propagations potentielles

En préalable à une étude détaillée des propagations, il est proposé d'utiliser la méthode dite des « cônes » ou de la « ligne d'énergie » (Heim, 1932) pour évaluer les emprises globales de propagation (annexe 3).

Cette méthode trouve son fondement scientifique dans les phénomènes de grande ampleur. En effet, elle assimile la phase de propagation des blocs à une phase de glissement sur un plan et permet d'évaluer l'extension du phénomène (distance de propagation). Il a cependant été observé que, dans le cas de chutes de blocs isolés, elle donne des résultats probants. À ce titre, la Norvège, la Bavière, l'Australie, la Slovaquie et l'Autriche ont utilisé cette méthode pour la réalisation de cartes d'aléa.

illustration 13 – Principe de la ligne d'énergie (angle d'atteinte β)



Les retours d'expérience de plusieurs centaines d'éboulements rocheux montrent que les angles de ligne d'énergie **correspondant à des chutes de blocs isolés** :

- sont quasi systématiquement supérieurs à 24 - 26°, même si ponctuellement, dans des contextes spécifiques des valeurs plus faibles ont été mesurées (cas en Lozère où l'angle d'énergie a été évalué à 17° pour une « boule » de granite) ;
- peuvent dépasser 45°, et atteindre près de 60° dans des contextes morphologiques particuliers tels que des parois rocheuses au droit de zone de replats (caractéristiques par exemple de falaises sub-verticales, sans versant, sans glacis rencontrées dans des vallées normandes).

En première approche le MOA (et son AMO éventuelle) pourra choisir une valeur précautionneuse selon les scénarios de référence à considérer pour définir l'extension potentielle du phénomène (cf. bibliographie sur les valeurs d'angles d'énergie en annexe 3) :

- scénarios A à E, valeurs d'angle de l'ordre de 25° à 45° sauf cas particulier où ;
 - la forme du bloc (arrondie ou en dalle notamment) ou la nature des sols de propagation (dalle rocheuse) peuvent engendrer des angles plus faibles ;
 - la morphologie du versant peut engendrer des valeurs plus élevées ;
- scénario F, valeurs d'angle inférieures à 25° - 28° (ex. « d'écroulements en grande masse » : rempart de Mahavel, 1965 (La Réunion), valeur de 20° pour 35-50 Mm³ confinés par le versant opposé ou éboulement du Mont Granier en 1248 dont la ligne d'énergie est estimée à 18°).

Pour aider au choix de valeurs d'angle de ligne d'énergie, selon les contextes morphologiques en particulier, l'INRAE et le BRGM ont constitué un inventaire documenté d'éboulements rocheux et développé des outils permettant de cibler les valeurs d'angles plausibles selon ces contextes (annexe 3).

3.1.3 Analyse du besoin – Cahier des charges pour la cartographie d'aléa rocheux

Le croisement simple des zones de propagation potentielle avec la présence d'enjeux permet au MOA de réaliser une pré-qualification des enjeux exposés (croisement simple des emprises des atteintes et des enjeux) sans présumer de sa hiérarchisation (dépendante notamment de l'intensité du phénomène et de la nature des structures potentiellement impactées).

Sur la base de cette analyse, les Services de l'État établiront le cahier des charges pour la réalisation d'une cartographie d'aléa à but réglementaire (PPRn) ou pour un PAC. Ce cahier des charges, outre la présentation de la méthode attendue décrite dans les paragraphes suivants, **précise les limites de la zone d'étude**. En cas de scénario d'éboulement de grande ampleur pressenti (scénario de type F), le MOA procédera au préalable à un diagnostic particulier afin de statuer la prise en compte ou non d'un tel scénario dans l'analyse.

Le guide général PPRn précise que : « *Les études détaillées (modélisations, trajectographies, sondages, etc.) seront réservées à des situations particulières et à des espaces géographiques, pour lesquels elles sont nécessaires. On pourra recourir ainsi à de la modélisation lorsque les informations existantes sont trop anciennes, ou que l'occupation du sol a changé de façon significative et qu'elle a modifié sensiblement les conditions de manifestation des phénomènes dans des secteurs urbains, très exposés en raison de la concentration des hommes, des biens ou des activités.* ».

À ce stade, le MOA pourra, en raison des spécificités pressenties dans des zones potentiellement exposées, afficher le nécessaire besoin d'analyses détaillées (recensement systématique de blocs en versant pour une approche statistique et/ou modélisation) qui mobiliseront des moyens techniques et financiers adaptés.

Remarque

L'État n'a pas vocation à **engager systématiquement** des études fines pour élaborer les PPRn. Il doit avant tout s'appuyer sur les données disponibles. Si un acteur tiers (collectivité locale voire des particuliers) considère que la connaissance des aléas est insuffisante au regard de ses projets de développement, il peut engager des études spécifiques, et ce **dans le respect du présent guide**. Il pourra proposer le résultat de ces études aux services de l'État, qui après expertise, pourront l'intégrer aux cartes d'aléas. Les objectifs poursuivis doivent être cohérents avec le projet de PPRn.

Il est également indispensable que cet acteur demande à son prestataire de préciser la carte d'aléa selon la MEZAP, en intégrant une expertise avancée, afin que celle-ci puisse être prise en compte par la suite par les services de l'État.

3.2 Carte informative des phénomènes

La méthode d'établissement de carte d'aléa pour les PPRn ou les PAC, comme préconisée page 18 du Guide PPRn Mouvements de terrain, est fondée sur une approche historique : « *la connaissance des phénomènes historiques ou actifs constitue une étape essentielle et incontournable de la démarche.* ». La carte informative des phénomènes repose sur l'inventaire des données existantes et sur une

acquisition de terrain spécifique. Le guide PPRn liste les principales sources d'information à consulter. Le volet enquête de terrain est essentiel dans la démarche puisqu'il justifie et garantit la traçabilité des hypothèses de scénarios proposés, que ce soit pour l'évaluation de la possibilité de départ en falaise ou pour l'estimation des emprises de propagation.

Pour l'établissement de la carte informative des phénomènes, **deux étapes sont indispensables** :

- une collecte et un examen des données existantes (archives notamment) avec analyse du besoin en données complémentaires ;
- une acquisition de données complémentaires
 - par expertise de terrain, à caractère technique : données géologiques, géomorphologiques, blocs témoins, zones de rupture, etc. ;
 - par enquêtes auprès des riverains et des élus notamment : recueil de témoignages.

3.2.1 Collecte et examen des données existantes

Les sources de données à exploiter sont sans exhaustivité :

- les archives communales, paroissiales ;
- les sources départementales (archives départementales, données RTM, DDT, DREAL, ...). Les archives historiques générales (calamités agricoles par exemple peuvent être utilement consultées) ;
- les documents de bureaux d'études concernant la zone d'étude (constats, diagnostic, dimensionnement de protection, ...) ;
- les éventuels travaux de recherche menés par les universitaires ou les organismes publics ;
- les bases de données (BD RTM, BDMVT, BD IRMA) ;
- les données des gestionnaires de réseaux (SNCF, EDF, DIRs, direction des routes des Conseils Départementaux).

Il peut s'agir de plans, de cartes, de photographies aériennes, de rapports d'étude. Cette phase de collecte doit s'accompagner d'une identification de données complémentaires à acquérir.

3.2.2 Acquisition de données spécifiques

Cette phase a pour objet l'identification des mécanismes redoutés, l'organisation morphologique des versants exposés, le recensement des blocs éboulés et doit comprendre les échanges avec les riverains. Elle est structurée de la façon suivante :

- recueil de témoignages, organisé en concertation avec le MOA et le représentant des collectivités :
 - identification des témoins auprès de la collectivité (fourniture d'une liste de personnes ressources) ;
 - organisation d'une à deux réunions publiques pour consolider l'inventaire.
- acquisition de données techniques :
 - données relatives à l'observation d'éboulements au niveau de zones de départ (en y associant les mécanismes et les volumes mis en jeu). L'observation des cicatrices dans une falaise peut, entre autres, être basée sur les changements de couleur et de morphologie qui résultent d'une chute. Il faut bien rappeler que l'estimation du volume, et surtout de la date, en l'absence d'informations historiques précises, demeurent assez subjectives.
 - inventaire des blocs déposés sur les versants, avec des descriptions quant à leur géométrie (forme, volume notamment). Là également, hormis pour les événements récents (moins de 10 ans), l'estimation de la date de leur chute est souvent très subjective (possible souvent d'hésiter entre 100 ans et 1000 ans). De plus, certains blocs ont pu être exploités – voire déplacés, par exemple pour la construction ;

- traces éventuelles laissées sur les arbres (cicatrices externes et perturbation de la croissance) en gardant bien à l'esprit que d'autres causes que des éboulements peuvent avoir généré ces traces. La valorisation de ces données par analyse dendro-chronologique peut permettre dans certains cas de dater précisément les impacts des blocs dans une certaine gamme de volume et d'en déduire potentiellement une fréquence spatio-temporelle de chute dans la zone étudiée. Ce type d'analyse nécessite néanmoins des moyens adaptés (Lopez-Saez J. *et al.*, 2014) ;
- éléments morphologiques conditionnant l'aléa de départ et de propagation.

Si les données existent ou si les enjeux le justifient, des acquisitions de données de type lidar ou photogrammétrie permettent également d'enrichir ce recensement (identification de blocs sous couvert végétal ou analyse structurale de falaise par exemple).

Quelle que soit la méthode utilisée, ou les moyens déployés, il convient de bien préciser les limites de la zone investiguée. Le report des cheminements doit être signifié clairement. Le report des événements historiques et d'inventaire des blocs déposés est réalisé en précisant les coordonnées des points et la précision du levé. Les photographies prises doivent être localisées. De même, le rapport d'enquête doit préciser les données « non-cartographiables ».

Pour accroître l'information sur les événements historiques, le guide PPRn préconise « *d'analyser le ou les phénomènes pris en compte sur la totalité de l'unité physique concernée par leur manifestation* ». Cette unité qui est qualifiée de bassin d'aléa ou par extension de bassin de risque peut être définie et délimitée à partir d'un contexte géologique, morphologique et structural où les facteurs d'instabilité, les mécanismes de rupture et de propagation sont similaires. Il peut donc être nécessaire d'étendre les investigations au-delà du périmètre d'étude.

Cette phase se traduira par un report sur carte :

- des **phénomènes observés** (issus d'études, d'archives ou de constats ou témoignages faits dans le cadre de l'étude d'aléa) en précisant en particulier :
 - les volumes totaux et unitaires ;
 - les dates de survenance lorsque connues ;
 - les conditions d'occupation du sol lorsque connues ;
 - la description des dommages engendrés avec l'intensité de phénomène associée ;
- des **indices morphologiques** nécessaires à la qualification de l'aléa rocheux :
 - éléments décrivant les sources potentielles d'éboulements : barres, ressauts, escarpements, falaises, talus le cas échéant ;
 - éléments caractérisant les conditions de propagation :
 - couloirs naturels de propagation, zones de concentration des trajectoires ;
 - zones anthropisées : terrasses agricoles, pistes, routes, ... ;
 - nature des terrains de surface en les distinguant selon leur rôle sur la propagation : colluvions meubles / compactes, prairies, éboulis vifs ou anciens, roche altérée ou couvert fin meuble sur substratum rocheux, roche, etc.
- la présence d'obstacles à la propagation qu'ils soient naturels (forêt, gros bloc, ...) ou anthropiques (ouvrages de protection).

Outre le report des événements et témoins d'événements, cette **carte informative des phénomènes** comprend un **volet géomorphologique adapté aux phénomènes de chute de bloc**.

Important !

À l'issue de l'étude d'aléa, les données événementielles doivent pouvoir être consolidées dans la base de données nationale sur les mouvements de terrain (<https://www.georisques.gouv.fr/risques/mouvements-de-terrain>). En conséquence, un des livrables attendu sera une base de données des événements au format défini par la MEZAP (annexe 4).

3.3 Choix du (des) scénario(s) par zone homogène de départ pour la construction de l'aléa de référence

3.3.1 Zone homogène de départ

Au sein d'une zone d'étude, plusieurs zones de départs potentiels peuvent être identifiées, et parfois s'imbriquer.

La définition des zones homogènes de départ intégrera des parois, secteurs, affleurements présentant des configurations similaires susceptibles de produire des phénomènes du même type suivant la double caractérisation intensité/activité (§ 2.3). Au sein d'un même versant, plusieurs zones homogènes sont susceptibles d'être définies. La **définition de ces zones de départ homogènes devra être explicitée et justifiée**. Le report des zones homogènes sur la carte informative est souhaitée.

Les données valorisables pour la définition des zones homogènes de départ sont :

- les cartes topographiques, les images aériennes (www.geoportail.gouv.fr) ;
- les bases de données historiques de mouvement de terrain (www.georisques.gouv.fr, <https://rtm-onf.ign.fr>) ;
- les MNT (idéalement issus de lidar) qui permettent soit par ombrage soit par création de cartes des pentes, de faciliter la distinction assez précisément les zones potentielles de départ ;
- et naturellement les données issues de l'expertise de terrain et de l'enquête menée auprès des acteurs locaux (§ 3.2.2).

Les outils d'aide à la définition des zones de départ décrits au paragraphe 3.1.1 peuvent être valorisés avec les réserves de nécessaire validation et d'ajustement de seuils en fonction des observations in-situ.

EXEMPLE

illustration 14 – Identification des zones homogènes de départ définies à partir de croisement des zones de granite affleurant et de conditions morphologiques (BRGM, Balogna, Corse du Sud)

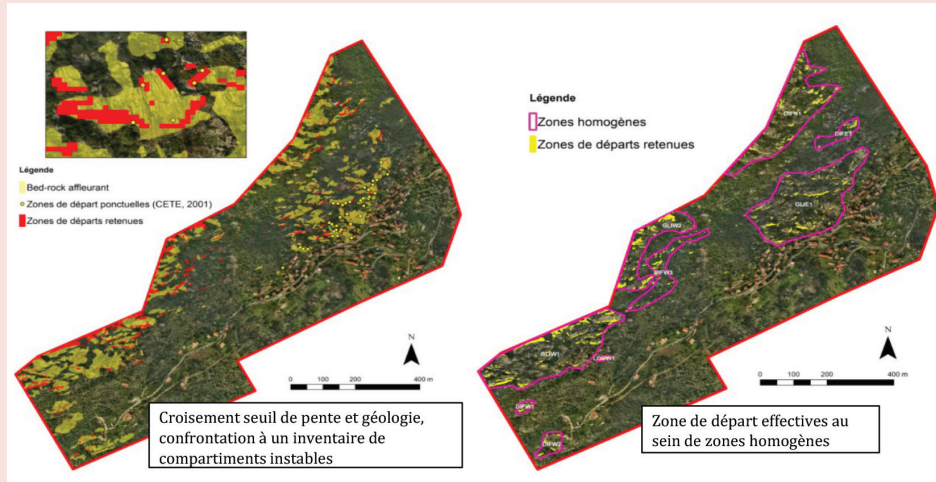
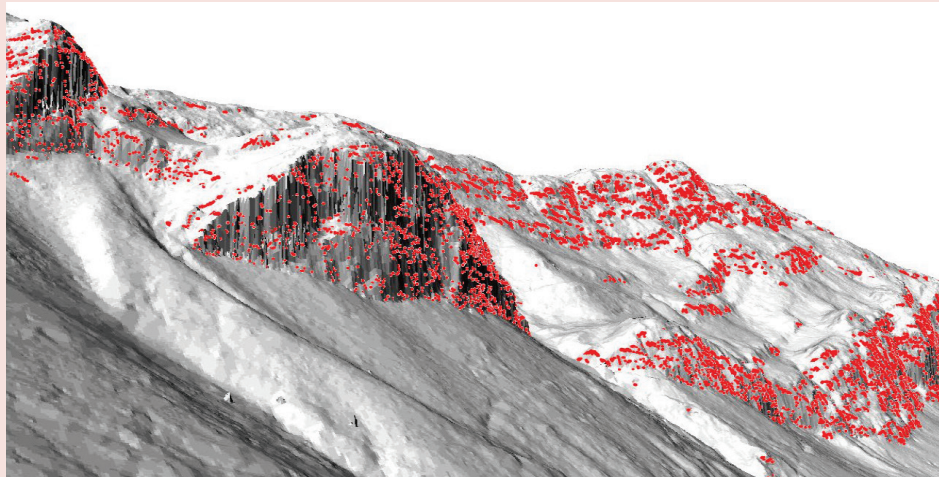


illustration 15 – Identification des zones de départ de blocs (en rouge) à partir de critères de pente (INRAE, Veyrier du Lac, Haute-Savoie)



Ponctuellement la prise en compte spécifique de compartiments isolés, non-représentatifs de l'ensemble de zones de départ d'une zone homogène peut être proposée (cas d'une chandelle au sein d'un versant par exemple).

3.3.2 Scénario(s) pour la proposition de l'aléa de référence

Plusieurs scénarios peuvent être présentés à l'échelle de la zone d'étude. Les propositions de scénario(s) de référence sont soumises pour validation aux services de l'État. Ces scénarios décrivent quel(s) type(s) de phénomène est sont redoutés sur la période de référence. Il sera décrit en particulier :

- les mécanismes de départ mis en jeu (basculement de colonne, ruptures dièdres, surplomb, glissement plan, etc.) ;
- les contextes de développement des ruptures : facteurs permanents (géologie, morphologie, contexte structural et lithologique) et facteurs de déclenchement voire facteurs aggravants (pluviométrie, gel-dégel, contraste thermique journalier ou saisonnier, végétation, ...) ;
- les volumes globaux potentiellement impliqués et les géométries de bloc unitaire (forme, élancement, volume, etc.) susceptibles de se propager vers les enjeux ;
- les conditions de propagation redoutées. Cette phase d'analyse essentielle devra décrire en particulier les phénomènes de fragmentation qui définissent in-fine le volume susceptible de se propager vers les enjeux.

Selon le type de scénario retenu et justifié, la concertation entre le MOA, le prestataire et le cas échéant une AMO sera adaptée. Chaque scénario de référence par zone homogène de départ retenue devra **être explicité et justifié**.

illustration 16 – Typologie des instabilités rocheuses (Guide LCPC, 2004)

Mécanisme d'instabilité	Configuration
Glissement plan (fig. 6a et 6b)	
Glissement plan composé	
Glissement de dièdre (fig. 6c et 6d)	
Rupture de surplomb ou de dalle en toit (fig. 6e et 6f)	
Rupture d'écaille en paroi (fig. 6g)	
Basculement de bloc, de panneau ou colonne	 Colonne si $h/l > 2$ Ecaille si $h/l < 2$
Rupture de pied de colonne (fig. 6h)	

3.3.3 Aléa de référence

L'aléa de référence est défini par zone de départ homogène comme le **volume de roche susceptible de se propager vers les enjeux** sur la période de référence, et ce après tout mécanisme de fragmentation. Il est à justifier au regard de l'historique évènementiel et des contextes géologiques et morphologiques.

Le choix de l'intensité caractérisant l'**aléa de référence correspond au(x) phénomène(s) redouté(s) sur la période de référence de 100 ans**. Il sera étayé sur la base d'analyse spécifiques dépendantes de la nature du (des) scénario(s) retenu(s)⁷. Par exemple, le travail d'analyse du prestataire ne saurait se réduire à prendre systématiquement le volume le plus important constaté sur le périmètre d'étude. Ces volumes sont à circonscrire en fonction des événements documentés, simplement supposés ou au contraire estimés non-pertinents pour une prise en compte de l'aléa de référence.

On peut distinguer les cas suivants pour le choix de l'intensité caractérisant l'aléa de référence :

■ scénarios de type 1 (l'intensité est dépendante du volume unitaire se propageant vers les enjeux).

Le volume unitaire :

- est équivalent au volume unitaire se propageant vers les enjeux associés au plus gros événement connu si un tel événement peut se produire sur la période de référence (100 ans) ;
- est plus important que le volume unitaire associé au plus gros événement connu si les contextes géologiques le permettent et que la survenance d'un tel phénomène est possible sur la période de référence (100 ans) ;
- est inférieur au volume du plus gros événement connu, si la configuration du versant (ou de la paroi) ne justifie pas qu'un tel événement se reproduise sur la période de référence (100 ans) ;
- est évalué, lorsque aucun événement significatif n'est connu sur la zone, à partir de l'expertise de terrain en décrivant les compartiments susceptibles de se détacher dans la période de référence (100 ans) et sur la base de la connaissance historique de sites ayant des contextes similaires (géologie, topographie, pédologie...) à celui de la zone d'étude. Cette évaluation doit être dûment explicitée et étayée, et il est recommandé d'en établir un point d'étape (ou d'arrêt) avec l'AMO ;

■ scénarios de type n° 2 – l'intensité du phénomène est fortement dépendante du volume total éboulé.

- le volume total est élevé et il n'y a pas d'individualisation des trajectoires dans les zones d'atteinte des enjeux, l'intensité est élevée à très élevée. Si, en fin de parcours des blocs s'individualisent, l'intensité peut être évaluée doublement avec prise en compte de scénarios de type n° 1 (cas des éjectas).

Il est à noter que contrairement à la caractérisation de l'aléa avalanche, il n'est pas envisagé de prendre en considération l'aléa exceptionnel, qui correspond à un événement de période de retour de plus de 100 ans pouvant se produire sur la période de référence de 100 ans.

Le choix de l'intensité de l'aléa de référence est une des bases de la MEZAP. À ce titre, le volume retenu pour caractériser l'intensité du phénomène de référence devra être explicité et justifié. **Ce choix fait l'objet d'un point d'arrêt dans la démarche.**

L'ensemble de cette analyse sera synthétisé sur la carte informative (§ 3.2) ou sur une carte construite sur le principe de carte géomorphologique. Cette carte portera les zones homogènes de départ, les choix de volume par zone homogène, les éléments géomorphologiques expliquant ces choix et les éléments géomorphologiques ou anthropiques impactant les propagations.

⁷ L'influence du changement climatique sur l'évolution de la rupture à 100 ans – dans la mesure où elle est étayée, pourra être prise en compte et des phénomènes jusqu'alors non observés pourront être, à ce titre, pris en considération.

3.4 Intensité du phénomène

Comme spécifié par le guide PPRn, la **MEZAP qualifie le niveau d'intensité du phénomène au travers d'une échelle de dommages au bâti courant**. En théorie, l'évaluation du dommage est menée en fonction de la sollicitation par le biais de courbes de fragilité (fonction de vulnérabilité). En l'état des connaissances, cette approche est impossible et non généralisable puisqu'il faudrait connaître la vitesse du projectile, l'énergie libérée à l'impact (de translation et de rotation) et à la nature des contacts à l'impact (arête, face, sommet) ainsi que la nature de l'interaction bloc/structure. En conséquence, la hiérarchisation de l'intensité est régie par deux hypothèses simplificatrices fortes (illustration 17) :

- l'intensité du phénomène est définie par le volume du bloc de l'aléa de référence ;
- à un volume, est associé un niveau de dommage.

Pour mémoire, il a été montré que, à partir d'une énergie de 30 kJ à l'impact, un mur en béton banché est cassé. Ce niveau d'énergie correspond sensiblement à l'atterrissage d'un bloc cubique de 1 m³ chutant d'une hauteur de 1 m (cf. annexe 2). Ceci étant, c'est à partir de 10 kJ qu'il est structurellement endommagé (Bost, 2018). Il est bien noté que le choix de définir l'intensité à partir du volume est très réducteur dans une approche risque théorisée. Néanmoins la logique PPRn (ou PAC) centrée sur les dommages potentiels à un bâti courant, justifie cette approche.

illustration 17 – Illustration des indices d'intensité de l'aléa rocheux en fonction du volume, exemples d'endommagement associé

Indice d'intensité	Description	Indications sur les dommages
Très faible	Le volume unitaire pouvant se propager est inférieur ou égal à 0,05 m ³	Peu ou pas de dommage au gros œuvre. Dommages aux éléments décoratifs.
Faible	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur à 0,05 m ³ mais inférieur ou égal à 0,25 m ³	Peu de dommage au gros œuvre. Fissuration.
Moyen	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur ou égal à 0,25 m ³ mais inférieur ou égal à 1 m ³	Dommage au gros œuvre sans ruine. Intégrité structurelle sollicitée partiellement.
Fort	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur à 1 m ³ mais inférieur ou égal à 10 m ³	Dommage important au gros œuvre. Ruine probable. Intégrité structurelle remise en cause.
Très fort	Le volume unitaire pouvant se propager dépasse 10 m ³	Destruction du gros œuvre. Ruine certaine. Perte de toute intégrité structurelle

La définition de l'intensité de phénomène par zone homogène de départ devra être étayée et justifiée à partir de la définition des scénarios redoutés.

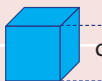
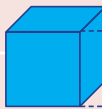
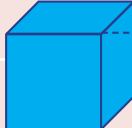
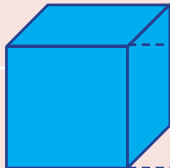
Comme signalé, le *Guide national PPRn Mouvement de terrain* propose également la possibilité de qualifier l'intensité à partir de l'importance des mesures de protection qui pourrait être nécessaire pour s'en prémunir.

illustration 18 – Indices d'intensité de l'aléa rocheux au regard des parades adaptées

Indice d'intensité	Parades envisageables
Très faible	Parade passive efficace de type écran d'interception / Renforcement du bâti
Faible	Parade passive efficace de type écran dissipateur (frein) Renforcement du bâti sous condition
Moyen	Parade passive efficace de type écran sous réserve de vérification ou de type merlon / Renforcement du bâti complexe voire impossible
Fort	Parade passive efficace de type écrans sous condition, de type merlon / Plus de renforcement possible
Très fort	Potentiellement ouvrage monumental, de type merlon de très grande dimension

À titre informatif cette hiérarchisation de l'intensité du phénomène est proposée de façon imagée :

illustration 19 – Indices d'intensité au regard du volume de bloc

Indices d'intensité	Description	Exemple
Très faible	$\leq 0,05 \text{ m}^3$ (50 litres) < 100-150 kg >	 0.37 m   0.01 m ³ (# 10 l)
Faible	$\leq \text{à } 0,25 \text{ m}^3$ (250 l) < 500 -700 kg >	 0.63 m 
Moyen	$\leq 1 \text{ m}^3$ < 2,5 - 3 t >	 1.0 m 
Fort	$\leq 10 \text{ m}^3$ < 25 - 30 t >	 2.15 m 
Très fort	$> 10 \text{ m}^3$	

Remarque

La méthode MEZAP donne un poids conséquent au volume pour la définition de l'intensité et donc de l'aléa. Il est généralement admis que les blocs les plus volumineux se propagent plus loin que les plus petits blocs et dans ces conditions la prise en compte dans l'évaluation des blocs les plus volumineux intègre de fait les éléments moins grossiers. Il ne faut pas oublier que cette approche n'est pas nécessairement conservatrice dans la mesure où les blocs les moins volumineux rencontrent moins d'obstacles et sont donc moins ralentis. Leur vitesse peut donc atteindre des valeurs plus élevées conduisant à une rupture par perforation. Ceci étant, ce principe n'est pas absolu et il n'est pas rare que des éléments de volume inférieur au volume retenu puissent se propager plus loin, c'est en particulier le cas lors d'éboulement avec interactions entre blocs ou lorsque la fragmentation est importante (exemple de fragmentation de bloc isolé à l'impact sur vire rocheuse et expulsion d'éjectas comme observé à La Réunion, site de la Passerelle (commune de Saint-Joseph). Ce cas doit être évalué et traité au besoin.

3.5 Activité : probabilité de départ sur une période de référence de 100 ans

Dans le cadre de la MEZAP l'activité définit la probabilité de départ sur une période de référence de 100 ans. Elle est qualifiée par un **indice d'activité**. L'indice d'activité est estimé à partir :

- des événements recensés lors de l'approche historique/documentaire ;
- des traces de départ visibles (cicatrices en falaises) ;
- du nombre de blocs observés dans la pente ;
- ou des traces d'impact laissées sur les arbres.

En cas de données insuffisantes, l'indice d'activité peut aussi être apprécié par les observations faites dans des contextes similaires (géologie, topographie...). Dans tous les cas, l'approche historique est essentielle (§ 3.2). Cet indice relativement frustre intègre de fait les approches quantifiées plus développées telles que des analyses de probabilités annuelles.

Afin de qualifier de façon comparable l'activité de zones homogènes d'ampleur différente, cet indice doit intégrer une référence spatiale (nombre de blocs de référence par hm^2 de surface ou par hm de longueur de falaise). Le JTC-1 propose de retenir pour la qualification de l'aléa sur linéaire de falaise :

■ Très élevé	> 1 chute/an/hm	
■ Élevé	0,1 à 1 chute/an/hm	soit 1 à 10 chutes / 10 ans / hm
■ Modéré	0,01 à 0,1 chute/an/hm	soit 1 chute / 10 ans à 1 chute / 100 ans / hm
■ Faible	< 0,01 chute/an/hm	soit < 1 chute / 100 ans / hm

Sur cette base la MEZAP propose de retenir pour qualifier l'indice d'activité au sein des zones homogènes :

illustration 20 – Définition de l'indice d'activité

Indice d'activité par zone d'homogène	Description (pour un linéaire de 100 m de zone de départ)	Probabilité de départ annuelle
Faible	De l'ordre d'un bloc correspondant à l'aléa de référence tous les 100 ans	10^{-2}
Moyen	De l'ordre d'un bloc correspondant à l'aléa de référence tous les 10 ans	10^{-1}
Fort	De l'ordre d'un bloc correspondant à l'aléa de référence tous les ans	1

Comme pour l'intensité du phénomène, cet indice d'activité, même s'il est évalué de manière experte doit être justifié en particulier au regard des chroniques évènementielles.

Remarque

La définition de l'indice d'activité est basée sur le nombre de blocs correspondant à l'aléa de référence se produisant sur une période donnée. Il est important de bien intégrer le fait qu'un scénario donné peut engendrer la production de nombreux blocs correspondant au volume de l'aléa de référence sur un évènement unique (cas des scénarios B, C, D notamment).

3.5.1 Application : cas de l'aléa diffus

L'application pour un aléa diffus est directement déclinée de l'illustration 20. L'indice d'activité peut également être déduit de la fréquence de chute en considérant que le processus de chute obéit à la loi de Poisson. Dans le cas d'absence d'historique sur le site, cet indice devrait être *a priori* faible, sauf justification par le prestataire.

Remarque

Notons qu'un faible nombre d'évènements d'une certaine taille ne doit pas empêcher d'estimer l'indice d'activité, même si l'incertitude est grande (C2ROP, 2020. Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux). Selon l'hypothèse que le nombre de chutes sur une certaine durée est régie par une loi de Poisson, si dans une plage de volume on observe x évènements sur une certaine durée, on peut déduire avec un niveau de confiance à préciser (entre 95 % et 99 % par exemple) une fourchette sur l'espérance de ce nombre.

Sur cette base on peut formaliser l'évaluation de l'indice d'activité ou même une probabilité calculée de départ en précisant l'incertitude attachée :

Nb d'évènements observés sur une période (T)	Confiance 95%			Probabilité annuelle (min/max)					
	Espérance de chute			Période d'observation (T) ans					
	Esp. min	Esp. max	Facteur d'incertitude	1		10		100	
0	0	3,7	Non défini	0	$9.8 \cdot 10^{-1}$	0	$3.1 \cdot 10^{-1}$	0	$3.6 \cdot 10^{-2}$
1	0,025	5,6	15,0	$2.5 \cdot 10^{-2}$	1	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$4.3 \cdot 10^{-1}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$5.4 \cdot 10^{-2}$
10	4,8	18,4	2,0	$9.9 \cdot 10^{-1}$	1	$3.8 \cdot 10^{-1}$	$8.4 \cdot 10^{-1}$	$4.7 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^{-1}$





Nb d'évènements observés sur une période (T)	Confiance 99%			Probabilité annuelle					
	Espérance de chute			Période d'observation (T) ans					
	Esp. min	Esp. max	Facteur d'incertitude	1		10		100	
0	0	4,6	Non défini	0	$9,9 \cdot 10^{-1}$	0	$3,7 \cdot 10^{-1}$	0	$4,5 \cdot 10^{-2}$
1	0,005	7,4	38,5	$5,0 \cdot 10^{-3}$	1	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$
10	3,7	21,4	2,4	$9,8 \cdot 10^{-1}$	1	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$8,8 \cdot 10^{-1}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$

D'après Hantz et al. (2003) <https://nhess.copernicus.org/articles/3/693/2003/nhess-3-693-2003.pdf>

Par conséquent, dans le cas particulier où il est possible d'établir des relations statistiques entre fréquence de chute et volumes de blocs éboulés, en se projetant sur la période considérée (100 ans), il est possible de déterminer l'indice d'activité pour le volume de référence à prendre en compte.

Si de telles approches sont possibles, elles seront déclinées sous la forme de l'indice d'activité MEZAP. Il faut rappeler que ce type d'approche implique un recensement de blocs dans les pentes (témoins de départs) et une vérification de la période durant laquelle l'échantillon de blocs est tombé (sur une période de 1000 ans ? de 100 ans ? de 10 ans ?). Une proposition d'un prestataire en ce sens dans la quantification de son temps de terrain est tout à fait recevable.

3.5.2 Application : cas d'un aléa localisé

Pour un aléa localisé, la probabilité de chute dans une période donnée est estimée à dire d'expert, sauf dans certains cas où le compartiment rocheux est déjà en mouvement et qu'il est surveillé. Dans ces conditions, l'indice d'activité est défini à partir de la probabilité annuelle de départ, elle-même qualifiée sur la base du délai probable de départ.

- Départ redouté dans l'année → indice d'activité « fort » ($P_{\text{annuelle}} \sim 1$)
- Départ redouté dans les 10 ans → indice d'activité « moyen » ($P_{\text{annuelle}} \sim 10^{-1}$)
- Départ redouté dans les 100 ans → indice d'activité « faible » ($P_{\text{annuelle}} \sim 10^{-2}$)

Remarque

À l'échelle de zones homogènes de départ (= secteur d'aléa diffus), des compartiments isolés (en faible nombre) peuvent être identifiés et conduire à des scénarios de référence à part entière pour l'intensité redoutée et/ou l'activité associée. La MEZAP intègre l'identification de ces zones de départ spécifiques (= aléa localisé) en justifiant de leur activité/intensité comme réalisé à l'échelle de zones homogènes.

Il est rappelé que le volume le plus fréquemment observé sur un site ne correspond pas forcément au volume de l'aléa de référence. En cas d'indice d'activité faible pour le volume de l'aléa de référence, il est nécessaire de contrôler la cohérence de ce choix au regard de la classe de volume le plus fréquent. En effet, si des volumes inférieurs peuvent conduire à revoir le niveau d'aléa final en raison de la fréquence plus importante, il conviendra d'en tenir compte. Cependant compte tenu des matrices de croisement utilisées, privilégiant l'intensité de phénomènes (§ 3.8), ce cas sera assez peu fréquent *a priori*. Ceci dit, pour mémoire, plusieurs scénarios décrivant des aléas de référence variables peuvent être proposés.

3.6 Probabilité de propagation

La zone de propagation représente la zone parcourue potentiellement par des éléments rocheux lors d'un éboulement : il s'agit de la zone dans laquelle les éléments rocheux passent et s'arrêtent. La probabilité de propagation est la probabilité qu'un phénomène atteigne une zone donnée en considérant les zones de départ susceptibles de l'atteindre. Cette grandeur est indépendante de toute période d'observation. La cartographie de la probabilité de propagation permet de représenter la distribution spatiale des points d'arrêts potentiels d'une chute de blocs.

Cette probabilité est fonction des caractéristiques du versant étudié (pente, présence d'obstacles, nature et état du sol, etc.) et du projectile (forme, dimensions, etc.). La combinaison de ces nombreux paramètres régissant la propagation la rend aléatoire.

Les méthodes mises en œuvre pour déterminer les probabilités de propagation sont soit empiriques (à partir de bases de connaissances) soit prospectives (s'appuyant sur des calculs trajectographiques). La qualification peut être qualitative ou quantitative selon les moyens mis en œuvre.

Afin d'**objectiver l'évaluation de la propagation**, la MEZAP en s'appuyant sur les recommandations du JTC-1 propose de relier qualification / quantification de la propagation. Cette proposition rejoint celle retenue pour la qualification de l'atteinte (§ 1.2.4) en considérant un départ acquis dans l'année :

illustration 21 – Proposition de la MEZAP pour la qualification de la probabilité de propagation

Qualification de la propagation	Probabilité de propagation associée
Extrêmement forte	$> 10^{-2}$
Très forte	10^{-3} à 10^{-2}
Forte	10^{-4} à 10^{-3}
Moyenne	10^{-5} à 10^{-4}
Faible	10^{-6} à 10^{-5}
Très faible	$< 10^{-6}$

La méthode utilisée est fonction de l'état des connaissances scientifiques et des moyens financiers disponibles pour l'étude. **La méthode MEZAP n'impose pas les moyens suffisants qui sont laissés à l'appréciation de l'expert pour évaluer la propagation.** En revanche, in-fine, les limites des zones de propagation proposées devront être **traduites en valeur d'angle de ligne d'énergie** par zone de propagation homogène, et ce quelle que soit l'approche utilisée en amont. Selon la méthode seront au moins fournies les valeurs correspondantes pour l'enveloppe maximale de propagation considérée pour la carte des aléas au niveau de profils de référence reportés sur la carte informative ou la carte de propagation.

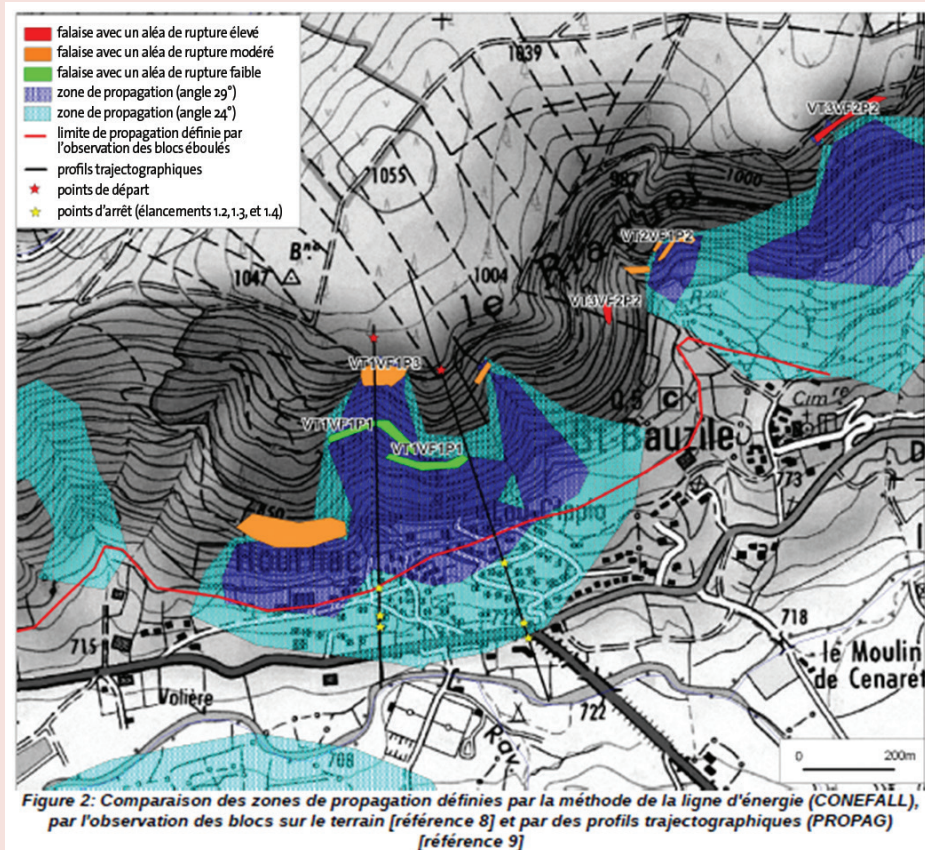
Traduction des emprises de propagation en valeur d'angle d'énergie

Selon la méthode valorisée, la traduction est plus ou moins aisée. L'outil ROLLFREE (INRAE, <http://www.captiven.fr/article/logiciel-rollfree>) permet une évaluation simple de l'angle d'énergie de points d'arrêt à partir du pointage de zones de départ associées.

Si la méthode de la ligne d'énergie est valorisée, le report des limites retenues est attendu par zone homogène ou par profil type valorisé, sous forme d'étiquettes ou sur la légende de la carte produite ou de tableau par secteur.

Si une approche trajectographique est valorisée l'analyse la plus simple proposée est de fournir outre les distances de propagation la valeur de la ligne d'énergie associée sur les profils 2D jugés comme représentatifs de l'analyse.

La figure suivante illustre ce type de restitution (extrait rapport Cerema : H18-034 – Février 2018).



3.6.1 Zone de propagation : hiérarchisation

Outre les enveloppes maximales de propagation, il est nécessaire en vue de qualifier l'atteinte des phénomènes de hiérarchiser les probabilités d'arrêt au sein de la zone homogène étudiée. Il s'agit ici de déterminer la distribution des points d'arrêt des blocs dans les versants depuis les zones de départ homogènes identifiées, pour l'aléa de référence estimé.

L'approche retenue est laissée à l'appréciation du prestataire mais la MEZAP recommande qu'elle comprenne au départ (§ 3.2) :

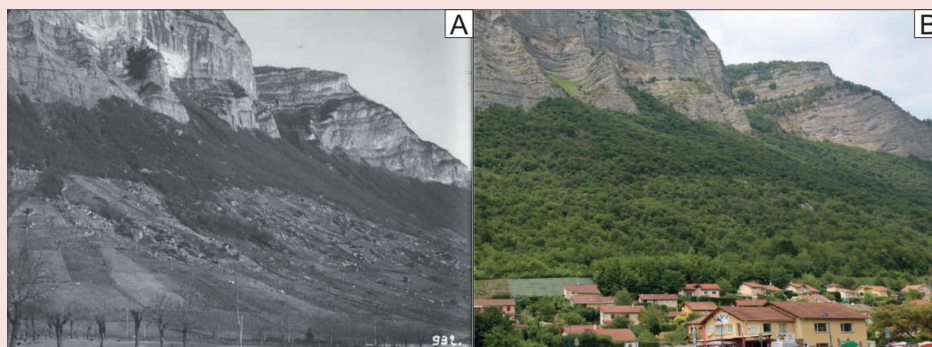
- une évaluation des trajectoires préférentielles, basée sur une approche morphologique : concentration des trajectoires vers les zones de talweg, report des zones d'éboulis – récents ou anciens, ... ;
- un inventaire des blocs éboulés en précisant les contextes de réalisation (zones de départs possibles / probables associées, état de l'occupation du sol au moment des chutes, ...).

Remarque

Il est important de bien accorder à la donnée d'inventaire de blocs éboulés (ou « blocs témoins ») l'importance qu'elle mérite.

En effet, outre l'association toujours délicate à des zones de départ, la nature même du versant au moment d'une chute de blocs est souvent inconnue. En montagne par exemple, l'activité agricole a énormément évolué sur les 100 dernières années modifiant considérablement l'occupation du sol en surface (zone agricole, terrains nus, couvert forestier, etc.) et la nature du sol voire la topographie (cas des terrasses par exemple). De plus, le comportement d'un même sol peut évoluer selon son degré d'humidité (sol meuble humide à compact sec) ou qu'il soit gelé ou non au moment de l'évènement.

Les forêts présentes sur un versant peuvent aussi altérer la perception des aléas par un expert du fait de l'effet de masque du couvert forestier (obstacle au champ de vision de l'expert) et du fait que les blessures observables sur les arbres peuvent avoir d'autres causes que les impacts de projectiles rocheux : dégâts d'exploitation, tempêtes...



*Exemple de l'évolution d'occupation du sol en Chartreuse en 1911 (A) et 2017 (B)
(source M. Farvacque, 2020)*

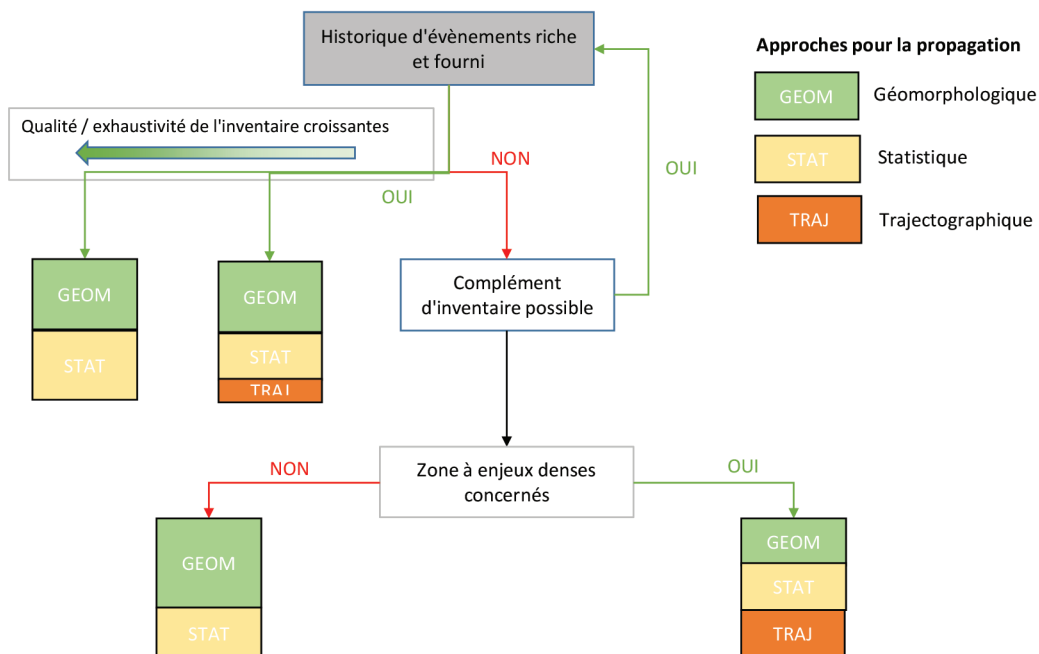
À ces égards, en théorie, l'utilisation de blocs témoins pour « rétro-caler » ou « valider » des modèles de propagation n'est réalisable *a priori* que dans les secteurs pour lesquels la date de réalisation de l'évènement et les caractéristiques de l'occupation de sols, voire de l'état des sols, à cette date sont connues. Cette considération impose une certaine prudence et l'affichage des incertitudes associées.

Sur cette base pourront être mises en œuvre :

- une **approche géomorphologique**, naturaliste : comprenant l'analyse de photos anciennes / photos aériennes, l'analyse du fonctionnement géomorphologique du site, adaptée aux phénomènes, l'analyse des effets des phénomènes passés avec une qualification de l'intensité par les impacts observés (carte des impacts / intensité) ;
 - une **approche statistique** : consistant en l'ajustement de loi statistique à des phénomènes observés et selon des « variables » assez documentées (distance de propagation, profil de pente). Cette approche intègre les modèles empiriques (ligne d'énergie) et lorsque les chroniques événementielles sont suffisantes, un traitement statistique est possible pour associer une fréquence à une distance d'atteinte par exemple.
- Ces modèles statistiques sont généralement issus de traitement multi-sites. Lorsque cela est possible (base de données suffisantes), ils doivent être adaptés aux sites d'études. Ces modèles permettent de qualifier correctement les emprises maximales et minimales. Ils ne permettent pas strictement d'appréhender des probabilités quantifiées. En revanche, les travaux de la MEZAP mettent en évidence l'influence de la morphologie 2D des profils topographiques décrivant les propagations en versant et des relations sont proposées pour aider à la définition des emprises maximales et des outils pour appuyer l'expert à la hiérarchisation des propagations (cf. annexe 3).
- une **approche à base physique** : décrivant la propagation par des lois mécaniques (rhéologie de l'écoulement, interaction avec le sol, ...). C'est le domaine de la trajectographie en 2D ou en 3D. La MEZAP alerte sur le fait que ce type d'approche implique une grande rigueur méthodologique. Ces analyses seront menées dans le respect des recommandations pour la réalisation des études trajectographiques formalisées dans une note technique réalisée par Cerema/RTM (janvier 2020) pour le Ministère de la Transition Écologique. On s'assurera notamment du nombre de simulations nécessaires pour obtenir une convergence du modèle.

Le couplage de méthodes est fortement recommandé par la MEZAP, mais le choix de méthode (illustration 22) à mettre en œuvre est orientée par les données disponibles et des enjeux concernés :

illustration 22 – Mode de qualification de la probabilité de propagation



Remarque : des outils d'aide à la cartographie accessibles à bas coût

Il existe plusieurs outils en ligne – accessibles gratuitement ou moyennant une faible contribution, d'aide à la cartographie de la propagation des aléas rocheux, en 2D ou en 3D, prenant ou non en compte la présence des peuplements forestiers :

- la plateforme en ligne multi-logiciels et en accès libre, PLATROCK, développé par INRAE (accessible par simple demande auprès de franck.bourrier@inrae.fr avec copie à frederic.berger@inrae.fr) propose des modèles en 2 et 3D prenant en compte ou non la forêt, un utilitaire de rétro-analyse des paramètres cinématiques entre deux impacts consécutifs d'un projectile et un outil pour l'évaluation de l'angle de ligne d'énergie minimal probable sur un profil topographique par comparaison à une base de données contenant 3 446 événements (profils topographiques entre les points de départ et d'arrêt observés) au 31 décembre 2020.
- ConeFall (<https://quanterra.ch/portfolio-items/conefall/>) développé par l'Université de Lausanne et E-Line (<https://www.ecorisq.org/ecorisq-tools>) : porté par la fondation scientifique ECORISQ : permettant la cartographie en 3D des emprises de propagation une fois les valeurs d'angle de ligne d'énergie définies par zones homogènes. Il faut noter que l'approche valorisée est purement géométrique et par conséquent cet outil trace des cônes qui « passent à travers le terrain », ce qui impose dans des configurations accidentées des corrections manuelles ;
- RockyFor3D porté par la fondation scientifique ECORISQ : modèle de trajectographie en 3D prenant en compte ou non la présence des peuplements forestiers (<https://www.ecorisq.org/ecorisq-tools>).

Ces outils ne sont pas spécialement préconisés par la MEZAP par rapport à d'autres outils commerciaux dont les limites et précautions d'emploi sont similaires.

Au final, la « carte de propagation » doit faire figurer le report de blocs rocheux « témoins » d'événements passés, le cas échéant. De façon générale, et modulo les remarques précédentes sur les blocs témoins et l'occupation du sol, les blocs « témoins » ont peu de chance de se trouver au sein des zones d'aléa de propagation faible définies. Néanmoins, il est important de sensibiliser les acteurs sur les biais possibles induits par les approches statistiques en cas d'échantillons insuffisant notamment (par exemple approche considérant un bloc qualifié de « courant » alors que sa présence relève d'une propagation tout à fait exceptionnelle).

Important !

Le fait de faire reposer le « dire d'expert » sur une « valeur » (l'angle de la ligne d'énergie) présente l'avantage de disposer d'un élément quantitatif de contrôle du « dire d'expert », qui peut par la suite être valorisé pour le suivi du travail des prestataires.

Il est rappelé les précautions d'usage sur la valorisation des outils mis en œuvre. Il ne s'agit en aucun cas d'outils « presse-bouton » et la validation finale des angles retenus est réalisée par l'expert (le prestataire). Il pourra, selon les contextes (chutes directes, trajectoires aboutissant à un replat marqué, ou empruntant des terrasses, forme de bloc arrondie par exemple – et les cas sont nombreux) réduire ou augmenter les valeurs d'angles fournies par les outils en justifiant de ses choix.

3.6.2 Cas particulier des obstacles à la propagation

Lors de leur propagation les blocs peuvent interagir avec des « obstacles », des variations de vitesse et de trajectoires, voire de volume (§ 2.2 cas des éclats) se produisent alors. Il peut s'agir d'**obstacles « naturels »** (présence d'un gros bloc, de la végétation au sens large) ou d'**obstacles « anthropiques »** (pistes, routes, bâtiments, ouvrages de protection, ...). Ces obstacles doivent être identifiés et reportés sur la carte informative (§ 3.2).

Les obstacles « naturels » **morphologiques** sont par définition pris en compte dans la cartographie. À ce titre, une modification globale de la topographie, suite à un éboulement majeur, impacte la cartographie des aléas et implique une révision du zonage existant.

En revanche, la **forêt** et les **obstacles « anthropiques » ne sont pas pris en considération** dans l'évaluation de l'aléa de propagation : les obstacles sont considérés comme « transparents ». Dans ces conditions, le prestataire doit impérativement préciser au droit des zones gommées :

- la façon dont la topographie est modifiée (notamment au niveau des zones bâties ou d'ouvrages type merlon) ;
- les types de sol considérés dans les zones de substitution des obstacles effacés.

Pour mémoire, les retours d'expérience sur les valeurs d'angle de la ligne d'énergie (annexe 3) ne distinguent pas spécifiquement les contextes avec ou sans obstacle ou différentes configurations d'occupation du sol (même si des développements sont en cours sur le rôle de la forêt notamment).

3.7 Probabilité d'atteinte

L'atteinte de phénomène en tout point du territoire (probabilité d'atteinte P_a) est dépendante de la probabilité de départ (P_d) et de la probabilité de propagation (P_p) suivant la relation :

$$\text{Prob. d'atteinte} = \text{Prob. de départ} * \text{Prob. de propagation} \quad (P_a = P_d \times P_p)$$

Sur ce principe, la MEZAP propose de qualifier la probabilité d'atteinte à partir de la matrice croisant probabilité de propagation et probabilité de départ (qualifiée par l'indice d'activité). Cette matrice prend en compte les recommandations du JTC-1 en matière de relation entre qualification et quantification du risque (cf. § 1.2.4, illustration 6).

illustration 23 – Définition de la probabilité d'atteinte de l'aléa de référence en un point (en rouge les probabilités associées à la qualification de l'activité et de la propagation)

		Probabilité de propagation					
		Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte	Extrêmement forte
Probabilité de départ (Indice d'activité)	Faible (1 / 100 ans)	10^{-2}	Très faible	Très faible	Faible	Moyenne	Forte
	Moyen (1 / 10 ans)	10^{-1}	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	Fort (1 / an)	1	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte

La mise en perspective de valeurs de probabilité en regard des classes qualifiées permet de rationaliser et d'objectiver l'approche.

Il est important de préciser qu'il y a des zones indemnes de probabilité d'atteinte résultantes soit d'une absence de zone de départ, soit d'un éloignement suffisant des zones de départ. Dans ces deux cas l'expert qualifiera l'atteinte comme nulle ou très faible.

Remarque : notion de fréquence des évènements

Dans les cas où les versants responsables de l'aléa rocheux ont une très forte activité, la répétition fréquente des phénomènes permet de réaliser des approches statistiques suffisantes dans la mesure où les données sont ou peuvent être collectées.

Ces approches tendraient à produire une analyse quantifiée de l'aléa en intégrant la fréquence des évènements selon des distributions de volumes. Dans ces conditions, l'aléa pourrait être appréhendé à partir du nombre moyen d'évènements par unité de temps (le siècle) et de longueur de falaise (hm par exemple) (comme préconisé par le JTC-1). Cette fréquence peut alors être représentée simplement à partir du nombre de blocs relativement récents observables sur le terrain depuis un point particulier (ou du nombre de cicatrices visibles en falaises). Dans l'optique du PPR ou d'un PAC, la fréquence d'atteinte d'un bâtiment pourrait être plus parlante (nombre de bloc par an, ou pour 100 ans, et par unité de longueur exposée). À titre d'exemple, en retenant une fréquence d'atteinte critique de l'ordre de 10^{-6} blocs par an et longueur exposée de 10 m (correspondant à un bâtiment courant), cela correspond à une « période de retour » de 100 ans sur 1 km de longueur de falaise par exemple, étant entendu que les blocs atteignent l'enjeu).

Cette notion de fréquence est d'autant plus importante à considérer en cas de départs multiples atteignant des mêmes points du territoire. Dans ces conditions, la probabilité d'atteinte résultante devrait théoriquement être évaluée à partir des probabilités d'atteinte élémentaires des phénomènes ($Pa(A)$ et $Pa(B)$) sur la base du théorème des probabilités totales :

$$Pa(A \cup B) = Pa(A) + Pa(B) - Pa(A \cap B)$$

avec $Pa(A \cap B) = Pa(A) \times Pa(B)$ puisque $Pa(A)$ et $Pa(B)$ sont indépendantes.

La généralisation de cette approche peut se traduire comme suit à partir de la formule d'inclusion-exclusion à n termes pour n zones de départ :

$$P \left| \bigcup_{i=1}^n A_i \right| = \sum_{k=1}^n (-1)^{k-1} \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n} P |A_{i_1} \cap A_{i_2} \cap \dots \cap A_{i_k}|$$

3.8 Qualification du niveau d'aléa

La MEZAP qualifie le niveau d'aléa en tout point de la zone d'étude en utilisant la matrice suivante :

illustration 24 – Définition du niveau de l'aléa de référence par zone homogène

		Indice d'intensité				
		$V \leq 0.05 \text{ m}^3$	$0.05 < V \leq 0.25 \text{ m}^3$	$0.25 < V \leq 1 \text{ m}^3$	$1 < V \leq 10 \text{ m}^3$	$V > 10 \text{ m}^3$
		Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort
Probabilité d'atteinte	Très faible 10^{-6}	Nul à négligeable	Nul à négligeable	Nul à négligeable	Nul à négligeable	Nul à négligeable
	Faible 10^{-5}	Faible	Faible	Moyen	Fort	Fort
	Moyenne 10^{-4}	Faible	Faible	Moyen	Fort	Fort
	Elevée 10^{-3}	Faible	Moyen	Fort	Fort	Très fort
	Très élevée	Moyen	Fort	Fort	Très fort	Très fort

Pour rappel, la qualification de l'aléa intègre une référence au bâti standard. De ce fait la MEZAP s'intéresse à la vulnérabilité du bâtiment (et des personnes dans le bâtiment) et non des personnes en dehors des bâtiments.

L'application de cette matrice peut se faire de manière automatique par l'usage des outils SIG. La carte résultante est un document de travail qui sera validée après dialogue avec le MOA.

Le prestataire doit réaliser :

- une analyse critique du résultat au regard de sa connaissance du terrain ;
- les corrections qu'il juge nécessaire en argumentant celles-ci.

4 Contenu de l'offre, restitution et livrables

La MEZAP présentée en détail ci-avant décrit les étapes de production de la carte d'aléa rocheux dans le cadre de PPRn, à l'échelle du 1 : 10 000° ou d'un PAC. Ce chapitre décrit les éléments nécessaires à évaluer dans le cadre de l'offre du prestataire et précise les livrables attendus.

Il est essentiel de retenir que l'ensemble des recommandations faites précédemment ont pour vocation majeure de faciliter les **démarches de transparence et de traçabilité dans l'évaluation des aléas**. Cet objectif facilitera de fait la compréhension et l'analyse critique de l'étude et renforcera de fait sa crédibilité, voire sa validité.

À ces égards il est demandé au prestataire de faire acte de ces principes dans la présentation de ses travaux que ce soit au niveau de sa proposition ou de la restitution des résultats. Doivent notamment être décrites : les données collectées, des interprétations formulées, les outils utilisés.

4.1 Offre : éléments de contenu

Lors de la consultation, le MOA doit lister l'ensemble des données disponibles et accessibles jugées nécessaires à l'établissement de l'offre. Il s'agit en particulier des études existantes (zonages existants, carte d'aléas y compris à une échelle plus petite, mise en sécurité), des données de topographie et des données relatives à l'occupation du sol. L'identification de besoins réalisée à partir d'une pré-analyse de risque (§ 3.1.3) sera décrite au cahier des charges avec l'assistance d'une AMO le cas échéant.

Sur la base de cette identification de besoins, le MOA demandera au prestataire une description technique du dimensionnement de son intervention en temps et moyens mis en œuvre pour atteindre l'objectif de cartographie visé. Le cahier des charges précisera en particulier la définition des zones sur lesquelles des analyses détaillées sont attendues (départ et/ou propagation).

Les éléments à demander au prestataire sont en particulier :

- les moyens mis en œuvre pour apprécier :
 - la délimitation des zones de départ homogènes et leur qualification en terme d'activité/intensité ;
 - les probabilités de propagation selon les contextes (analyse statistique sur échantillon d'événement, trajectographie, modèle empirique type ligne d'énergie, ...) ;
- les moyens déployés pour l'approfondissement des diagnostics (inspection sur cordes notamment, inventaire exhaustif dans les pentes, ...) ;
- le nombre de jours de terrain qu'il prévoit de réaliser ;
- les qualifications des personnels affectés au projet dont notamment celles présentes sur le terrain ;
- le calendrier prévisionnel d'intervention sur site afin, au besoin, de permettre au MOA et/ou à son AMO d'être présent lors des visites.

4.2 Livrables

Suite à ses investigations, le prestataire doit d'une part apporter les éléments nécessaires au choix du (des) scénario(s) de référence puis d'autre part proposer une cartographie de l'aléa rocheux à l'échelle du 1:10 000° en explicitant clairement les zones où il estime ne pas avoir atteint la précision nécessaire pour des raisons qui devront être justifiées.

Ces éléments sont à traduire de manière cartographique. Ces documents doivent être accompagnés de photographies et de tableaux récapitulatifs précisant l'origine de l'information (témoignage, rapport, levé de terrain) et leur pertinence (notamment pour les témoignages).

Outre le rapport de synthèse précisant les outils et moyens mise en œuvre, il est attendu en restitution au moins :

- carte informative des phénomènes regroupant :
 - les informations historiques (bibliographie), les informations issues des interviews validées par le prestataire, des prospections et levés de terrains, inventaire des événements dont les blocs éboulés ;
 - les éléments morphologiques prédisposant à l'apparition de phénomènes rocheux (talus, falaises, escarpements) et guidant la propagation (talwegs, couloirs d'éboulis, etc.) ;
 - les éléments, minorants ou aggravants, régissant l'aléa de propagation, évalués à partir des observations de terrain (nature des sols, occupation des sols – couvert forestier, terrasse agricole, route, forte pente, etc.) ;
 - les zones reconnues sur le terrain (parcours, points d'arrêt).
- une base de données des événements répertoriés permettant le déversement vers la base de données nationale sur les mouvements de terrain. L'annexe 4 précise le format, la structuration et les champs descriptifs de la base de données attendue.
(<https://www.georisques.gouv.fr/risques/mouvements-de-terrain>).
- carte des zones homogènes de départ en précisant pour chaque zone :
 - le(les) scénario(s) de référence retenu(s) ;
 - l'intensité de l'aléa de référence ;
 - l'indice d'activité de l'aléa de référence.
- carte des probabilités de propagation avec référence par zone homogène à des valeurs d'angle de ligne d'énergie correspondants.
- carte des atteintes intégrant départ et propagation.
- carte d'aléa rocheux prenant en compte l'intensité de phénomène.

La carte des aléas définitifs est issue de l'analyse du résultat automatisé de l'application de la matrice de définition de l'aléa et est finalement lissée et ponctuellement « corrigée » d'éventuelles incohérences induites par des notions d'échelles notamment. Ces « corrections » sont à justifier.

L'ensemble des cartes doit illustrer de manière claire les observations, sous format SIG compatible avec les outils du MOA. Les tables attributaires des couches SIG seront décrites. L'ensemble des cartes de travail permettant d'aboutir à la carte des aléas sera exposé en annexe du rapport de présentation.

En complément, il est recommandé que le recueil photographique soit géo-localisé (des prises de vue sur la carte de parcours terrain par exemple). Ces photographies illustreront et justifieront les choix finaux du prestataire en terme de volume des blocs au départ, volume des blocs à l'arrivée, nature des affleurements à l'origine de blocs, nature des zones de propagation (valeur d'angle de ligne d'énergie). À cet égard il apparaît essentiel d'avoir i) une échelle de référence sur toutes les photographies (blocs isolés) et ii) une localisation de toutes les photographies (en indiquant la précision de cette localisation, type +/- 5 m en plan pour rester cohérent avec l'échelle de restitution).

5 Glossaire et liste des acronymes

5.1 Glossaire

Les définitions rappelées ici sont pour partie issues du glossaire défini dans le cadre du PN C2ROP :

Activité : probabilité de départ sur une période de référence de 100 ans. Elle est qualifiée par un indice d'activité à l'échelle d'une zone de départ homogène spatialement définie.

Aléa de départ : phénomène incertain (départ d'un compartiment rocheux) caractérisé en termes de géométries, géologie, mécanisme, facteurs déclenchants possibles et probabilité de départ en fonction de la période de référence (ou fréquence temporelle pour un aléa de départ diffus).

Aléa (de départ) diffus : phénomène incertain pouvant se produire en tout point d'une zone géographique homogène.

Aléa de départ localisé (ou ponctuel) : phénomène incertain concernant un compartiment rocheux localisé. Peut concerner soit un compartiment susceptible de se détacher d'une paroi, soit un bloc ou une série de blocs déposés sur une pente et susceptibles d'être remobilisés.

Aléa de propagation : phénomène incertain (propagation de l'élément rocheux) caractérisé par la spatialisation des trajectoires possibles de l'élément rocheux s'il se détache : probabilité de propagation, hauteur de passage, volume, énergie, point d'arrêt. *L'aléa de propagation peut être déterminé par des méthodes de type trajectographie (modélisation des trajectoires de blocs en 2D ou 3D) ou empiriques (par exemple sur le principe de la ligne d'énergie). Lorsque l'éboulement est avec interactions entre blocs, des méthodes spécifiques doivent être engagées : modélisation de type couches minces par exemple ou méthode de la ligne d'énergie (les gammes de valeurs d'angle sont dans ce cas inférieures à celles retenues pour des chutes de blocs isolés). L'aléa de propagation est associé à une zone de départ identifié ; dans le cas d'un enjeu menacé par plusieurs sources distinctes, il convient généralement de définir un aléa de propagation pour chacune d'elles.*

Aléa de recul : phénomène incertain se produisant en amont d'une zone de départ. Qualifié par une distance de recul.

Aléa de référence : phénomène rocheux incertain d'occurrence et d'intensité données servant de référence pour définir la réglementation d'un PPRn.

Aléa résultant : phénomène incertain pouvant causer des dommages, résultant d'un aléa de départ et d'un aléa de propagation, caractérisé par la probabilité qu'un emplacement soit atteint par un élément rocheux avec une certaine intensité dans un délai donné, qui est en principe la période de référence (ou par la fréquence d'atteinte de cet emplacement pour un aléa diffus). *En un point donné, l'aléa résultant doit tenir compte de toutes les zones de départ qui le dominent.*

Aléa rocheux : l'aléa est la manifestation d'un phénomène ou d'un événement naturel (inondation, mouvement de terrain, séisme, avalanche, ...) ou anthropique d'occurrence et d'intensité données. L'aléa rocheux est la manifestation d'un événement de chute de bloc rocheux.

Atteinte d'un phénomène : l'atteinte est définie comme l'occurrence d'un phénomène en un point du territoire. Elle couple l'aléa de départ et l'aléa de propagation. Elle est caractérisée comme une probabilité exprimée de façon qualitative ou quantitative. Croisée à l'intensité de phénomène, elle exprime l'aléa résultant.

Intensité : grandeur physique caractérisant le pouvoir destructeur d'un aléa (sur un enjeu de référence de vulnérabilité donnée). L'énergie cinétique apparaît souvent comme le paramètre le plus pertinent pour représenter physiquement l'intensité. Le volume peut également être utilisé. *De façon qualitative, l'intensité peut être évaluée en fonction de l'importance et de l'ordre de grandeur des coûts des mesures qu'il pourrait être nécessaire de mettre en œuvre pour s'en prémunir.*

Occurrence : probabilité qu'un évènement survienne.

Période de référence : durée pour laquelle les aléas sont évalués. Une période de référence de X années signifie que la probabilité d'atteinte des enjeux par les instabilités est évaluée pour les X prochaines années.

Probabilité de départ : probabilité qu'un compartiment rocheux défini se détache dans la période de référence exprimée de manière quantitative (entre 0 et 1) ou qualitatives (faible, moyenne, forte, etc.).

Probabilité de propagation : probabilité caractérisant la spatialisation des passages possibles d'un élément rocheux qui se propage dans une pente (voir aléa de propagation). La probabilité de propagation est indépendante du temps. Elle est exprimée de manière quantitative (entre 0 et 1) ou qualitative (faible, moyenne, forte, etc.).

Scénario de référence : phénomène ou évènement retenu pour qualifier l'aléa de référence.

5.2 Liste des acronymes utilisés

Les acronymes utilisés dans le texte sont rappelés ci-après :

AMO : Assistance à maîtrise d'ouvrage

MOA : Maître d'ouvrage (ou maîtrise d'ouvrage)

BRGM : Bureau de recherche géologiques et minières

Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

DDTM : Direction départementale des territoires et de la mer

DGPR : Direction générale de la prévention des risques

IFSTTAR : Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

INERIS : Institut national de l'environnement industriel et des risques

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

LCPC : Laboratoire central des ponts et chaussées

MTE : Ministère de la Transition écologique

ONF-RTM : Office national des forêts – Restauration des terrains en montagne

PAC : Porté à connaissance

PPR(n) : Plan de de prévention des risques (naturels)

SIG : Système d'information géographique

6 Bibliographie

Productions techniques institutionnelles

- Besson, L., Durville, J.-L., Garry, G., Grasz, E., Hubert, T., & Toulemon, M. (1999). Plans de prévention des risques naturels (PPR). Risques de mouvements de terrain. Guide méthodologique. La Documentation française. <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/66935>
- C2ROP. (2020). *Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux - État de l'art*. Cerema. <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/caracterisation-alea-eboulement-rocheux-etat-art>
- Cemagref & Arpa Piemonte. (2008). *Projet n° 165 PROVIALP protection de la viabilité alpine. Rapport final*. Alpes Latines Coopération Transfrontalière France-Italie. <https://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/pubblicazioni-anno-2008/volumeprovialpbassa.pdf>
- Cherkaoui, A., & Herbaux, M. (2018). *Aléa versant rocheux sous-cavé. Caractérisation et évaluation*. INERIS-CEREMA. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Guide_VSC_A4_V15_web.pdf
- Collectif. (2020). *Glossaire du risque rocheux*. CEREMA. <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1246839.pdf>
- Effendiantz, L., Guillemin, P., Rochet, L., Pauly, J.-C., & Payany, M. (2004). *Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux. Guide technique*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. https://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/GuideTechnique/GuideTechnique-LCPC-ALEABOUL.pdf
- Egli, T. (2005). *Recommandations. Protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels*. Association des établissements cantonaux d'assurance incendie. https://www.vkg.ch/media/1578/wegleitung_objektschutz_gegen_gravitative_naturgefahren_f_vo-1.pdf
- Garry, G., Grasz, E., & Dupuy, J. L. (1997). *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) : Guide général*. La Documentation française. <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/72230/plans-de-prevention-des-risques-naturels-previsibles-ppr-guide-general#>
- Lopez-Saez, J., & Corona, C. (2014). *La dendrogéomorphologie. Principes Méthodes Applications*. IRSTEA. https://www.researchgate.net/publication/282005198_La_dendrogéomorphologie_Principes_Methodes_Applications
- Loup, B., & Raetz, H. (2016). *Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain*. Office fédéral de l'environnement. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dangers-naturels/publications-etudes/publications/protection-contre-les-dangers-dus-aux-mouvements-de-terrain.html>
- MTE. (2020). Note technique. *Recommandations pour la réalisation d'étude trajectographique de blocs pour la détermination de l'aléa rocheux et le dimensionnement fonctionnel de parade passive*. Cerema - RTM.

Productions académiques

- Bost, M. (2019). *Endommagement des murs de bâtiments en béton armé soumis à impacts de blocs rocheux - étude quantitative*. IFSTTAR. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02448673/>
- Bost, M., Limam, A., Joffrin, P., & Pruvost, C. (2018). *Failure mechanisms within unreinforced concrete wall under rockfall impact loading*. RSS 2018, 4th International Symposium Rock Slope Stability. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02446052>
- Corominas, J., & Mavrouli, O.-C. (2013). *Estimation quantitative du risque (QRA) pour les bâtiments liés aux éboulements rocheux : progrès et défis*. Société vaudoise des Sciences naturelles.
- Dorren, L.-K.-A., Berger, F., & Putters, U.-S. (2006). *Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes*. Natural Hazards and Earth System Sciences. <https://nhess.copernicus.org/articles/6/145/2006/nhess-6-145-2006.pdf>
- Evans, S. G. and Hungr, O (1993). *The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes*, Can. Geotech. J., 30, 620–636.
- Farvacque, M. (2020). *Évaluation quantitative du risque rocheux : de la formalisation à l'application sur les linéaires et les zones urbanisées (Thèse)*. Université Grenoble Alpes. <http://www.theses.fr/2020GRALU001>
- Heim, A. (1932). *Bergsturz und Menschenleben*. Fretz und Wasmuth, Zurich, 218 pp.
- Jaboyedoff, M., & Labiouse, V. (2011). Technical Note : Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(3), 819828. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-819-2011>
- Lied, K. (1977). *Rockfall problems in Norway*, in: *Rockfall dynamics and protective work effectiveness*, ISMES, Bergamo, 90, 51–53.
- Loye, A., Jaboyedoff, M., & Pedrazzini, A. (2009). Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(5), 16431653. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1643-2009>
- Mavrouli, O., & Corominas, J. (2010). Rockfall vulnerability assessment for reinforced concrete buildings. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(10), 20552066. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-2055-2010>
- Quarteroni, A. (2017). *Modélisation statistique pour l'aide à la cartographie de l'aléa chute de blocs : Influence de la topographie du versant et du couvert forestier (Mémoire)*. Nancy [France] : AgroParisTech. https://infodoc.agroparistech.fr/index.php?lvl=notice_display&id=193533
- Savage, W. Z., Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., & Leroi, E. (2008). *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*. Engineering Geology, 8598. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>

7 Annexes

ANNEXE ① : Notion de précision, de résolution et d'échelle de travail

ANNEXE ② : Intensité des phénomènes

ANNEXE ③ : Ligne d'énergie

ANNEXE ④ : Format, structuration et champs descriptifs de la base de données événementielle

ANNEXE ①

Notion de précision, de résolution et d'échelle de travail

L'ensemble des travaux d'analyse (relevés de terrain, étude historique, recueil de témoignage, analyse photogrammétrique, simulations, ...) a pour objectif la production de la carte d'aléa qui sera utilisée pour l'aide à la réalisation de la carte de risque et du zonage réglementaire.

Les données topographiques, et plus particulièrement le fond topographique, sont une des informations les plus importantes dans la démarche d'analyse de l'expert. En effet, ces données lui sont nécessaires entre autres pour les travaux de simulations et pour la restitution cartographique des résultats de ses analyses.

Il est très important de ne pas confondre les différentes notions associées à une carte, à savoir :

- son échelle ;
- sa résolution ;
- sa précision.

L'échelle d'une carte est le coefficient réducteur de représentation d'une mesure planimétrique réelle sur un document cartographique. Elle s'exprime sous la forme d'une fraction : dimension apparente sur la carte/dimension réelle sur le terrain. Ainsi au 1 :25000°, 1 cm mesuré sur une carte représente une distance planimétrique réelle de 25 000 cm soit 250 m. Il est important de rappeler que le terme « grande » échelle correspond à une valeur de ratio supérieur à celui d'une « petite » échelle. Ainsi un document au 1 :1000° sera qualifié de grande échelle par rapport à un document au 1 :25 000°.

La précision est un terme ambigu qui peut définir aussi bien la plus petite distance lisible sur une carte (notion d'exhaustivité de la représentation cartographique) que l'erreur de mesure associée aux données cartographiées (notion de précision géométrique : écart entre la valeur réelle sur le terrain et le report de position sur une carte). Il est couramment admis que la plus petite longueur discernable à l'œil nu est de l'ordre de 0,4 mm. Ainsi sur une carte au 1 :25000°, une longueur de 0,4 mm équivaut à une longueur de 10 m. Par conséquent, la précision d'une carte au 1 :25000° est de 10 m en réalité. En d'autres termes, tout élément sur le terrain qui aura une dimension inférieure à 10 x 10 m, ne peut être représenté fidèlement sur une carte de cette échelle. À titre d'exemple, seul l'axe médian des chemins et routes est correctement positionné sur une carte au 1 :25 000°, la largeur des traits utilisés sur la carte ne correspondant nullement à la largeur réelle de la voirie (notion de précision sémantique : conformité de la représentation d'un objet ou d'une famille d'objet sur une carte par rapport à la réalité terrain).

La précision est aussi utilisée pour caractériser l'erreur associée à une donnée cartographiée : quant à sa localisation et/ou sa valeur. Le cas le plus illustratif est la précision des courbes de niveaux d'une carte. Au 1 :25 000° la précision en altimétrie d'une courbe de niveau est de 5 m en plaine et de 40 m en montagne (source descriptif BDALTI de l'IGN), et la précision en positionnement est de l'ordre de 10 m correspondant à l'épaisseur du trait.

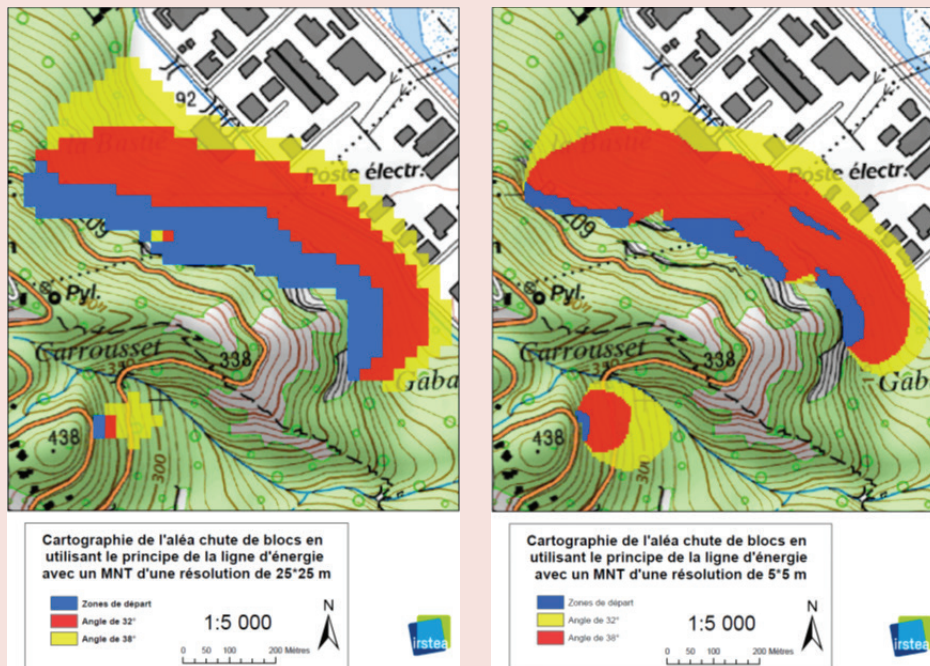
La résolution est un terme qui caractérise les distances planimétriques maximales (en abscisses et ordonnées) entre les points de mesure sur le terrain.

Là encore ce terme est ambigu, car il est aussi utilisé pour définir le niveau de représentation des détails d'une « image » et par association les distances séparant deux points contigus dans des données topographiques en format raster, aussi dénommé « pas ». Ainsi, bien souvent les modèles numériques de terrain sont des fichiers raster dont la résolution peut varier de 1×1 m à 50×50 m et plus. À partir d'un relevé de terrain à raison d'un point tous les mètres, il est possible de générer un MNT raster au pas de 1×1 m. S'il est possible, à partir de celui-ci, de construire un MNT au pas de 5×5 m avec une résolution de 5 m, le contraire est quant à lui impossible. En effet, à partir d'un relevé de terrain à raison d'un point tous les 5 m, il est possible de construire un MNT au pas de 5×5 m mais celui-ci ne peut être utilisé pour générer par interpolation un MNT au pas de 1×1 m avec une résolution de 1 m, ce MNT de 1×1 m aura une résolution réelle de 5 m et la même précision que celle du MNT ayant été utilisé pour le générer. Un document à haute résolution correspond à un faible pas : 1×1 m est une haute résolution par rapport à 5×5 m. Il est important de rappeler que la résolution d'un document n'est pas forcément égale à la précision de la donnée décrivant les objets.

Exemple des effets de la résolution d'un MNT sur la cartographie

L'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain au pas de 25 m, n'implique pas forcément une échelle de rendu compatible avec le 1:10 000°. Il y a une différence entre résolution et précision. En effet, dans ce cas de figure, la délimitation de zones implique une extrapolation entre deux points distant de 25 m (MNT de l'IGN), qui ne donne pas forcément la précision d'un plan au 1:10 000°. La précision d'un plan au 1:10 000° peut requérir un point réellement mesuré et non extrapolé, tous les cinq mètres voire tous les mètres.

Les cartes ci-dessous illustrent ce point : les résultats obtenus avec la méthode de la ligne d'énergie pour deux résolutions de MNT mesuré et non extrapolé sont reportés sur une carte à la même échelle.



Il convient aussi de ne pas confondre échelle et résolution réelle avec le facteur d'agrandissement d'une carte. En aucun cas un plan au 1 :10 000^e avec la précision du 1 :10 000^e n'est obtenu en agrandissant de 2,5 fois une carte au 1 :25 000^e ! Par contre la réciproque est vraie.

Il est important de rappeler que la résolution finale d'une carte est égale à celle de la donnée ayant la plus faible résolution ou précision. Il est possible de croiser des informations ayant une résolution de 1 x 1 m et une précision métrique avec des informations ayant une résolution de 50 x 50 m et une précision décamétrique, mais la résolution et la précision de la carte finale issue de ce croisement sera de 50 x 50 m et décamétrique.

Par conséquent, il faut bien distinguer l'échelle et la précision du fond de plan sur lequel des résultats sont reportés, de la résolution et de la précision réelles des données ayant servies à obtenir ces résultats. Ce n'est pas parce qu'une expression cartographique des résultats sur un fond de plan à échelle du 1 :5 000^e ou du 1 :10 000^e est demandée que les relevés de terrain ont été réalisés à la résolution adéquate. Le tableau suivant donne les résolutions suffisantes et nécessaires pour produire les principales échelles cartographiques :

Résolution	Échelle
20 x 20 m	1 :50 000 ^e
10 x 10 m	1 :25 000 ^e
4 x 4 m	1 :10 000 ^e
2 x 2 m	1 :5 000 ^e
0,4 x 0,4 m	1 :1 000 ^e

Il existe un cas particulier qui est celui de l'utilisation de photographies aériennes (ortho-rectifiées ou non) à haute résolution pour reporter des relevés de terrain. Chacun des points observés sur le terrain peut alors faire l'objet d'une localisation très précise (25 cm près voire moins) sur une photographie aérienne, sur laquelle un fond de plan à une autre échelle (type courbes de niveau) peut être par la suite drapé ou non.

Dans le cadre de la réalisation d'un PPRn, la résolution des données ne peut être définie sans prendre en compte le coût et les délais d'acquisition de celles-ci. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre coût et délai d'acquisition des données, résolution des résultats et l'échelle support de leur représentation cartographique. Par conséquent, le tableau ci-dessus correspond à une situation idéale théorique. Dans la pratique l'adaptation du tableau précédent comme présenté ci-dessous peut être justifiée :

Échelle	Résolution
1 :100 000 ^e	100 x 100 m
1 :50 000 ^e	50 x 50 m
1 :25 000 ^e	25 x 25 m
1 :10 000 ^e	10 x 10 m
1 :5 000 ^e	5 x 5 m

En ce qui concerne la résolution des relevés de terrain, elle ne peut être définie sans tenir compte de l'hétérogénéité de la distribution spatiale des paramètres à relever. Pour ce faire, il est nécessaire de réaliser une première analyse à partir des documents disponibles qui permettra de définir des zones homogènes en termes de valeur de pente, d'orientation, conditions géologiques, d'occupation des sols, ... Cette première analyse servira à construire le plan d'échantillonnage sur le terrain.

Il est important de garder à l'esprit que dans le cas d'une étude de simulations trajectographiques en 2D, sur des profils en long, il existe deux résolutions. La première est celle associée à la résolution de chacun des profils et qui correspond à la plus grande distance séparant deux points consécutifs de relevés. Cette première résolution peut être qualifiée de résolution locale ou infra-profil. La deuxième correspond à la plus grande distance séparant deux profils en long consécutifs. Elle peut être qualifiée de résolution globale ou inter-profil. Ainsi, la première résolution est bien souvent de l'ordre de 10 m alors que la deuxième peut être de 100 m et plus. Cette deuxième résolution est celle qui va s'imposer à la carte finale.

ANNEXE 2

Intensité des phénomènes

Le potentiel de dommages peut être appréhendé de façon physique à partir notamment de l'énergie à l'impact engendrée par la chute d'un bloc isolé. Mavrouli *et al.* (2010) ont proposé des seuils critiques d'énergie à l'impact engendrant des pertes structurelles importantes telles que la rupture de poteaux isolés.

illustration 2.1 – Dommages structurels et niveaux d'énergie (Mavrouli et al. , 2010)

Niveau de dommages	Élément endommagé	E (kJ)
Pas de dommages	Colonne quelconque	< 14
Dommages non structurels	Mur non-porteur	
Dommages structurels locaux	Colonne centrale	14 - 28
Effondrement partiel de la structure	Colonne angulaire	14 - 28
Dommage généralisé	Plusieurs colonnes	> 28

En Suisse (Recommandations des établissements cantonaux d'assurance WG-6 ©2005 VKF/AEAI), une table indicative sur les dommages engendrés par diverses classes d'énergie de translation de bloc est proposée de la même manière.

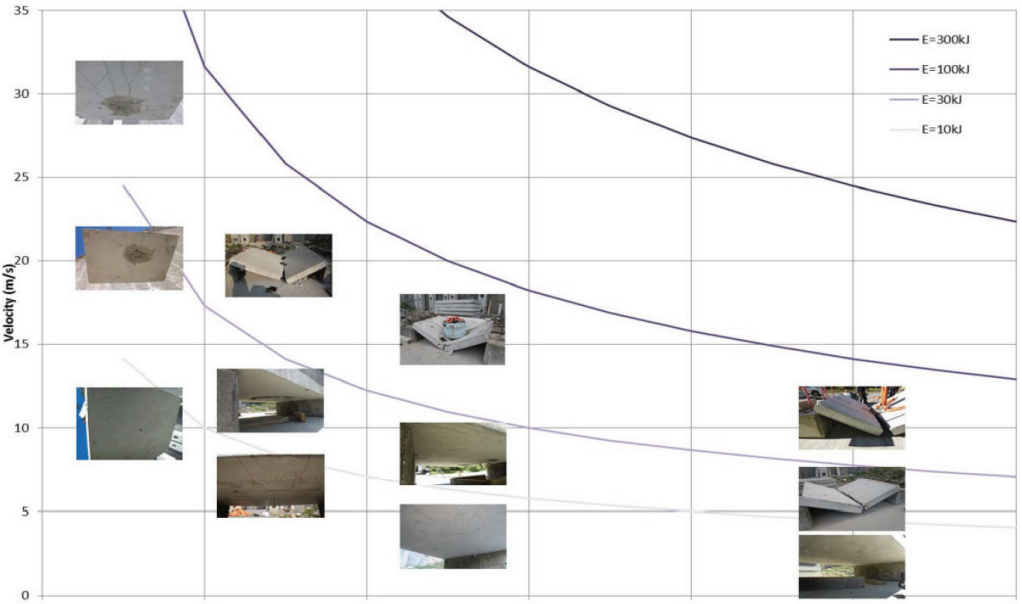
illustration 2.2 – Dommages aux structures et niveaux d'énergie (Egli T. VKF-AEAI, 2005)

Énergie cinétique de translation	Vitesse maximale (m/s) en fonction du volume unitaire de propagation (masse volumique de 2,5)			Potentiel de destruction	Capacité d'absorption énergétique d'ouvrage de retenue
	0,25 m³	1 m³	10 m³		
De 0 à 10 Kj	5,77	2,89	0,91	Destruction de parois en éléments de bois	Rondins en sapin avec supports en acier
De 10 à 30 Kj	10,00	5,00	1,58	Destruction de parois en rondins de sapin	Bois de chêne avec supports acier Treillages métalliques à simple torsion
De 30 à 100 Kj	18,26	9,13	2,89	Destruction de parois en béton armé épaisse de 0,2 à 0,3 m	Filets simples en câbles acier
De 100 à 300 Kj	31,62	15,81	5,00	Destruction de parois en béton armé épaisse de 0,4 à 0,5 m	Filets perfectionnés en câbles acier
De 300 à 1 000 Kj	57,74	28,87	9,13	Destruction de parois en béton armé épaisse de plus de 0,5 m	Filets en anneaux d'acier avec éléments de freinage
De 1 000 à 3 000 Kj	100,00	50,00	15,81		Filets spéciaux en anneaux d'acier
Au delà de 3 000 Kj	> 100,00	> 50,00	> 15,81		Digue en sol meuble

Ces approches montrent que le seuil énergétique de l'ordre de 30 kJ (cercle en rouge sur les deux tableaux ci-avant) constitue une limite inférieure pouvant occasionner des dommages structuraux sévères. À titre indicatif, la chute de sa hauteur d'un bloc de 1 m³ (cas d'une forme cubique) engendre une énergie de l'ordre 27 kJ et un bloc de 1,05 m³ de l'ordre de 32 kJ.

Entre 2014 et 2017, l'IFSTTAR (aujourd'hui Université G. Eiffel) a mené des campagnes d'essais pour évaluer la résistance de murs aux impacts rocheux. Il a été montré (Bost et al., 2018) qu'à partir de 30 kJ, un mur en béton banché est cassé. C'est à partir de 10 kJ qu'il est structuellement endommagé. Les résultats de ces travaux sont illustrés ci-dessous en précisant le mode de rupture (*punching* : poinçonnement ou *bending* : flexion).

illustration 2.3 – Dommages aux structures et niveaux d'énergie (Bost et al., 2018)



Le tableau suivant fournit des ordres de grandeur de niveau d'énergie en translation pour différents volumes (en nuancé les niveaux < 30 kJ).

illustration 2.4 – Ordres de grandeur de niveau d'énergie selon les géométries de bloc et de chute (d'après Egli T. VKF-AEA, 2005)

Energie de translation (kJ) (cas de masses cubiques)			Hauteur de chute libre hf (m)								
Masse (t)	Arête (m)	Volume (m ³)	Vitesse en translation (m/s)								
			2,5	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0
0,00	0,10	0,001	0,01	0,03	0,1	0,3	0,5	0,8	1	2	2
0,03	0,22	0,01	0,08	0,3	1	3	5	8	12	17	22
0,14	0,37	0,05	0,4	2	7	15	27	42	61	83	108
0,27	0,46	0,1	0,8	3	14	30	54	84	122	165	216
0,68	0,63	0,25	2	8	34	76	135	211	304	413	540
1,35	0,79	0,5	4	17	68	152	270	422	608	827	1080
2,70	1,00	1	8	34	135	304	540	844	1215	1654	2160
5,40	1,26	2	17	68	270	608	1080	1688	2430	3308	4320
13,50	1,71	5	42	169	675	1519	2700	4219	6075	8269	10800
27,00	2,15	10	84	338	1350	3038	5400	8438	12150	16538	21600

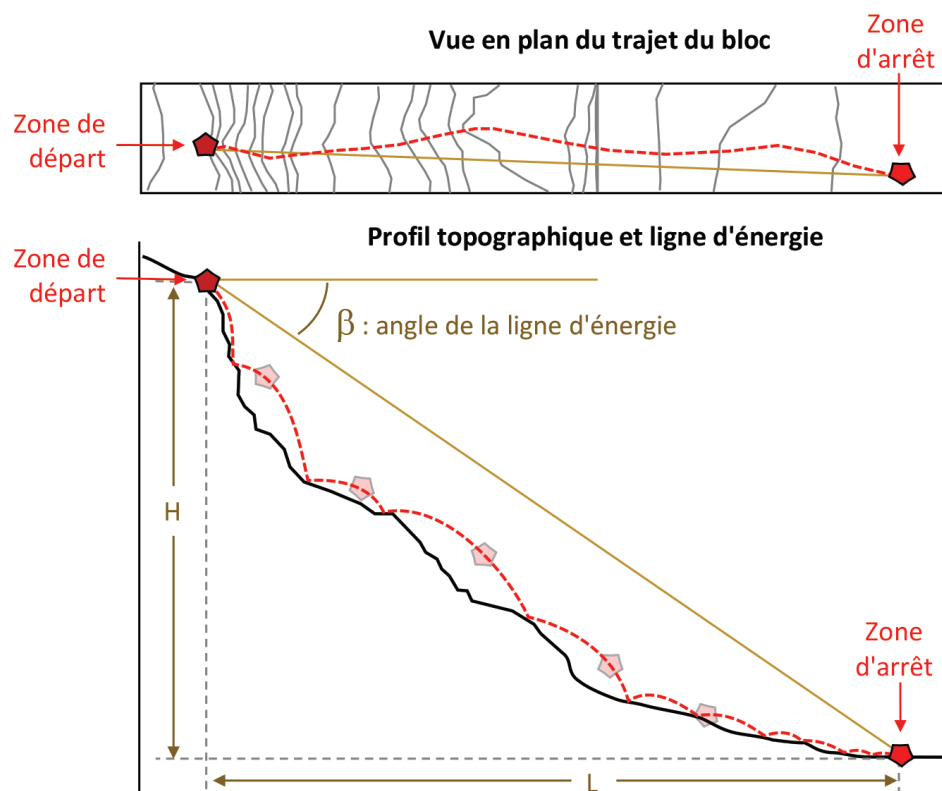
ANNEXE ③

Ligne d'énergie

La méthode développée par Heim A. en 1932 repose sur un principe simple et trivial qu'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. Le point d'intersection du relief avec une ligne imaginaire partant de la zone de départ et formant un angle β avec l'horizontal (illustration 3.1) fournit le point d'arrêt. Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β , l'angle de la ligne d'énergie.

Compte tenu de la possibilité de déviation des trajectoires des blocs que ce soit à cause de leur forme ou des obstacles rencontrés, ils 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.

illustration 3.1 – Principe de la ligne d'énergie (angle d'atteinte)



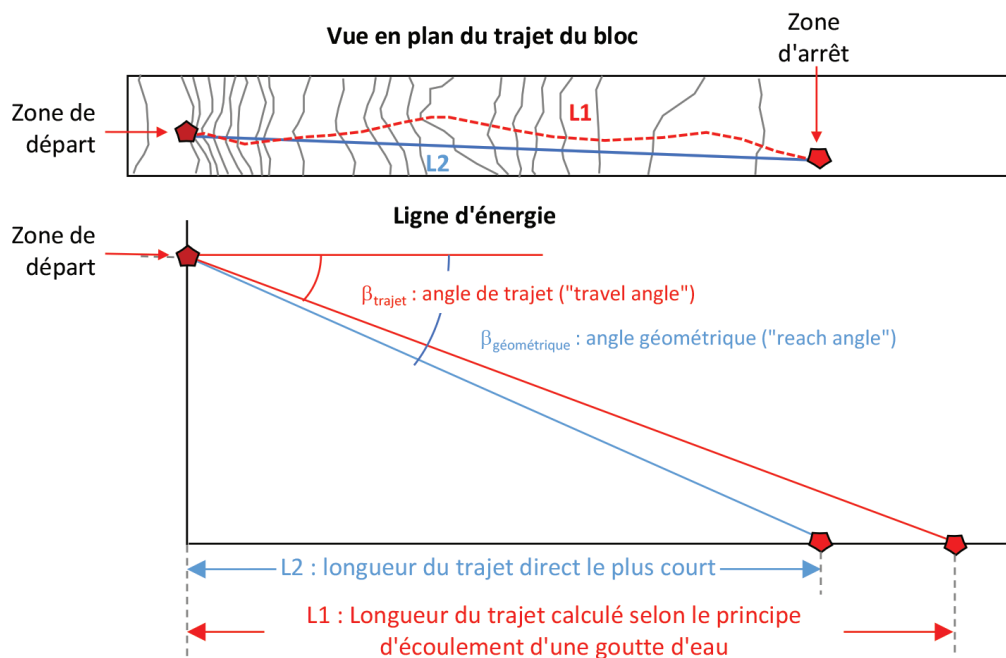
Depuis sa formalisation, ce principe a fait l'objet de nombreuses études. Différents auteurs se sont, entre autres, intéressés à l'adaptation de cette méthode en fonction de la localisation du point de départ et du type de profil en long à utiliser pour les calculs.

En ce qui concerne le choix d'implantation du profil en long, il existe deux grandes écoles de pensée :

- utilisation de la ligne de plus grande pente qui définit l'angle géométrique (aussi dénommé *reach angle*) ;
- utilisation du profil en long correspondant au trajet réel du bloc (qui peut s'appréhender par le principe d'écoulement d'une goutte d'eau) qui définit « l'angle de trajet » (*travel angle*).

L'illustration 3.2 présente ces deux concepts. Dans les deux cas le point d'arrêt et les dénivelés parcourus sont les mêmes mais les distances sont différentes. Sur ce principe, l'angle de trajet est plus faible que l'angle géométrique. La différence entre les deux angles est de l'ordre du degré mais dépend naturellement des contextes.

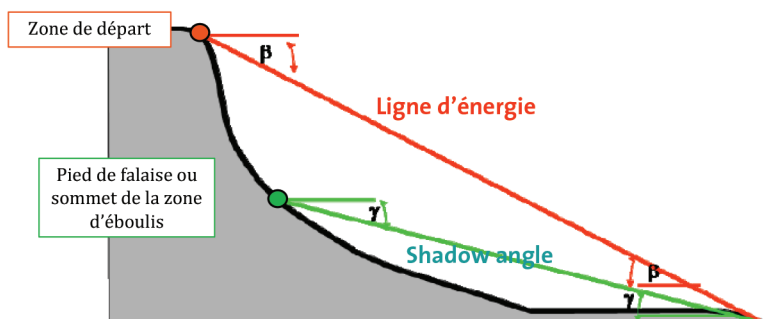
illustration 3.2 – Principe de calcul de la ligne d'énergie selon l'angle géométrique (reach angle) ou l'angle de trajet (travel angle)



En ce qui concerne le choix de la localisation du point de départ, des auteurs tels que Lied (1977), et Evans and Hungr (1993) proposent d'utiliser non le point sommital des falaises mais le pied de falaise ou le sommet du talus d'éboulis.

Ils ont ainsi élaboré le principe « d'angle d'ombrage » de l'anglais *Shadow angle* (illustration 3.3). La valeur de l'angle d'ombrage étant pour chacun de ces auteurs de respectivement de : 28° , 22° et $27,5^\circ$. L'utilisation du *shadow angle* nécessite de déterminer le sommet des « talus ». Une telle détermination n'est pas chose aisée à réaliser de façon automatique à partir de l'analyse d'un MNT et est d'autant plus compliquée que la précision du MNT est faible (effet de lissage des ruptures de pente). Cette approche peut être utilisée lorsque le profil de pente contient une rupture de pente nette engendrant une dissipation importante de l'énergie cinétique au premier impact.

illustration 3.3 – Principe de la ligne d'énergie selon Heim (1932) et principe du shadow angle selon Lied (1977)



Plusieurs auteurs ont travaillé sur la détermination de l'angle β de la ligne d'énergie selon le principe de Heim (1932). L'illustration 3.4 donne les valeurs observées :

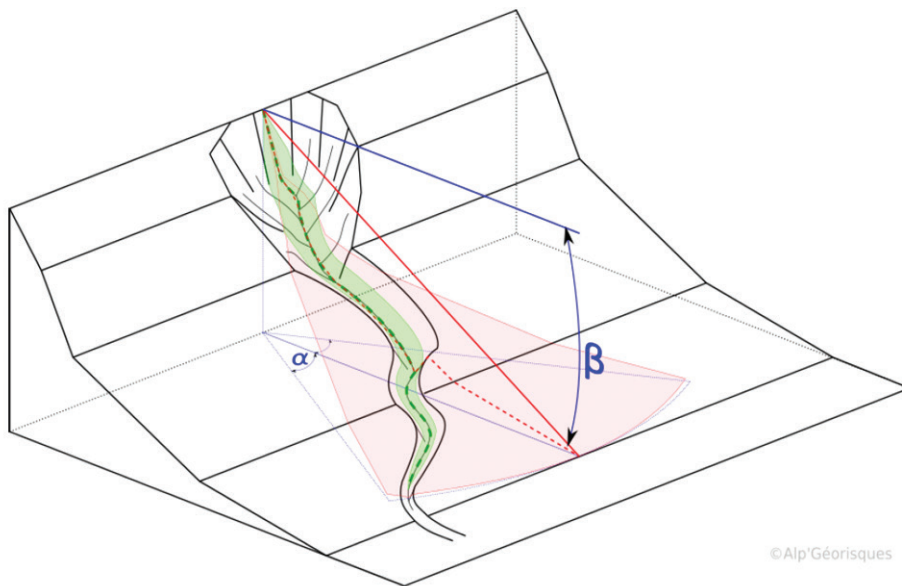
illustration 3.4 – Valeurs de l'angle d'énergie (géométrique) suivant différents auteurs (en blanc valeurs min. inférieures à 30°)

Auteurs	Angle géométrique	
	Min.	Max.
Shreve (1968)	26.6°	38.7°
Hsü (1975)	32.0°	32.0°
Onofri & Candian (1979)	28.8°	41.7°
Grunder (1984)	33.1°	34.4°
Moser (1986)	34.0°	43.0°
Domaas (1985 in Toppe 1987)	33.0°	33.0°
Mac ewen (1989)	31.0°	31.0°
Gerber (1994)	33.5°	38.0°
Meissl (1998)	29.5°	48.5°
Heinimann et al. (1998)	33.5°	38.0°
Focardi & Iotti (2001)	27.5°	30.0°
Ayala-carcedo et al. (2001)	29.1°	38.9°
Jaboyedoff & Labouise (2003)	33.0°	33.0°
Jaboyedoff & Labouise (2011)	32.6°	35.6°
Corominas et al. (2003)	27.6°	55.0°
Dorren & Berger (2005, 2006)	31.9°	38.0°
Copons et al. (2009) site a	36.9°	56.3°
Copons et al. (2009) site b	28.8°	42.0°
Hutter et al. (2005) modèle réduit	30.0°	37.0°
Scheidegger (1973)	29.7°	39.7°
Marquinez et al. (2002) cas 1	32.5°	40.9°
Marquinez et al. (2002) cas 2	29.4°	38.5°
Antoniou & Lekkas (2009)	35.0°	35.0°
Deparis et al. (2008)	31.6°	47.2°
Hyndman & Hyndman (2009)	33.0°	33.0°
Berger et al. (2009) sans forêt	27.7°	33.9°
Berger et al. (2009) avec forêt	31.3°	37.9°
BRGM (données MEZAP - 2758 valeurs)	25.0°	79.7°
RTM (données 2011-2013 - 192 cas)	24.7°	58.4°

L'application en 3D (méthode des cônes) de la méthode de la ligne d'énergie est réalisée en considérant que la propagation se réalise au sein d'un cône de sommet la zone de départ, de pente la valeur de la ligne d'énergie et d'ouverture un angle dit de « dispersion » variable entre 10° à 20° pour des versants réglés homogènes à près de 30° pour des topographies irrégulières.

Il convient de rappeler que l'application en 3D de la méthode de la ligne d'énergie a des limites d'utilisation et ce notamment lorsque la topographie locale du versant peut influencer fortement sur la propagation (illustration 3.5).

*illustration 3.5 – Exemple de cas pour lequel l'application de la méthode des cônes peut conduire à un zonage excessif (zone d'arrêt pertinente dans l'axe du chenal uniquement)
(en vert zone de propagation ; en rouge zone simulée par la méthode des cônes)*



A contrario, sur ce schéma si un bloc sort du talweg en sommet de pente il pourrait se propager plus loin en versant que s'il reste dans le talweg. En conséquence ces configurations spécifiques de chenalisation doivent faire l'objet d'une attention particulière dans la cartographie des propagations.

À partir de l'analyse de plusieurs milliers d'éboulements rocheux, le BRGM et l'INRAE ont bâti en 2016 (2 758 évènements analysés) et 2020 (3 446 évènements analysés) deux approches statistiques basées sur l'adimensionnement des profils topographiques (illustration 3.6) et le calcul des aires situées en-dessous et au-dessus du profil topographique : respectivement AED et AAD (illustration 3.7) permettant une estimation de l'angle de la ligne d'énergie dans différents contextes morphologiques.

illustration 3.6 – Création de profils adimensionnés

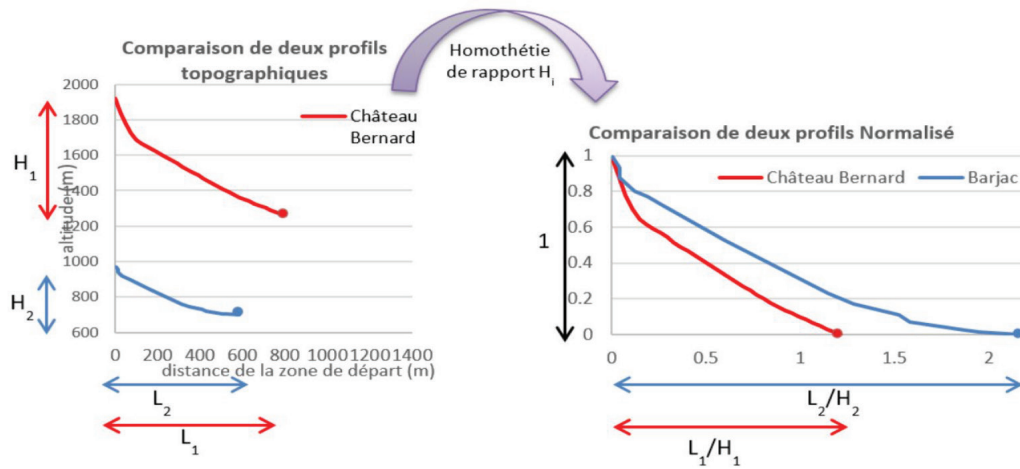
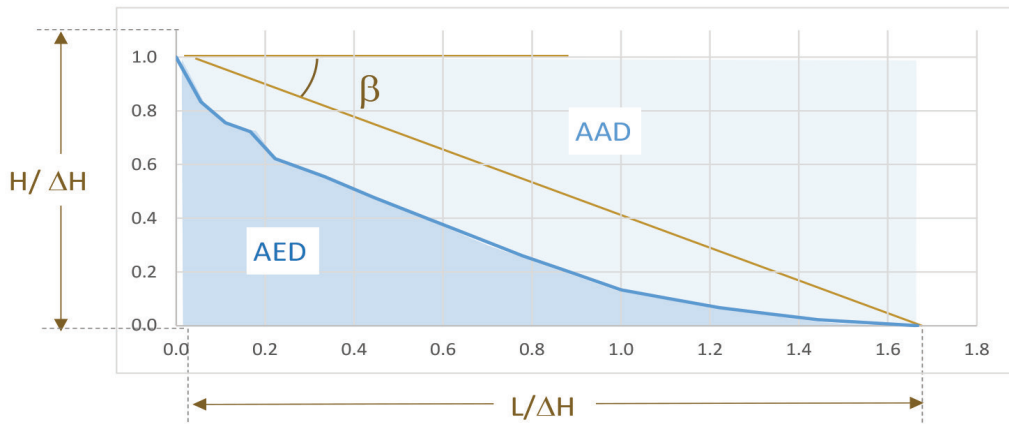


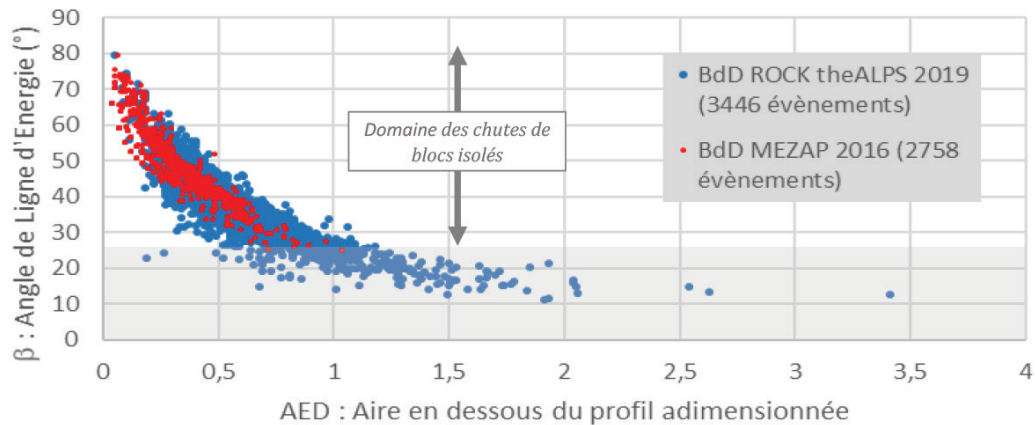
illustration 3.7 – Définition des aires en-dessous (AED) au-dessus (AAD) d'un profil adimensionné



La valorisation des données a conduit à proposer une relation entre la morphologie globale des profils de versants sièges d'éboulements rocheux (caractérisée par leur AED) et les valeurs d'angle de ligne d'énergie (angle géométrique) :

illustration 3.8 – Relation entre aires en dessous (AED) d'un profil adimensionné et angle de la ligne d'énergie pour des éboulements rocheux

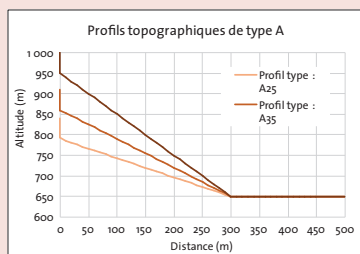
Distribution des points d'arrêt dans les bases de données : $\beta = f(\text{AED})$



Ces approches permettent de cadrer, dans des contextes donnés, des plages de valeurs plausibles de l'angle de la ligne d'énergie et donc de proposer par report cartographique des emprises de propagation attendues. Il est à noter que ce graphe intègre des éboulements en masse dont les valeurs d'angles sont potentiellement inférieures à 24 - 26°, tels qu'attendus pour des chutes de blocs isolés et des cas très particuliers telle qu'une chute d'une boule de granite en Lozère (AED = 1.67 ; $\beta=17^\circ$).

Afin de donner un ordre de grandeur des plages de valeurs de l'angle de ligne d'énergie attendues selon divers contextes morphologiques, cinq configurations topographiques types, caractéristiques des versants soumis à l'aléa rocheux, ont été retenues et testées suivant les approches évoquées.

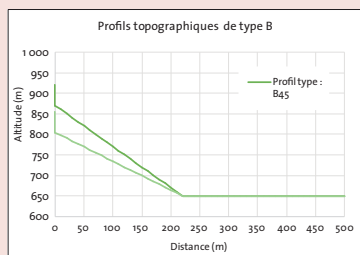
illustration 3.9 – Configurations topographiques types retenues pour évaluer les plages de valeurs plausibles de l'angle de ligne d'énergie



Type A

Profil de pente régulière en pied de zone de départ

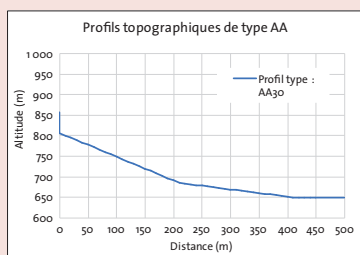
- hauteur de chute initiale comprise entre 0 et 50 m
- longueur planimétrique de la pente 300 m
- trois valeurs de pente analysées : 25° (A25), 35° (A35) et 45° (A45)



Type B

Profil de pente régulière en pied de zone de départ
avec replat marqué en fin de profil

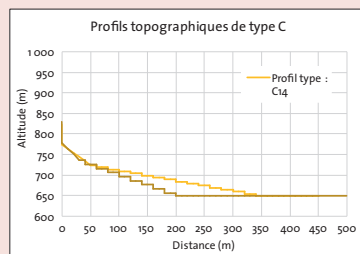
- hauteur de chute initiale comprise entre 0 et 50 m
- longueur planimétrique de la pente 220 m
- deux valeurs de pente analysées : 35° (B35) et 45° (B45).



Type AA

Profil de pente avec deux zones distinctes

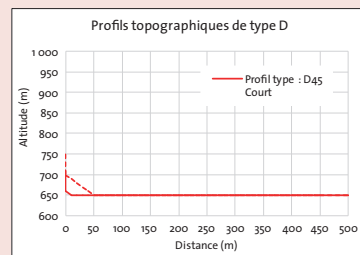
- hauteur de chute initiale comprise entre 0 et 50 m
- longueur planimétrique de la pente amont 210 m de pente 30°
- longueur planimétrique de la pente aval 200 m de pente 10°



Type C

Profil de pente irrégulière (terrasses agricoles...)
avec présence d'un glaciais en pied de la zone de départ

- hauteur de chute initiale comprise entre 0 et 50 m,
- longueur planimétrique du glaciais 50 m de pente 45° ET longueur planimétrique de la zone de pente irrégulière 290 m de pente moyenne 14,5° (C14)
- longueur planimétrique du glaciais 30 m de pente de 55° ET longueur planimétrique de la zone de pente irrégulière 170 m de pente moyenne 25,84° (C25)



Type D

Falaise avec présence d'un glaciais en pied de falaise

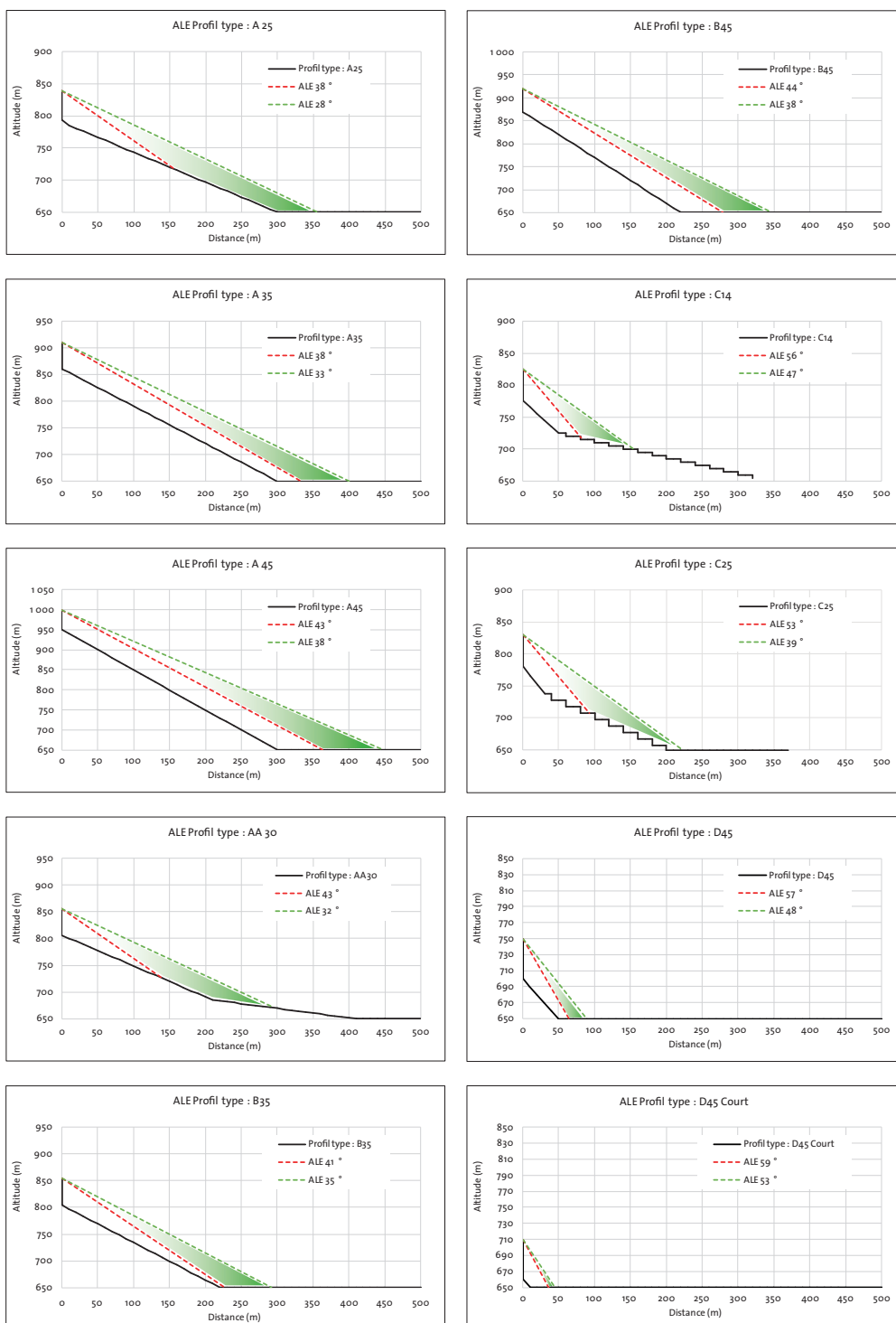
- hauteur de chute initiale comprise entre 0 et 50 m
- longueur planimétrique du glaciais 50 m de pente 45° (D 45)
- longueur planimétrique du glaciais 10 m de pente de 45° (D45 court)

illustration 3.10 – Bornes des plages de valeurs de l'angle de ligne d'énergie obtenus selon deux approches statistiques (INRAE / BRGM) pour différentes configurations topographiques types

Profil type	Intervalle d'angle de ligne d'énergie - Champ des possibles probables (synthèses de résultats INRAE-BRGM)	
	β inf. (°)	β sup. (°)
A 25	28	39
A 35	33	39
A 45	38	43
AA 30	32	43
B 35	35	41
B 45	38	44
C 14	47	56
C 25	40	53
D 45	48	58
D 45 court	53	59

L'illustration 3.11 présente ces résultats sous forme graphique. Il est évident que les cas testés sont très loin de représenter l'ensemble des contextes morphologiques rencontrés dans le cadre de la réalisation de cartes d'aléa rocheux. Néanmoins, ces graphes fournissent des informations pour orienter le prestataire dans son analyse. Des développements futurs, sur la base de ce type d'analyse statistique devraient permettre d'étoffer le catalogue de configurations voire de généraliser l'estimation des angles de ligne d'énergie probables selon les contextes rencontrés.

illustration 3.11 – Représentation graphique des emprises de propagation maximales probables pour les différentes configurations topographiques types retenues avec les résultats présentés illustration 3.9

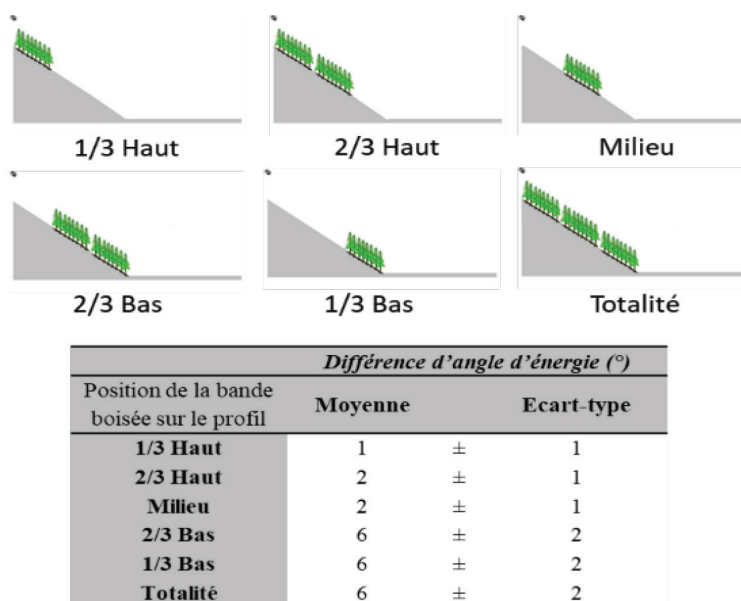


Pour mémoire le couvert forestier joue un rôle reconnu vis-à-vis de l'aléa rocheux. Lors d'expériences grandeur nature *in situ* réalisées en 2005 (Cemagref devenue depuis INRAE) sur une pente d'éboulis de 38°, avec un lâcher à 5 m de haut et une distance au départ de 40 m planimétrique dépourvue d'arbres, pour une forêt ayant 290 arbre/ha et une surface terrière de 22 m²/ha (surface cumulée de la section des arbres à 1,30 m/surface totale de la parcelle), 66 % des blocs (volume de 0,8 m³) est arrêtée après 185 mètres de course dans cette forêt alors que dans les mêmes conditions de pente mais en absence de toute végétation forestière seul 5 % des projectiles se sont arrêtés. Avec ces caractéristiques dendrométriques et de pente, la totalité des blocs serait arrêtée après une distance de parcours en forêt de 290 m.

Les analyses menées par INRAE (conduisent à une augmentation des valeurs d'angles de ligne d'énergie (qui conduit à une diminution des emprises de propagation) de l'ordre de 3 à 4° en moyenne dans l'hypothèse de prise en compte de la forêt comme protection.

En outre, une étude (Quarteroni, AgroParisTech-IRSTEA, 2017) a permis de conclure que la position d'une bande boisée sur un profil topographique a un impact de premier ordre sur l'angle de la ligne d'énergie alors que sa longueur a un impact de second ordre.

illustration 3.12 – Effet de la position de la bande boisée sur l'angle de ligne d'énergie (différence à la même configuration topographique en absence de toute végétation forestière)



Ces résultats peuvent être utiles pour juger de la représentativité de blocs témoins dans des contextes d'occupation variables au cours du temps.

ANNEXE 4

Format, structuration et champs descriptifs de la base de données événementielle

Contexte

« Une documentation fidèle des événements représente une base indispensable pour être en mesure de tirer des enseignements des événements passés » (Convention Alpine, 2006).

Lors de la réalisation d'un PPRn, la construction de la chronique des événements passés est une étape très importante car elle va permettre entre autre de justifier/valider les choix de l'expert : définition du scénario de référence, analyse critique de la carte d'aléa, ...

Faute d'une proposition de structuration adaptée, des données suffisantes et nécessaires pour décrire les événements passés, la capitalisation des informations collectées n'est pas optimisée. Si les sources des données ainsi que les principales informations (date, lieu, volume, dommage) sont présentées dans le texte du PPRn et les points d'arrêt font l'objet d'une représentation cartographique, (avec le cas échéant une information sur les volumes) les autres informations disponibles et/ou collectées sur site ne font pas l'objet au sein des services instructeurs d'une capitalisation avec pour objectifs d'accroître les bases de connaissances et l'optimisation des modèles de simulation.

L'objectif de cette annexe est de proposer une structuration des données relative à l'historicité des aléas rocheux sur le territoire de réalisation d'un PAC-PPRn afin de pouvoir :

- reconstruire le cas échéant la trajectoire des événements passés ;
- alimenter la base de données nationale sur les Mouvements de terrain (BDMvt).

La base BDMvt recense les mouvements de terrain répertoriés en France métropolitaine et dans les départements des Antilles de la Guyane et de La Réunion. Cette base nationale est gérée et développée depuis 1994 par le BRGM, avec le soutien du MET et en collaboration avec divers organismes (Cerema, ONF-RTM)

(<https://www.georisques.gouv.fr/donnees/bases-de-donnees/base-de-donnees-mouvements-de-terrain>).

Une des pistes d'évolution future de la BDMvt est l'intégration des profils trajectographiques et le calcul des métriques associées (notamment les valeurs d'angle de ligne d'énergie observées) afin d'enrichir la base de connaissance sur la propagation.

Proposition de structuration de la base de donnée événementielle pour un PPRn ou un PAC

La capitalisation des données historiques collectées dans les archives et/ou *in situ*, nécessite donc une formalisation adaptée pour garantir :

- un accès facile et rapide à ces informations ;
- leur utilisation pour accroître les connaissances.

Les données collectées peuvent permettre, dans le meilleur des cas, de reconstituer le trace de la trajectoire du projectile rocheux observé *in situ*. La source d'information (archive identifiée ou témoignage oral validé par l'expert par exemple) doit être clairement spécifiée.

Dans les faits, la nature des informations qui peuvent être collectées/acquises pendant l'étude d'aléa dépend de la typologie des phénomènes passés et des données effectivement disponibles. On peut distinguer quatre cas :

Type d'information	Description	Source de données
(T1)	Information sur un évènement sans localisation précise	Ce type d'information est en général issue de documents d'archives ou de témoignages
(T2)	Information sur un évènement avec la localisation unique du point d'arrêt (bloc témoin)	Cette information ponctuelle est en général issue des relevés de terrain mais peut également provenir de données d'archives ou de témoignages
(T3)	Information sur un évènement avec la localisation unique du point de départ (cicatrice)	Cette information ponctuelle est en général issue des relevés de terrain mais peut également provenir de données d'archives ou de témoignages
(T4)	Information sur un évènement avec localisation du point de départ et du(des) point(s) d'arrêt	Cette information est en général accessible pour des évènements ayant fait l'objet d'une expertise post-événementielle

Le type d'information à fournir est décrit dans le tableau ci-dessous. Ces données seront transmises par le prestataire en fin d'étude au commanditaire du PPRn/PAC, sous la forme d'un fichier Excel.

Proposition de fiche de synthèse pour décrire la donnée évènementielle

IDENTIFICATION

	Identifiant évènement
	Identifiant de bloc >> possibilité de saisir plusieurs blocs par évènement
	Point d'arrêt maximal (oui / non)
	Type d'information (T1 à T4)

SOURCE D'INFORMATION

	Nom de l'expert qui a recueillis/collectés les données
	Courriel expert / téléphone
	Date de recueil/collecte des données par l'expert
	Nature de la source de l'information
	Identifiant de la source
	Accès à la source

LOCALISATION

	INSEE de la commune
	Nom de la commune
	Précision de coordonnées
	Qualification de la zone de départ (estimée / observée)
	Coordonnées de la zone de départ
	Précision de coordonnées
	Coordonnées du point d'arrêt
	Précision de coordonnées
	Valeur de l'angle de ligne d'énergie (<i>reach angle</i>) du point d'arrêt (°)
	Trajectoire connue :
	Mode de propagation
	Occupation du sol (au moment de la chute)

DESCRIPTION

	Date de l'évènement
	Précision de date
	Heure de l'évènement
	Nature géologique
	Volume total au départ (m ³)
	Volume du bloc au point d'arrêt (m ³)
	Volume maximal de bloc propagé (m ³)

DOMMAGES

	Cause de l'arrêt
	Dommages sur enjeux
	Nature des dommages

Information relative à l'évènement

Information relative à un bloc

Le guide technique MEZAP (Méthode de Zonage de l'Aléa chute de Pierres) s'adresse aux services de l'État amenés à faire réaliser des études de l'aléa rocheux dans le cadre de la réalisation d'un PAC (Porter à connaissance) ou d'un PPRn, ainsi qu'aux opérateurs (bureaux d'études, organismes publics) amenés à réaliser ces études. Il intéresse également les collectivités qui peuvent dans certains cas diligenter ce type de cartes d'aléa.

Ce document est le fruit des réflexions collectives, initiées en 2014, menées au sein d'un groupe de travail rassemblant les opérateurs publics de l'Etat (INRAE, BRGM, Cerema, Université G. Eiffel, ONF-RTM) et les représentants des services déconcentrés de l'État, sous pilotage du ministère de la Transition Écologique.

La MEZAP répond à la volonté de l'État de conserver une approche proportionnée aux attentes et aux moyens dédiés à la cartographie de l'aléa rocheux dans le cadre de PPRn ou de PAC. La MEZAP s'appuie sur une base commune de caractérisation de l'aléa rocheux et d'un vocabulaire commun. Elle propose une approche pragmatique de la cartographie de l'aléa rocheux, couvrant toute la gamme des phénomènes (de la pierre isolée jusqu'au phénomène de grande ampleur) permettant de garantir la cohérence des productions d'un territoire à l'autre.

BRGM

3, avenue Claude Guillemin
BP 36009
45060 Orléans Cedex 2
Tél. : 02 38 64 34 34



www.brgm.fr