



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Cartographie de l'aléa chute de blocs sur la commune de Bar-sur- Seine (10).



Rapport final

BRGM/RP-72285-FR

Version 0 du 26 octobre 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

Szczyglowski Marion, Vallet Aurélien, Dupuis Manon

Vérificateur :

Nom : B. Colas

Fonction : Ingénieur géotechnicien

Date : 22/11/2022

Signature :

Approbateur :

Nom : H. VINOT

Fonction : Directrice Régionale Déléguée

Date : 22/11/2022

Signature :

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

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

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

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

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

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : Chute de blocs, chute de pierres, mouvement de terrain, carte d'aléa, colluvions, calcaire, Kimméridgien, Portlandien – Bar-sur-Seine, Aube, Grand Est.

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

Szczyglowski Marion, Vallet Aurélien, Dupuis Manon (2022) – Cartographie de l'aléa chute de blocs sur la commune de Bar-sur-Seine (10). Rapport final V0. BRGM/RP-72285-FR, 62 p., 19 ill., 2 annexes

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-20/01/2022

Synthèse

La Direction Départementale des Territoires de l'Aube (DDT10) a confié au BRGM une étude technique visant à caractériser les aléas « glissement de terrain » et « chute de blocs » pour le versant Sud-Est de la commune de Dolancourt et le versant Ouest de la commune de Bar-sur-Seine (10), afin d'assurer un aménagement durable d'éventuelles futures installations.

La présente étude s'intéresse à l'évaluation de l'aléa chute de blocs sur le versant ouest de la commune de Bar-sur-Seine. L'aléa glissement de terrain n'est ici pas évalué, aucun indice de tels mouvements n'ayant été relevé sur le versant concerné. L'étude engagée présente la méthode d'évaluation de l'aléa chute de blocs adoptée, permet de caractériser les aléas à l'échelle du versant et propose des mesures de protection et de prévention, à l'échelle du versant en fonction des niveaux d'aléa mis en évidence.

L'évaluation et la cartographie de l'aléa chute de blocs est basée sur la méthode MEZAP¹, une approche de type expert, adaptée au contexte local. L'analyse repose ici principalement sur les observations in-situ (la bibliographie existante étant très restreinte).

Aucune zone d'aléa fort n'a été mise en évidence au regard des volumes de blocs mobilisés et mobilisables (< 0,1 m³). Plusieurs parcelles bâties et sentiers forestiers sont cependant concernés par un aléa qualifié de « moyen » à « faible ».

Une série de mesures est proposée afin de prendre en compte et de réduire l'exposition des biens et des personnes au phénomène de chute de blocs. Il s'agit notamment de conserver l'état boisé du versant, faisant obstacle à la propagation des blocs. Sur le bâti, des adaptations peuvent être réalisées (façades, toitures, ouvertures). La valorisation des travaux réalisés doit également permettre de fournir une information pertinente à l'échelle infra-communale pour réaliser une communication préventive.

¹ MEZAP : « Méthodologie d'Evaluation du Zonage de l'Aléa chute de Pierre ». Méthode développée par un groupe de travail pour le compte du MTE (Ministère de la Transition Ecologique)

Sommaire

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 6 |
| 2. Contexte général..... | 9 |
| 2.1. Contexte géographique et morphologique | 9 |
| 2.2. Contexte géologique et hydrogéologique | 9 |
| 3. Principe de la cartographie de l'aléa chute de blocs..... | 11 |
| 3.1. Fondements..... | 11 |
| 3.2. Démarche..... | 11 |
| 3.2.1. <i>Carte informative des phénomènes</i> | 13 |
| 3.2.2. <i>Définition des scénarios de référence et des zones homogènes de départ</i> | 14 |
| 3.2.3. <i>Intensité de l'aléa de référence</i> | 15 |
| 3.2.4. <i>Indice d'activité de l'aléa de référence</i> | 15 |
| 3.2.5. <i>Propagation</i> | 16 |
| 3.2.6. <i>Atteinte</i> | 17 |
| 3.2.7. <i>Aléa</i> | 17 |
| 4. Cartographie d'aléa chute de blocs | 18 |
| 4.1. Carte informative des phénomènes | 18 |
| 4.1.1. <i>Phase documentaire</i> | 18 |
| 4.1.2. <i>Reconnaissance de terrain</i> | 18 |
| 4.1.3. <i>Synthèse des observations</i> | 19 |
| 4.2. Définition des scénarios de référence et des zones homogènes de départ..... | 25 |
| 4.2.1. <i>Scénarios de référence</i> | 25 |
| 4.2.2. <i>Typologie des ruptures observées</i> | 25 |
| 4.2.3. <i>Zones homogènes de départ</i> | 26 |
| 4.3. Intensité de l'aléa de référence | 30 |
| 4.4. Indice d'activité de l'aléa de référence | 30 |
| 4.5. Propagation | 32 |
| 4.6. Atteinte | 35 |
| 4.7. Aléa | 35 |
| 4.7.1. <i>Aléa remobilisation de blocs en versant</i> | 36 |
| 4.7.2. <i>Synthèse</i> | 38 |
| 5. Proposition de travaux de mise en sécurité..... | 39 |
| 5.1. Zone en aléa fort..... | 39 |
| 5.2. Zone en aléa moyen | 39 |
| 5.2.1. <i>Recommandations en zone de versant boisé</i> | 39 |
| 5.2.2. <i>Recommandations pour l'existant en pied de versant</i> | 39 |
| 5.2.3. <i>Recommandations pour les projets futurs</i> | 40 |
| 5.3. Zone en aléa faible | 40 |
| 5.3.1. <i>Recommandations en zone de versant boisé</i> | 40 |
| 5.3.2. <i>Recommandations pour l'existant en pied de versant</i> | 40 |
| 5.3.3. <i>Recommandations pour les projets futurs</i> | 40 |
| 6. Bibliographie | 41 |

Liste des illustrations

| | |
|--|----|
| illustration 1 – Localisation des deux zones d'études (Dolancourt : environ 0,7 km ² ; Bar-sur-Seine : environ 1,9 km ²) | 7 |
| illustration 2 – Carte géologique harmonisée au 1/50 000 ^{ème} corrigée (à gauche) d'après les observations de terrain et la carte des pentes (à droite) | 10 |
| illustration 3 – Méthode MEZAP | 13 |
| illustration 4 – Indices d'intensité de l'aléa rocheux en fonction du volume (MEZAP, 2021)..... | 15 |
| illustration 5 – Définition de l'indice d'activité (MEZAP, 2021)..... | 15 |
| illustration 6 – Probabilité de propagation (MEZAP 2021)..... | 16 |
| illustration 7 – Définition de la probabilité d'atteinte de l'aléa de référence en un point..... | 17 |
| illustration 8 – Définition du niveau de l'aléa de référence par zone homogène..... | 17 |
| illustration 9 – Carte informative des phénomènes avec les zones de départ potentiel et blocs observés lors des campagnes terrain..... | 21 |
| illustration 10 – Description de quelques zones de départ et définition de scénario(s) de référence (du nord au sud de la zone d'étude) | 24 |
| illustration 11 – Scénario de référence retenu sur la commune de Bar-sur-Seine..... | 25 |
| illustration 12 – Mécanismes de rupture rencontrés lors des visites de terrains à Bar-sur-Seine | 26 |
| illustration 13 – Inventaire des zones de départ avec la définition d'une valeur de seuil de pente 50° (voir 45°) et 55°, après validation par reconnaissance sur le terrain (fonds : carte des pentes calculées à partir du MNT RGE ALTI 1m)..... | 29 |
| illustration 14 – Exemples de pierres et petits blocs observés (A : barre rocheuse d'environ 3 m de hauteur avec bancs calcaires sub-horizontaux en débit décimétrique, nappes d'éboulis avec pierres au sol inférieures à 10 litres unitaire ; B : affleurement de 3 m de hauteur avec éléments calcaires altérés dans une matrice marneuse, quelques pierres au sol et un petit bloc de 55 litres retenu par un arbre) | 30 |
| illustration 15 – Cartographie de l'indice d'intensité pour chaque zone de départ (l'indice d'activité est considéré fort sur l'ensemble des zones de départ)..... | 31 |
| illustration 16 – Qualification des zones de départ homogènes | 32 |
| illustration 17 – Cartographie de la probabilité de propagation à partir d'ELANA et après contrôle terrain sur le versant ouest de Bar-sur-Seine | 34 |
| illustration 18 – Matrice d'évaluation de la probabilité d'atteinte adaptée au contexte local (d'après guide MEZAP)..... | 35 |
| illustration 20 – Cartographie de l'aléa chutes de blocs (et remobilisation de blocs en versant) sur le versant ouest de Bar-sur-Seine | 37 |

Liste des annexes

| | | |
|----------|--|----|
| Annexe 1 | Mécanismes de rupture..... | 42 |
| Annexe 2 | Ligne d'énergie..... | 47 |
| Annexe 3 | ELANA, outil d'aide à la cartographie de la propagation des chutes de blocs base sur la méthode de la ligne d'ENERGIE..... | 52 |

1. Introduction

La Direction Départementale des Territoires de l'Aube (DDT 10) a confié au BRGM une étude technique visant à caractériser les aléas « glissement de terrain » et « chute de blocs » pour le versant Sud-Est de la commune de Dolancourt et du versant Ouest de la commune de Bar-sur-Seine (10).

Lors d'une précédente étude « glissement de terrain » / « chute de blocs » menée sur les communes de Fontaine et de Bar-sur-Aube (10), plus d'une soixantaine de communes sur le seul département de l'Aube, dont Dolancourt et Bar-sur-Seine, ont été identifiées comme pouvant provoquer un aléa mouvements de terrain de niveau moyen, voire fort, sur des pentes et des lithologies similaires (RP-65258-FR). En effet, l'analyse des versants de Bar-sur-Aube et Fontaine a permis de mettre en évidence des couches géologiques et pentes suffisantes pour générer des phénomènes de glissement et de chute de blocs.

Les phénomènes pris en compte se limitent aux glissements de terrain et aux chutes de blocs. Ces phénomènes correspondent à ceux qui sont les plus répandus pour les territoires concernés et qui justifient la présente étude. Les autres phénomènes de mouvements de terrain, du type affaissement, effondrement et érosion des berges notamment, n'ont pas été retenus sur ces deux communes pour la cartographie de l'aléa. En outre le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux a déjà été traité à l'échelle départementale (rapport BRGM RP-56710-FR).

Les périmètres d'étude ont été définis par la DDT de l'Aube dans le cadre d'éventuels futurs aménagement au vu du contexte similaire aux communes de Bar-sur-Aube et Fontaine. Ils peuvent se définir comme suit (illustration 1) :

- Commune de Dolancourt : Versant Sud-Est dit de « La prairie », vallée du Landion ;
- Commune de Bar-sur-Seine : Versant Ouest dit de « La Croix Bleue », vallon de Vauldon.

Le présent rapport traite la commune de Bar-sur-Seine pour l'aléa « Chute de bloc ». La commune de Dolancourt a été traitée lors d'une première phase d'étude (rapport BRGM RP-71490-FR).

Dans le cadre de ce projet, le BRGM valorise la méthode MEZAP pour élaborer la cartographie de l'aléa de référence « chute de blocs ». Cette méthode vise à harmoniser les pratiques pour la cartographie de cet aléa pour des Portés à connaissance (PAC) ou Plans de prévention des risques (PPR). Cette méthode est adaptée à sa valorisation à l'échelle locale.

La carte de l'aléa chute de blocs produite est directement valorisable pour favoriser l'information préventive vers les communes et pour la mise en œuvre d'actions préventives et d'actions de communication sur ces phénomènes.

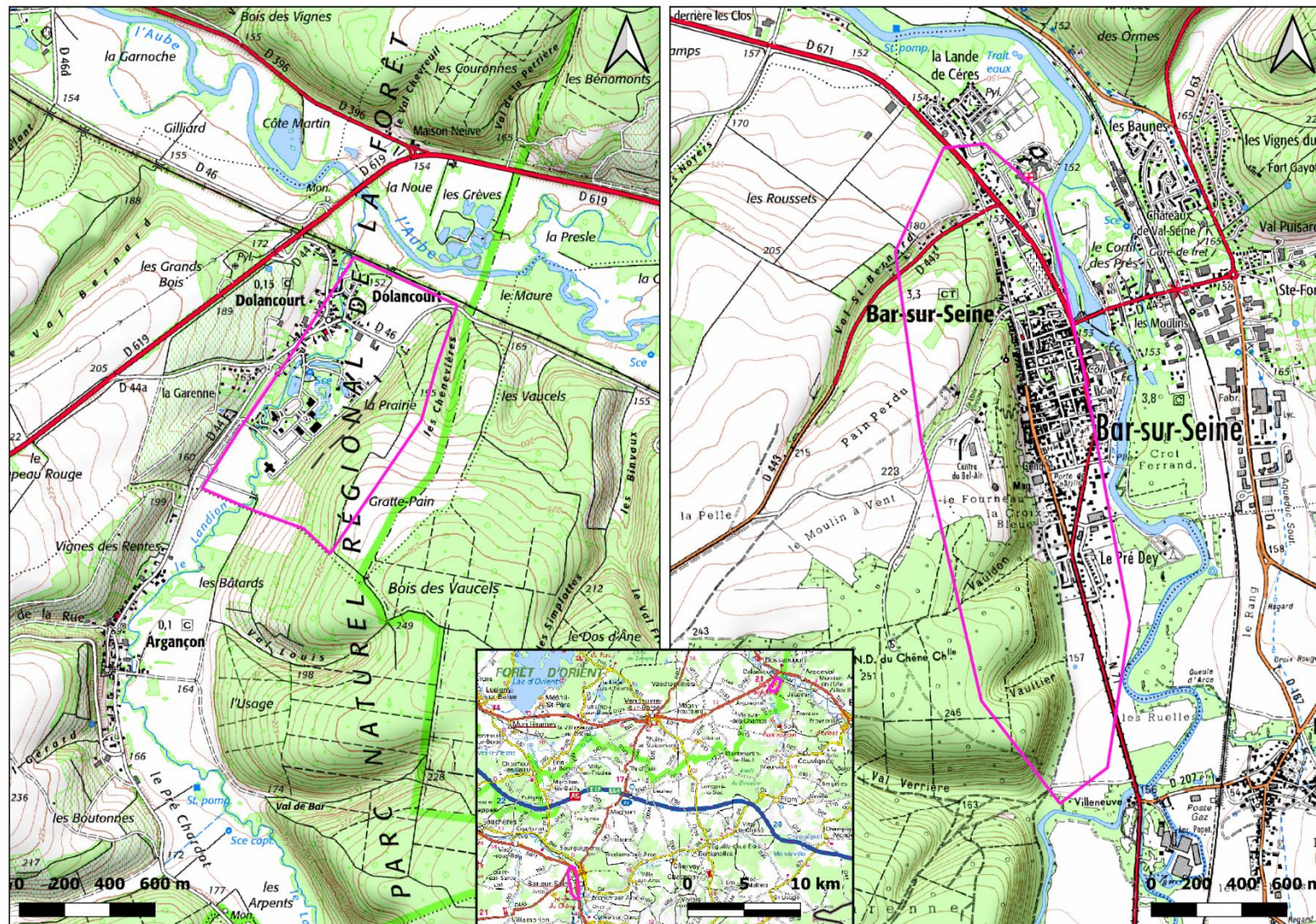


illustration 1 – Localisation des deux zones d'études (Dolancourt : environ 0,7 km² ; Bar-sur-Seine : environ 1,9 km²)

2. Contexte général

2.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET MORPHOLOGIQUE

La région de Bar-sur-Seine se situe sur la bordure orientale du Bassin de Paris, dans la région naturelle du Barrois (Côte des Bar). La commune s'étend sur environ 27,5 km² au sud-est de Troyes (Illustration 1). Le dénivelé peut atteindre environ 75 m entre (du nord au sud) le Faubourg de Troyes, la Grand rue de la Résistance, le Faubourg de Châtillon, la RN71 et le plateau forestier et agricole amont. Le secteur couvert représente un linéaire d'environ 2,8 km (surface d'environ 1,9 km²).

Le réseau hydrographique est marqué par la présence de la Seine qui entaille de manière assez profonde les couches calcaires du Jurassique supérieur, mettant à l'affleurement des barres rocheuses. Le relief actuel correspond à la nature des roches à l'affleurement. Les plateaux à bords abrupts sont formés par les calcaires du Portlandien. Les dépressions sont creusées par les marnes du Kimméridgien et la région présente une différence d'altitude notable entre les plateaux et les collines (240 m NGF au plus haut) et, les vallons et la vallée de la Seine (150 m NGF au plus bas).

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Les terrains géologiques, uniquement sédimentaires, forment une série continue depuis le Kimméridgien moyen (j6b-cN) au Tithonien inférieur (j6c-7a). Les dépôts quaternaires se présentent sous la forme d'alluvions récentes à actuelles (holocènes, Fz).

Les couches présentent une stratification sub-horizontale avec un léger pendage vers le nord-ouest. Dans le détail, la succession géologique (de la plus récente à la plus ancienne) est la suivante (illustration 2) :

- Fz : Holocène. Alluvions récentes à actuelles ;
- j6c-7a : Portlandien. Suite à l'érosion, le Portlandien n'est représenté que par ses assises inférieures constituées par des calcaires blanchâtres, beiges à grisâtres en bancs sub-lithographiques compacts. L'épaisseur de la formation peuvent dépasser 75 m. Ces calcaires peuvent présenter une prédisposition à la chute de blocs s'ils se trouvent à l'affleurement. Sur le terrain, il forme la tête des corniches en partie haute de versant ;
- j6b-cN : Kimméridgien supérieur à moyen. Cette couche est constituée par une alternance marno-calcaire (assises de marnes grises séparées par des assises de calcaires marneux en bancs). La formation dans son ensemble peut atteindre 80 m d'épaisseur. Les niveaux calcaires peuvent présenter une susceptibilité à la chute de blocs. Sur le terrain, ils forment les escarpements en milieu de versant.

Les nappes aquifères se présentent dans l'ordre suivant, depuis les terrains les plus récents au plus anciens :

- La nappe pléistocène (correspondant aux alluvions de fond de vallée) ;
- La nappe du Kimméridgien moyen (dans les calcaires au-dessus des assises marneuses).

Cartographie de l'aléa chute de blocs sur la commune de Bar-sur-Seine (10).

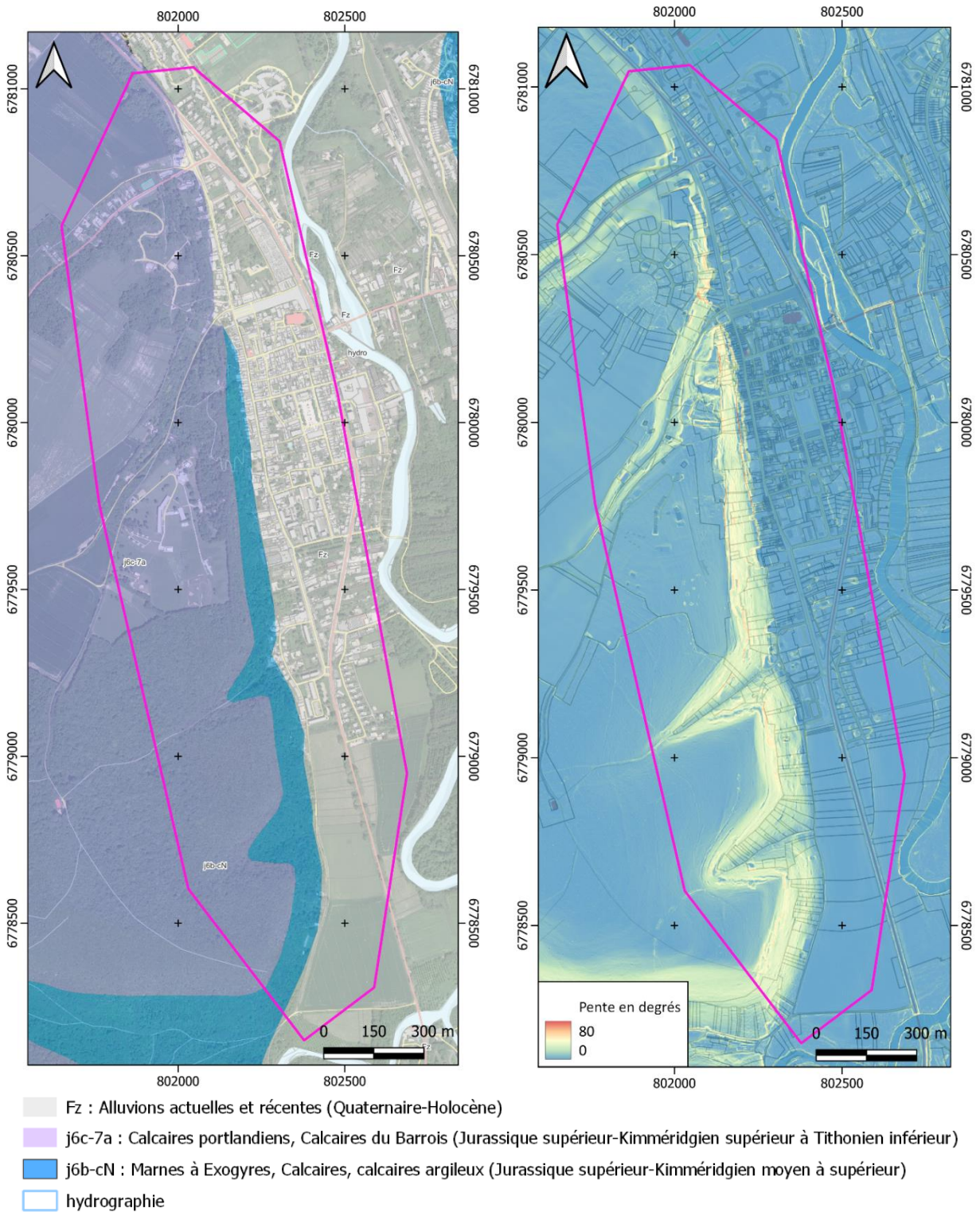


illustration 2 – Carte géologique harmonisée au 1/50 000^{ème} corrigée (à gauche) d'après les observations de terrain et la carte des pentes (à droite)

3. Principe de la cartographie de l'aléa chute de blocs

3.1. FONDEMENTS

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 Plan de Prévention des Risques naturels (PPRn). Pour la cartographie de l'aléa rocheux il s'agit du phénomène d'**occurrence** et d'**intensité** données susceptible de se propager vers les enjeux, sur la période de référence. Dans le cadre de PPRn, 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.

La méthode valorisée dans le cadre de la présente étude est issue des résultats d'un groupe de travail (MEZAP², 2021) sur l'évaluation de l'« aléa rocheux » dans le cadre de la mise en œuvre d'un PPRn.

3.2. DEMARCHE

La caractérisation de l'aléa rocheux dans la MEZAP est basée sur le croisement d'une **intensité** de phénomène 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** (aussi qualifiée d'activité) et d'une **probabilité de propagation**. Les étapes de la MEZAP sont les suivantes :

² 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 a connaissance (PAC). BRGM, 2021. Collection Scientifique et technique. ISBN : 978-2-7159-2760-5

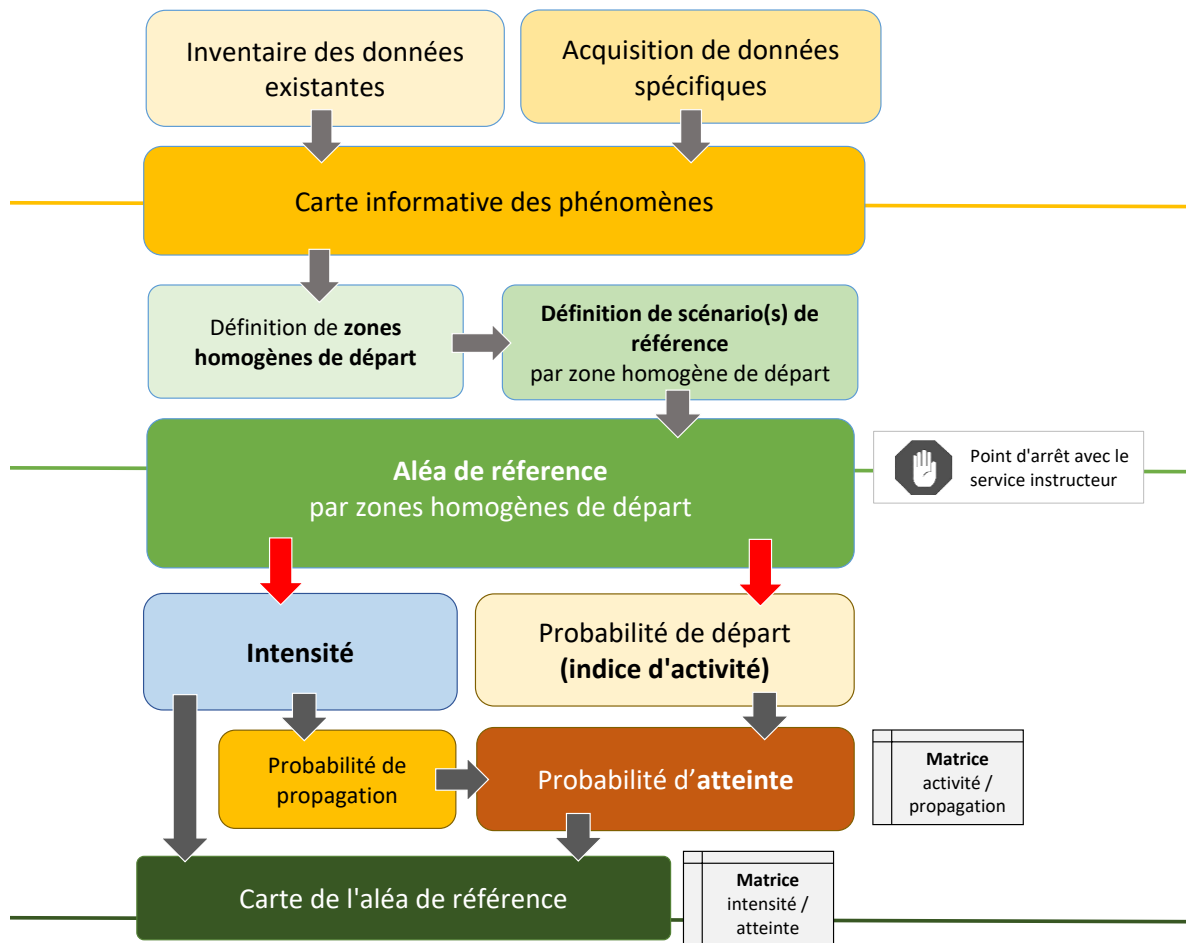


illustration 3 – Méthode MEZAP

3.2.1. Carte informative des phénomènes

La carte informative des phénomènes repose sur l'inventaire des données existantes et sur une acquisition de terrain spécifique. Sont attendues :

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

Cette phase aboutit à une carte regroupant :

- Des **phénomènes observés** décrits et documentés : date, volume, mécanismes, dommages, etc... consolidés en une base de données cartographique ;
- Des **indices morphologiques** nécessaires à la qualification de l'aléa rocheux :
 - o Sources potentielles d'éboulements : barres, ressauts, escarpements, falaises, talus le cas échéant ;
 - o Eléments caractérisant les conditions de propagation : couloirs naturels de propagation ; zones anthropisées : terrasses agricoles, pistes, routes, etc... ; 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).

3.2.2. Définition des scénarios de référence et des zones homogènes de départ

La MEZAP définit 6 scénarios de référence répartis en 2 types :

- Type n°1 – l'intensité du phénomène est dépendante du volume unitaire se propageant vers les enjeux. Il peut s'agir de :
 - o Scénario A : chute de bloc isolé depuis une zone de versant. Propagation sur des distances longues ;
 - o 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 ;
 - o 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 ;
 - o Scénario D : éboulement en masse depuis une zone de versant. Propagation sur des distances longues et individualisation de trajectoires en fin de parcours ;
- Type n°2 – l'intensité du phénomène est fortement dépendante du volume total éboulé. Il peut s'agir de :
 - o 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 ;
 - o 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.

Les scénarios décrivent quels types de phénomène sont redoutés sur la période de référence, et selon les zones homogènes de départ. Leur description comprend notamment :

- ✓ Les mécanismes de départ (annexe 1.) 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, etc...) ;
- ✓ 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.

La définition des zones homogènes de départ intègre des parois, secteurs, affleurements présentant des configurations similaires susceptibles de produire des phénomènes du même type. Au sein d'un même versant, plusieurs zones homogènes sont susceptibles d'être définies.

3.2.3. Intensité de l'aléa de référence

La MEZAP définit l'intensité d'un phénomène par le volume de bloc retenu pour l'aléa de référence :

| <i>Indice d'intensité</i> | <i>Description</i> | <i>Indications sur les dommages</i> |
|---------------------------|--|--|
| 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 10m 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 |

illustration 4 – Indices d'intensité de l'aléa rocheux en fonction du volume (MEZAP, 2021)

3.2.4. Indice d'activité de l'aléa de référence

La MEZAP définit l'activité comme la probabilité de départ sur une période de référence de 100 ans :

| 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 |

illustration 5 – Définition de l'indice d'activité (MEZAP, 2021)

La caractérisation des indices d'intensité et d'activité d'une zone homogène de départ s'effectue à partir de l'examen, au sein de ce secteur homogène, des zones de départ individuelles, des zones de dépôts, des événements historiques recensés, du contexte géologique et morphologique.

3.2.5. 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 départs 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.

Afin d'objectiver l'évaluation de la propagation, la MEZAP propose de relier qualification / quantification de la propagation :

| Qualification de la propagation | Quantification |
|---------------------------------|-----------------------|
| Extrêmement forte | $> 10^{-2}$ |
| Très forte | 10^{-3} à 10^{-2} |
| Fort | 10^{-4} à 10^{-3} |
| Moyen | 10^{-5} à 10^{-4} |
| Faible | 10^{-6} à 10^{-5} |
| Très faible | $< 10^{-6}$ |

illustration 6 – Probabilité de propagation (MEZAP 2021)

Cette propagation dépend des caractéristiques du versant étudié (pente, obstacles éventuels, nature et état du sol, etc.) et du projectile (forme, dimensions, etc.). La combinaison des nombreux paramètres régissant la propagation la rend aléatoire. Pour mémoire, 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 ». Plusieurs méthodes peuvent être mises en œuvre pour déterminer les probabilités de propagation (empiriques ou prospectives).

L'approche retenue pour l'évaluation dépend des données disponibles et des enjeux concernés. On distingue les approches :

- 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) ;
- 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, annexe 6.2.) ou un traitement statistique lorsque les chroniques événementielles sont suffisantes ;
- 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.

3.2.6. Atteinte

La MEZAP définit l'atteinte comme le croisement de la probabilité de propagation et probabilité de départ (qualifiée par l'indice d'activité) :

| | | Probabilité de propagation | | | | | |
|---|-----------------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------------|-------------------|
| | | Très faible 10^{-6} | Faible 10^{-5} | Moyenne 10^{-4} | Forte 10^{-3} | Très forte 10^{-2} | Extrêmement forte |
| Probabilité de départ (Indice d'activité) | Faible (1 / 100 ans) 10^{-2} | 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 | Très forte |

illustration 7 – 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)

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.

3.2.7. Aléa

La MEZAP qualifie le niveau d'aléa en tout point de la zone d'étude comme le croisement de l'atteinte et de l'intensité du phénomène de référence :

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

illustration 8 – Définition du niveau de l'aléa de référence par zone homogène

Si plusieurs scénarios sont superposés, l'aléa final est retenu comme de niveau le plus élevé évalué.

4. Cartographie d'aléa chute de blocs

4.1. CARTE INFORMATIVE DES PHENOMENES

4.1.1. Phase documentaire

Une première phase d'inventaire des zones de départ potentiel de blocs et des chutes de blocs passées a été réalisée au travers des données et documents existants. Ont notamment été consultés et analysés :

- Les bases de données du BRGM (BDMVT³, BSS⁴, cartes géologiques au 1/50 000^{ème}, rapports d'études) ;
- Les données spatialisées de l'IGN (MNT⁵ au pas de 5 m et de 1 m, orthophotographie, SCAN25, cadastre,) ;
- Les archives communales de Bar-sur-Seine ;
- Des sources départementales (archives départementales de l'Aube, DDT 10) ;
- La presse locale.

L'absence d'évènement recensé lors de la consultation de la base de données mouvement de terrain, des archives communales et départementales ainsi que de la presse locale n'a pas permis de définir un historique des évènements passés sur le versant Ouest de Bar-sur-Seine. L'analyse des MNT a cependant permis de dresser un inventaire des zones de départ potentiel de blocs.

4.1.2. Reconnaissance de terrain

L'inventaire précédent a été complété par des relevés de terrain, réalisés le 21 octobre 2021 puis entre le 30 mars et le 1^{er} avril 2022. La campagne de terrain s'est appliquée à visiter l'ensemble des zones de départs identifiées afin de décrire les différents affleurements et morphologies de versant, mais également à repérer et caractériser les blocs chutés.

Cette phase de reconnaissance de terrain s'est accompagnée d'un recueil de témoignages (riverains, historien local). Un nombre très limité de témoignages a pu être recueilli. Ceux-ci indiquent une fréquence d'atteinte aux enjeux faible (parcelles bâties en pied de versant), aucun dommage et des éléments chutés présentant de petits volumes (≤ 1 litre).

Lors des investigations de terrain, une cartographie non-exhaustive des pierres et petits blocs éboulés a été réalisée pour caractériser l'aléa aussi bien pour la définition du scénario de référence (intensité / activité) que pour l'estimation de la propagation. Cette analyse événementielle met en évidence les faciès géologiques sensibles aux éboulements rocheux ainsi que les contextes morphologiques associés. Les reports correspondent aux points d'atterrissement des blocs. De façon générale, la propagation des évènements peut atteindre plusieurs dizaines de mètres, en raison des contextes d'escarpements rocheux en versant référencés.

³ Base de Données nationale sur les MouVemenTs de terrain

⁴ Banque de données du Sous-Sol

⁵ Modèle Numérique de Terrain

La reconnaissance et l'inventaire des zones de départ potentiel (escarpements, barres rocheuses) lors des campagnes de terrain sont une tâche laborieuse, chronophage et rendue compliquée par la végétation et les bâtiments existants. A ce titre, une analyse préliminaire réalisée par l'analyse couplée des MNT, du SCAN25 et des orthophotographies couvrant le secteur d'étude est pertinente afin de cibler les secteurs à investiguer lors des campagnes de reconnaissance terrain. La méthode d'identification préalable des zones de départ est explicitée au paragraphe 4.2.

L'approche utilisée lors des campagnes de terrain est type expert. Pour rappel, les indices sont déterminés sur la base de relevés géotechniques visuels des affleurements et barres rocheuses (fracturation, altération, etc.). Ces données sont uniquement qualitatives, aucun essai de laboratoire ou in situ n'a été réalisé dans le cadre de ce projet.

4.1.3. Synthèse des observations

L'ensemble des observations (zones de départ et blocs observés sur le versant) sont reportés à l'illustration 9. Les zones de départ sont davantage caractérisées à l'illustration 10.

D'une manière générale, les escarpements rocheux (ou barres rocheuses) rencontrés sur le terrain mesurent entre 3 m et 6 m de hauteur. Ils peuvent atteindre ponctuellement plus de 10 m (jusqu'à 20 m au Nord de la zone d'étude – affleurement anthropique) sur une quarantaine de mètres de linéaire continu au maximum. Ils se situent entre 195 m NGF et 215 m NGF. Les bancs calcaires mesurent quelques centimètres à dizaines de centimètres d'épaisseur et leur stratification sub-horizontale est fine. Ils sont notamment soumis à la gélifraction et, plus généralement aux intempéries, qui accentue leur fracturation. Plusieurs zones rocailleuses (éboulis) sans escarpements rocheux en amont et zones à corniches rocheuses de moins d'1 m de hauteur (généralement de l'ordre de 0,5 m) ponctuent le versant.

Les pierres et petits blocs observés au sol ont généralement un volume unitaire de l'ordre du litre. Quelques blocs de l'ordre de 50 litres ou plus (au maximum 55-60 litres pour moins d'une dizaine de blocs) sont rencontrés ponctuellement. Le volume total des blocs chutés peut atteindre quelques centaines de litres. Aucun élément rocheux n'est visible sur les toits des bâtiments ni au sol en bas de versant. Il est à noter que les blocs sont régulièrement retenus par la végétation en versant (milieu forestier) et qu'ils sont observés à une distance d'environ 60 m de la corniche rocheuse au maximum.

Des murs de soutènement sont présents à l'amont des parcelles bâties en pied de versant. Un ouvrage de protection contre les chutes de blocs semble avoir récemment été créé (parade passive type merlon). Quelques pierres sont retenues en arrière.

Des chemins forestiers passent régulièrement en pied de corniches. Aucune source (potentiel indice d'interface entre marnes et calcaires) ou mare (possible témoin du caractère imperméable des niveaux marneux du Kimméridgien supérieur) n'a été repéré dans le versant lors des investigations de terrain.

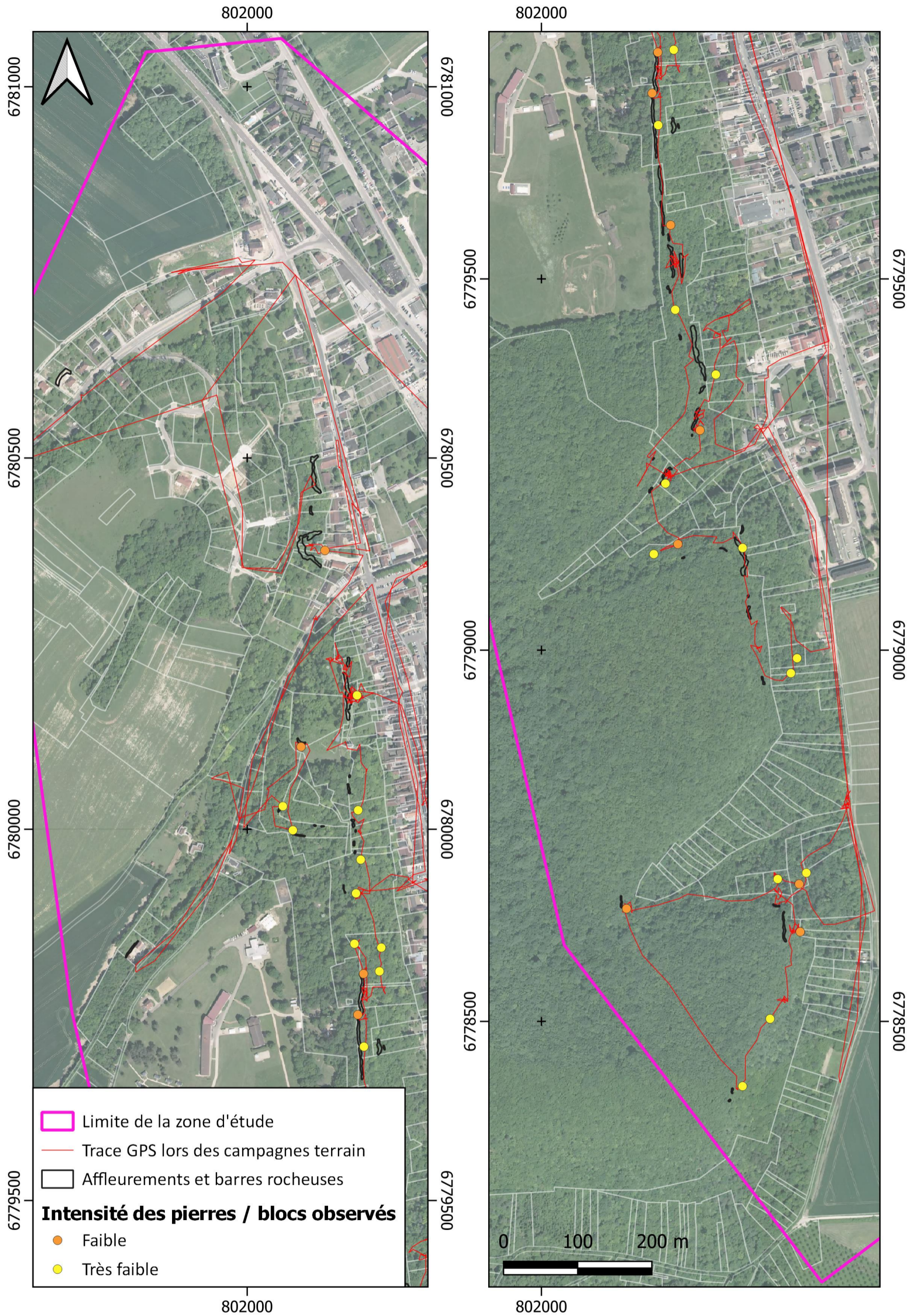









illustration 9 – Carte informative des phénomènes avec les zones de départ potentiel et blocs observés lors des campagnes terrain

| ID ZD | Description | Lithologie et fracturation | Hauteur | Mécanisme de rupture | Volume total | Volume unitaire | Couple Indice intensité/activité | Commentaire | Photo |
|-------|---|---|--------------|---|-------------------------------|--|----------------------------------|---|---|
| 1 | Affleurement vertical anthropique (après terrassement) à l'arrière d'une parcelle bâtie | Calcaires en bancs altérés pris dans une matrice argileuse, fracturation perpendiculaire à l'affleurement | 3 à 4 m | Erosion différentielle principalement | Quelques centaines de litres | Litre à dizaine de litres | Très faible / fort | Muret créé entre la paroi rocheuse et l'habitation (pour retenir les blocs) |  |
| 2 | Affleurement sub-vertical en tête puis profilé en pied (éboulis, pente autour de 30°) | Calcaires compacts en bancs (peu visibles) | Environ 20 m | Rupture de surplomb, érosion différentielle | Plusieurs centaines de litres | Dizaine de litres fréquent à 60 litres ponctuellement (au moins trois blocs) | Faible / Fort | Affleurement le plus haut et le plus marqué de la zone d'étude, végétation développée |  |
| 3 | Affleurement vertical en milieu de versant, continu sur quelques mètres linéaire | Calcaires durs en bancs décimétriques | Moins d'1 m | Rupture de surplomb, érosion différentielle | Quelques dizaines de litres | Quelques litres | Très faible / Fort | - |  |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---------|---|---|---|--------------------|---|---|
| 4 | Affleurement très peu visible le long d'un sentier forestier | Calcaires peu compacts, en bancs infra-décimétriques | 6 à 8 m | Rupture de surplomb, érosion différentielle | Quelques dizaines de litres à la centaine de litres | Litre majoritairement, dizaines de litres ponctuellement | Très faible / Fort | Végétation très dense |  |
| 5 | Affleurement sub-vertical peu visible | Calcaires peu compacts en bancs mal définis (très altérés, disloqués) pris dans une matrice argileuse, fracturation dense | 1 à 4 m | Rupture de surplomb, érosion différentielle | Quelques centaines de litres | Litre majoritairement, jusqu'à 50-55 litres ponctuellement | Faible / Fort | Affleurement pas visible sur toute sa longueur (masqué par la végétation) |  |
| 6 | Affleurement sub-vertical en tête de versant | Calcaires en bancs décimétriques à centimétriques, fracturation et altération | 2 à 6 m | Rupture de surplomb, érosion différentielle | Centaine de litres | Litre à la dizaine de litres | Très faible / Fort | Peu visible (végétation dense) |  |
| 7 | Affleurement bien marqué en tête de versant, continu sur une dizaine de mètres linéaire | Calcaires en bancs décimétriques compacts | 3 à 6 m | Rupture de surplomb principalement | Quelques centaines de litres | Litre et dizaine de litres fréquent, blocs de 50-60 litres ponctuellement | Faible / Fort | - |  |




| | | | | | | | | | |
|----|---|---|-----------|---|---|---|--------------------|---|--|
| 8 | Affleurement sub-vertical, continu sur quelques mètres linéaire | Calcaires en bancs décimétriques compacts, fracturation perpendiculaire à l'affleurement | 1,5 à 3 m | Rupture de surplomb principalement | Quelques centaines de litres | Litre et dizaine de litres fréquent, blocs de 50-60 litres ponctuellement | Faible / Fort | - |  |
| 9 | Affleurement peu visible en tête de versant | Bancs calcaires compacts décimétriques à infra-décimétriques, fracturation perpendiculairement à l'affleurement | 1,5 à 3 m | Rupture de surplomb, érosion différentielle | Quelques dizaines de litres à la centaine de litres | Litre fréquent à dizaine de litres | Très faible / Fort | - |  |
| 10 | Affleurement peu visible en tête de versant | Bancs calcaires compacts décimétriques à infra-décimétriques, fracturation perpendiculairement à l'affleurement | 1,5 à 3 m | Rupture de surplomb, érosion différentielle | Quelques dizaines de litres à la centaine de litres | Litre fréquent à dizaine de litres | Très faible / Fort | - |  |

illustration 10 – Description de quelques zones de départ et définition de scénario(s) de référence (du nord au sud de la zone d'étude)

4.2. DEFINITION DES SCENARIOS DE REFERENCE ET DES ZONES HOMOGENES DE DEPART

4.2.1. Scénarios de référence

De par leur géologie et leur altération, les affleurements rocheux rencontrés en zone de versant forestier sont susceptibles de produire des pierres, et plus ponctuellement de petits blocs (volume unitaire inférieur à la centaine de litres), qui se peuvent se propager sur une centaine de mètres après fragmentation (**cas type 1 – scénario B**, illustration 11). Le volume unitaire considéré est équivalent au plus gros évènement connu d'après les observations de terrain, aucun évènement significatif (dommageable) n'ayant été recensé lors de la phase documentaire et d'enquête auprès de la commune, des riverains et sachants locaux.

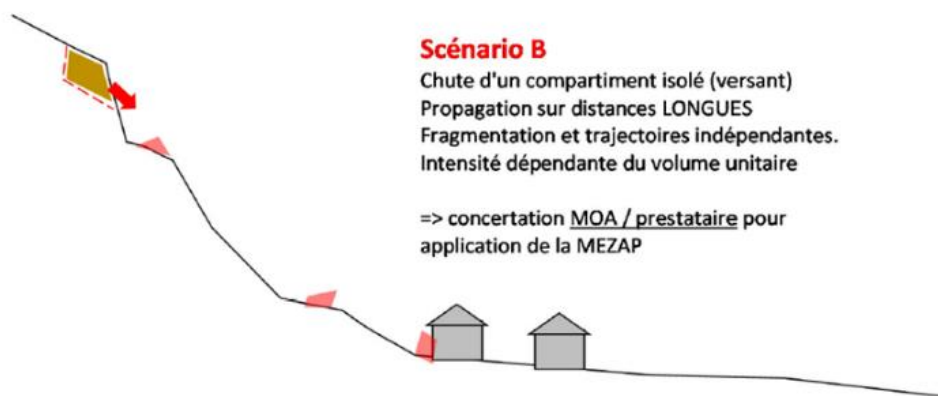


illustration 11 – Scénario de référence retenu sur la commune de Bar-sur-Seine

Au regard des volumes totaux mobilisés ou potentiellement mobilisables (de l'ordre de plusieurs centaines de litres au maximum), l'éventualité d'un éboulement en masse sur le versant ouest de la commune de Bar-sur-Seine n'a pas été retenue. Il n'est par ailleurs pas connu de phénomène historique de ce type sur la commune.

4.2.2. Typologie des ruptures observées

Les mécanismes de chutes de blocs conditionnent l'aléa de départ (rupture). Le phénomène de chute de blocs comprend de façon systématique un aléa de propagation qui définit l'extension spatiale des éboulements rocheux une fois déclenchés.

L'inventaire des chutes de blocs recensées et des zones de départ observées sur la zone d'étude via les opérations de terrain a permis de mettre en évidence les principaux types de rupture affectant les Calcaires du Portlandien présents à Bar-sur-Seine. Trois grands types de mécanismes de rupture ont été identifiées sur le secteur d'étude et sont présentés à illustration 12.




| Type de mécanisme de rupture | Facteurs de prédisposition | Facteurs aggravants / déclencheurs | Photos associées |
|---|---|---|--|
| Rupture de surplomb (ou de dalle en toit) | Lithologie et fracturation (bancs calcaires décimétriques sub-horizontaux) | Gélifraction, précipitations, végétation (milieu forestier) |  |
| Erosion différentielle | Contrastes lithologiques (alternance de bancs calcaires compétents et d'inter-lits marneux à compétence variable) | Gélifraction, précipitations, végétation |  |
| Remobilisation de blocs en versant | Lithologie (éboulis, formations en place déstructuré à l'affleurement avec une hauteur faible) et morphologie de la zone de dépôt (pente supérieure à 20-25°) | Précipitations (ravinement) |  |

illustration 12 – Mécanismes de rupture rencontrés lors des visites de terrains à Bar-sur-Seine

4.2.3. Zones homogènes de départ

La reconnaissance et l'inventaire des zones de départ potentiel (escarpements et barres rocheuses) lors des campagnes terrain sont difficilement réalisables et rendus compliqués par la végétation et les bâtiments existants. A ce titre, une analyse préliminaire est réalisée par l'analyse couplée du Modèle Numérique de Terrain (MNT), du scan 25 de l'IGN et des orthophotographies couvrant le secteur d'étude afin de cibler les secteurs à investiguer lors des campagnes de reconnaissances terrain.

Les barres rocheuses naturelles présentent des pentes fortes, généralement beaucoup plus élevées que les pentes du versant environnant, la définition d'un seuil de pente à partir duquel la présence de barre rocheuse est probable est alors possible. Cependant, l'estimation des pentes

pour un secteur donné à partir d'un MNT dépend de sa résolution : plus la résolution est basse et plus l'estimation des pentes est lissée et moins les détails des objets topographiques comme les corniches naturelles sont représentés. A partir de ce constat, des travaux ont été menés (projet Interreg PROVIALP, INRAE, 2008) pour estimer empiriquement la valeur d'un seuil de pente à partir duquel la présence de corniche rocheuse est probable en fonction de la résolution de MNT (avec RES résolution du MNT) :

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

Ainsi pour le MNT au pas de 1 m disponible, une pente supérieure ou égale à 55° est considérée comme zone de départ potentiel. En complément, cette approche est croisée et ponctuellement enrichie avec la digitalisation des barres rocheuses apparentes sur l'orthophotographie et/ou le scan 25 afin de produire une carte des zones de départ potentiel la plus exhaustive possible. Afin de maximiser la reconnaissance préliminaire des zones potentielles de départ, **un seuil de pente à 45°** a également été utilisé (Illustration 12).

Les investigations de terrain ont permis de caractériser les escarpements et barres rocheuses précédemment identifiées. Cette reconnaissance de terrain a également permis de mettre en évidence de nombreux faux positifs correspondant à des bordures de bâtiment, des talus anthropiques ou des murs, détectés avec les seuils de pente. Il s'agit notamment des « corniches basses » identifiées préliminairement en pied de versant.

Au final les zones de départ homogènes sont caractérisées par une double approche :

- Numérique à partir des données MNT disponibles ;
- Empirique, validée sur le terrain sur la base des enveloppes définies numériquement.

La problématique de remobilisation éventuelle des blocs unitaires partiellement enveloppés dans de la terre et/ou qui seraient posés à la surface de pentes raides n'a pas été prise en compte pour la cartographie des zones de départ potentiel (sauf cas exceptionnel) et donc pour l'aléa chute de blocs.

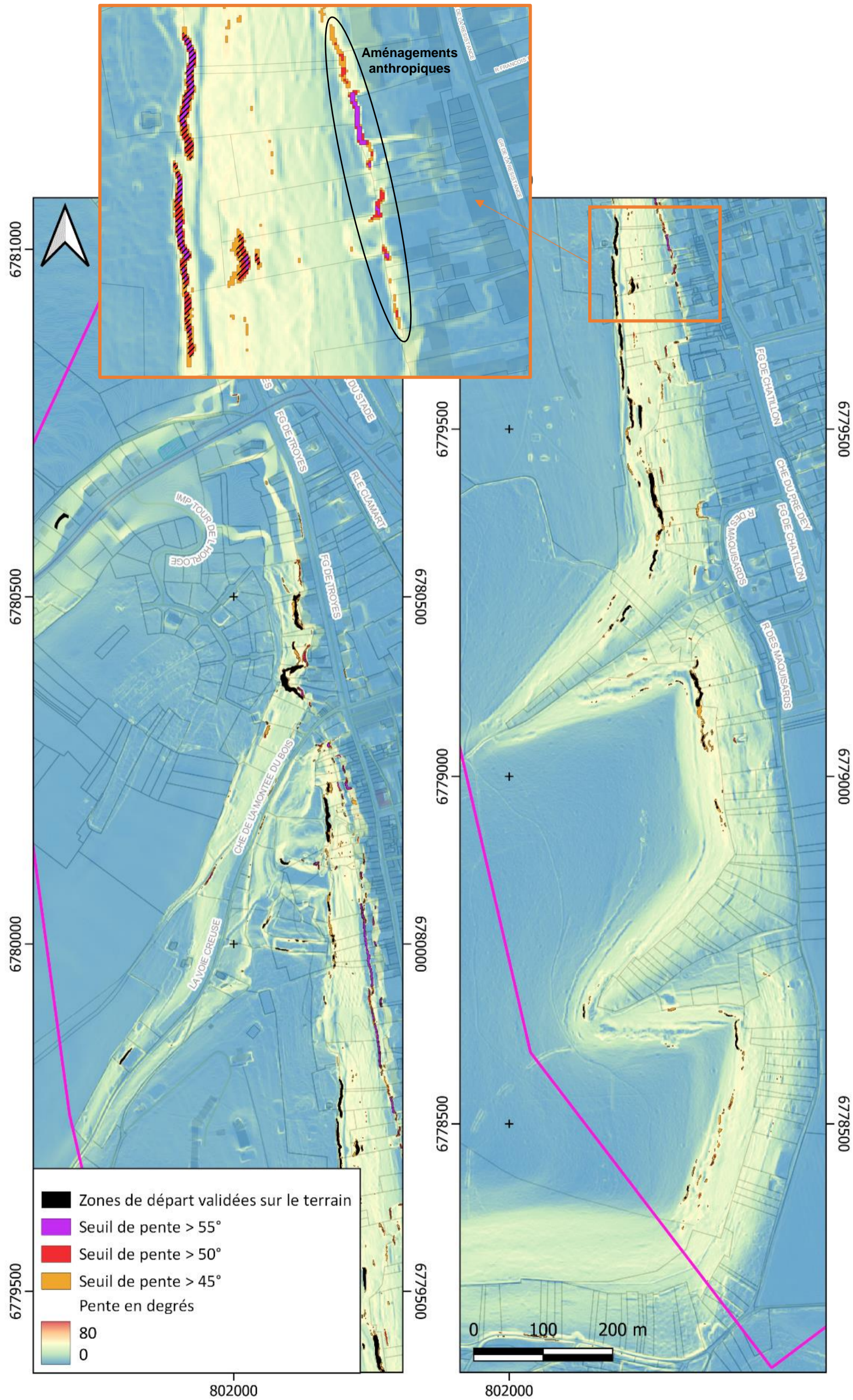


illustration 13 – Inventaire des zones de départ avec la définition d'une valeur de seuil de pente 50° (voir 45°) et 55°, après validation par reconnaissance sur le terrain (fonds : carte des pentes calculées à partir du MNT RGE ALTI 1m)

4.3. INTENSITE DE L'ALEA DE REFERENCE

Les volumes de blocs potentiellement mobilisables décrivent l'intensité attendue des phénomènes, qualifiée par un indice d'intensité, et associée à l'endommagement potentiel des enjeux en cas d'atteinte. Chaque site fait l'objet de visites de terrain afin d'identifier les instabilités en paroi mais également les volumes éboulés, et de collecter les informations nécessaires à l'évaluation des indices.

Les pierres et petits blocs chutés ou instables en parois observés sur le terrain sont majoritairement inférieurs ou de l'ordre du litre, avec ponctuellement des blocs pouvant atteindre 55 à 60 litres (volume unitaire) (illustration 14).



illustration 14 – Exemples de pierres et petits blocs observés (A : barre rocheuse d'environ 3 m de hauteur avec bancs calcaires sub-horizontaux en débit décimétrique, nappes d'éboulis avec pierres au sol inférieures à 10 litres unitaire ; B : affleurement de 3 m de hauteur avec éléments calcaires altérés dans une matrice marneuse, quelques pierres au sol et un petit bloc de 55 litres retenu par un arbre)

D'une manière générale, l'intensité est donc considérée comme très faible (pierres $\leq 0,05 \text{ m}^3$ soit ≤ 50 litres). Une intensité faible (petits blocs $\leq 0,25 \text{ m}^3$ soit ≤ 250 litres) a été attribuée aux zones de départs présentant de petits blocs chutés ou instables de l'ordre de 50 à 60 litres (illustration 15). De tels événements ne peuvent générer que très peu de dommages au gros œuvre mais il est important de noter que des dommages aux personnes peuvent être engagés dès la première classe d'intensité « très faible ».

4.4. INDICE D'ACTIVITE DE L'ALEA DE REFERENCE

L'indice d'activité, relatif à la fréquence de chute d'un bloc du scénario de référence, est plus délicat à estimer que l'indice d'intensité associé à une zone de départ. L'intensité de la fracturation, la répartition et le nombre de blocs éboulés en aval sont autant d'indices suggérant le choix de tel ou tel indice d'activité. Néanmoins, qualifier l'indice d'activité se fait davantage encore « à dire d'expert » que pour l'indice d'intensité.

Le phénomène de chute de pierres est inhérent à chaque affleurement rocheux ramené à sa longueur (ou surface). L'indice d'activité est généralement décroissant avec l'indice d'intensité. Les chutes de pierres et de blocs de petit volume se produisent en général de manière fréquente. Sur la base de la définition des classes d'activité de la MEZAP, l'indice d'activité est donc considéré comme fort (1 chute / an / 100 m d'affleurement) et ce, pour toutes zones de départ identifiées.



illustration 15 – Cartographie de l'indice d'intensité pour chaque zone de départ (l'indice d'activité est considéré fort sur l'ensemble des zones de départ)

Deux zones homogènes de départ caractérisées par un couple unique intensité / activité ont été définies sur le territoire d'étude et sont synthétisées dans le tableau ci-dessous (Illustration 12) et représentées sur la carte (illustration 16) :

| Zone | Indice intensité | Indice activité | Surface totale (m ²) | % surface de départ |
|------|------------------|-----------------|----------------------------------|---------------------|
| 1 | Très faible | Fort | 1 863 | 54 |
| 2 | Faible | Fort | 1 568 | 46 |

illustration 16 – Qualification des zones de départ homogènes

La définition de ces deux zones homogènes de départ, dépendant principalement de l'intensité, est potentiellement liée à la litho-stratigraphie :

- Zone 1 (intensité très faible) : affleurements de faible hauteur (escarpements naturels principalement), présentant des calcaires altérés à passées marneuses (rupture par érosion différentielle), généralement en milieu de versant (probablement jonction entre la partie inférieure des Calcaires portlandiens – j6c-7a, et la partie supérieure des Marnes à Exogyres et calcaires argileux – j6b-cN) ;
- Zone 2 (intensité faible) : affleurements plus marqués (anciennes exploitations à ciel ouvert, têtes de corniches, vallons incisés), présentant des bancs calcaires compétents alternant avec des inter-lits marneux (rupture de surplomb), davantage en tête de versant (Calcaires portlandiens – j6c-7a).

4.5. PROPAGATION

Une fois l'aléa de rupture défini, la propagation des éléments rocheux sur les versants est étudiée. Cette analyse est basée sur de la modélisation, validée ou « corrigée » par les retours d'expérience d'évènements passés (inventaire des blocs observés en pied de falaise et dans le versant sur le terrain). Le résultat permet de définir des probabilités d'atteinte des blocs en tout point du territoire.

Dans le cadre de cette étude, la probabilité de propagation (et d'atteinte) a été établie à l'aide du module ELANA©, décrit en annexe 3, développé par le BRGM. Le module ELANA© valorise la méthode dite de la ligne d'énergie (annexe 2) et utilise les données topographiques du MNT au pas de 5 m, ainsi qu'un raster définissant les pixels considérés comme zones de départ.

Les zones de propagation faibles, moyennes, fortes, très fortes et extrêmement fortes sont modélisées à partir de lois empiriques définies sur la base d'un échantillon de plus de 2 700 chutes de blocs (Colas, Faure, & Rohmer, 2017). Ces lois empiriques étant applicables sur des profils 2D, le logiciel interpole des profils topographiques issus du MNT autour de chaque pixel de départ afin de pouvoir déterminer la probabilité de propagation (et d'atteinte) pour chaque pixel du MNT situé à l'aval des zones de départ.

Un cône d'ouverture de 30° (2 fois α) a été sélectionné (pour une longueur de profil de 1 000 m au maximum) et la propagation a seulement été estimée à partir des pixels sélectionnés des corniches rocheuses cartographiées. Ce choix permet de compenser en partie les surfaces parfois exagérées des corniches détectées par seuil de pente.

Un certain nombre de corniches rocheuses n'est pas détecté par la méthode des seuils de pente mais seulement par la cartographie basée sur les observations de terrain. Cette non-détection

est la conséquence d'une résolution de MNT insuffisante pour détecter des corniches rocheuses de faible hauteur (inférieure à 5 m). La méthode de propagation étant basée uniquement sur le MNT, ce type de corniches ne produit peu ou pas de propagation car leur profil est « lissé » par la résolution du MNT, ce qui conduit à sous-estimer l'aléa. Afin de palier à ce biais, et par principe de précaution, la propagation a été évaluée « à dire d'expert » (basée sur les observations et les mesures de terrain) et à partir de la méthode de ligne d'énergie en 2D (selon les plus grandes lignes de pente) pour ces corniches non-détectées.

Un contraste est observé entre les distances de propagation modélisées avec ELANA© et la réalité de terrain. En effet, les distances de propagation apparaissent surestimées d'environ 5 à 10 m avec ELANA©. Ce constat est cohérent avec les lois empiriques utilisées dans l'outil et le retour d'expérience fait sur son utilisation. En effet, ELANA© est généralement pessimiste avec les petits volumes (intensité faible à très faible), l'outil étant basé sur des lois empiriques qui tiennent compte de bases de données événementielles sur des gros volumes⁶ (intensité moyenne à extrêmement forte).

En l'état actuel de la connaissance, il est difficile de réajuster les lois pour considérer les petits volumes de blocs, leur distribution n'étant pas homogène et leur échantillon trop réduit, non représentatif (événements généralement non remarquables car peu ou pas dommageables). ELANA© reste un outil d'aide à la cartographie dont les résultats doivent être réajustés en fonction du retour d'expérience sur la zone d'étude. Considérant les éléments présentés précédemment, il a été proposé de réduire forfaitairement les distances de propagation de 5 m et **de regrouper les classes de propagation forte, très forte et extrêmement forte sous la classe forte**, en accord avec la DDT de l'Aube.

Les blocs semblent pouvoir se propager jusqu'à plusieurs parcelles bâties de la partie nord de la zone d'étude (illustration 17).

⁶ Chutes de blocs survenus en domaine alpin principalement.

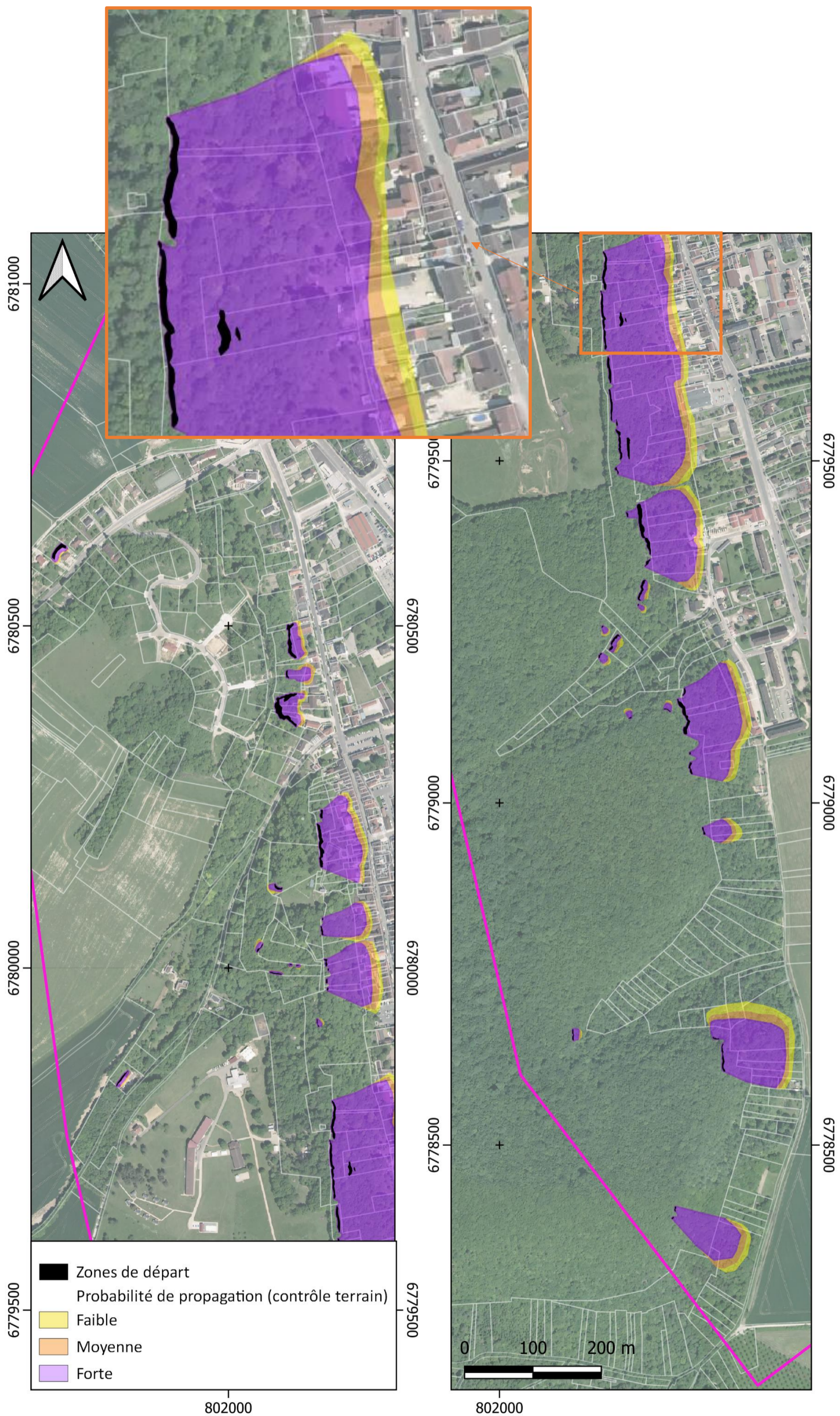


illustration 17 – Cartographie de la probabilité de propagation à partir d'ELANA et après contrôle terrain sur le versant ouest de Bar-sur-Seine

4.6. ATTEINTE

Considérant une probabilité de départ systématiquement forte (chutes annuelles), la probabilité d'atteinte est directement dépendante de la probabilité de propagation de ce bloc. La probabilité d'atteinte peut donc varier de très faible (en pied de versant en fin de propagation) à forte (à proximité de la corniche) (illustration 18).

| | | Probabilité de propagation | | | |
|---|-------|----------------------------|--------|---------|-------|
| | | Très faible | Faible | Moyenne | Forte |
| Probabilité de départ (indice d'activité) | Forte | Très faible | Faible | Moyenne | Forte |

illustration 18 – Matrice d'évaluation de la probabilité d'atteinte adaptée au contexte local (d'après guide MEZAP)

L'ensemble des blocs observés se situent dans la zone de **probabilité d'atteinte forte**.

4.7. ALEA

L'aléa chute de blocs résulte du croisement de l'indice d'intensité et de la probabilité d'occurrence qui est elle-même la résultante du croisement de l'indice d'activité et de la probabilité d'atteinte. La carte d'aléa brute produite d'après le croisement de ces différents indices est ajustée à dire d'expert, notamment d'après les investigations de terrain, afin de produire une cartographie homogène et réaliste. En fonction de l'échelle de restitution de la carte d'aléa, une zone tampon de sécurité de 10 m a systématiquement ajoutée autour des différentes classes d'aléa (illustration 19).

Les paramètres considérés (volume unitaire, propagation) dans l'évaluation de l'aléa sont sécuritaires / conservateurs. En effet, la plupart des éléments rocheux observés dans le versant sont de l'ordre du litre. Quelques éléments plus gros, d'un volume unitaire d'environ 50 à 60 litres ont été repérés sur le terrain, ce qui correspond à la limite de classe d'intensité très faible à faible. Pour des raisons de lisibilité de la carte d'aléa et de différenciation dans la prise en compte des volumes dans les recommandations, il a été proposé de classer les affleurements présentant des blocs instables ou chutés de l'ordre de 50 litres dans la classe d'intensité faible, en accord avec la DDT de l'Aube. De plus, il est rappelé que l'effet induit par la présence d'éventuels obstacles (végétation, aménagement) n'est pas évalué dans la propagation des blocs.

Compte tenu de la **maximisation de la propagation à la classe « forte »**, un aléa faible est attribué aux plus petits volumes (intensité très faible) quelle que soit la probabilité d'atteinte et un aléa faible est défini pour les phénomènes d'intensité faible sur les zones en probabilité d'atteinte faible à moyenne et un aléa moyen pour une probabilité d'atteinte forte.

Il est important de noter que les dommages aux personnes peuvent être engagés dès la première classe d'aléa « faible ». En effet, les classes de l'indice d'intensité, basées sur le volume unitaire, sont définies uniquement en fonction des potentiels de dommages au bâtiment, la carte d'aléa étant destinée à l'aménagement du territoire.

4.7.1. Aléa remobilisation de blocs en versant

La cartographie de l'aléa remobilisation de blocs prend en compte la problématique de remobilisation éventuelle de blocs unitaires partiellement enveloppés dans de la terre ou une matrice argilo-marneuse (cas de la formation géologique étudiée) et/ou qui seraient posés à la surface de pentes raides.

D'après les investigations de terrain, l'aléa rocheux sur le versant Ouest de la commune de Bar-sur-Seine est localisé principalement dans le versant sur des pentes supérieures à 20° en contexte géologique calcaire. Un aléa remobilisation de blocs a été caractérisé sur l'ensemble du versant présentant des pentes supérieures à 20-25° sur des surfaces significatives en contexte calcaire (zones d'éboulis, formations en place déstructurées à l'affleurement avec une hauteur largement inférieure à 1 m, etc.).

Pour les zones d'aléa remobilisation, un niveau d'aléa faible a été qualifié sur l'ensemble du versant (vitesse de propagation faible et volumes majoritairement observés de très faible intensité et donc énergie destructive généralement associée très faible).

L'emprise cartographique de l'aléa remobilisation est basée sur les pentes issues du MNT 1 m de l'IGN et des observations de terrain.

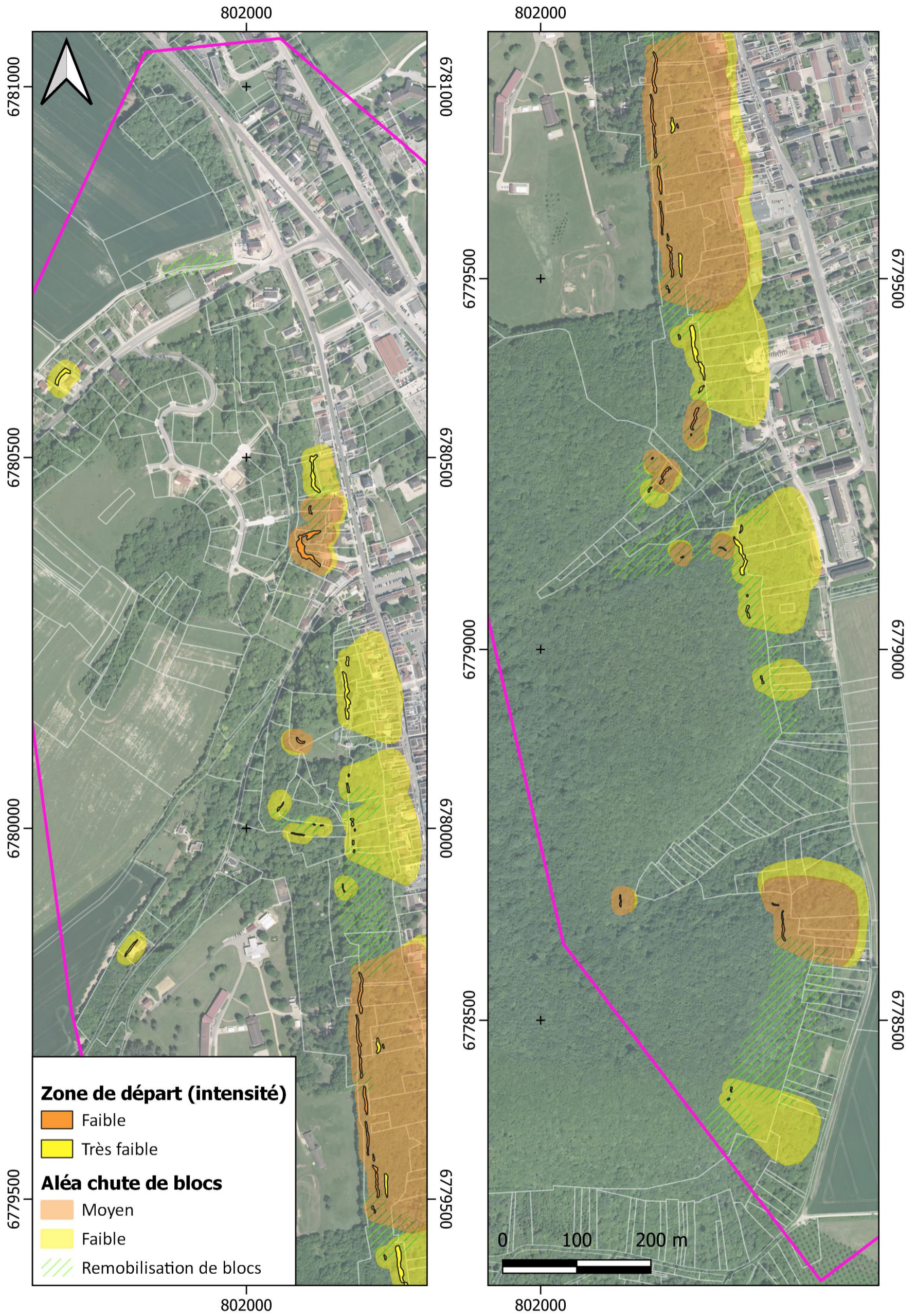


illustration 19 – Cartographie de l'aléa chutes de blocs (et remobilisation de blocs en versant) sur le versant ouest de Bar-sur-Seine

4.7.2. Synthèse

Aucune zone n'est affectée par un aléa fort sur la zone d'étude, ce qui est cohérent avec les observations réalisées sur le terrain et les témoignages recueillis.

Un aléa moyen couvre une surface de près de 37,5 ha (soit environ 47 % de la surface totale couverte par un aléa chute de blocs) et est défini sur plus d'une vingtaine de parcelles bâties (arrière-cours et jardins principalement) en pied de versant et sur plusieurs chemins forestiers en milieu de versant :

- Faubourg de Troyes : parcelles cadastrées AE0242-243, AE0108-109, AE0220 et AE0246 ;
- Grand rue de la Résistance : parcelles cadastrées AI0289, AI0217, AI0278, AI0213-214, AI0248, AI0211, AI0203, AI0201, AI194, AI0296, AI0187-188-189, AI0183, AI0181 et AI0264-265.

De nombreuses parcelles bâties et chemins forestiers sont concernés par un aléa faible. Plus de 43 ha sont concernés par ce niveau aléa (soit près de 53 % de la surface totale concernée par un aléa chute de blocs).

Les voiries ne sont pas impactées par un aléa chute de blocs. La rue présente au nord de la route du Val Saint-Bernard (au sud de la parcelle ZI0042) est cependant sujette au phénomène de remobilisation de blocs en versant. D'une manière générale, l'aléa remobilisation concerne les zones de milieu de versant et concerne plus de 7 ha.

5. Proposition de travaux de mise en sécurité

Une proposition de parades est donnée à titre indicatif pour toutes les zones de départ où un enjeu est concerné par un aléa chute de blocs. Dans ces secteurs « à risque », les phénomènes redoutés (chutes de pierres, chutes de petits blocs) peuvent mettre en danger les personnes et, dans une moindre mesure, les infrastructures (habitations, industries, etc.).

D'une manière générale, il convient de mettre en place des actions de communication et d'information des riverains sur l'aléa chute de blocs. Il pourra par exemple s'agir d'un Porter A Connaissance (PAC) des résultats de la présente étude.

Les préconisations suivantes sont classées en fonction du niveau d'aléa et des enjeux existants ou futurs.

5.1. ZONE EN ALEA FORT

Aucune zone n'a été classée en aléa fort. Pour rappel, l'évaluation de l'aléa est réalisée sur la base de l'état des connaissances actuelles sur la zone d'étude (observations de terrain et témoignages recueillis en 2021 et 2022).

Dans le cas où certains secteurs évolueraient, un classement en inconstructibilité serait préconisé.

5.2. ZONE EN ALEA MOYEN

Plusieurs parcelles bâties sont concernées par un aléa moyen Grand rue de la Résistance et Faubourg de Troyes (pied de versant), principalement des arrière-cours et des jardins, ainsi que des chemins forestiers (milieu de versant).

5.2.1. Recommandations en zone de versant boisé

Il convient dans un premier temps de maintenir l'état boisé du versant. La végétation joue un rôle obstacle à la propagation des blocs. Le déboisement et le défrichement sont donc fortement déconseillés.

La mise en place d'une signalétique aux abords des sentiers et chemins de versant est également recommandé, en particulier à proximité des affleurements. Ils permettront d'informer les personnes qu'elles circulent dans des zones potentiellement dangereuses, sujettes aux chutes de pierres et de petits blocs. Pour rappel, même si très peu ou pas de dommages sont attendus sur le bâti en zone d'aléa moyen, des dommages corporels notables peuvent être engagés.

5.2.2. Recommandations pour l'existant en pied de versant

Des parades passives (type écran, merlon ou fosse de réception) peuvent être mises en place à l'amont des parcelles bâties afin de retenir les pierres et petits blocs chutés en amont des enjeux. Il est par ailleurs recommandé de veiller à l'entretien des ouvrages de protection existants (merlons, murs de soutènement) pour en pérenniser l'efficacité.

Les énergies attendues seront faibles et les propagations de type « roulement » principalement, sans rebonds importants. Des ouvrages de type gabion ou barrière fixe semblent adaptés pour se prémunir du niveau d'aléa évalué.

Des adaptations du bâti existant peuvent également être engagées afin de les rendre plus résilient. Il pourra s'agir de favoriser des façades et toitures adaptées à l'impact de blocs, de rediriger les ouvertures et accès sur les façades non exposées. Dans le cas de Bar-sur-Seine, on évitera donc les accès ouest (en direction du versant).

5.2.3. Recommandations pour les projets futurs

Au regard des volumes de blocs mobilisés (maximum 60 litres), très peu à pas de dommages sont attendus sur le bâti. Les nouvelles constructions sont alors possibles sous certaines conditions pour réduire le risque, notamment en jouant sur la vulnérabilité des constructions.

De la même manière que pour l'existant, il convient donc d'adapter les structures pour prendre en compte la problématique chute de blocs (en amont avec des ouvrages adaptés ou directement sur la construction avec des façades et ouvertures adaptées). Les différents ouvrages devront être dimensionnés et réalisés par un bureau d'étude spécialisé en géotechnique.

5.3. ZONE EN ALEA FAIBLE

De nombreuses parcelles bâties sont concernées par cet aléa Grand rue de la Résistance, Faubourg de Troyes, Faubourg de Chatillon et rue des Maquisards en pied de versant. Des sentiers forestiers en milieu de versant sont également affectés d'un aléa chute de blocs faible.

5.3.1. Recommandations en zone de versant boisé

De la même manière qu'en zone d'aléa moyen, il convient de maintenir l'état boisé du versant, qui agit notamment sur la propagation des blocs.

La mise en place de panneaux d'information (chutes de pierres par exemple) aux abords des affleurements le long des sentiers est préconisé. Pour rappel, des dommages aux personnes peuvent être engagés dès la classe d'aléa faible avec des volumes de blocs largement inférieurs à 50 litres.

5.3.2. Recommandations pour l'existant en pied de versant

Aucune recommandation particulière n'est nécessaire en zone d'aléa faible pour le bâti, très peu ou pas de dommages pouvant être engendrés.

5.3.3. Recommandations pour les projets futurs

De la même manière que pour le bâti existant, aucune recommandation spécifique n'est émise, au regard du peu de dommages pouvant être engendrés.

6. Bibliographie

Berger F., Clouet N., Monnet J-M., Lopez J., Mermin E., Tardif P., Bigot C., Jancke O. (2009) – Expertise trajectographique en 3 dimensions, de l'aléa chute de pierres et de blocs rocheux, pour l'aide à la réalisation de la révision du PPR de la commune de Veyrier-du-Lac

BRGM (2021) – Méthodologie de caractérisation de l'aléa rocheux dans le cadre d'un PPR ou d'un PAC. Note technique MEZAP.

Cerema (2020) – Projet National C2ROP. Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux – Etat de l'art. Collection Connaissances. ISBN 978-2-37180-470-8. 68 p.

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

Levy C. et al. (2021) – ELANA (Energy Line Angle Normalized Area) : un outil d'aide à la cartographie de la propagation des chutes de blocs basée sur la méthode de la ligne d'énergie à différentes échelles. 5th RSS Rock Slope Symposium, Chambéry, 2021

Thuon Y. avec la collaboration de Bollot N. et Le Duy P. (2010) – Inventaire départemental des mouvements de terrain de l'Aube. Rapport final. BRM/RP-58754-FR. 72 p., 31 ill., 3 ann., 1 pl. hors-texte.


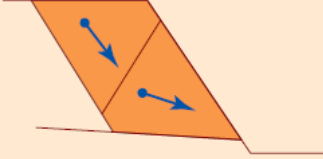
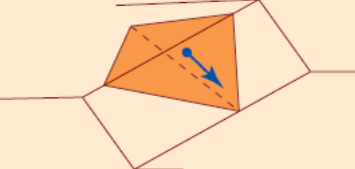
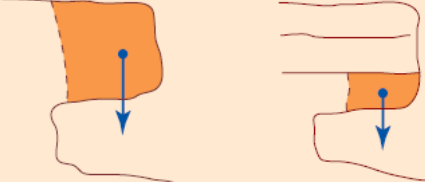

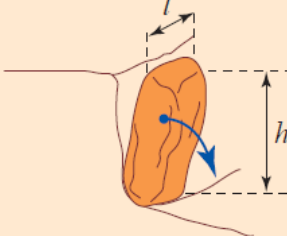
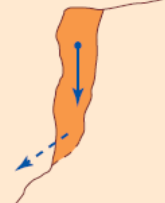
Thuon Y. (2014) – Bar-sur-Aube (10) – Examen des risques de mouvements de terrain au lieu-dit « Ste Germaine ». Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-63522-FR. 14 p., 8 fig.

Thuon Y., Leprêtre F. (2015) - Cartographie de l'aléa glissement de terrain et chute de blocs rocheux. Versants des communes de Fontaine et Bar-Sur-Aube (10). Rapport final. BRGM/RP-65268-FR. 74 pages, 45 illustrations, 3 annexes.

Vernhet Y. (2007) – Carte géologique harmonisée du département de l'Aube. BRGM/RP-55722-FR. 103 p., 3 fig., 4 tabl., 3 pl. hors-texte.

Carte géologique harmonisée au 1/50 000 (feuille n° 1399, Projet Aube)

Annexe 1 Mécanismes de rupture

| Mécanisme d'instabilité | Configuration |
|---|---|
| <p>M1</p> <p>Glissement plan (fig. 6a et 6b)</p> |  |
| <p>M1a</p> <p>Glissement plan composé</p> |  |
| <p>M1b</p> <p>Glissement de dièdre</p> |  |
| <p>M2</p> <p>Rupture de surplomb ou de dalle en toit</p> |  |
| <p>M3</p> <p>Rupture d'écaille en paroi</p> |  |
| <p>M4</p> <p>Basculement de bloc, de panneau ou colonne</p> |  <p>Colonne si $h/l > 2$ Écaille si $h/l < 2$</p> |
| <p>M5</p> <p>Rupture de pied de colonne</p> |  |

La typologie générale des événements chutes de blocs est élaborée à partir des données d'inventaire et des contextes géologiques et morphologiques. Les types de mécanismes de rupture fréquemment rencontrés sont présentés ci-dessous :

M1 – Glissement plan / dièdre

On retrouve le mécanisme de glissement plan et/ou dièdre, et plus particulièrement le glissement banc sur banc, avec suppression de butée de pied régressive, essentiellement sur les escarpements rocheux où les plans de discontinuités sont bien exprimés et s'intersectent de façon à délimiter des compartiments (dièdres). Ce découpage isole des blocs de taille et de forme variable (fonction de l'espacement et des orientations des plans). Généralement, ce type de rupture se rencontre sur des escarpements dont la pente est inclinée mais non sub-verticale, et pour lesquels le pendage des strates est orienté dans le même sens que la pente suivant une inclinaison plus faible que la topographie.

Les conditions de glissement sont liées à :

- Facteurs de prédisposition : orientation relative des discontinuités (plan de glissement de même orientation que celle de la pente du versant) et fracturations orthogonales au plan de glissement, en pendage inverse (rentrant dans le massif) et sub-verticales qui découpent les éléments rocheux latéralement. La nature des joints – i) à remplissage argileux ou ii) peu rugueux avec peu ou pas de remplissage (absence de cohésion d'imbrication) – constitue un facteur aggravant.
- Facteurs d'activité : la présence de fractures ouvertes témoigne de déplacements locaux, signes d'amorce de rupture. Les contrastes thermiques et la végétation arbustive constituent les principaux facteurs d'évolution sensibilisant les masses découpées. Les circulations d'eau lessivant les joints et les altérant, favorisent la fatigue des ponts rocheux assurant la stabilité des masses délimitées. Les zones d'éboulis vifs, fréquentes à l'aval de ce type d'escarpement, sont également des signes d'activité de production de ces zones de départ.

Les masses rocheuses (volumes et géométries) associées à ce type de rupture sont très variables, en fonction de l'organisation locale du réseau de fractures.

M2 – Rupture de surplomb

A la faveur des fracturations rentrantes dans le massif, des masses en surplomb apparaissent localement. Ce type de configuration est rencontré principalement dans les formations sédimentaires tabulaires mais peuvent affecter l'ensemble des faciès. Les faciès soumis à altération différentielle (faciès détritiques, notamment tertiaires de type alternance argilo-conglomératique ou marno-calcaire) sont également très concernés.

Les conditions de mouvement sont liées à :

- Facteurs de prédisposition : orientation relative des discontinuités et départs régressifs depuis le pied des parois abruptes. Les plans de discontinuités préférentiels (stratification ou fracturation) sont sub-verticaux et subhorizontaux et quasi orthogonaux pour permettre la formation de surplombs puis leur rupture. L'encastrement relatif des masses et la continuité des plans de fracturation « rentrants » sont essentiels dans la genèse de ce type de rupture.
- Facteurs d'activité : les contrastes thermiques constituent les principaux facteurs d'évolution sensibilisant les masses prédécoupées. La micro-fissuration des assises encastrées développe l'appel au vide jusqu'à la rupture, initiée systématiquement de façon régressive des pieds vers le haut des parements. Des traces de circulations d'eau sont souvent visibles à l'affleurement, elles apparaissent à la faveur des fractures. La circulation d'eau au sein des fractures accentue la dégradation des joints rocheux.

M3 – Rupture d'écaillage en paroi

Une « écaillage rocheuse » est définie en fonction de sa géométrie. On considère le ratio $R = \text{hauteur} / \text{largeur}$ pour distinguer une écaillage ($R < 2$) d'une colonne ($R > 2$). La rupture d'écaillage en paroi est un processus de cisaillement plutôt au niveau de la matrice (en cas de rupture le long d'un joint le processus M1 est généralement retenu). Le détachement d'écaillage rocheuse se traduisant fréquemment par une fragmentation importante du fait même de la géométrie des éléments. La fracturation initiale de la roche et sa résistance mécanique conditionne cette fragmentation (outre la hauteur de chute). Des configurations topographiques très redressées (à sub-verticales) sont nécessaires pour justifier de ce mécanisme. Lorsque qu'une simple pellicule altérée (quelques centimètres) se détache suivant ce processus on parle aussi de « desquamation ».

Les conditions de rupture sont liées à :

- Facteurs de prédisposition : nature géologique des formations et altération/fracturation. Fragilité de ponts rocheux.
- Facteurs d'activité : Evolution possible sous l'action de l'altération des formations par la pluie, les contrastes thermiques, la présence de végétation, les venues d'eau.

M4 – Basculement de colonne ou de panneau

Ce mécanisme de rupture s'observe en présence d'une fracturation sub-verticale qui découpe le massif en colonnes, aux formes élancées. Des colonnes peuvent également être rencontrées dans des terrains soumis à altération différentielle (« cheminées de fées » ou « demoiselles coiffées »). Les conditions de rupture sont liées à :

- Des facteurs de prédisposition : orientation relative des discontinuités au sein de la masse rocheuse (discontinuités mécaniques ou tectoniques). Le basculement d'éléments peut résulter d'une initiation en glissement plan (voire dièdre) ou plus fréquemment par évolution de l'assise (rupture en compression ou érosion différentielle).
- Des facteurs d'activité : la présence de végétation et de circulations d'eau est autant de facteurs déclenchant le phénomène. Le basculement peut être également lié à des ruptures (micro-ruptures) de l'assise.

La propagation suivant ce mécanisme est majoritairement faible (chute de la hauteur de colonne sur replat) mais en cas de fragmentation et/ou de pente aval significative, les trajectoires peuvent vite évoluer (effet « fronde » avec éjectas).

M5 – Rupture de pied de colonne

Ce mécanisme de rupture s'initie en pied de colonnes ou possiblement de panneaux par compression généralement. La rupture amorcée l'évolution du mouvement consiste à un écroulement de la masse sur elle-même ou à des ruptures en cascade, sans basculement. La propagation est généralement faible mais bien naturellement dépendants de la morphologie avale.

Les conditions de rupture sont liées à :

- Des facteurs de prédisposition : une hétérogénéité géométrique (assise moins large que la colonne sus-jacente par exemple) ou mécanique (niveau peu résistant ou sensible à l'érosion en pied). Le développement de la densité de fracturation constitue également un facteur de prédisposition. A noter que le développement de ce type de rupture peut s'accompagner de

précurseurs tels que l'apparition de micro-fissuration au niveau du pied, zone de concentration des contraintes.

- Des facteurs d'activité : la présence de circulations d'eau notamment est un déclenchant du phénomène.

M6 – Remobilisation de blocs en versant

Les versants peuvent être marqués par la présence de blocs « posés » dans les pentes, en aval des barres rocheuses, témoins d'évènements passés fréquemment. Ces éléments, de volume unitaire variable, issus du démantèlement des barres rocheuses en amont voire de glissements de terrain ou de phénomènes de transport (charriage torrentiel, dépôts de moraines glaciaires) sont susceptibles par remobilisation (par altération, érosion progressive et ravinement) de se propager dans les pentes.

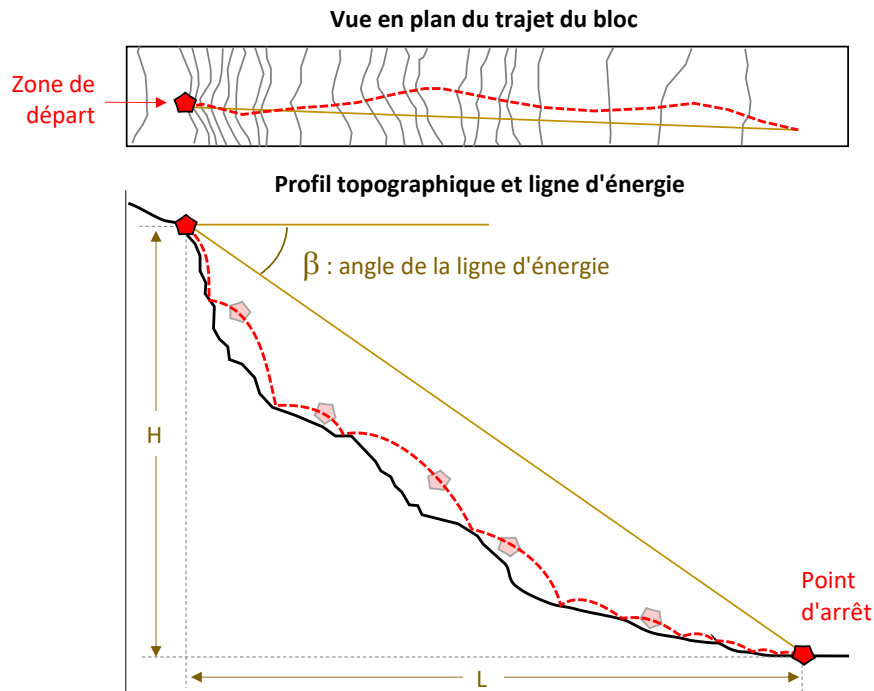
Les conditions de mouvement de ces compartiments sont liées à :

- Des facteurs de prédisposition : position et forme du bloc, érodabilité de l'assise, morphologie de la zone de dépôt et encastrement relatif de la masse dans le sol ;
- Facteurs d'activité : le ravinement est le moteur essentiel de déstabilisation par affouillement de l'assise. Les incendies peuvent être un facteur potentiellement aggravant qui accentue l'érosion après les précipitations.

Annexe 2 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.

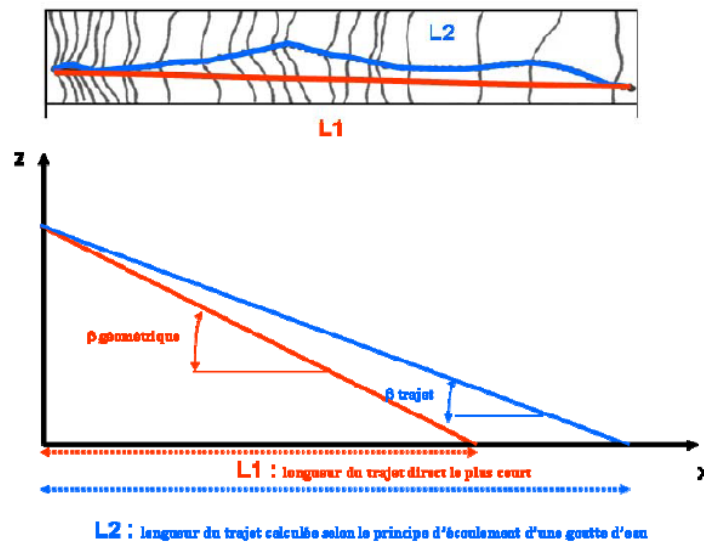


Principe de la ligne d'énergie (angle d'atteinte)

Depuis sa formalisation, ce principe a fait l'objet de nombreuses études. Différents auteurs se sont, entre autre, 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 ci-dessous 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.

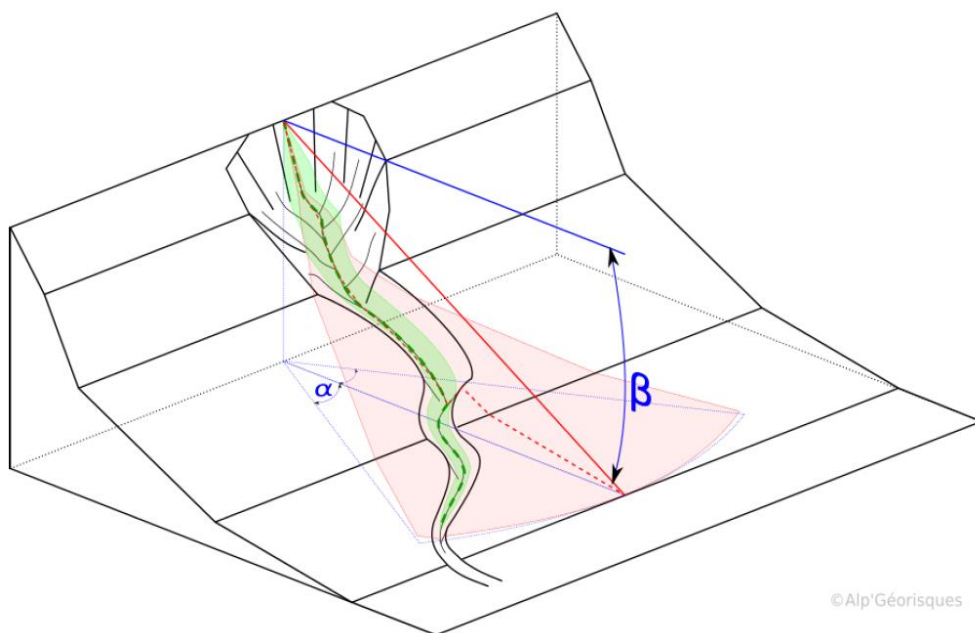


Principe de calcul de la ligne d'énergie selon l'angle géométrique (reach angle) ou l'angle de trajet (travel angle)

Plusieurs auteurs ont travaillé sur la détermination de l'angle β de la ligne d'énergie selon le principe de Heim (1932). A partir de l'analyse de plusieurs milliers d'éboulements rocheux, le BRGM et l'INRAe ont proposé (MEZAP) des plages de valeurs plausibles de l'angle de la ligne d'énergie selon différentes configurations topographiques. 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 l'analyse.

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. Le BRGM a développé un outil d'aide à la cartographie sur ce principe en adaptant les valeurs de ligne d'énergie à la configuration des versants en se fondant sur les travaux de la MEZAP (©ELANA).

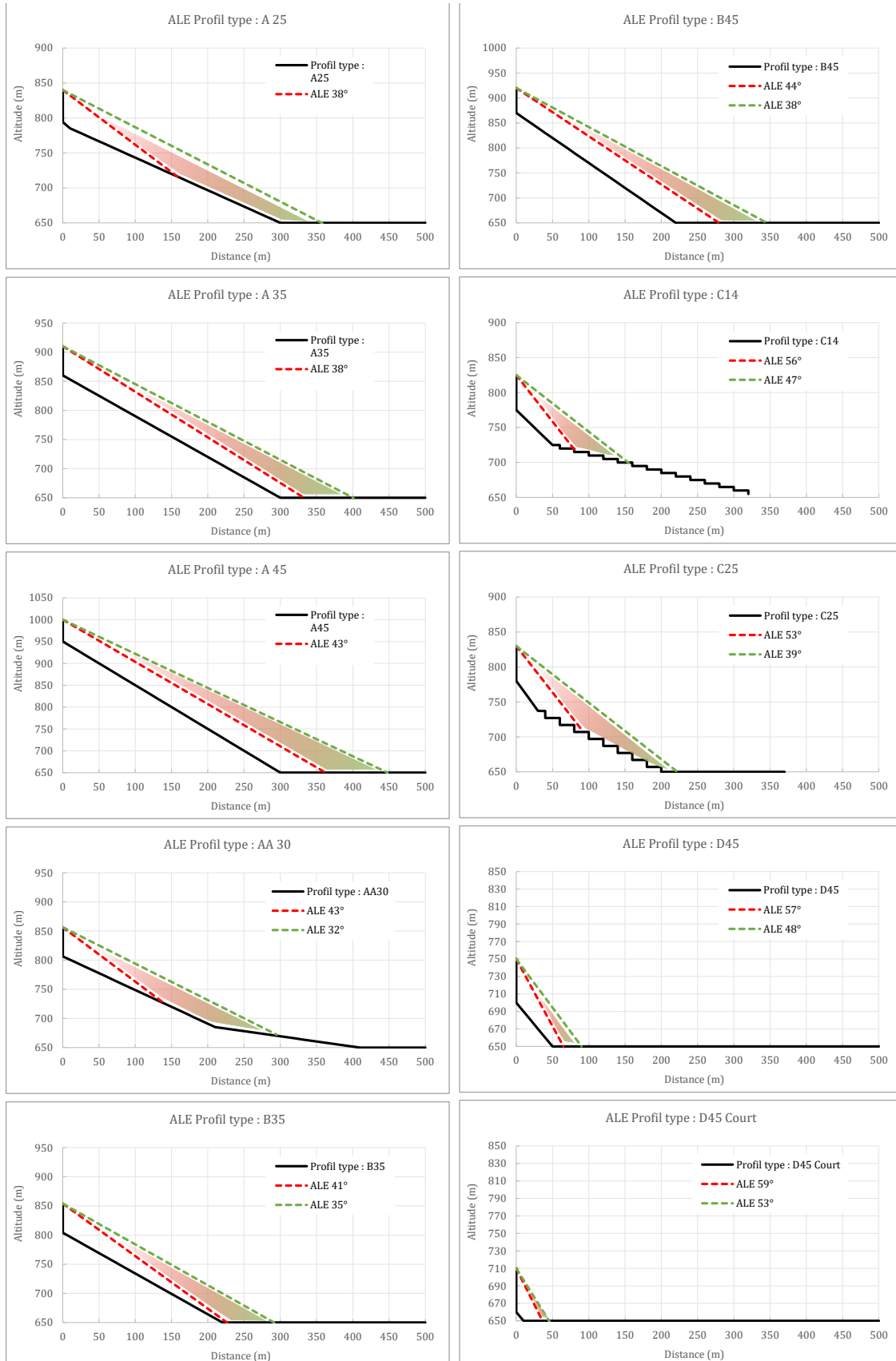
Il convient de rappeler que l'application en 3D de la méthode de la ligne d'énergie a des limites d'utilisation et ce notamment lorsque la topographie locale du versant peut influencer fortement sur la propagation.



*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.

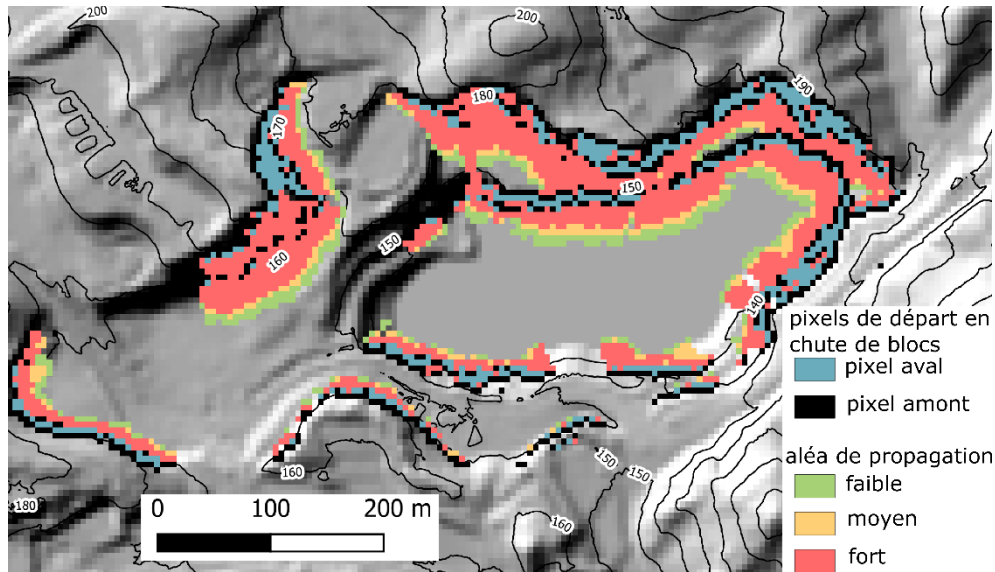
Cartographie de l'aléa chute de blocs sur la commune de Bar-sur-Seine (10).



Représentation graphique des emprises de propagation maximales probables pour différentes configurations topographiques

Annexe 3 ELANA, outil d'aide à la cartographie de la propagation des chutes de blocs base sur la méthode de la ligne d'ENERGIE

ELANA a été développé pour utiliser les lois empiriques 2D présentées dans la section précédente afin de cartographier spatialement la probabilité de propagation des chutes de blocs. ELANA utilise les données topographiques d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), ainsi qu'un raster de même dimension où l'utilisateur déclare les pixels qu'il considère comme zone de départ (Figure 1). ELANA permet d'obtenir le raster des zones de propagation faible, moyenne et forte à partir de lois empiriques proposées (Figure 1). Ces lois empiriques étant applicables sur des profils 2D, le logiciel interpole des profils autour de chaque pixel de départ afin de pouvoir déterminer l'emplacement des limites de propagation pour chaque profil. Afin de limiter le temps de calcul, cette opération est effectuée uniquement pour les pixels des zones de départ classées « amont ».



Les étapes suivantes de calculs sont :

- la recherche de la direction de plus grande pente autour de chaque pixel de départ «amont» par pas de 1° (Figure 2a) ;
- la sélection des directions autour de la plus grande pente dans un cône d'ouverture 2 fois α (α étant défini par l'utilisateur) et pour des pentes initiales supérieures à 26° (Figure 2a) ;
- l'interpolation de profils topographiques depuis le pixel de départ pour toutes les directions sélectionnées et avec une discrétisation horizontale de la taille de la maille (Figure 2a);
- le calcul des couples (A_n, β) obtenus pour chaque point des profils topographiques (Figure 2b) et leur comparaison avec les lois empiriques. En chaque point du profil, on précise la probabilité de propagation (forte, moyenne, faible ou nulle, Figure 2b);
- le report des probabilités de propagation obtenues pour chaque profil (Figure 2c) dans un « raster de propagation » (Figure 2d). Les résultats sont conservateurs vis-à-vis de l'aléa de propagation : la probabilité retenue pour chaque pixel est la valeur la plus défavorable obtenue pour tous les profils interceptant le pixel.

Tout au long du processus, des tests sont réalisés afin de vérifier la pertinence ou les limites des calculs réalisés (longueur de profils, résolution spatiale finale, etc.).

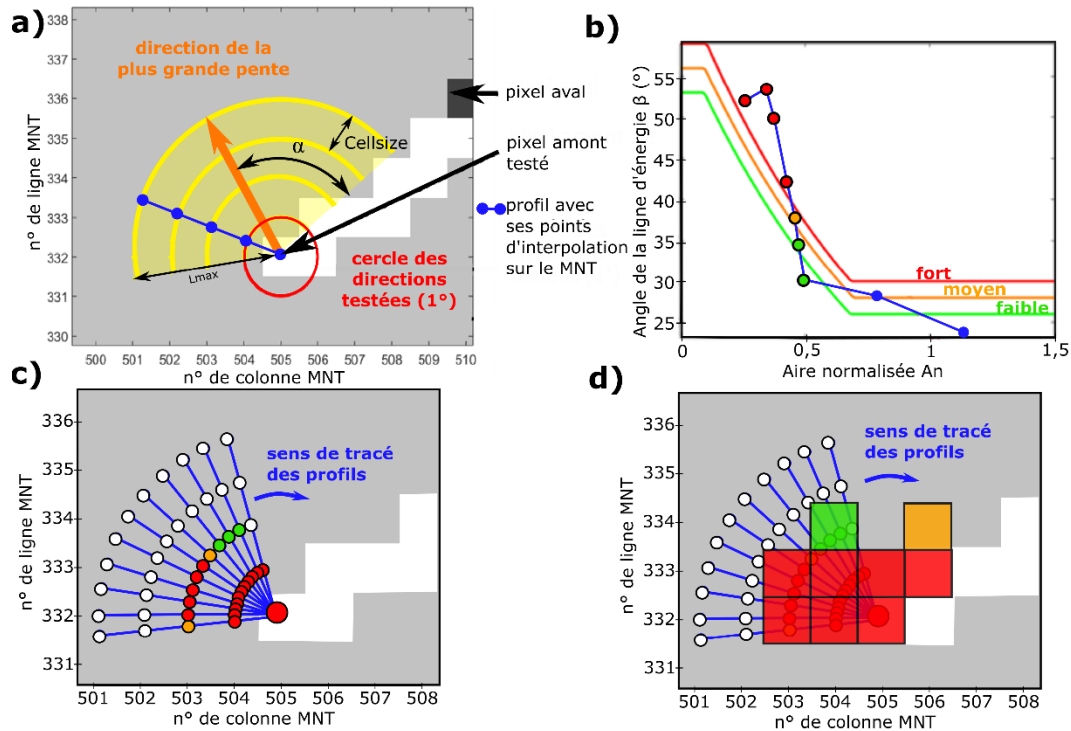


Figure 2- a) Exemple des étapes d'ELANA pour un pixel de départ en chute de blocs : recherche de la direction de plus grande pente autour du pixel, sélection des directions autour de la plus grande pente dans un cône d'ouverture de 2 fois α et exemple de l'interpolation d'un profil topographique de longueur L_{max} . b) Calcul des couples (A_n, β) pour chaque point du profil et comparaison avec les lois empiriques de propagation. En chaque point du profil, on précise la probabilité de propagation (forte, moyenne, faible ou nulle). c) et d) Reports des probabilités de propagation obtenues pour différents profils dans le raster des probabilités de propagation. La probabilité retenue est la plus défavorable obtenue pour tous les profils interceptant le pixel.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Grand Est – Site de Reims

1 rue Maurice Hollande, Cellule Bulle

51100 – Reims – France

Tél. : 03 26 84 47 70

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm