

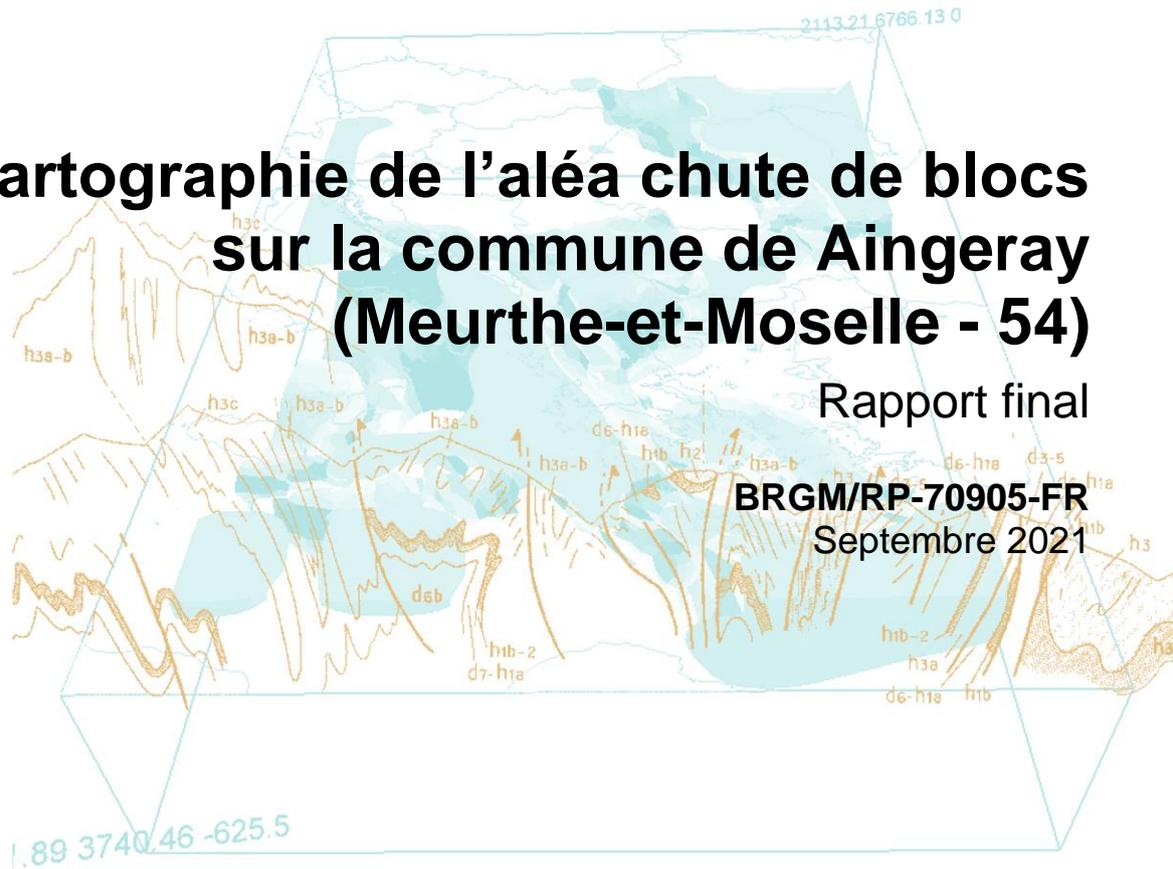


Cartographie de l'aléa chute de blocs sur la commune de Aingeray (Meurthe-et-Moselle - 54)

Rapport final

BRGM/RP-70905-FR

Septembre 2021



Direction
Départementale
des Territoires
de Meurthe et Moselle



Géosciences pour une Terre durable

brgm



Cartographie de l'aléa chute de blocs sur la commune de Aingeray (Meurthe-et-Moselle - 54)

Rapport final

BRGM/RP-70905-FR

Septembre 2021

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM AP18NCY007

Théo Krauffel

Vérificateur :

Nom : Clara Levy

Fonction : Ingénieure
géotechnicienne

Date : 01/09/2021

Signature :

Approbateur :

Nom : Dominique Midot

Fonction : Direction régional Grand
Est

Date : 23/09/21

Signature :

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

Contact : qualite@brgm.fr



**Direction
Départementale
des Territoires
de Meurthe et Moselle**



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : cartographie, aléa, chute de blocs, Aingeray, Moselle, Grand Est

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

Krauffel T. (2021) – Cartographie de l'aléa chute de blocs sur la commune de Aingeray (Meurthe et Moselle – 54). Rapport final. BRGM/RP-70905-FR, 156 p., 81 ill., 9 ann., 2 planches hors-texte., 1 CD-ROM.

© BRGM, 2021, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Suite à un inventaire départemental (Moiriat D. et al., 2008), la commune d'Aingeray a été identifiée comme appartenant à l'un des quatorze bassins à risque de chutes de blocs. Cette cartographie, à l'échelle du 1/50 000^{ème}, plaçait plusieurs parties de la commune en zone d'aléa de niveau moyen à faible (Illustration 1).

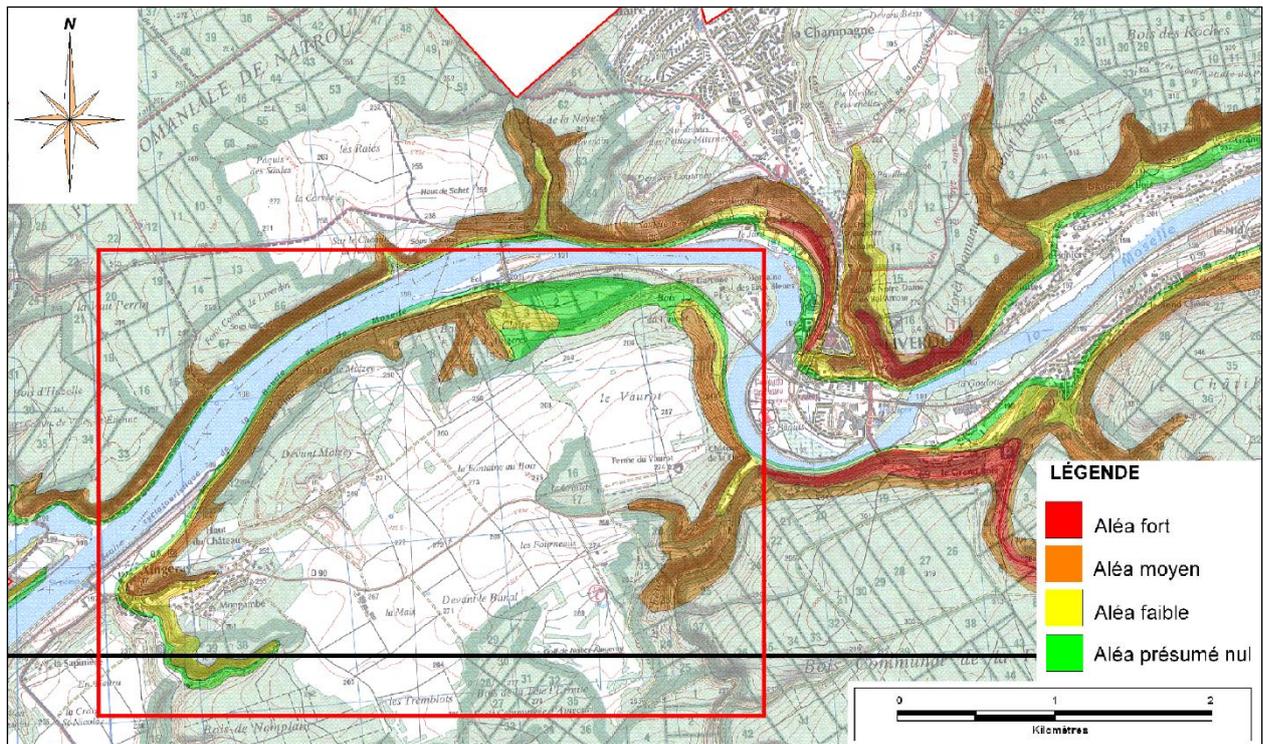


Illustration 1 – Cartographie de l'aléa départemental sur la commune de Aingeray (issue du rapport BRGM de 2008 (Moiriat D. et al., 2008))

Au vu des zones d'aléa précédemment mises en évidence et des enjeux sur la zone urbanisée, la DDT 54 souhaite améliorer la caractérisation de l'aléa lié à ce phénomène.

Cette étude a pour objectif de réaliser une étude cartographique détaillée de l'aléa chute de blocs à l'échelle communale. Les phénomènes de glissement de terrain, de coulée de boue, de retrait-gonflement, les affaissements et effondrements liés à la présence de cavités naturelles ou anthropiques ne seront pas pris en compte dans cette étude.

L'approche utilisée pour l'évaluation de l'aléa est de type expert. La cartographie de l'aléa est basée sur la méthode MEZAP¹ adaptée au contexte local. Sur la base de la cartographie de l'aléa, un ciblage des zones à risque a été réalisé et des propositions de parades ont été formulées. Pour ce faire, la vulnérabilité des enjeux, scindés en deux catégories, bâtiment et voie de communication, a été évaluée. Le croisement des classes d'aléa et de vulnérabilité a permis de hiérarchiser les zones par priorité de mise en œuvre des solutions de parade.

Un levé LIDAR (caractérisation topographique haute résolution) aéroporté a été réalisé par l'entreprise Helimap. Ce levé a permis de produire un modèle numérique de terrain (MNT) et un modèle numérique de surface (MNS) à la maille de 50 cm. Le levé LIDAR a permis d'identifier préliminairement les zones de départ ainsi que d'améliorer l'évaluation des zones de propagation des chutes de blocs.

Cette cartographie a permis d'identifier 67 escarpements considérés comme des zones de départ en chute de blocs sur la commune d'Aingeray, ainsi que 17 phénomènes historiques de chute de blocs. Bien que cet inventaire ne soit pas exhaustif, il permet de cibler les zones particulièrement exposées et permet de quantifier les volumes potentiellement mobilisables.

Les données récupérées sur le terrain et les données topographiques ont permis de définir pour chacune des zones de départ, l'indice d'intensité (ce qui part) et l'indice d'activité (avec quelle fréquence), ainsi que la probabilité d'atteinte. Le croisement de ces deux indices avec la probabilité d'atteinte a permis d'évaluer l'aléa chute de blocs.

Le territoire communal d'Aingeray d'une surface de 12,9 km² est impacté par de l'aléa chute de blocs sur 147 195 m² soit 1,13 % de sa surface :

- 0,08 % du territoire communal en aléa faible ;
- 0,19 % du territoire communal en aléa modéré ;
- 0,72 % du territoire communal en aléa élevé ;
- 0,14 % du territoire communal en aléa très élevé.

Sur la base de la cartographie de l'aléa, un ciblage des zones à risque a été réalisé et des propositions de parades ont été formulées. Pour ce faire, la vulnérabilité des enjeux, scindés en deux catégories, bâtiment et voie de communication, a été évaluée. Le croisement des classes d'aléa et de vulnérabilité a permis de hiérarchiser les zones par priorité de mise en œuvre des solutions de parade. 12 secteurs ont été hiérarchisés avec les priorités suivantes au niveau communal :

- 12 bâtiments sont classés en priorité très forte ;
- 8 bâtiments sont classés en priorité forte ;
- 17 m de voie de communication (chemin) sont classés en priorité forte ;
- 2 580 m de voie de communication sont classés en priorité moyenne dont 17 m concernant une route communale, 18 m concernant la route départementale n°90 et 2 545 m concernant des chemins ;
- 312 m de voie de communication sont classés en priorité faible dont 10 m concernant une route communale et la route départementale n°90, ainsi que 302 m concernant des chemins.

¹ Groupe de travail réuni pour la détermination d'une Méthodologie de Zonage de l'Aléa chute de Pierres.

Sommaire

1. Contexte général	13
1.1. OBJET	13
1.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	14
1.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE	15
1.3.1. Description des formations géologiques.....	15
1.3.2. Description des formations superficielles	18
1.4. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE.....	18
1.4.1. Généralités	18
1.4.2. Aquifères	19
2. Collecte et structuration des données.....	21
2.1. LEVE LIDAR	21
2.2. INVENTAIRE DES PHENOMENES HISTORIQUES.....	23
2.3. ETUDE ANTERIEURE.....	27
3. Rappel sur l'aléa chute de blocs et éboulement	29
3.1. TERMINOLOGIE	29
3.2. EVOLUTION VERS LA RUPTURE	30
3.3. FACTEURS INTERVENANT DANS LA CHUTE DE BLOCS.....	30
3.3.1. Les facteurs de prédisposition intrinsèques au massif rocheux.....	30
3.3.2. Les facteurs de prédisposition environnementaux	31
3.4. TYPOLOGIE DES RUPTURES	33
3.4.1. Typologie des ruptures	33
3.5. PROPAGATION.....	37
4. Evaluation de l'aléa chute de blocs	39
4.1. METHODE.....	39
4.2. RECONNAISSANCE DES ZONES DE DEPART.....	40
4.2.1. Géologie	41
4.2.2. Morphologie.....	41
4.2.3. Escarpements.....	44
4.2.4. Carrière d'Aingeray	46
4.2.5. Synthèse.....	46

4.3. CARTOGRAPHIE DES ZONES DE REcul.....	46
4.4. INDICE D'INTENSITE	47
4.5. INDICE D'ACTIVITE	50
4.6. SYNTHÈSE DES INDICES D'INTENSITE ET D'ACTIVITE	51
4.7. PROBABILITE DE PROPAGATION	51
4.7.1. Méthode de la ligne d'énergie.....	52
4.7.2. Synthèse aléa de propagation	56
4.8. ZONE DE REcul ET INCERTITUDE DE POSITIONNEMENT	56
4.8.1. Recul par à-coups lié à des chutes de blocs successives.....	56
4.8.2. Application d'une zone tampon pour le recul et l'incertitude de positionnement	56
4.9. PROBABILITE D'ATTEINTE DE CHUTE DE BLOCS	57
4.10. ALEA DE CHUTE DE BLOCS.....	57
4.11. LIMITE DE LA CARTE ET ECHELLE DE RESTITUTION.....	60
5. Evaluation du risque et parades associées	61
5.1. EVALUATION ET HIERARCHISATION DU RISQUE	61
5.1.1. Vulnérabilité des enjeux	61
5.1.2. Analyse des enjeux	61
5.1.3. Hiérarchisation des secteurs	62
5.2. PROPOSITION DE PARADES PAR SECTEUR.....	65
5.2.1. Méthode	65
5.2.2. Fiche synthétiques des secteurs et des parades associées.....	65
6. Conclusion	85
7. Bibliographie.....	87

Liste des illustrations

Illustration 1 – Cartographie de l'aléa départemental sur la commune de Aingeray (issue du rapport BRGM de 2008 (Moiriat D. et al., 2008)	5
Illustration 2 – Topographie de la commune de Aingeray (fond scan 25 de l'IGN).....	14
Illustration 3 – Photo du pli synclinal d'Aingeray lors du relevé de terrain (Annotations d'après Didier Zany, 2008).....	15
Illustration 4 – Extrait de la carte géologique harmonisée à 1/50000 du département de Meurthe-et-Moselle sur la commune d'Aingeray (source BRGM, fond IGN scan25)	16
Illustration 5 – Colonne lithostratigraphique des formations présentes à Aingeray	17
Illustration 6 – Principaux éléments de l'hydrographie et de l'hydrogéologie sur la commune d'Aingeray (source BRGM, fond IGN scan25).....	19
Illustration 7 – Modèle numérique de surface ombragé obtenu à partir du levé LIDAR au pas de 0,5 m avec représentation des enjeux.....	22
Illustration 8 – Cartographie des pentes à partir du levé LIDAR au pas de 0,5 m	23
Illustration 9 – Phénomène P1, éboulement de volume total compris entre 1 et 5 m ³ , observé lors de la campagne terrain le 27/04/2021 (lambert93 : 919719.60,6850890.37)	25
Illustration 10 – Phénomène P6, bloc de volume compris entre 0,25 et 1 m ³ observé lors de la campagne de terrain le 27/04/2021 (lambert93 : 919552.20,6851867.03)	25
Illustration 11 - Bloc P13 de volume compris entre 0,05 et 0,25 m ³ observé lors de la campagne de terrain le 29/04/2021 (lambert93 : 921567.20,6854133.78)	26
Illustration 12 - Phénomène P17, bloc de volume inférieur à 0,05 m ³ observé lors de la campagne de terrain le 30/04/2021 (lambert93 : 921135.676,6853048.552)	26
Illustration 13 – Phénomènes de chute de bloc observés lors du relevé de terrain (fond scan 25 de l'IGN, 1/25 000).....	27
Illustration 14 – Extrait de la cartographie chute de bloc à l'échelle départementale sur la commune d'Aingeray (fond IGN scan 25, Moiriat et al. 2008).....	28
Illustration 15 – Terminologie de l'aléa rocheux en fonction des volumes mobilisés	29
Illustration 16 - Principaux processus d'évolution des compartiments rocheux, d'après LCPC (Effendiantz L. et al., 2004).....	32
Illustration 17 - Schéma des principaux mécanismes de rupture (Dussauge-Peisser, 2002)	33
Illustration 18 – Phénomène de chute de blocs - typologie.....	34
Illustration 19 – Dièdre – Affleurement A1.....	35
Illustration 20 - Surplomb – Affleurement A4.....	36
Illustration 21 – Basculement de bloc – Affleurement A5.....	37
Illustration 22 – Inventaire des zones de départs potentiels sur MNT avec la définition d'une valeur de pente seuil α de 57,9° (fond carte ombragée du MNT)	42
Illustration 23 – Inventaire des zones de départ sur MNT avec la définition d'une valeur de pente seuil α de 57,9°, affiné par post-traitement (reclassement manuel d'après des informations de terrain ou photographiques)	43
Illustration 24 – Reconnaissance des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain (fond scan 25 de l'IGN).....	45
Illustration 25 – Définition des classes d'intensité de l'aléa rocheux en fonction du volume et du potentiel de dommages (source : document MEZAP 2021).....	47

Illustration 26 – Identification de blocs potentiellement mobilisables lors du relevé terrain (fond scan 25 de l'IGN, 1/25 000).....	49
Illustration 27 – Définition des classes d'indice d'activité (source : document MEZAP 2021)	50
Illustration 28 - Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β (d'après MEZAP).....	52
Illustration 29 - Représentation schématique de la méthode de cônes (d'après Jaboyedoff et Labiouse, 2011).....	53
Illustration 30 – Localisation du profil topographique au droit du phénomène P13 (fond scan 25 IGN)	55
Illustration 31 – Profil topographique et enveloppes de propagation au droit du phénomène P13, obtenu par méthode de la ligne d'énergie	55
Illustration 32 – Matrice de probabilité d'atteinte (source : document MEZAP 2021)	57
Illustration 33 – Matrice d'évaluation de l'aléa (source : d'après document MEZAP 2021)	57
Illustration 34 – Croisement des données sur la commune d'Aingeray	58
Illustration 35 – Carte de l'aléa chute de blocs sur la commune d'Aingeray (fond Scan25 de l'IGN)	59
Illustration 36 – Définition des zones de priorités des bâtiments pour la mise en place de parades	62
Illustration 37 – Définition des zones de priorités des voies de communication pour la mise en place de parades	62
Illustration 38 – Hiérarchisation des secteurs pour l'évaluation du risque en fonction des niveaux de priorités	63
Illustration 39 – Localisation des secteurs pour l'évaluation du risque sur la commune d'Aingeray	64
Illustration 40 – Légende des cartes par secteur	65
Illustration 41 – Tableau récapitulatif des enjeux par secteur à risque au sein de la commune de Aingeray	86
Illustration 42 – Caractérisation des escarpements observés sur le terrain.....	96
Illustration 43 - Caractérisation de l'aléa des escarpements observés sur le terrain	98
Illustration 44 - Carte de reconnaissance des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain (1/25 000).....	101
Illustration 45 - Carte de reconnaissance « A » des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain	102
Illustration 46 - Carte de reconnaissance « B » des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain	103
Illustration 47 - Carte de reconnaissance « C » des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain	104
Illustration 48 - Carte de reconnaissance « D » des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain	105
Illustration 49 - Carte de reconnaissance « E » des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain	106
Illustration 50 - Fiche affleurement A58.....	109
Illustration 51 - Fiche affleurement A59.....	110
Illustration 52 - Fiche affleurement A63.....	111

Illustration 53 - Fiche affleurement A4.....	112
Illustration 54 - Fiche affleurement A26.....	113
Illustration 55 - Fiche affleurement A55.....	114
Illustration 56 - Fiche affleurement A39.....	115
Illustration 57 - Liste des blocs potentiellement mobilisables identifiés sur le terrain	119
Illustration 58 - Liste des phénomènes de chute de blocs identifiés sur le terrain	123
Illustration 59 - Carte de localisation des phénomènes observés sur le terrain (1/17 000)	124
Illustration 60 - Carte de propagation sur la commune d'Aingeray (1/17 000, fond Scan25 de l'IGN)	127
Illustration 61 - Carte de propagation "A", (fond Scan25 de l'IGN)	128
Illustration 62 - Carte de propagation "A", (fond orthophotographie, 2019)	129
Illustration 63 - Carte de propagation "B", (fond Scan25 de l'IGN)	130
Illustration 64 - Carte de propagation "B", (fond orthophotographie, 2019)	131
Illustration 65 - Carte de propagation "C", (fond Scan25 de l'IGN)	132
Illustration 66 - Carte de propagation "C", (fond orthophotographie, 2019)	133
Illustration 67 - Carte de propagation "D", (fond Scan25 de l'IGN)	134
Illustration 68 - Carte de propagation "D", (fond orthophotographie, 2019)	135
Illustration 69 – Carte de l'aléa chute de blocs sur la commune d'Aingeray (1/17 000, fond Scan25 de l'IGN).....	139
Illustration 70 – Carte de l'aléa chute de blocs "A" (fond Scan25 de l'IGN).....	140
Illustration 71 – Carte de l'aléa chute de blocs "A" (fond orthophotographie, 2019).....	141
Illustration 72 – Carte de l'aléa chute de blocs "B" (fond Scan25 de l'IGN).....	142
Illustration 73 – Carte de l'aléa chute de blocs "B" (fond orthophotographie, 2019).....	143
Illustration 74 – Carte de l'aléa chute de blocs "C" (fond Scan25 de l'IGN).....	144
Illustration 75 – Carte de l'aléa chute de blocs "C" (fond orthophotographie, 2019)	145
Illustration 76 – Carte de l'aléa chute de blocs "D" (fond Scan25 de l'IGN).....	146
Illustration 77 – Carte de l'aléa chute de blocs "D" (fond orthophotographie, 2019)	147
Illustration 78 - Exemple de parades actives.....	151
Illustration 79 - Exemple de parades passives.....	152
Illustration 80 – Exemple des résultats fourni par ELANA à partir du MNT 5 m d'une ancienne carrière et d'un raster de même dimension où l'utilisateur déclare les pixels de départ en chute de blocs. ELANA classe les pixels de départ en pixels « amont » et « aval » et permet d'obtenir le raster des zones de propagation faible, moyenne et fortes à partir des lois empiriques proposées.....	154
Illustration 81 – 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 2α 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 (extrêmement forte, très forte, forte, moyenne, faible ou nulle). c) et d) Reports des probabilités de propagation obtenus 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..... 154

Liste des annexes

Annexe 1 : Identification de quelques escarpements sur le terrain et caractérisation de leur aléa (liste non exhaustive)	89
Annexe 2: Carte de reconnaissance des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain (fond scan 25 de l'IGN).....	99
Annexe 3 : Fiches des escarpements types réalisées à partir des données acquises sur le terrain	107
Annexe 4 : Liste des blocs potentiellement mobilisables identifiés sur le terrain	117
Annexe 5 : Liste des phénomènes de chute de blocs identifiés sur le terrain	120
Annexe 6 : Carte de propagation.....	126
Annexe 7 : Carte de l'aléa chute de blocs	137
Annexe 8 : Tableaux synthétiques des parades pour les chutes de blocs	149
Annexe 9 : ELANA (Energy Line Angle Normalized Area)	153

1. Contexte général

1.1. OBJET

A la demande de la DDT de la Meurthe-et-Moselle, le BRGM a été sollicité afin de mener une étude de l'aléa chute de blocs sur la commune d'Aingeray (carte d'aléa au 1/5 000^{ème}). Ce rapport présente un état actualisé des connaissances sur la commune d'Aingeray intégrant une compilation des archives disponibles, les résultats des recherches sur le terrain et des enquêtes réalisées auprès des services de la mairie.

La réalisation de cette étude est structurée en deux parties : une recherche informative et une phase d'évaluation de l'aléa. Il s'agira de réaliser une étude détaillée suivant une démarche de type expert. L'objectif est de réaliser :

- une cartographie des événements historiques avec leurs descriptions ;
- une cartographie de l'aléa chute de blocs au 1/ 5 000^{ème} ;
- la hiérarchisation des sites à risques et la définition de bonnes pratiques et de types de parades les plus adaptées, à priori, pour leur mise en sécurité.

Ne seront pas pris en compte les phénomènes concernant les glissements circulaires, les glissements plans, les glissements pelliculaires, le fluage, la reptation et la solifluxion, les phénomènes de retrait-gonflement, les affaissements et effondrements liés à la présence de cavités naturelles ou anthropiques ainsi que les coulées de boue.

La cartographie de l'aléa chute de blocs sera établie en fonction des escarpements rocheux d'origine naturelle. L'aléa lié aux chutes de pierres qui pourraient provenir de murs délabrés, de bâtiments et d'anciens forts militaires ne sera pas cartographié.

Au regard des nombreuses zones de départ situées sur des propriétés privées et/ou masquées par des bâtiments depuis les accès publics, il n'a pas été possible de tous les identifier.

L'approche utilisée pour l'évaluation de l'aléa est de type expert. Cette analyse est basée sur des observations in-situ et la bibliographie existante. La cartographie de l'aléa chute de blocs s'est basée sur la méthode MEZAP adaptée au contexte local. La méthode de la ligne d'énergie automatique via le programme ELANA a été mise en œuvre pour évaluer l'enveloppe des zones de propagation et les probabilités d'atteintes des blocs.

Le travail a été effectué en cinq étapes :

- levé LIDAR ;
- recherche d'évènements historiques ;
- reconnaissance des zones de départ ;
- évaluation de l'aléa ;
- ciblage des zones à risque et détermination de l'aléa détaillé sur ces zones avec proposition de type de parades.

1.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE

La commune d'Aingeray s'étend sur environ 12,9 km² en Meurthe et Moselle. La zone urbaine est principalement située à l'ouest de la commune (illustration 2), en bord de rive droite de la Moselle, le long de laquelle parcourt la voie ferrée. Le reste de la commune est recouvert en majorité par des terres agricoles mais également par les Bois de la Claire, les Bois des Haiottes, les Bois de Namplain et les bois de la Tête l'Ermitte. L'altitude varie entre 190 m au nord au niveau de la Moselle et 290 m à l'est de la commune au Golf de Nancy-Aingeray. La Moselle délimite la frontière nord de la commune, elle s'écoule du sud-ouest au nord-est d'Aingeray.

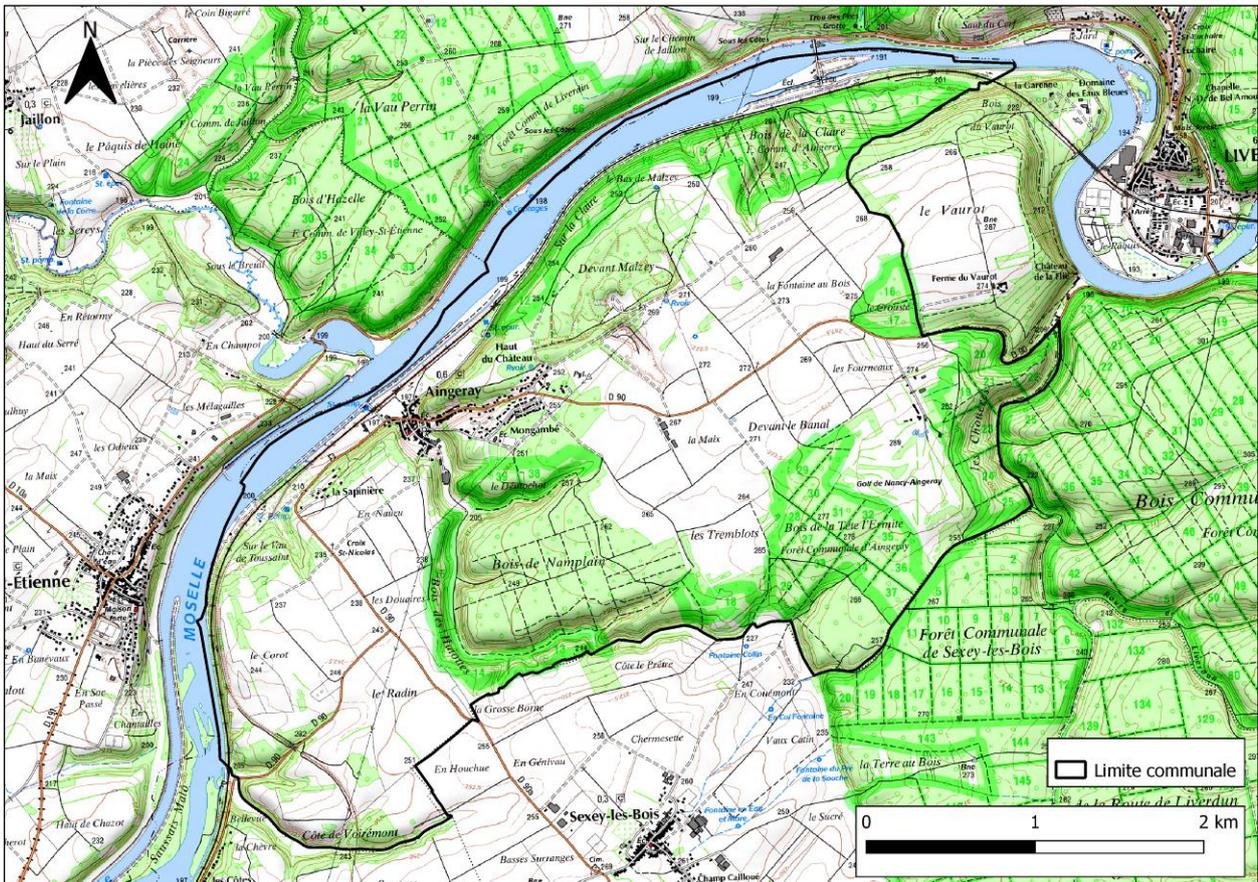


Illustration 2 – Topographie de la commune de Aingeray (fond scan 25 de l'IGN)

1.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE

1.3.1. Description des formations géologiques

D'un point de vue géologique, la commune est marquée par une succession de couches de sédiments déposés par la mer à l'ère Secondaire (Mésozoïque), pendant la période du Jurassique, et plus précisément à l'époque du Dogger (Jurassique moyen), aux étages du Bathonien et du Bajocien, entre environ -172 et -165 millions d'années. Les formations du Dogger sont essentiellement calcaires.

Ce secteur faisant partie de la bordure orientale du Bassin Parisien, du point de vue structural le pendage moyen des séries sédimentaires est de 0,5 % à 3 % en direction de l'ouest/nord-ouest.

Au sud-ouest de la commune se trouve le pli synclinal d'Aingeray, curiosité géologique constituant l'un des escarpements sujet à des chutes de blocs (illustration 3).

Le synclinal est un pli concave des différentes couches lithologiques en place centré sur la lithologie la plus récente. Dans le cas d'Aingeray, différentes formations sont visibles, respectivement de la couche supérieure la plus récente à la couche inférieure la plus ancienne :

- Calcaires micritiques (ensemble des Polypiers de Husson) ;
- Calcaires bioturbés, (ensemble des Polypiers de Husson) ;
- Marnes à pseudo-oolithes ;
- Oolithes à *Clypeus plotii*.

L'observation de ces couches permet de retracer le paléoenvironnement du secteur à l'étage du Bajocien, à savoir un milieu marin de sédimentation calme à modéré (Didier Zany, 2008).



Illustration 3 – Photo du pli synclinal d'Aingeray lors du relevé de terrain (Annotations d'après Didier Zany, 2008)

Un extrait de la carte géologique harmonisée à 1/50 000 du département de Meurthe-et-Moselle pour la commune d'Aingeray (illustration 4) présente la répartition spatiale des formations géologiques affleurant sur le territoire communal.

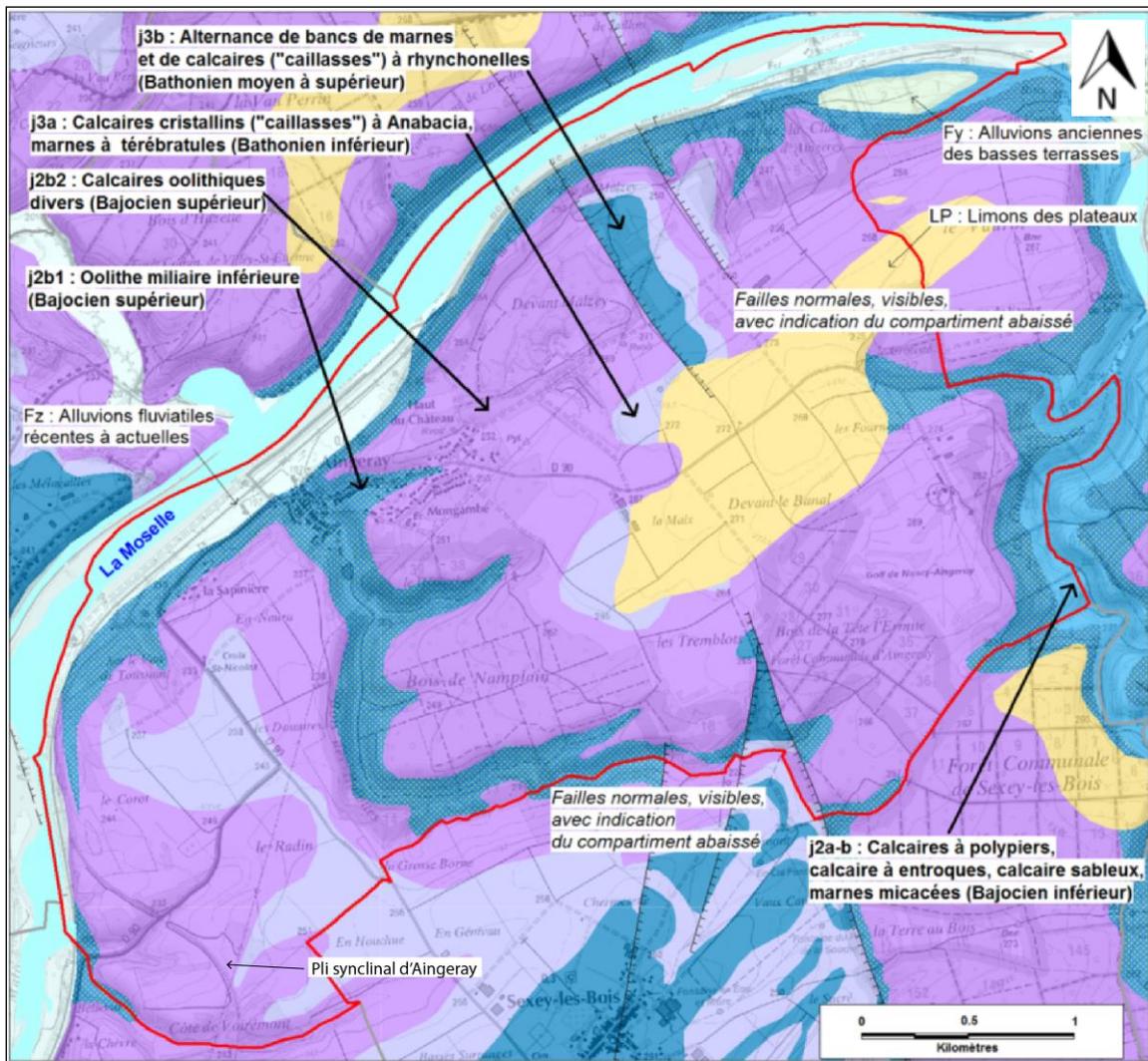


Illustration 4 – Extrait de la carte géologique harmonisée à 1/50000 du département de Meurthe-et-Moselle sur la commune d'Aingeray (source BRGM, fond IGN scan25)

Le territoire est affecté au nord par des cassures de terrain avec déplacement relatif des parties séparées. Sont distinguées :

- deux failles parallèles d'orientation nord-nord-ouest/sud-sud-est, situées au nord de la commune, avec compartiment abaissé, à l'origine notamment de l'affleurement des bancs de marnes et calcaires à rhynchonelles ;
- deux failles non parallèles au sud de la commune, délimitant un compartiment abaissé (forme de triangle) à l'origine de l'affleurement des bancs de marnes et calcaires à rhynchonelles.

Jurassique moyen (Dogger)

Sur la commune d'Aingeray, les formations géologiques suivantes de la série du Dogger affleurent de la base au sommet de la série (illustration 5) :

- Calcaires à polypiers, calcaire à entroques, calcaire sableux, marnes micacées (Bajocien inférieur) : la formation inférieure correspond, sur une épaisseur de 30 à 35 m, aux marnes micacées (argilites micacées bleues ou noires) surmontées du calcaire sableux puis du calcaire à entroques et de l'oolithe blanche. La formation supérieure, les calcaires à polypiers, a une épaisseur de 25 à 30 m. Il s'agit d'un ensemble récifal à lithologie très variée allant des calcaires cristallins aux calcaires sublithographiques en passant par les calcaires oolithiques et bioclastiques. On distingue en général une masse inférieure d'une masse supérieure séparées par le niveau de l'oolithe cannabine (calcaire à grosses pisolithes sphériques) épais de 2 à 4 m ;
- Oolithe miliaire inférieure (Bajocien supérieur) : cette formation (appelée aussi Bâlin) a une épaisseur de 20 à 25 m. Il s'agit d'une masse de calcaires fins à granulométrie régulière et présentant des stratifications obliques. Des passées coquillières y sont fréquentes, ainsi que la présence de polypiers coloniaux roulés. Le noyau du village est implanté dans une vallée sèche et ses pentes sur cette formation. Il est noté la présence sur les pentes de colluvions et éboulis de calcaires ;
- Calcaires oolithiques divers (Bajocien supérieur) : ils correspondent à une alternance de bancs calcaires et de bancs marneux mal définis. Leur épaisseur est variable avec un maximum de 45 m. Les quartiers de la périphérie du village sont implantés sur cette formation qui couvre la majorité du territoire communal ;
- Calcaires cristallins ("caillasses") à Anabacia (Bathonien inférieur) : ce sont des calcaires argileux détritiques à pseudo-oolithes d'une épaisseur de 3 à 4 m constituant un ensemble marno-calcaire caractérisé par la présence d'un petit polypier, Anabacia orbulites. Ils affleurent en partie sommitale du plateau au sud-ouest et au centre du territoire communal ;
- Alternance de bancs de marnes et de calcaires ("caillasses") à rhynchonelles (Bathonien moyen à supérieur) : c'est ensemble alterne les marnes à rhynchonelles (marnes grises à Brachiopodes et Huîtres) et les « caillasses » à rhynchonelles (ensemble marno-calcaire très argileux à Brachiopodes et Huîtres) sur une épaisseur de 16 à 35 m.

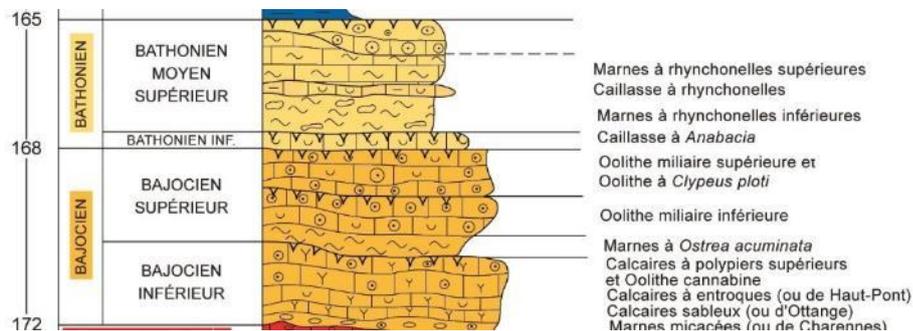


Illustration 5 – Colonne lithostratigraphique des formations présentes à Aingeray

Ce substratum est masqué dans certains secteurs par des formations superficielles récentes. Ce sont les alluvions fluviales présentes dans la vallée de la Moselle et sur des basses terrasses, et les limons des plateaux présents sur les parties hautes de la commune.

1.3.2. Description des formations superficielles

Dans l'établissement des cartes d'aléa, il convient de distinguer les formations superficielles du substratum géologique, car elles présentent généralement des caractéristiques mécaniques médiocres, et sont de ce fait sensibles aux remobilisations gravitaires. Dans le cas des chutes de blocs, la remobilisation de blocs dans les versants peut engendrer un aléa chute de blocs.

- Alluvions anciennes des basses terrasses : ces alluvions sont en général situées en bordure des vallées actuelles, à 5-30 m au-dessus des cours actuels, sur des replats. Ce sont des alluvions fluviales grossières (galets, graviers, sables) fréquemment masquées par des limons. Leur épaisseur est en général métrique à plurimétrique. Dans le secteur, les terrasses anciennes d'alluvions ont été déposées par la Moselle et se situent au nord du territoire communal. Elles sont constituées de graviers et galets siliceux, à matrice sablo-argilo-limoneuse ;
- Alluvions fluviales récentes à actuelles : ces alluvions, qui résultent de l'érosion des terrains entaillés par les cours d'eau, tapissent les fonds des vallées actuelles (Moselle) et sont constituées de matériaux fins, argiles, limons, sables reposant ou non sur des matériaux grossiers (sables, graviers, galets). Leur épaisseur est de 5 à 6 m en moyenne ;
- Limons des plateaux : Ce sont des couvertures limono-argileuses parfois sableuses, épaisses de quelques décimètres à 1 mètre, particulièrement présentes sur le territoire communal.

1.4. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

1.4.1. Généralités

La commune d'Aingeray s'inscrit pour la majorité de son territoire dans le bassin versant hydrographique de la Moselle. Plus précisément, la majorité du territoire (nord et est) appartient à la zone hydrographique de « la Moselle du Terrouin à la Meurthe » et la partie sud et ouest à la zone hydrographique de « la Moselle du ruisseau de Fontenoy-sur-Moselle au Terrouin » (illustration 6).

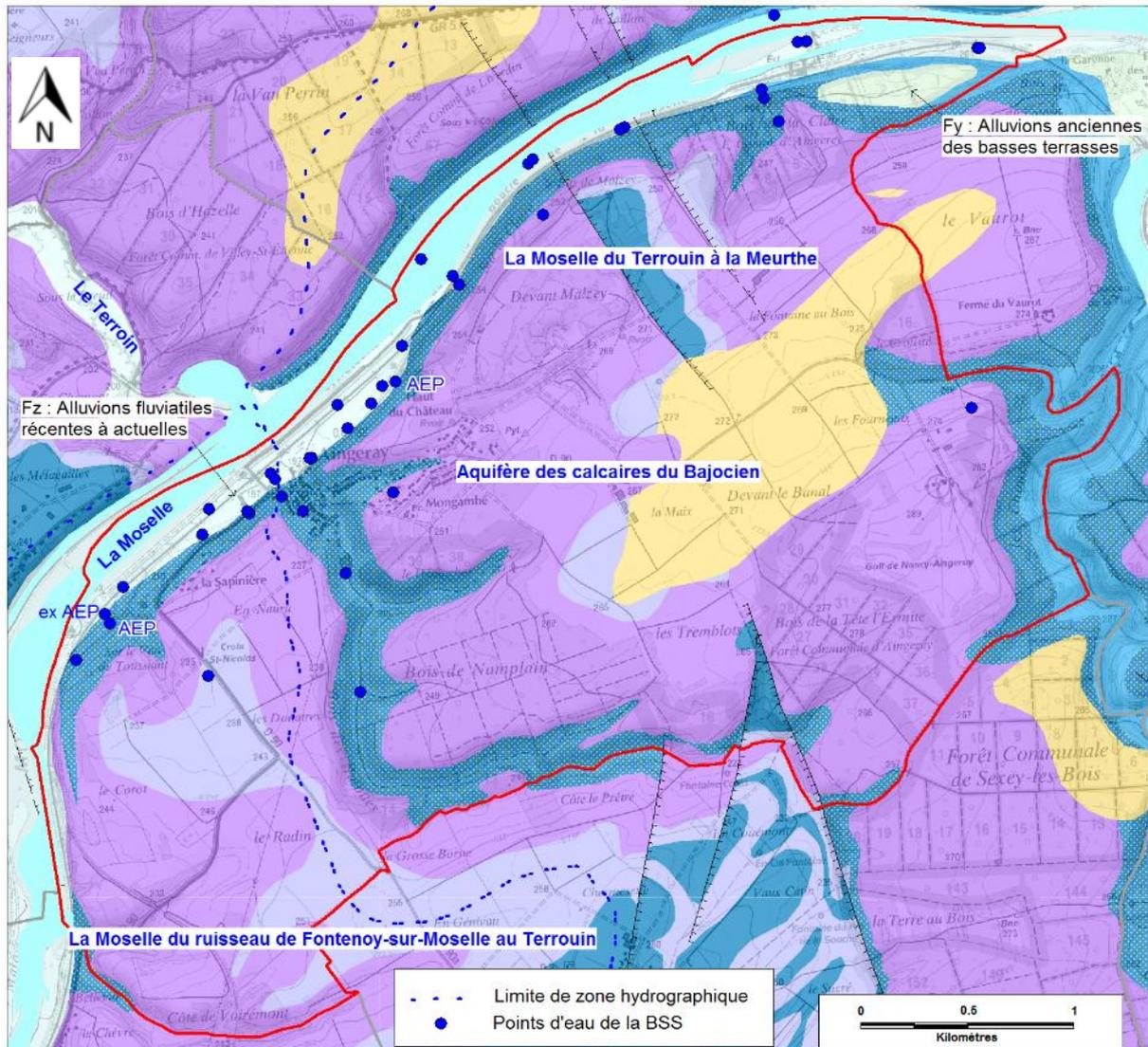


Illustration 6 – Principaux éléments de l’hydrographie et de l’hydrogéologie sur la commune d’Aingeray (source BRGM, fond IGN scan25)

Le Service d’eau potable est assuré par la Syndicat Intercommunal d’eau SEXEY-VELAINE-AINGERAY - eau potable et d’après le site internet de l’Observatoire national des services d’eau et d’assainissement, deux ouvrages actifs d’adduction collective publique en eau potable sont présents sur le territoire communal, le Forage d’Aingeray - Puits communal (BSS 02293X0009) et le Forage d’Aingeray 2013 - Puits du Vau Toussaint (BSS 02293X0159). Un 3^{ème} ouvrage d’adduction a été abandonné (BSS 02293X0152).

1.4.2. Aquifères

Les deux principaux aquifères du secteur d’étude sont celui des alluvions de la vallée de la Moselle et celui des calcaires du Bajocien nommé également aquifère du Dogger.

Les alluvions de la vallée de la Moselle constituent un aquifère qui n’est pas exploité à Aingeray.

Les calcaires du Bajocien forment un réservoir fissuré, karstifié, reposant sur les marnes micacées qui constituent le mur de l'aquifère. Les circulations souterraines peuvent s'effectuer sur de grandes distances et avec des vitesses importantes, rendant cet aquifère potentiellement sensible aux pollutions. Les eaux sont moyennement minéralisées et de faciès bicarbonaté calcique.

Les deux forages AEP actifs d'Aingeray captent l'eau de l'aquifère des calcaires du Bajocien.

Dans le forage « Aingeray 2013 » les calcaires se situent sous des argiles sableuses à une profondeur d'environ 10 m. Dans le forage « Aingeray - Puits communal », les calcaires sont affleurants.

2. Collecte et structuration des données

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

- la Banque de données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM (<http://infoterre.brgm.fr/>) ;
- les archives du BRGM (rapports, cartes géologiques) ;
- la base de données mouvement de terrain du portail Géorisque (<http://www.georisques.gouv.fr/>) ;
- une analyse bibliographique rassemblant les informations transmises par les services publics (Mairie d'Aingeray – réunion le 25 juin 2019) ;
- la réalisation d'une campagne d'acquisition sur site de photographies et d'un levé LIDAR par avion en avril 2019 ;
- cartographie départementale au 1/50 000^{ème} de 2008 du risque chute de bloc (Moiriat et al., 2008) ;

Lors des campagnes de terrain menées en avril et mai 2021, la majeure partie des zones accessibles du périmètre d'étude a été parcourue à pied. Les principaux relevés effectués concernent :

- les levés de présence de blocs rocheux éboulés ;
- les levés et la description des escarpements et des zones de ruptures potentielles.

Les observations de terrain ont été nommées de la manière suivante (avec n numéro d'incrémentation) :

- An, pour les escarpements rocheux ;
- Pn, pour les phénomènes observés ;
- Bn pour les blocs potentiellement mobilisables.

2.1. LEVE LIDAR

Le levé LIDAR (caractérisation topographique haute résolution) aéroporté a été réalisé par l'entreprise Helimap. Ce levé a permis de produire un modèle numérique de terrain (MNT) et un modèle numérique de surface (MNS) à la maille de 50 cm (Illustration 7). Les caractéristiques de l'acquisition sont les suivantes:

- date du vol : 3 jours d'acquisition² (17/04/2019, 18/04/2019 et 19/04/2019) ;
- vitesse d'acquisition : 15 m/s ;
- densité de point : 20 pts/m² à 360 m altitude vol ;
- précision : inférieur à 5 à 7 cm en altimétrie et 10 cm en planimétrie.

² 3 communes ont fait l'objet d'acquisition LIDAR (Val-et-Châtillon, Val-de-Briey et Aingeray).

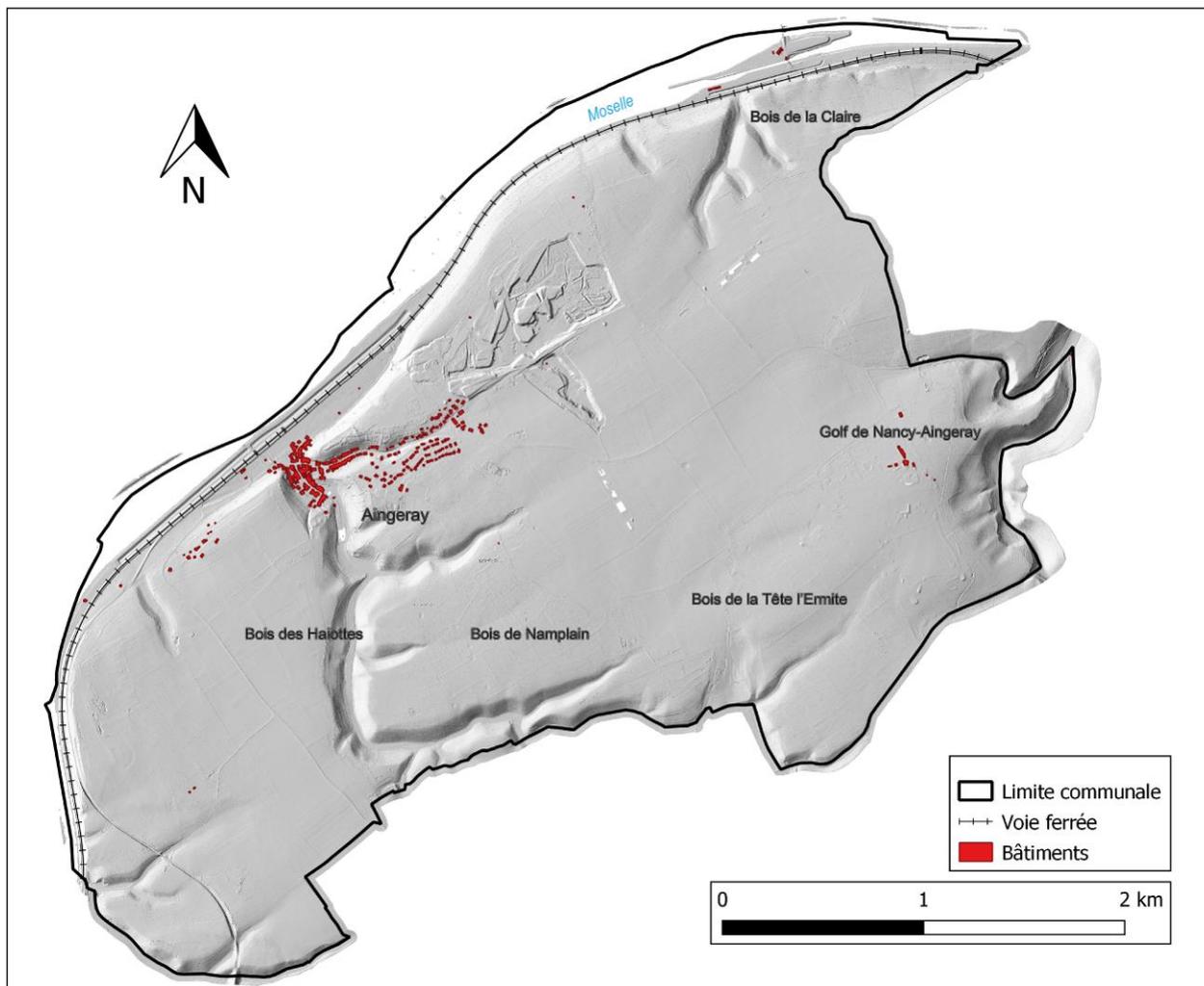


Illustration 7 – Modèle numérique de surface ombragé obtenu à partir du levé LIDAR au pas de 0,5 m avec représentation des enjeux

Une évaluation de la pente a été calculée à partir du MNT LIDAR (Illustration 8).

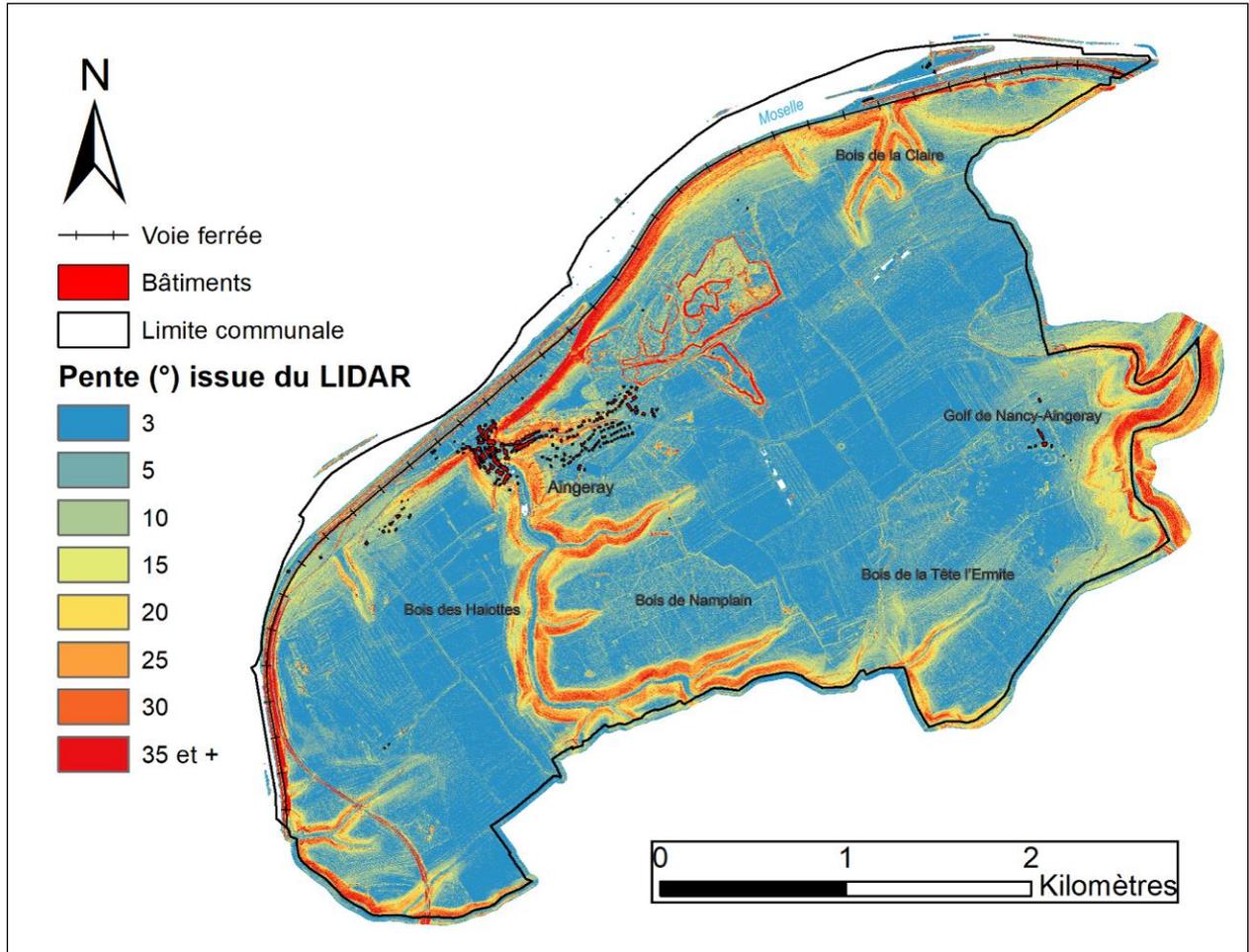


Illustration 8 – Cartographie des pentes à partir du levé LIDAR au pas de 0,5 m

2.2. INVENTAIRE DES PHENOMENES HISTORIQUES

Une recherche des événements historiques de chutes de blocs sur la commune d'Aingeray a été menée à partir des bases de données suivantes :

- la base de données nationale sur les mouvements de terrain (www.georisques.gouv.fr), gérée par le BRGM, ne mentionne aucune chute de bloc sur le territoire de la commune ; lors de la cartographie des aléas au 50 000^{ème} établie en 2008 (Moiriat et al., 2008), aucun phénomène n'a été recensé ;
- aucun phénomène n'a été retrouvé dans les archives consultées.

Avant l'inventaire événementiel réalisé lors de cette étude, les phénomènes recensés de chute de bloc les plus proches d'Aingeray se situaient dans les communes limitrophes de :

- Villey-Saint-Etienne (5 blocs de volume inférieur à 0,25 m³ au droit d'une maison et d'une route, provenant d'un escarpement de 3 à 5 m de hauteur) ;
- Liverdun (5 blocs de volume inférieur à 0,25 m³ au droit d'un chemin, provenant d'un escarpement de 6 m de hauteur dans le bois communal de la Fourasse).

Inventaire événementiel sur la commune d'Aingeray

Le report des événements connus permet de circonscrire globalement les zones principales d'atterrissement. Cet inventaire ne saurait évidemment pas être exhaustif mais vise d'une part à identifier les zones plus particulièrement exposées et d'autre part à permettre de quantifier les volumes potentiellement mobilisables.

En terme de cartographie, ont été identifiés en priorité les blocs remarquables : par leur volume et par leurs atteintes (les éléments les plus lointains en pied de versant étant naturellement recherchés).

Il s'agit d'un recensement non exhaustif de blocs éboulés effectué à partir de différentes sources d'informations :

- reconnaissances de terrain pédestres (principalement des blocs remarquables dans les zones de propagation) ;
- exploitation des orthophotographies 2019 réalisées en parallèle à la campagne LIDAR ;

Le recensement effectué montre une concentration à l'aval des zones d'escarpements, notamment sur les replats marqués par les chemins. La grande majorité des éléments rocheux sont de volume inférieur à $0,25 \text{ m}^3$. Certains blocs isolés sont compris entre $0,25$ et 1 m^3 . Un phénomène d'éboulement ancien observé concerne un bloc de volume unitaire supérieur à 1 m^3 .

Les principaux phénomènes sont observés :

- au nord de la D90 à l'ouest de la commune (P1). Un phénomène d'éboulement ancien observé comprenant un bloc de volume élevé ($> 1 \text{ m}^3$) et 3 blocs de volume moyen ($0,25 < V < 1 \text{ m}^3$) (illustration 9) ;
- le long de la voie verte (P2 à P7). Ils correspondent à des volumes faibles ($0,05 < V < 0,250 \text{ m}^3$) à moyens ($0,25 < V < 1 \text{ m}^3$; P6 – illustration 10). Au niveau de la voie ferrée (P5 à P7), des blocs de volume inférieur à $0,05 \text{ m}^3$ sont retenus par les grillages côté aval. Les nombreux blocs de volume très faible ($< 0,05 \text{ m}^3$) le long de la voie verte n'ont pas été recensés ;
- au niveau de la rue des pâtureaux et du chemin longeant la voie ferrée au nord de la commune (P8 à P14). Des blocs atteignent le bord de la voie ferrée avec des volumes faibles ($0,05 < V < 0,250 \text{ m}^3$), au total 5 blocs de volume faible ($0,05 < V < 0,250 \text{ m}^3$) et 2 blocs de volume très faible ($< 0,05 \text{ m}^3$). Le bloc P13 a été observé au milieu du chemin, bloquant le passage d'un véhicule 4 roues (illustration 11). La trace du dernier impact du bloc est nette dans le sol. De plus ce bloc n'est pas visible sur les orthophotographies prises lors de l'acquisition des données de télédétection en 2019. Ces indices traduisent un phénomène relativement récent survenu dans les 2 dernières années ;
- à l'est de la commune à proximité de la D90 (P15). Un bloc de volume très faible ($< 0,05 \text{ m}^3$) ;
- au sein du village (P16, P17). Le point P16 traduit un phénomène d'éboulis de volume unitaire inférieur à $0,05 \text{ m}^3$ et de volume total inférieur à $0,25 \text{ m}^3$ à proximité immédiate d'un mur. L'état de l'affleurement et cette proximité avec un ouvrage anthropique ne permet pas d'affirmer que l'affleurement est naturel. Le point P17 correspond à un bloc de volume très faible ($< 0,05 \text{ m}^3$) s'étant propagé jusqu'au trottoir bordant la rue de Liverdun (illustration 12).



Illustration 9 – Phénomène P1, éboulement de volume total compris entre 1 et 5 m³, observé lors de la campagne terrain le 27/04/2021 (lambert93 : 919719.60,6850890.37)



Illustration 10 – Phénomène P6, bloc de volume compris entre 0,25 et 1 m³ observé lors de la campagne de terrain le 27/04/2021 (lambert93 : 919552.20,6851867.03)



Illustration 11 - Bloc P13 de volume compris entre 0,05 et 0,25 m³ observé lors de la campagne de terrain le 29/04/2021 (lambert93 : 921567.20,6854133.78)



Illustration 12 - Phénomène P17, bloc de volume inférieur à 0,05 m³ observé lors de la campagne de terrain le 30/04/2021 (lambert93 : 921135.676,6853048.552)

Les phénomènes sont localisés sur l'illustration 13. Cette carte est reprise au format A3 (1/25 000) accompagnée d'un tableau recensant les informations de chaque événement dans l'annexe 5.

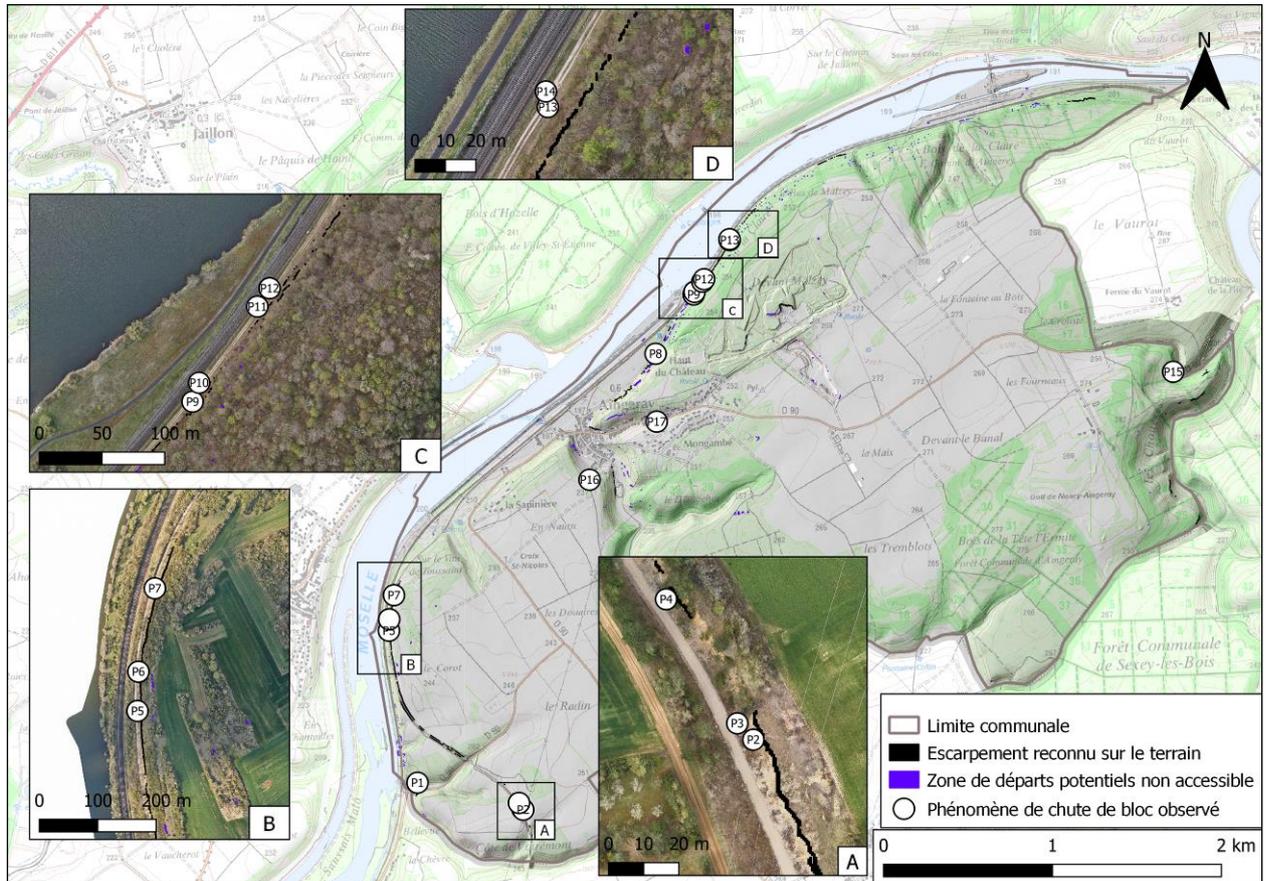


Illustration 13 – Phénomènes de chute de bloc observés lors du relevé de terrain (fond scan 25 de l'IGN, 1/25 000)

2.3. ETUDE ANTERIEURE

Une cartographie des aléas au 50 000^{ème} a été établie en 2008 (illustration 14, Moiriat et al. 2008). De cette cartographie sont ressortis deux secteurs concernés par un aléa moyen de chute de bloc :

- au nord de la commune, le premier secteur concerne le centre du village d'Aingeray et s'étend sur environ 2,5 km le long de la voie ferrée bordant la Moselle ;
- le second secteur est situé à la bordure est de la commune le long de la D90.

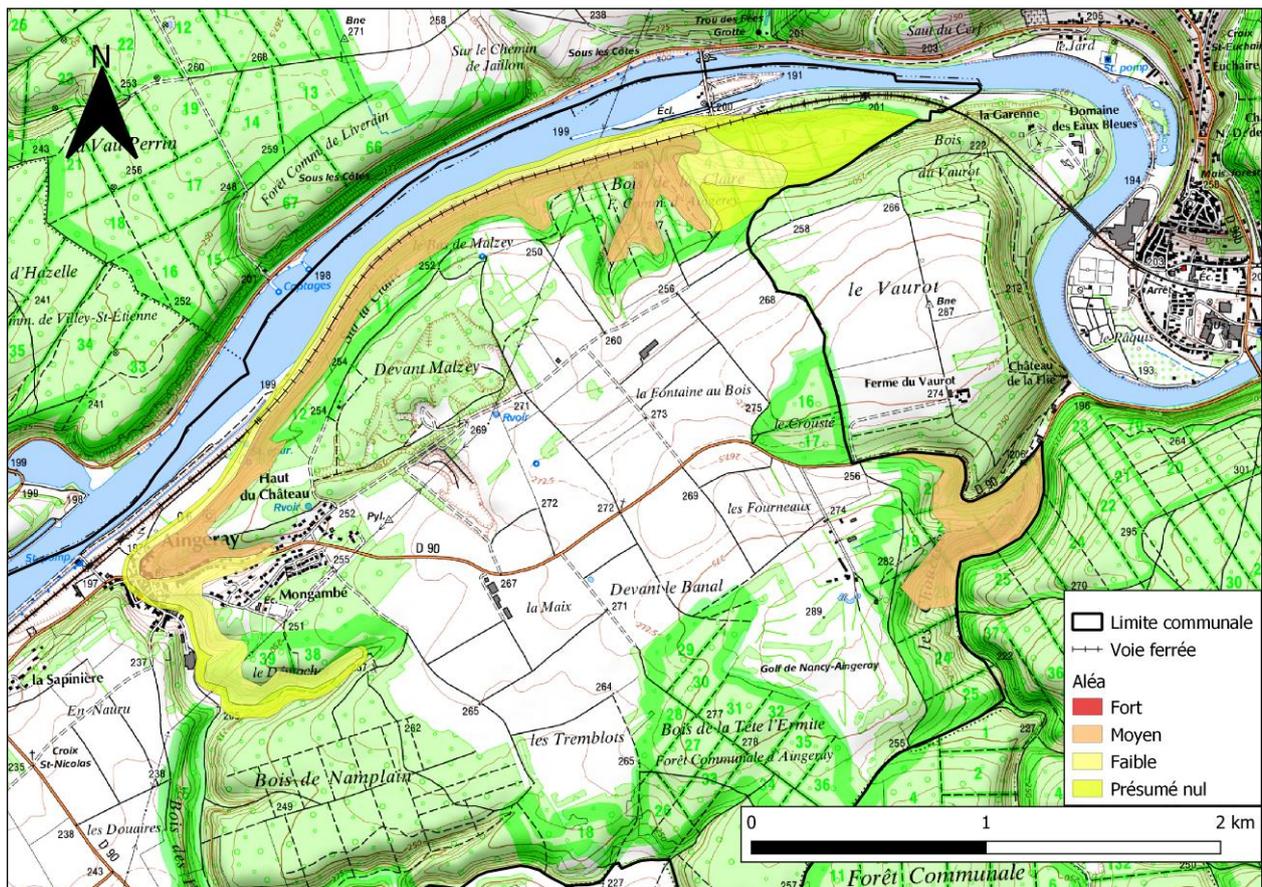


Illustration 14 – Extrait de la cartographie chute de bloc à l'échelle départementale sur la commune d'Aingeray (fond IGN scan 25, Moiriat et al. 2008)

3. Rappel sur l'aléa chute de blocs et éboulement

3.1. TERMINOLOGIE

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

La classification des phénomènes à l'origine de l'aléa rocheux est élaborée à partir des volumes totaux éboulés et des volumes unitaires concernés (LCPC, 2004, Guide PPR 1999) :

Ecroulement (éboulements en grande masse)	Eboulement rocheux (éboulement en masse)	Chute de blocs	Chutes de pierres
Plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes > 10 000 m ³	Quelques centaines de mètres cubes 100 à 10 000 m ³	Jusqu'à une centaine de mètres cubes < 100 m ³	Jusque quelques mètres cubes de pierres < 10 m ³

Pierres	Blocs	Gros blocs
Inférieur à quelques dm ³	Quelques m ³	Quelques dizaines de m ³
0,05 m ³ (50 l)	jusque 10 m ³	> 10 m ³

Illustration 15 – Terminologie de l'aléa rocheux en fonction des volumes mobilisés

Il faut également distinguer le volume unitaire (c'est-à-dire, le volume moyen des blocs rocheux de l'événement considéré) du volume total mobilisé par l'événement.

Les chutes de pierres ou de masses rocheuses de petite taille se produisent sous l'action de la gravité et de l'altération d'une paroi rocheuse par différents agents d'érosion. Les chutes régulières de pierres mènent à la formation d'éboulis (accumulations de matériel détaché de l'abrupt en amont).

Les chutes de blocs correspondent à un mécanisme gravitaire se manifestant de manière rapide et brutale, et qui affecte des matériaux rigides et fracturés. Il concerne principalement les affleurements rocheux à parois subverticales. Les éléments éboulés sont des blocs rocheux de volumes variables pouvant se propager en pied de falaise. Le volume de l'éboulement ne dépasse généralement pas quelques dizaines de m³ (Vincent et al., 2001).

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

3.2. EVOLUTION VERS LA RUPTURE

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

3.3. FACTEURS INTERVENANT DANS LA CHUTE DE BLOCS

Chaque mouvement de terrain résulte du rééquilibrage gravitaire d'un versant. Les versants présentant une prédisposition au déséquilibre ont une pente généralement forte. Des périodes de stabilité provisoires, plus ou moins longues, séparent les périodes brèves de déséquilibre. Le déclenchement d'un mouvement de terrain est toujours lié à une situation de déséquilibre gravitaire entraînant un réajustement.

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

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

3.3.1. Les facteurs de prédisposition intrinsèques au massif rocheux

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

- **une topographie**³ en falaise ou l'existence de reliefs rocheux fissurés. Elle conditionne l'essentiel de la fréquence des chutes de blocs. Les affleurements de calcaire marquent des ressauts topographiques sur la commune avec des fissurations parfois importantes ;
- **la géologie** :
 - o la lithologie⁴. Elle contribue au déséquilibre gravitaire à l'origine des mouvements de terrains. Les roches, recèlent des particules argileuses qui s'altèrent par hydrolyse, ce qui favorise les altérations préférentielles et le sous-cavage de la roche.

³ Se dit de la disposition ou du relief d'un lieu

⁴ Nature des roches d'une formation géologique

- la structure (la fracturation, le pendage, la présence de joints de stratification, de plis, de schistosité qui constituent des zones de faiblesse dans un massif). Les stratifications obliques et entrecroisées sont fréquentes sur les massifs, d'où la probabilité de rencontrer un plan de moindre résistance.

3.3.2. Les facteurs de prédisposition environnementaux

La mise en mouvement des blocs est liée à un changement des conditions de stabilité qui peut avoir plusieurs origines, combinées ou non. Ainsi, les facteurs environnementaux favorisant le déclenchement d'un événement sont nombreux (Illustration 166).

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

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

D'autres facteurs naturels influencent la stabilité des versants :

- la sismicité/ les vibrations ;
- la modification de la répartition des masses par érosion en pied de versant par une rivière par exemple ou par surcharge en haut d'une pente (*Société Suisse de Géomorphologie, 2009*) ;
- la croissance de la végétation. La croissance des racines des arbres insinuées dans les fissures participe activement à l'augmentation de taille de ces dernières. De plus, à la mort des arbres, les passages des racines ainsi libérés constituent des lieux de circulation préférentiels des eaux de ruissellement qui continuent d'agrandir les fissures par dissolution de la roche. Enfin, lorsque la végétation a une forte prise au vent, elle peut transmettre des contraintes non négligeables au massif rocheux.

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

Processus	Agents	Effets	Dynamique
Action physico-chimique et dissolution	Eau Cycle hydroclimatiques Acides humiques	Altération matricielle Destruction de ponts rocheux Altération des caractéristiques mécaniques	Lente et souvent masquée
Dislocation	Effets gravitaires Racines Fluage d'une assise Gel, faible profondeur	Destruction mécanique des ponts rocheux Ouverture de fissuration	Lente sous nos latitudes
Erosion mécanique, mise en surplomb	Ecoulement d'eau Abrasion Erosion éolienne	Mise en équilibre par suppression d'appui Perte de cohésion	Variable, peut être rapide
Action mécanique de l'eau (pression hydraulique)	Infiltrations Circulations internes du massif	Déstabilisation par des poussées hydrauliques	Variable, peut être rapide, cyclique
Gélifraction	Gel	Réduction des surfaces d'appui par ablation Décohésion et dislocation des fractures	Lente
Fatigue mécanique	Sollicitation physique et niveau de contraintes élevées	Ecaillage, dégradation mécanique des ponts rocheux Progression des fissures	Rarement processus significatif à l'échelle humaine, sauf contextes extrêmes
Application de forces extrêmes	Variation d'effort Déstabilisation anthropique Modification des conditions hydrauliques Séismes	Déstabilisation, activation de nouveaux mécanismes de rupture	Variable, éventuellement rapide Peut être accidentel

Illustration 16 - Principaux processus d'évolution des compartiments rocheux, d'après LCPC (Effendiantz L. et al., 2004)

3.4. TYPOLOGIE DES RUPTURES

3.4.1. Typologie des ruptures

Les observations sur le terrain et l'analyse des événements passés mettent en évidence différents mécanismes de rupture (Illustration 17).

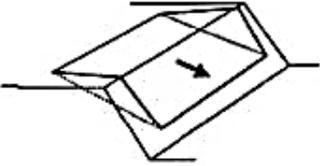
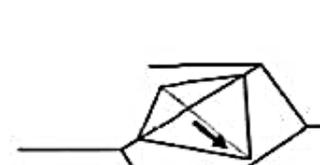
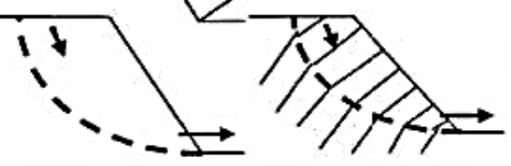
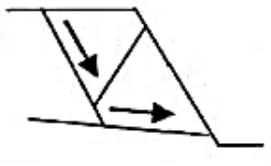
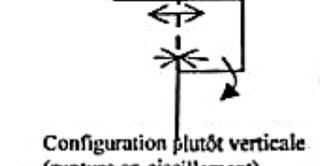
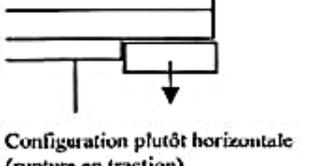
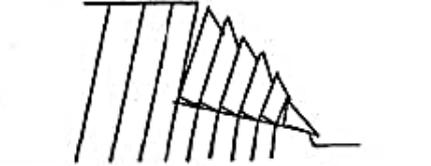
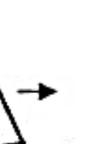
Configurations / mécanismes	Mécanisme d'instabilité
 	Glissement plan Gp
 	Glissement dièdre ou plan Gd
 	Glissements rotationnel et fractionné Gr
 <p data-bbox="434 1285 705 1339">Configuration plutôt verticale (rupture en cisaillement)</p>  <p data-bbox="833 1285 1120 1339">Configuration plutôt horizontale (rupture en traction)</p>	Rupture de surplomb S
 	Basculement de colonne ou de blocs Cb
 	Rupture de colonne en pied Cp
  	Rupture de banc (par flambage ou sur fracture) Bf

Illustration 17 - Schéma des principaux mécanismes de rupture (Dussauge-Peisser, 2002)

Les reconnaissances de terrain et l'analyse des évènements passés mettent en évidence les principaux types de rupture affectant les parois rocheuses et autres escarpements présents sur la zone d'étude. La typologie des phénomènes concernés identifie trois grands types de ruptures :

- les glissements plans ou dièdres ;
- les ruptures de surplombs ;
- les basculements de blocs ;

Le contexte géologique et topographique de la zone d'étude (granulométrie variable des calcaires au sein d'un même affleurement, altération hétérogène importante avec mise en avant de surplomb, fracturation parallèle aux affleurements, stratification obliques et entrecroisées) entraîne une diversité des modes de rupture potentiels et une spatialisation hétérogène de ces mécanismes, y compris au sein d'un même affleurement.

Les volumes mobilisables sont très variables, fonction de la nature et de l'état de fracturation du massif rocheux, du mécanisme de rupture et vont du bloc isolé (quelques dm³) à la chute de bloc de volume important (une dizaine de m³) (Illustration 18).

La remobilisation de blocs en versant (zone d'éboulis) est possible avec du ruissellement et de l'érosion, ainsi qu'avec la poussée de racines. Ces phénomènes peuvent être aggravés par des incendies (perte de la végétation qui favorise l'érosion des sols), ou au contraire tempérés par la présence de couvert végétal (diminution de l'érosion des sols et frein à la propagation des blocs).

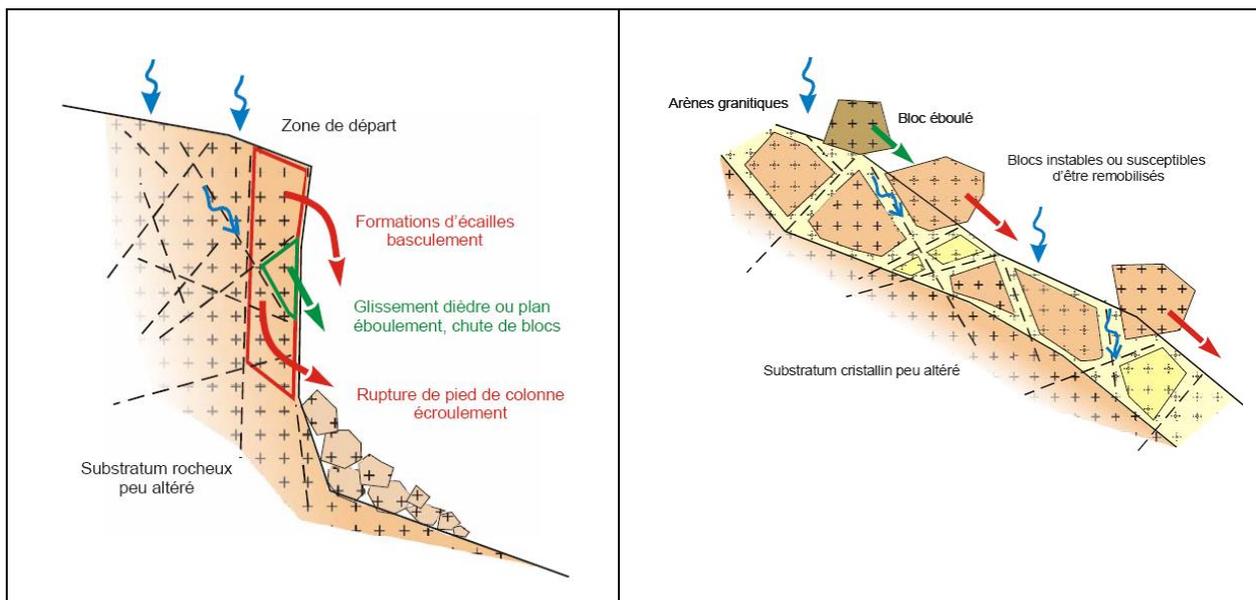


Illustration 18 – Phénomène de chute de blocs - typologie

Les paragraphes qui suivent décrivent plus en détail les mécanismes de rupture observés pour le site étudié, notamment en fonction des contextes géomorphologiques.

Les glissements plans ou dièdres

Ce mécanisme de rupture est fortement représenté dans les versants de la zone d'étude.

Ce type de rupture se produit selon un ou deux plans de discontinuité dans le massif rocheux (illustration 19). Les glissements dièdres font intervenir deux plans ou plus alors que les glissements plans n'en font intervenir qu'un. Le facteur de prédisposition aux glissements plans et dièdres est la fracturation.

Les masses rocheuses – volumes et géométries, associées à ces ruptures sont variables : volumes variables de l'ordre de blocs inférieur à 0,05 m³ à des blocs de volumes supérieur au mètre cube.



Illustration 19 – Dièdre – Affleurement A1

Les ruptures de surplombs

L'érosion différentielle des parois dégage fréquemment des masses dites en surplomb (Illustration 20). Les volumes concernés par ce type de rupture sont très variables et sont fonction de l'organisation du réseau de fractures et de la stratification. L'orientation des discontinuités et les départs de matériaux depuis le pied des abrupts créent un appel au vide.

Les masses rocheuses – volumes et géométries - associées à ces ruptures sont également très variables.



Illustration 20 - Surplomb – Affleurement A4

Les basculements de blocs

Les ruptures par basculement de blocs sont liées à la présence d'instabilités pluri-métriques désolidarisées de la paroi par des discontinuités majeures qui affectent, souvent, l'ensemble du massif (Illustration 21). Ces discontinuités correspondent essentiellement à de grosses diaclases ou à des fractures de détentes sub-parallèles au versant.



Illustration 21 – Basculement de bloc – Affleurement A5

3.5. PROPAGATION

L'étendue des zones de propagation varie considérablement en fonction de :

- la morphologie de la zone de départ (talus routier, versant naturel, falaises, etc.) ;
- la morphologie de la zone de propagation (versant uniforme, talwegs, etc.) ;
- la présence éventuelle d'ouvrages de protection (filets, écrans pare-blocs, merlons, etc.) ;
- la nature et la densité du couvert végétal (prairie, zones forestières, , etc.) et la nature des sols de la zone de propagation (route, piste forestière, éboulis, etc.);
- la forme des blocs qui se propagent.

Sur la commune d'Aingeray, la morphologie des versants n'est pas tout à fait régulière (présence de replats, de chemins et d'escarpements ponctuels de hauteur limitée).

4. Evaluation de l'aléa chute de blocs

4.1. METHODE

La cartographie de l'aléa rocheux nécessite de définir les volumes susceptibles de se propager. Ces volumes peuvent être issus de plusieurs types de scénarios :

- départ de volume unitaire se propageant vers l'enjeu ;
- départ d'un volume important se fragmentant lors de sa chute et produisant des volumes plus faibles se propageant vers l'enjeu ;
- écroulements en masse avec propagation spécifique.

La méthode valorisée dans le cadre du présent programme est issue des résultats à paraître d'un groupe de travail sur l'évaluation de l' « aléa rocheux » dans le cadre d'un PPRn (MEZAP⁵).

Pour l'aléa de chute de bloc, le scénario de référence est caractérisé par le volume du plus gros bloc susceptible, sur la période de référence de 100 ans, de se propager. Cet aléa peut être reproductible ou non. Ce scénario de référence peut correspondre soit au plus gros évènement historique connu, soit être supérieur soit inférieur à celui-ci. Si aucun évènement historique n'est connu, une analyse spécifique est à mener.

Après examen des zones de départ, examen des zones de dépôt, référence à des contextes similaires (géologie, topographie), témoignages, synthèse historique, il est proposé des zones homogènes de départ, chacune étant caractérisée par un volume unitaire de bloc (volume après fragmentation) susceptible de se propager dans la pente. Plusieurs scénarios de référence par zone homogène peuvent être présentés. L'hypothèse d'un scénario de type phénomène de grande ampleur induisant un mélange turbulent dans la propagation sur la période de référence 100 ans est à préciser.

L'approche utilisée ensuite pour l'évaluation de l'aléa de référence est de type expert. Cette analyse est basée sur des observations in-situ et en fonction des documents d'archives, le tout en prenant soin de compiler les données événementielles servant de référence à l'analyse de propagation des blocs en versant. En termes pratiques, cette évaluation découle de 5 étapes résumées comme suit :

- Indice intensité
 - cet indice définit *ce qui peut être mis en mouvement*. C'est la quantité de roche, exprimée en volume, qui peut être déstabilisée et mise en mouvement. Le moteur de ce mouvement est gravitaire. Ces volumes potentiellement mobilisables décrivent l'intensité attendue des phénomènes, qualifiée par un **indice d'intensité**. Cette intensité est associée à l'endommagement potentiel engendré par une atteinte à des enjeux.

⁵ Méthodologie de l'aléa chute de pierres

- Indice d'activité
 - cet indice définit *la fréquence* avec laquelle ce ou ces volumes de roches se mettent en mouvement. On peut ainsi observer dans certains contextes, des chutes de pierres incessantes alors qu'une fois par décennie, un gros bloc se détache. Dans ce type d'étude, il s'agit de facto d'un facteur qui s'appuie, lorsqu'ils existent, sur de longs historiques d'observations, à défaut sur l'expertise. Ce paramètre qualifie un **indice d'activité** des zones de départ.
- Aléa de propagation – probabilité de propagation
 - le principe est d'étudier la propagation des éléments rocheux en versant. Cette analyse est basée sur les retours d'expérience d'évènements passés et sur des modélisations plus ou moins complexes, validées ou corrigées par la connaissance du terrain. Selon les cas, des chemins probables des trajectoires de chutes de blocs sont définis (calculs déterministes en 2D ou 3D de trajectographie intégrant les volumes et formes des éléments rocheux, la nature des sols soumis à impacts, les vitesses de propagation ...) ou des enveloppes globales résultant d'analyses empiriques.
 - le résultat permet de définir **des probabilités de propagation** de blocs en tout point du territoire.
- Probabilité d'atteinte
 - la probabilité d'atteinte résulte du croisement de l'indice d'activité des zones de départ et des probabilités de propagation simulées.
- Aléa résultant
 - l'aléa de mouvement de terrain (ici chute de blocs) résulte du croisement de la probabilité d'atteinte et de l'intensité du phénomène de référence considéré.

Dans la pratique, la mise en œuvre de cette démarche impose la définition d'un (de) phénomène(s) de référence pour lequel/lesquels sont déclinés :

- l'estimation de la probabilité de départ (rupture) ;
- la détermination de la probabilité de propagation ;
- le calcul de l'aléa résultant « chute de blocs » à l'échelle communale.

4.2. RECONNAISSANCE DES ZONES DE DEPART

La définition des zones de départs potentiels est basée sur les paramètres de prédisposition suivants :

- la géologie : faciès rocheux pouvant générer des blocs ;
- la morphologie : présence de falaises ou de ressauts topographiques pouvant générer des éboulements ou des départs de blocs isolés ;
- les mécanismes de rupture : conditions de fracturation notamment propices aux éboulements.

A l'échelle de l'ensemble de la zone, et compte-tenu de la diversité des ruptures identifiées, le cas échéant au sein de mêmes ensembles, il n'a pas été fait de discrimination spécifique sur le mode de rupture, en considérant que tout relief était à même de produire des blocs.

Les indices sont déterminés sur la base de relevés géotechniques visuels des corniches (fracturation, altération, etc.). Ces données sont uniquement qualitatives, aucun essai de laboratoire ou in situ n'est prévu dans le cadre de ce projet.

4.2.1. Géologie

Les zones favorables sont définies par rapport aux levés géologiques. Du point de vue lithologique, les ensembles favorables au départ de chutes de blocs sont les formations calcaires du Bajocien, formant l'intégralité des zones de plus grande pente.

4.2.2. Morphologie

L'inventaire exhaustif des zones de départs potentiels (falaises et barres rocheuses) lors d'une reconnaissance *in situ* est difficilement réalisable à l'échelle de la zone d'étude. A ce titre, un couplage est réalisé à partir de l'analyse couplée du Modèle Numérique de terrain (MNT), du scan 25 de l'IGN et des orthophotographies récentes (acquisition 2019 lors du levé LIDAR) couvrant le secteur de la commune, ainsi qu'en s'appuyant sur les informations recueillies lors des visites de terrain.

Les corniches 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 corniche 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 constat, des travaux ont été menés 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 (Berger et al., 2009) :

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

Ainsi pour le MNT au pas de 0,5 m disponible, une pente supérieure ou égale à 57,9° est considérée comme zone de départs potentiels. En complément, cette approche est croisée et ponctuellement enrichie avec la digitalisation des barres rocheuses apparentes sur l'orthophotographie haute résolution afin de produire une carte des zones de départs potentiels la plus exhaustive possible.

Les résultats des démarches réalisées sont reportés sur l'illustration 22 qui présente les zones de départs potentiels sur la zone d'étude.

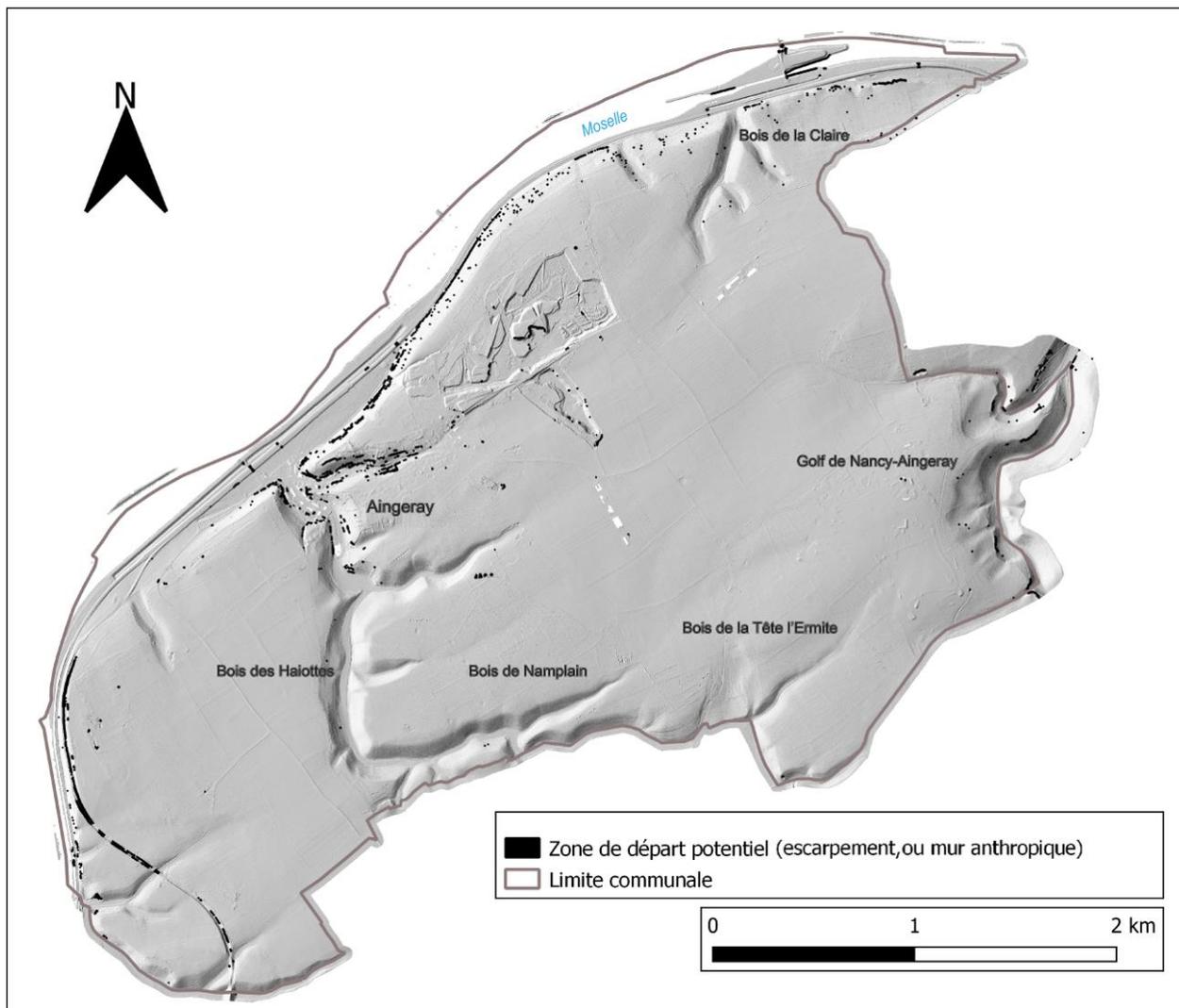


Illustration 22 – Inventaire des zones de départs potentiels sur MNT avec la définition d'une valeur de pente seuil α de $57,9^\circ$ (fond carte ombragée du MNT)

Cette reconnaissance préliminaire détecte de nombreux faux positifs à l'instar des bordures de bâtiment, des talus anthropiques et des murs et doit être affinée par traitement numérique et manuel (Illustration 23). Ce traitement a été effectué sur la base d'indices géométriques (élongation, surface, périmètre...) et morphologiques (continus/discontinu, position dans le versant, répartition par rapport aux autres éléments...). En complément, les données IGN de BD Topo, le MNS et les photographies aériennes réalisées durant l'acquisition LIDAR ont été utilisés pour identifier les éléments anthropiques.

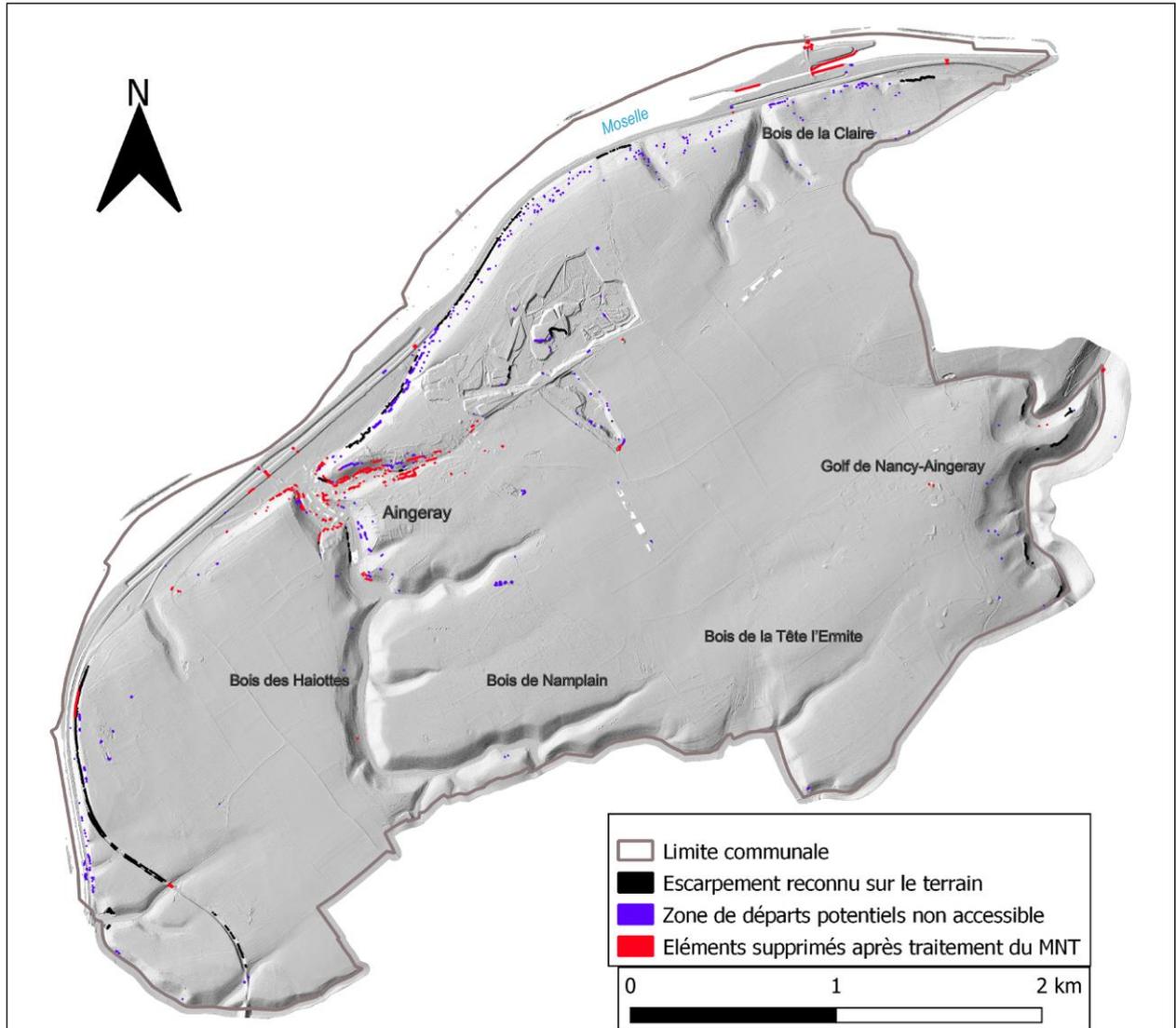


Illustration 23 – Inventaire des zones de départ sur MNT avec la définition d'une valeur de pente seuil α de 57,9°, affiné par post-traitement (reclassement manuel d'après des informations de terrain ou photographiques)

Cette analyse a été complétée et affinée par les campagnes de terrain qui permettent en plus de caractériser les escarpements et les blocs de volume important. L'analyse couplée du MNT et des observations de terrain a permis de :

- valider la présence ou non des escarpements caractérisés uniquement à partir du MNT ;
- compléter l'inventaire des zones de départ sur le territoire communal ;
- caractériser les zones de départ.

De nombreuses zones ont donc pu être observées et caractérisées (affleurement naturel ou ouvrage anthropique).

Pour les zones derrière des propriétés privées, l'accès n'a pas toujours été possible (absence d'autorisation notamment), de fait ces zones sont notées « non accessible » et se verront attribuer un aléa basé sur le scénario de référence correspondant aux escarpements observés à proximité possédant les mêmes caractéristiques (continuité de l'affleurement, même hauteur évaluée sur le MNT).

4.2.3. Escarpements

Les reconnaissances de terrain ont permis de caractériser les escarpements rocheux rencontrés.

Chaque point relevé sur le terrain (Illustration 24) correspond à une description géologique/géotechnique visuelle (annexe 1) : hauteur de l'escarpement, formation, dimension des blocs...etc. Ces informations ont été extrapolées aux escarpements identifiés uniquement par l'analyse sur MNT (notamment hors des zones d'enjeu ou secteurs inaccessibles). La carte de reconnaissance des affleurements rocheux est reprise et précisée en annexe 2.

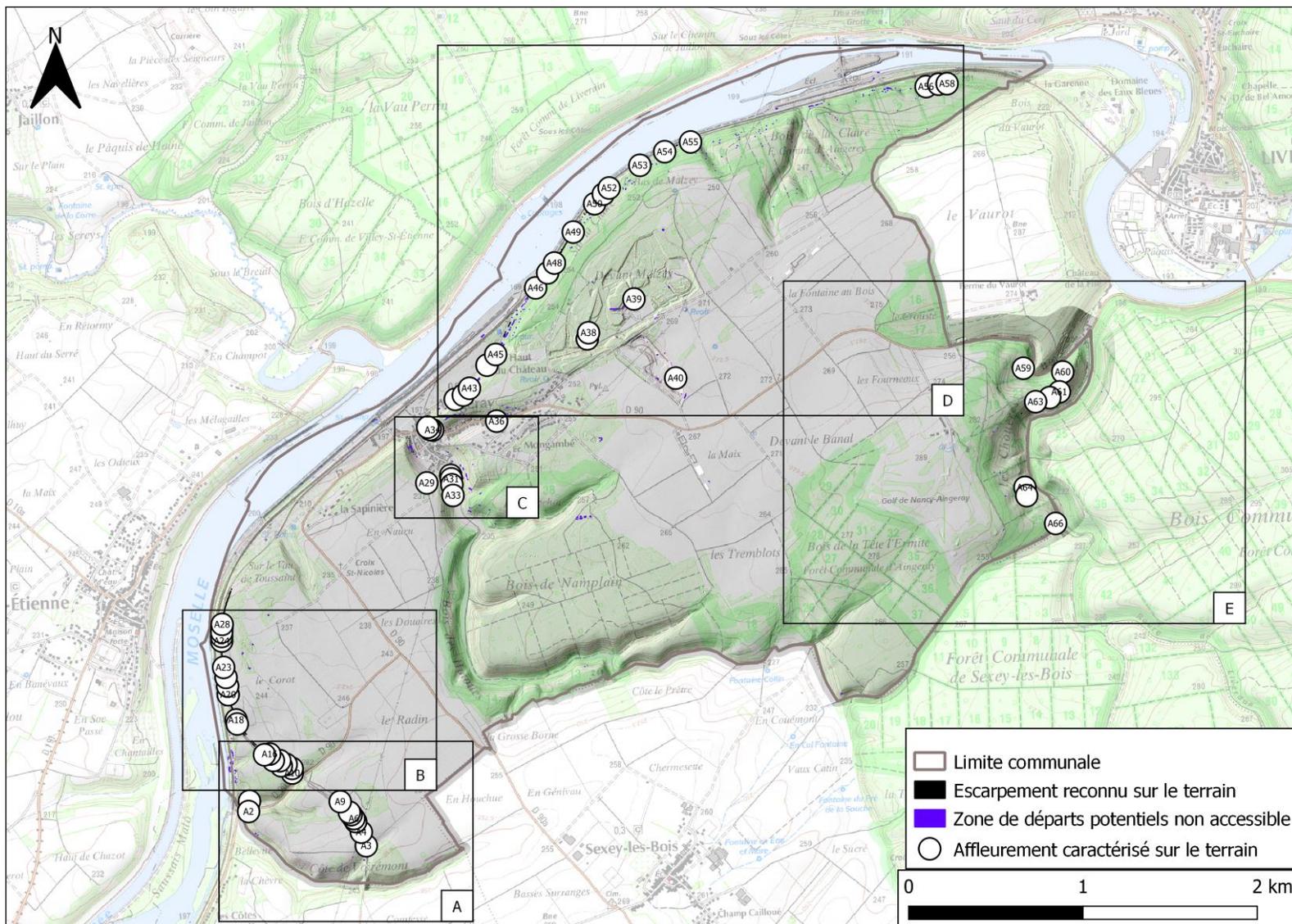


Illustration 24 – Reconnaissance des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain (fond scan 25 de l'IGN)

4.2.4. Carrière d'Aingeray

Au nord de la route départementale D 90, l'ancienne carrière d'Aingeray présente sur ses versants de nombreux éboulis dont l'origine anthropique ou naturelle n'est pas clairement définie, ces affleurements détectés par le MNT sont caractérisés par des blocs unitaires de volume majoritairement inférieur à 0,25 m³ répartis sur l'ensemble des pentes, en aval des escarpements identifiés. En effet, bien que très probablement d'origine anthropique, ces escarpements pourtant actuellement non exploités continuent de débiter des blocs de très faible volume de manière annuelle pour certains d'entre eux, la roche étant très altérée et fracturée due à l'exposition aux éléments des anciens fronts de taille (annexe 3, ID A39).

4.2.5. Synthèse

L'ensemble des éléments recueillis sur le terrain a permis d'identifier et de caractériser les différents affleurements constituant des zones de départs potentiels. Néanmoins dans certaines zones à enjeux, les escarpements n'ont pas pu être observés (non accessibles, propriétés privées), dans ces cas les zones de départs potentiels se verront attribuer le scénario de référence des zones caractérisées à proximité directe (exemple de continuité d'un escarpement) ou bien des zones caractérisées possédant les mêmes caractéristiques (hauteur escarpement obtenu sur le MNT). Enfin pour les escarpements non observés lors de la campagne de terrain présents dans des zones sans enjeux, ils se verront attribuer le scénario maximal observé sur la commune.

4.3. CARTOGRAPHIE DES ZONES DE REcul

Les éboulements ou chutes de blocs unitaires peuvent provoquer la déstabilisation des terrains situés en amont de la « tête » de falaise. Ce type de phénomène, appelé « recul de falaise », peut se produire de façon immédiate lors d'un éboulement rocheux ou de façon progressive, sur le moyen ou le long terme (10 à 100 ans), suite à des chutes de blocs successives.

Il existe donc deux types de recul de falaise :

- le recul brutal lié à un départ en masse de blocs rocheux : il s'agit du phénomène le plus impactant pouvant se traduire par plusieurs mètres de recul en un événement ;
- le recul progressif lié à des chutes successives de blocs unitaires : ce phénomène se traduit par un recul par à-coups de la tête de falaise.

Un relevé détaillé de la fracturation, des mécanismes de rupture et des volumes mobilisables est nécessaire pour évaluer précisément cet aléa de façon précise. Dans cette étude, seule l'étendue potentielle impactée par ce phénomène sera définie à partir des phénomènes observés sur la commune, des données bibliographiques et du retour d'expérience du BRGM dans d'autres contextes, notamment l'étude d'EPINAL réalisée dans un contexte géologique similaire (Rabin M., 2019).

En se basant sur des études réalisées dans divers contextes géologiques (Maquaire et Gigot, 1988, Moon et Healy, 1994, Gutierrez et al., 2016, Hantz 2018, Vallet et Hannion, 2018), plusieurs hypothèses de départ peuvent être formulées :

- **l'étendue maximale du recul de falaise peut être estimée en considérant l'évènement le plus gros possible pour une période de 100 ans, suivit de régression progressive ;**
- la probabilité d'occurrence d'un phénomène de grande ampleur (gros volume) est plus faible que celle de petits volumes. En effet, quel que soit la falaise concernée, elle produit plus de petit blocs que de gros blocs (Hantz, 2018) ;
- la probabilité d'occurrence d'évènements successifs affectant une même portion de falaise diminue avec le nombre d'évènements considérés. Ainsi, la probabilité de recul est décroissante en s'éloignant de la tête de falaise.

4.4. INDICE D'INTENSITE

Les volumes potentiellement mobilisables (définis après fragmentation en cours de propagation de la masse au départ) conditionnent directement l'intensité attendue des phénomènes, qualifiée par un **indice d'intensité**. Cette intensité est associée à l'endommagement potentiel des enjeux engendré par leur atteinte. De façon globale, le niveau d'intensité du phénomène est défini à partir de la grille ci-dessous issue du groupe de travail MEZAP 2021 (illustration 25).

Indice d'intensité	Volume unitaire pouvant se propager (m ³)	Potentiels de dommages
Très Faible	Volume < 0,05 m ³	Peu ou pas de dommage au gros œuvre, perturbation des activités humaines.
Faible	0,05 ≤ Volume < 0,25 m ³	Peu de dommage au gros œuvre, perturbation des activités humaines.
Modérée	0,25 ≤ Volume < 1	Domage au gros œuvre sans ruine. Intégrité structurelle sollicitée.
Elevée	1 ≤ Volume < 10	Domage important au gros œuvre. Ruine probable. Intégrité structurelle remise en cause.
Très élevée	Volume ≥ 10	Destruction du gros œuvre. Ruine certaine. Perte de toute intégrité structurelle.

Illustration 25 – Définition des classes d'intensité de l'aléa rocheux en fonction du volume et du potentiel de dommages (source : document MEZAP 2021)

L'analyse de la distribution des volumes des blocs recensés dans les zones d'atterrissement principales ou bien potentiellement mobilisables présents sur les zones de départ montre qu'à l'échelle de la zone d'étude, les classes d'intensité majoritairement représentées sont la classe « très faible » (100 % des escarpements caractérisés produisent des blocs de volume inférieur $0,05 \text{ m}^3$), vient ensuite la classe « faible » (41 % des escarpements caractérisés produisent des blocs de volume compris entre $0,05$ et $0,25 \text{ m}^3$), puis la classe « modérée » (23 % des escarpements caractérisés produisent des blocs de volume compris entre $0,25$ et 1 m^3), jusqu'à atteindre pour certains affleurements identifiés la classe « élevée » (15 % des escarpements caractérisés produisent des blocs de volume compris entre 1 et 10 m^3). Les blocs potentiellement mobilisables observés sont caractérisés en annexe 4 et sont représentés sur l'illustration 26.

La voie verte située au sud-ouest de la commune présente de nombreux blocs potentiellement mobilisables notamment au nord de la Côte de Voiremont, au niveau du synclinal d'Aingeray. D'autres blocs ont également été identifiés le long de la voie ferrée au nord de la commune (B11), blocs pouvant dépasser le mètre cube (B12, B13). Des volumes supérieurs au mètre cube sont également identifiés en amont de la D90 (B3 et B14) et en amont d'un chemin forestier (B15).

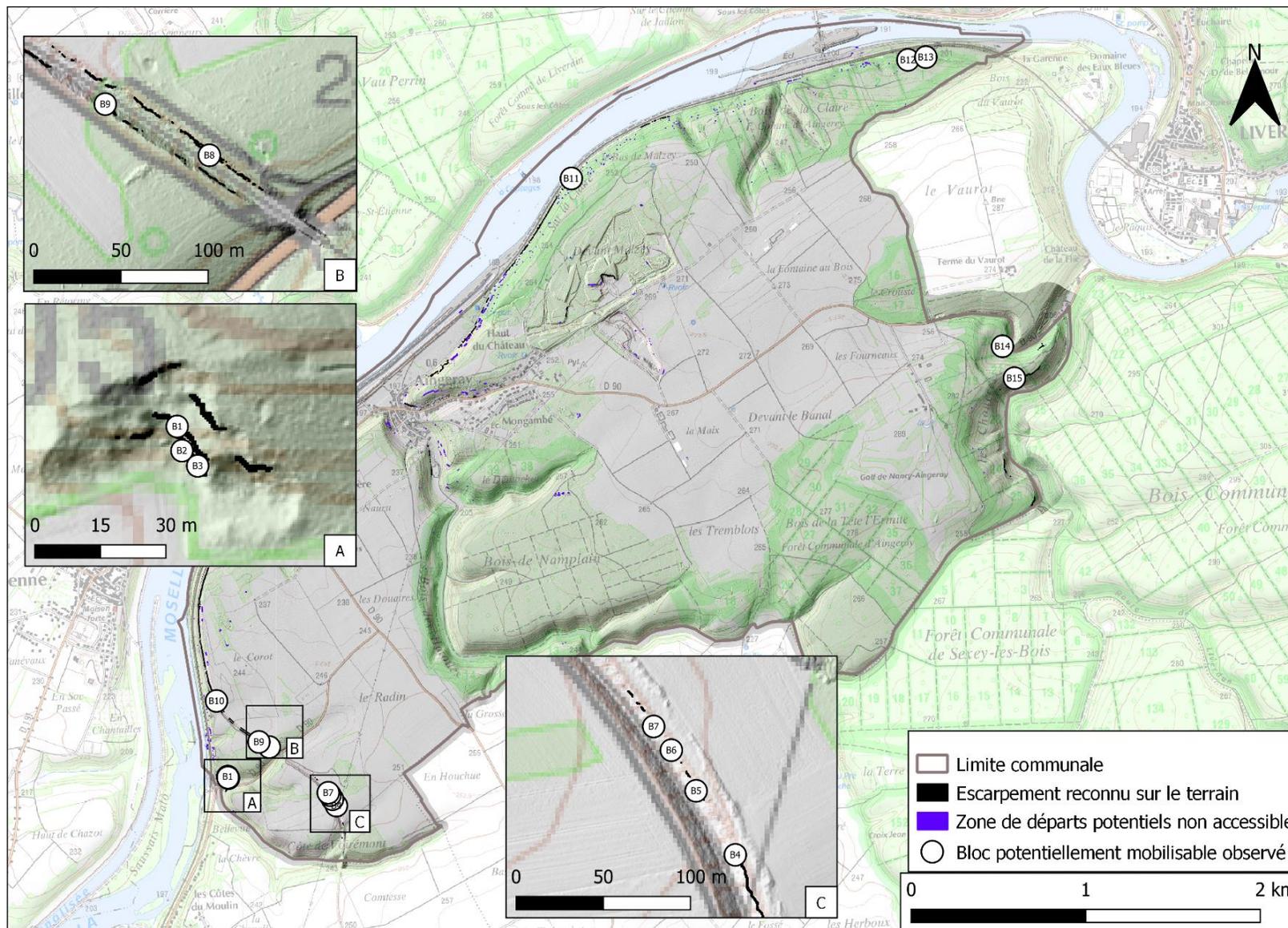


Illustration 26 – Identification de blocs potentiellement mobilisables lors du relevé terrain (fond scan 25 de l'IGN, 1/25 000)

Etant donné les terrains calcaires rencontrés, la fragmentation au cours de chute peut être importante due à la fracturation identifiée sur les blocs de volume supérieur au mètre cube sujet à un potentiel basculement.

Certaines zones de départs potentiels n'ont pas pu être caractérisées car le terrain ne le permettait pas : zone non accessible à pied à cause de la végétation, zone sur propriété privée sans autorisation d'accès...etc. Ces zones se verront attribuer comme volumes potentiellement mobilisables, les volumes correspondant au scénario de référence caractérisé sur les escarpements possédant des caractéristiques similaires (volumes observés sur les affleurements voisins, continuité structurelle avec l'affleurement non observé).

Un scénario de rupture potentielle en très grande masse entraînant un comportement de propagation de type « écoulement » (phénomène « de grande ampleur » dont la dynamique s'apparente à celle d'un mélange « turbulent ») n'a pas été retenu dans le cadre de la présente étude. La survenue d'un tel événement semble en effet peu probable compte tenu de la dimension des affleurements observés sur le terrain.

La méthode MEZAP propose de définir un potentiel de dommage directement à partir de l'indice d'intensité, c'est-à-dire uniquement en fonction du volume du bloc du scénario de référence.

4.5. INDICE D'ACTIVITE

La fréquence avec laquelle les volumes de roches se mettent en mouvement qualifie un **indice d'activité** des zones de départ, défini à partir de la grille suivante établie par le groupe de travail MEZAP. En plus de l'expertise terrain (traces de départ visibles et nombre des blocs observés dans la pente), l'évaluation de ce paramètre peut également être appréciée par les observations faites dans des contextes similaires ou s'appuyer sur des observations historiques lorsqu'elles existent.

Trois classes d'indice d'activité ont été définies pour cette étude en se basant sur les recommandations du MEZAP (illustration 27).

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

Illustration 27 – Définition des classes d'indice d'activité (source : document MEZAP 2021)

L'évaluation des indices d'activité se fera sur le terrain.

Sur l'ensemble des différents sites de départs potentiels de blocs, une évaluation de l'activité a donc été faite à dire d'expert. Cette évaluation a conduit à un indice d'activité de niveau faible (de l'ordre d'un bloc tous les 100 ans) à moyen (de l'ordre d'un bloc tous les 10 ans) concernant les blocs de volume compris entre 0,25 m³ et 1 m³ et les blocs de volume supérieur à 1 m³. Un indice d'activité de niveau moyen pour les blocs de volume compris entre 0,05 m³ et 0,25 m³. Enfin un indice d'activité fort (de l'ordre d'un bloc tous les ans) pour les blocs de volume inférieur à 0,05 m³.

Les zones de départ où l'indice d'activité est supérieur à la période de référence de 100 ans, c'est-à-dire moins d'un bloc tous les 100 ans, sont considérées comme présentant un aléa nul sur cette période référence.

4.6. SYNTHÈSE DES INDICES D'INTENSITÉ ET D'ACTIVITÉ

A partir des relevés de terrain, les volumes potentiellement mobilisables ainsi que leur indice d'activité associé ont été caractérisés pour chaque affleurement (annexe 1). Ce sont ces scénarii qui seront croisés avec les différentes probabilités de propagation afin de déterminer le niveau d'aléa final.

L'altération et la fracturation des escarpements de calcaire sont susceptibles d'individualiser des blocs de tailles très variables, pouvant être supérieures à 1 mètre cube. La majorité des affleurements observés sur la commune débitent des volumes très faibles avec un indice d'activité fort (calcaire très altéré et fracturé en surface). Cela se retrouve sur les petits affleurements inférieurs à 3 m environ, mais également sur les affleurements de plus grande taille. Sur des affleurements de 4 mètres pouvant atteindre les 15 mètres par endroit, les calcaires débitant des volumes très faibles se trouvent généralement sous des bancs plus indurés, lesquels vont produire des blocs de volumes plus importants. Pour ces derniers affleurements, l'activité a été évaluée à 10 ans (activité moyenne) pour les blocs d'un volume faible compris entre 0,05 et 0,25 m³ et de 10 à 100 ans (activité moyenne à faible) pour les blocs d'un volume modéré compris entre 0,25 et 1 m³. Les blocs supérieurs à 1 mètre cube sont majoritairement des ensembles qui présentent des fracturations verticales parallèles significatives permettant un basculement de l'ensemble rocheux vers l'aval. Ces blocs d'intensité élevée possèdent une activité évaluée à dire d'expert de 10 à 100 ans.

4.7. PROBABILITÉ DE PROPAGATION

La probabilité de propagation caractérise la propagation des éléments rocheux en versant. Un bloc peut se propager plus ou moins loin en fonction des caractéristiques du versant (pente, présence d'obstacles, nature du sol...) et des caractéristiques du bloc (forme, masse...).

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

- utilisation de l'outil de cartographie ELANA, utilisant la méthode dite de la ligne d'énergie permettant la définition d'enveloppes de propagation en fonction des caractéristiques topographiques du site ;
- analyse de la répartition des blocs éboulés dans le versant lors des relevés de terrain ;
- cartographie de synthèse basée sur les résultats des méthodes précédentes enrichies d'une approche « experte ».

4.7.1. Méthode de la ligne d'énergie

Principe de la méthode

Le modèle de la ligne d'énergie est un modèle dit statistique qui permet d'estimer à partir d'une zone de départ la localisation du point d'arrêt maximal probable d'un projectile et qui ne nécessite pas à proprement parlé de détermination des coefficients de réponse des sols. Ce modèle est basé sur le principe de la ligne d'énergie développée par HEIM A. en 1932. Ce modèle repose sur le principe 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. En partant de ce constat, un bloc peut aller d'une zone de départ A jusqu'à B, point d'intersection du relief avec une ligne imaginaire partant de la zone de départ et formant un angle β avec l'horizontal (Illustration 28). Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β , l'angle de la ligne d'énergie.

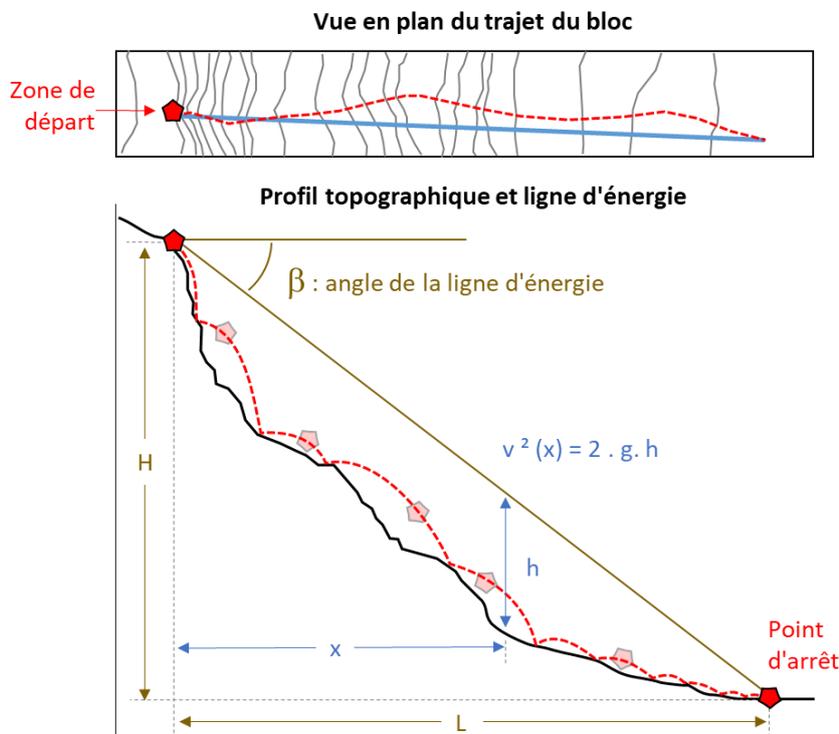


Illustration 28 - Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β (d'après MEZAP)

La délimitation des enveloppes de propagation sous forme de cône de propagation s'appuie sur le calcul de l'intersection des lignes d'énergie avec la topographie en introduisant un paramètre de dispersion latérale des propagations des phénomènes de chutes de blocs (Illustration 30, méthode aussi dite des cônes).

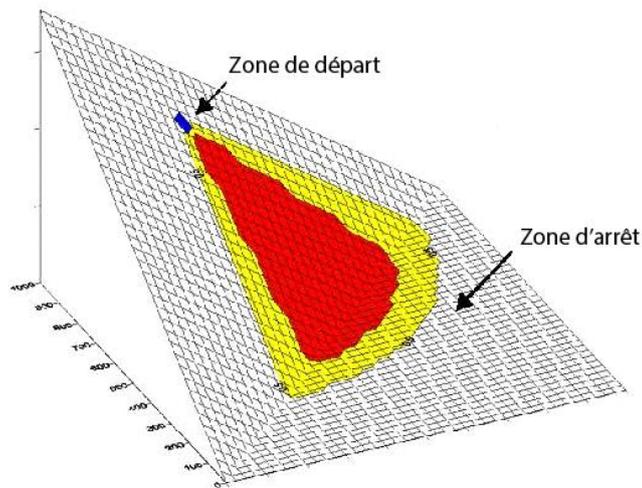


Illustration 29 - Représentation schématique de la méthode de cônes (d'après Jaboyedoff et Labiouse, 2011)

La méthode des lignes d'énergie permet d'obtenir une bonne estimation des enveloppes de propagation en cas de chute de blocs. Cependant la méthode est uniquement basée sur le profil topographique du versant et ne prend pas implicitement en compte :

- les caractéristiques des blocs (volume, forme...);
- le mécanisme de rupture ;
- la nature du sol au niveau de la zone de propagation (propriété mécanique et rugosité).

La précision de l'atteinte est conditionnée par la résolution et la qualité du MNT utilisé. Dans l'absolu, pour des scénarios de rupture différents on pourrait être amené à proposer des valeurs d'angles variables, dans un même contexte géomorphologique.

Par conséquent, pour la cartographie de l'aléa chute de blocs, la probabilité d'atteinte n'est pas considérée au sens mathématique/physique mais comme un indice qualitatif de possibilité d'atteinte d'un événement.

La difficulté de la mise en œuvre de la méthode de ligne d'énergie réside dans le choix d'une valeur d'angle pour une probabilité d'atteinte donnée. Communément, le choix des valeurs d'angle retenues pour qualifier la propagation est évaluée en fonction :

- de l'expertise du site (campagne de terrain, phénomènes historiques, répartition des blocs éboulés, similarité avec d'autres cas d'études...);
- des plages indicatives de valeur d'angle proposées par le guide MEZAP en fonction des principaux types de profil topographique des versants ;
- de l'analyse probabiliste et de la relation statistique mise en évidence entre l'aire normalisée (A_n) d'un profil de pente de versant et la valeur de l'angle de la méthode de la ligne d'énergie pour une probabilité d'atteinte donnée sur la base d'évènement de chute de blocs (rapport BRGM RP-66589-FR).

C'est cette troisième approche qui a été utilisée pour cette étude.

Utilisation de l'outil ELANA

Les calculs de probabilité d'atteinte ont été mis en œuvre en utilisant l'outil d'aide à la cartographie de la propagation des chutes de blocs ELANA (Energy Line Angle Normalized Area) développée par le BRGM (détaillé en annexe 9).

Cet outil a permis de définir 5 probabilités d'atteinte : extrêmement forte, très forte, forte, moyenne et faible.

La campagne de terrain a permis de vérifier les différentes enveloppes de propagation obtenues via l'outil de propagation ELANA et ce de plusieurs manières :

- en identifiant la position des blocs au sein de la pente et donc leur zone d'atterrissement ;
- à dire d'expert en fonction de la topographie des zones de propagation (replats, talus important pouvant endiguer la propagation).

Comme exemple, pour les zones de départ le long de la voie verte et en amont de la voie ferrée à l'ouest de la commune (annexe 6, feuille D), de nombreux blocs de volumes inférieur à $0,05 \text{ m}^3$ ayant chuté se retrouvent dans un grillage de protection empêchant les blocs de poursuivre leur propagation jusqu'au niveau du chemin de fer. Ces blocs ainsi que les impacts et déformations du grillage justifient alors une propagation dépassant le replat que forme la voie verte.

Sur les 17 phénomènes reportés, 15 sont compris dans l'enveloppe de propagation extrêmement forte, 1 dans l'enveloppe de propagation très forte et 1 dans l'enveloppe de propagation forte. Ces résultats sont cartographiés en annexe 6.

Les propagations obtenues ont également été vérifiées avec la méthode de la ligne d'énergie, permettant de définir les angles de propagation extrêmement forte (10^{-2}), forte (10^{-4}) et faible (10^{-6}) d'un bloc sur une pente à partir de sa zone de départ. En illustration 30 et 31, l'exemple du profil de propagation du phénomène P13, bloc n'ayant pas été déplacé à la suite de sa chute.

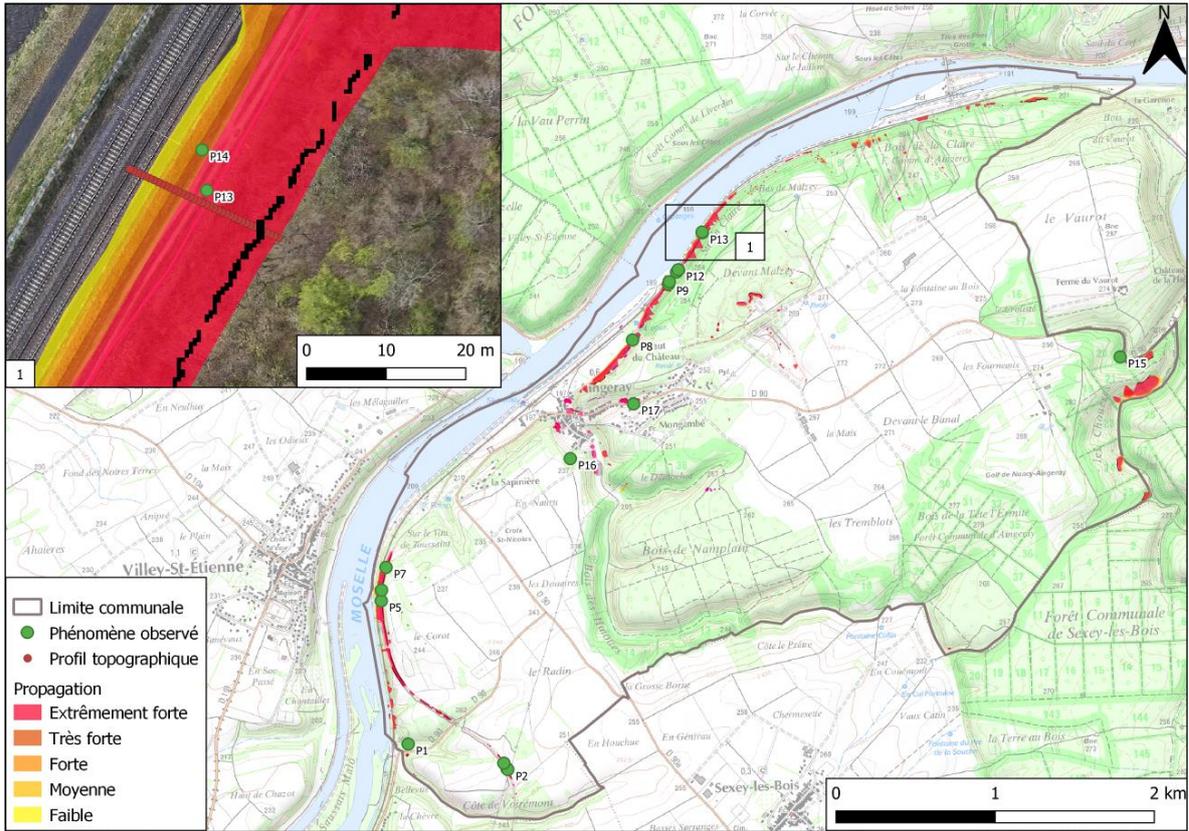


Illustration 30 – Localisation du profil topographique au droit du phénomène P13 (fond scan 25 IGN)

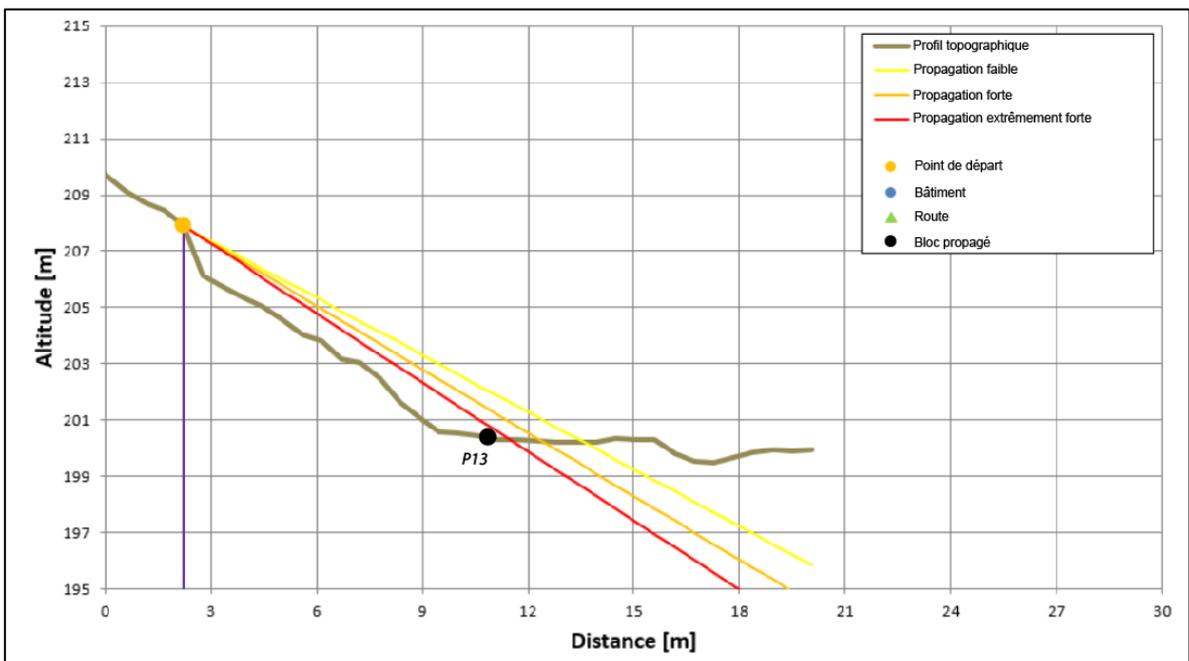


Illustration 31 – Profil topographique et enveloppes de propagation au droit du phénomène P13, obtenu par méthode de la ligne d'énergie

4.7.2. Synthèse aléa de propagation

L'analyse croisée des différents paramètres permet de proposer une cartographie de l'aléa de propagation. Afin d'aboutir à une hiérarchisation de l'atteinte potentielle de blocs rocheux en versant, la démarche a été la suivante :

- analyse de la répartition des blocs éboulés dans le versant ;
- valorisation à travers l'outil ELANA du retour d'expérience statistique en matière d'événements de chute de blocs par le positionnement pour chaque zone de départ identifiée des limites de probabilité d'atteinte faible, moyenne, forte, très forte et extrêmement forte ;
- in fine, positionnement des enveloppes de propagation et cartographie résultante arrêtées à dire d'expert, en intégrant les caractéristiques topographiques locales, les caractéristiques et la disposition des blocs présents dans les zones d'arrêt.

Il est important de rappeler que la végétation (forêt, arbuste...) et que les ouvrages existants (bâtiment, mur, parade antichute de blocs...) ne sont pas considérés dans l'évaluation de l'enveloppe de propagation et de l'estimation de la probabilité d'atteinte. Ces éléments sont considérés comme transparents à la propagation des événements de chute de blocs.

La cartographie des zones de propagation est présentée en annexe 6 sur l'ensemble de la commune au 1/17 000^{ème} et au 1/5 000 (B et D), 1/6 000 (A et C)

4.8. ZONE DE REcul ET INCERTITUDE DE POSITIONNEMENT

4.8.1. Recul par à-coups lié à des chutes de blocs successives

L'étendue maximale du recul progressif peut être estimée en considérant l'évènement impliquant le plus gros volume unitaire possible pour une période de 100 ans, suivit d'une régression progressive.

Sur la commune d'Aingeray, l'évènement connu impliquant le plus gros volume unitaire correspond au phénomène n°1. Il s'agit de blocs inframétriques à métriques pour un volume total estimé à environ 5 m³.

La limite d'étendue maximale du recul peut être fixée à 50 % de la hauteur de la falaise à dire d'expert pour la zone d'étude. Une zone de recul correspondant à 50 % de la hauteur de falaise, jusqu'à un maximum de 10 m, peut donc être appliquée sur l'ensemble des escarpements incluant le recul attendu et l'incertitude de positionnement.

L'étendue de la zone de recul de falaise ne pouvant pas dépasser 50 % de la hauteur de la falaise, les zones de départ de moins de 5 m de haut n'ont pas été considérées comme pouvant générer un phénomène de recul conséquent, la zone de recul retenue est de 1 m pour ces escarpements.

4.8.2. Application d'une zone tampon pour le recul et l'incertitude de positionnement

Le recul de falaise a donc été cartographié par l'application d'une zone tampon de :

- 5 m de large en amont des escarpements de plus de 5 m de hauteur ;
- 2 m de large pour les escarpements de moins de 5 m de hauteur.

Ces distances incluent une incertitude de positionnement des affleurements (estimée à 1 m).

4.9. PROBALITE D'ATTEINTE DE CHUTE DE BLOCS

La qualification de la probabilité d'atteinte est définie à partir de la matrice de l'illustration 32, en croisant la probabilité de propagation en un point et la probabilité de départ qualifiée par l'indice d'activité.

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

Illustration 32 – Matrice de probabilité d'atteinte (source : document MEZAP 2021)

L'application de cette grille conduit à considérer des zones de probabilité d'atteinte très faible, faible, modérée, forte et très forte du phénomène de référence.

4.10. ALEA DE CHUTE DE BLOCS

L'approche utilisée pour l'évaluation de l'aléa est de type expert. Cette analyse est basée sur des observations in-situ et la bibliographie existante. La cartographie de l'aléa chute de blocs s'est basée sur la méthode MEZAP 2021. L'outil de cartographie de propagation de blocs ELANA a été utilisé pour évaluer l'enveloppe des zones de propagation et les probabilités d'atteinte des blocs.

Le niveau d'aléa résultant est qualifié en tout point de la zone d'étude en utilisant la matrice ci-dessous (illustration 33).

		Intensité				
		$V \leq 0,05 \text{ m}^3$	$0,05 \leq V < 0,25 \text{ m}^3$	$0,25 \leq V < 1 \text{ m}^3$	$1 \leq V < 10 \text{ m}^3$	$V > 10 \text{ m}^3$
		Très faible	Faible	Modérée	Elevée	Très élevée
Probabilité d'atteinte	Faible	Faible	Faible	Modéré	Elevé	Elevé
	Modérée	Faible	Faible	Modéré	Elevé	Elevé
	Élevée	Faible	Modéré	Elevé	Elevé	Très élevé
	Très élevée	Modéré	Elevé	Elevé	Très élevé	Très élevé

Illustration 33 – Matrice d'évaluation de l'aléa (source : d'après document MEZAP 2021)

Ces zones de départs potentiels de blocs ont dans un second temps été sectorisées en grands ensembles homogènes du point de vue de leurs principales caractéristiques géomorphologiques et structurales, et de leur activité potentielle vis-à-vis des chutes de blocs.

La présente étude a permis d'identifier 67 escarpements sur la commune d'Aingeray. Les données récupérées sur le terrain et les données topographiques ont permis de définir pour chacune de ces zones de départ, la probabilité d'atteinte et l'indice d'intensité. Le croisement de ces deux indices permet d'évaluer l'aléa chute de blocs sur la commune, résumé dans le tableau suivant :

Nature du substratum	Calcaire					
	inf 0,05	0,05 à 0,25	0,25 à 1		1 à 10	
Indice d'intensité (m3)	1/an	1/10 ans	1/100 ans	1/10 ans	1/100 ans	1/10 ans
propag faible	faible	nul à négligeable				
propag moyenne	faible	faible	nul à négligeable	modéré	nul à négligeable	élevé
propag forte	faible	faible	modéré	modéré	élevé	élevé
propag très forte	modéré	modéré	modéré	elevé	élevé	élevé
propag extrêmement forte	modéré	elevée	élevé	elevé	élevé	très élevé

Illustration 34 – Croisement des données sur la commune d'Aingeray

Ci-dessus sont représentées les données relatives aux chutes de blocs observées sur la commune d'Aingeray. En croisant les données, on obtient le niveau d'aléa correspondant à chaque scénario.

Pour une même zone de départ, plusieurs scénarii peuvent s'exprimer : dans le cas où une zone de départ produit des blocs de volume élevé (1 à 10 m³) pour une période de 100 ans, et également des blocs volume modéré (0,25 à 1 m³) pour une période de 10 ans, alors cette zone de départ se verra attribuer 2 scénarii :

- un premier scénario (intensité élevée pour une activité faible), le niveau d'aléa sera élevé sur les enveloppes de propagation extrêmement forte, très forte et forte ;
- un second scénario (intensité modérée pour une activité moyenne), le niveau d'aléa sera modéré sur l'enveloppe de propagation moyenne.

La cartographie de l'aléa chute de bloc est présentée sur l'illustration 35 et en annexe 7 au format A3 sur l'ensemble de la commune au 1/17 000^{ème} et au 1/5 000 (B et D), 1/6 000 (A et C). Une carte de l'aléa au format A0, au 1/5 000 et sur fond cadastrale issu de la BD EDIGEO avril 2021, est joint avec ce rapport.

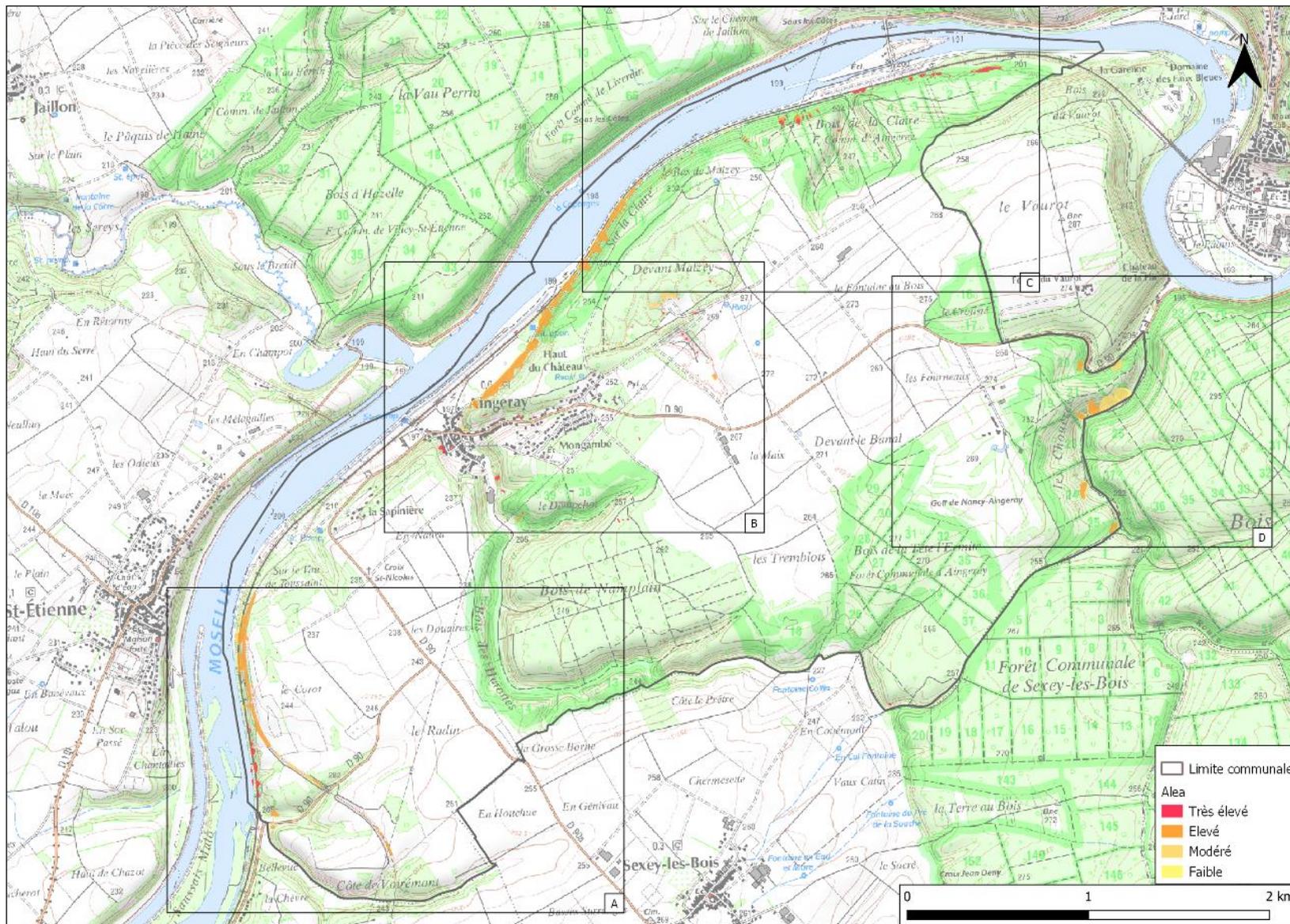


Illustration 35 – Carte de l'aléa chute de blocs sur la commune d'Aingeray (fond Scan25 de l'IGN)

4.11. LIMITE DE LA CARTE ET ECHELLE DE RESTITUTION

La carte établie dans ce contexte est une cartographie de l'aléa chute de blocs lié aux escarpements rocheux d'origine naturelle, à l'exclusion des chutes de blocs provenant de murs délabrés de bâtiments. La cartographie de l'aléa ne concerne que les zones d'escarpements identifiés et repérés sur le terrain ou à partir des données des MNT et des cartes IGN. Le zonage est donc ponctuel à l'échelle communale.

La cartographie de l'aléa est basée sur l'analyse des sources documentaires disponibles (méthodologies, connaissances des mécanismes...) à la date de sa réalisation et sur l'exploitation des événements historiques connus. L'étude est donc le reflet de la connaissance au moment de sa réalisation. La prise en compte ultérieure de données non connues ou non disponibles pendant cette période (méthodologies, investigations, phénomènes, archives, témoignages, etc.) peut conduire à une révision des critères d'analyse de l'aléa et donc de son expression cartographique.

La carte d'aléa est restituée sur les fonds cadastraux à l'échelle du 1/5 000^{ème}. La précision des limites des zones cartographiées au 1/5 000^{ème} est de 5 m auxquels il faut associer l'épaisseur du trait de report des limites cartographiées qui correspond, par exemple, pour 1 mm d'épaisseur à 5 m. Enfin, toute opération de zoom sur une carte au 1/5 000^{ème} pour en agrandir l'échelle est à proscrire.

5. Evaluation du risque et parades associées

5.1. EVALUATION ET HIERARCHISATION DU RISQUE

Les secteurs à enjeux situés dans les zones de propagation sont hiérarchisés en fonction du niveau de risque (croisement entre le niveau d'aléa et la vulnérabilité des enjeux).

5.1.1. Vulnérabilité des enjeux

La vulnérabilité d'un enjeu caractérise par sa capacité de résistance à un impact d'intensité donnée (type de maçonnerie, ouverture...). L'évaluation de la vulnérabilité intègre également des notions fonctionnelles incluant, par exemple, la fréquence d'exposition de l'enjeu face à l'aléa.

Dans le cadre de cette étude, l'évaluation de la vulnérabilité des enjeux a été mise en œuvre pour les bâtiments et les voies de communication. L'analyse réalisée exclut :

- les terrains de sport et les jardins (publics ou privés) ;
- les autoroutes et les voies de chemin de fer, car la responsabilité incombe au gestionnaire du réseau.

La définition d'un seuil de vulnérabilité nécessite une connaissance des dispositions constructives (matériaux utilisés, agencement des bâtiments en fonction de la propagation, annexe éventuelle comme des vérandas particulièrement vulnérables au chute de blocs, régularité des bâtiments en élévation...). Ne disposant pas de ces informations, l'analyse proposée repose sur une approche fonctionnelle à partir des données de la BDtopo de l'IGN (couches bâtis et infrastructures routières).

La hiérarchisation du risque est évaluée en croisant l'aléa chute de bloc avec les enjeux afin d'établir des priorités d'intervention pour la mise en place des parades. Ce croisement permet de mettre en évidence les principaux secteurs à risque.

5.1.2. Analyse des enjeux

Un traitement a été réalisé sous Qgis pour reprendre les données de la table bâtiment de la BDtopo et les faire correspondre à l'orthophotographie acquise en 2019. Les bâtiments dont la superficie totale dans la BDtopo est inférieure à 10 m² ont été supprimés de l'analyse.

A l'issue du traitement, un total de 20 bâtiments a été conservé.

La commune d'Aingeray comprend :

- 7 bâtiments impactés par un aléa chute de blocs très élevé ;
- 4 bâtiments impactés par un aléa chute de blocs élevé ;
- 7 bâtiments impactés par un aléa chute de blocs modéré ;
- 2 bâtiments impactés par un aléa chute de blocs faible.

La définition des zones de priorités des bâtiments est reprise dans l'illustration 36 :

Aléa	Bâtiments impactés
Faible	Priorité moyenne (0 bâtiment)
Modéré	Priorité forte (8 bâtiments)
Elevé	Priorité très forte (1 bâtiments)
Très élevé	Priorité très forte (11 bâtiments)

Illustration 36 – Définition des zones de priorités des bâtiments pour la mise en place de parades

Les priorités sur les voies de communication ont été établies à partir des données de la BDtopo. Les données ont été mises à jour avec l'orthophotographie levée lors de l'acquisition LIDAR.

De nombreux chemins se trouvent dans des zones d'aléa (voie verte, chemin bordant la voie ferrée, chemin forestier), il est donc important de les inclure dans les enjeux, cependant leur priorité vis-à-vis du risque sera diminué d'un cran comparé aux routes départementales et communales.

La définition des zones de priorités des voies de communications et des chemins est reprise dans l'illustration 37 :

Aléa	Voies de communications (route départementale et communale)	Chemins
Faible	Priorité faible	Priorité faible
Modéré	Priorité moyenne	Priorité faible
Elevé	Priorité forte	Priorité moyenne
Très élevé	Priorité très forte	Priorité forte

Illustration 37 – Définition des zones de priorités des voies de communication pour la mise en place de parades

5.1.3. Hiérarchisation des secteurs

En fonction de la localisation des bâtiments, des voies de communication et des affleurements, des secteurs ont été définis sur le site d'étude. Ces secteurs sont hiérarchisés selon le tableau suivant (illustration 38), et sont localisés sur l'illustration 39.

Numéro du secteur	Bâtiments				Voies de communication				
	Nombre de bâtiments en priorité très forte	Nombre de bâtiments en priorité forte	Nombre de bâtiments en priorité moyenne	Nombre total de bâtiments	Linéaire de route concernée en priorité très forte (m)	Linéaire de route concernée en priorité forte (m)	Linéaire de route concernée en priorité moyenne (m)	Linéaire de route concernée en priorité faible (m)	Linéaire total de route concernée (m)
1	8	0	0	8	0	0	0	0	0
2	2	0	0	2	0	0	0	0	0
3	1	0	0	1	0	0	0	0	0
4	1	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	5	0	5	0	0	0	0	0
6	0	3	0	3	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	17	134	20	171
8	0	0	0	0	0	0	18	0	18
9	0	0	0	0	0	0	1425	70	1495
10	0	0	0	0	0	0	890	0	890
11	0	0	0	0	0	0	65	172	237
12	0	0	0	0	0	0	48	50	98

Illustration 38 – Hiérarchisation des secteurs pour l'évaluation du risque en fonction des niveaux de priorités

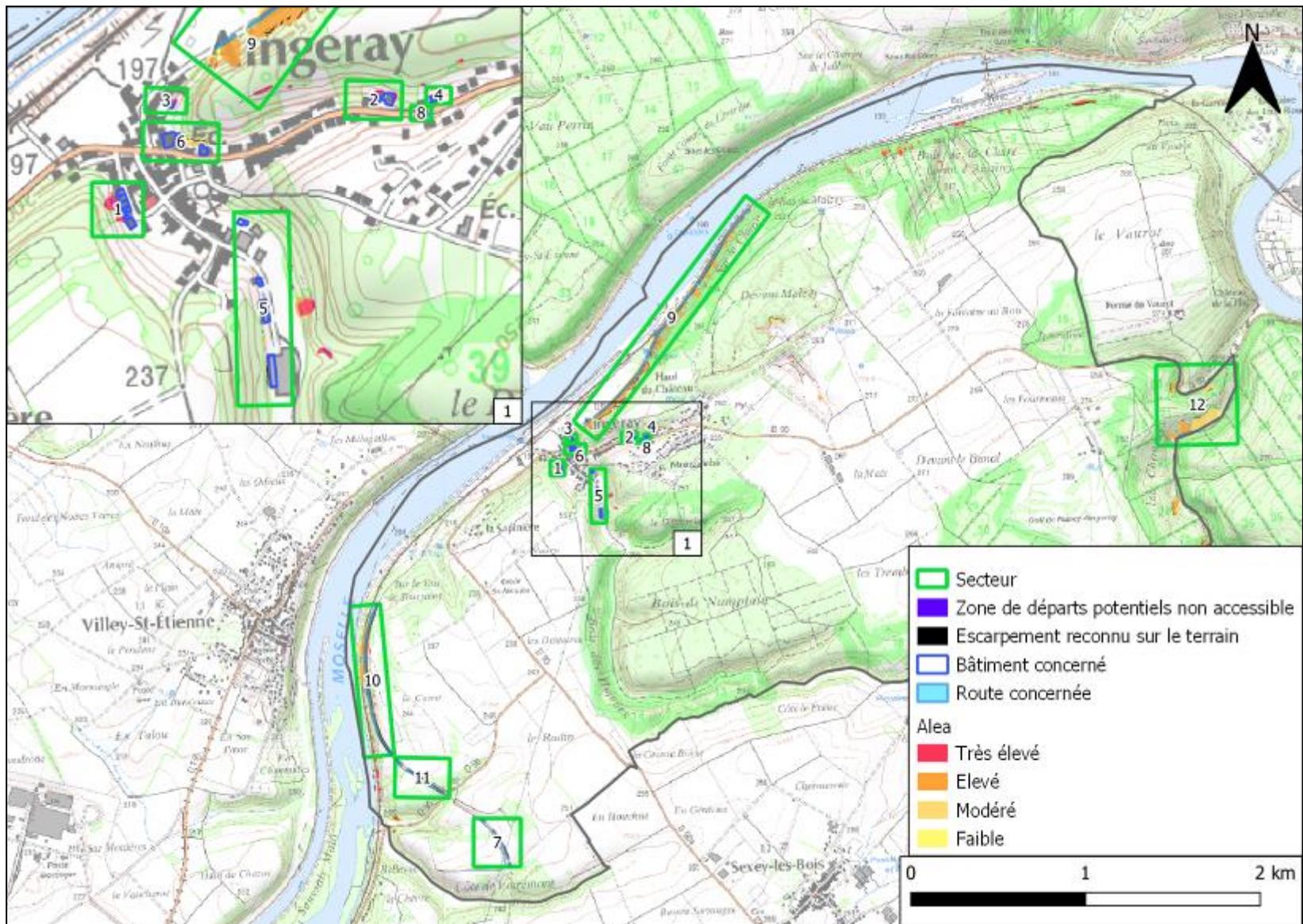


Illustration 39 – Localisation des secteurs pour l'évaluation du risque sur la commune d'Aingeray

5.2. PROPOSITION DE PARADES PAR SECTEUR

5.2.1. Méthode

Une ou des propositions de parades sont données pour toutes les zones de départ où un enjeu est concerné par un aléa chute de blocs. La hiérarchisation des priorités de mise en place des solutions de parade a pour seul objectif de fournir une aide à la décision aux administrateurs.

Les parades existantes n'ont pas été prises en compte dans l'analyse.

Dans les zones à enjeux, des propositions de parades sont données à titre informatif. Ces propositions, dans tous les cas, nécessiteront ultérieurement d'être validées et dimensionnées par un bureau d'étude compétent. De plus, les choix définitifs dépendent de rapports coûts/bénéfices ne faisant pas l'objet de cette étude.

Les types de parades peuvent être classés en deux principales catégories (tableau en annexe 8) :

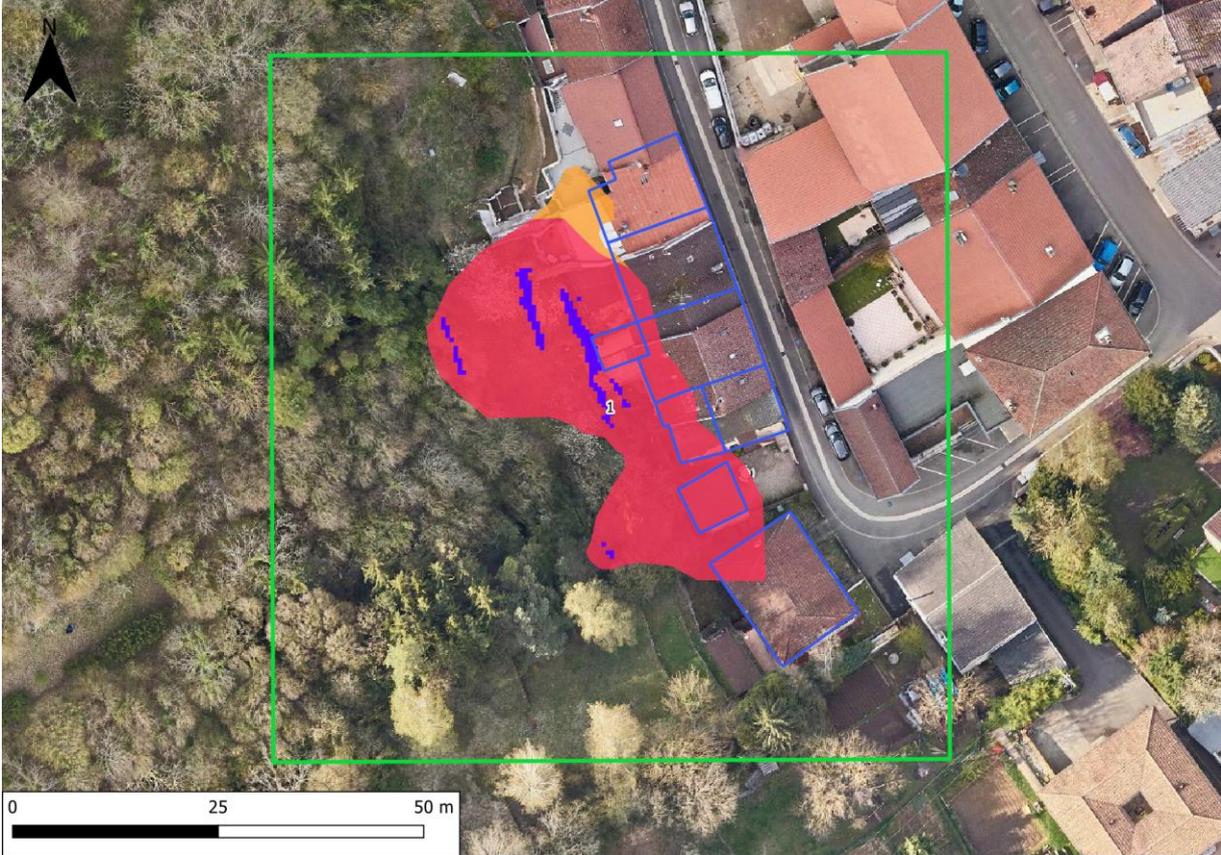
- **les parades actives proposant une action sur le départ de l'objet instable :**
 - en augmentant les forces résistantes (ancrage, contrefort, mur, filet, grillage plaqué) ;
 - en diminuant diminuer les contraintes motrices/aggravantes (drainage, limitation de l'érosion) ;
 - en éliminant l'objet instable (purge, reprofilage...).
- **les parades passives proposant une action sur la propagation de l'objet instable :**
 - en arrêtant le mouvement (écran, merlon, fosse) ;
 - en guidant le mouvement (grillages, filets pendus, casquette).

5.2.2. Fiche synthétiques des secteurs et des parades associées

Les figures composant les fiches synthétiques des secteurs sont des agrandissements du rendu cartographique au 1/5 000 et ne doivent donc en aucun cas servir à déterminer précisément les limites de zonages. Le zonage du niveau d'aléa a été tracé pour un rendu au 1/5 000, ce rendu cartographique est joint en 2 planches hors-texte au format A0.

	Secteur		Bloc observé
	Zone de départs potentiels non accessible	Aléa	
	Escarpement reconnu sur le terrain		Très élevé
	Bâtiment concerné		Elevé
	Route concernée		Modéré
			Faible

Illustration 40 – Légende des cartes par secteur

Secteur 1	
Localisation	Rue de la mairie
	
<p>Phénomènes : Un phénomène de mouvement de blocs calcaires du sous-sol remontant au début du 20^{ème} siècle décrit oralement par 2 habitants de la rue (date incertaine).</p>	
<p>Les escarpements ne sont pas accessibles.</p> <p>Il est important de noter que de nombreux murs ont pu être identifiés derrière les habitations de la rue de la mairie au nord du secteur 1, il est donc possible que ces zones, situées dans la continuité, soient également des murs de soutènement. A proximité, un accès à la forêt a permis d'identifier des restes d'ouvrages anthropiques datant de la première guerre mondiale (ancien point stratégique, fortifications légères). La zone de départs potentiels la plus à l'ouest est sous couvert végétale, non accessible.</p> <p>La hauteur des escarpements potentiels est de 2 à 3 m d'après évaluation au MNT.</p> <p>A défaut de pouvoir caractériser ces zones et par mesure de sécurité, l'aléa attribué à ce secteur a été défini par rapport au scénario le plus contraignant observé sur la commune.</p>	
Aléa : Très élevé et élevé selon la propagation	Volume mobilisable : 1 m ³ à 10 m ³ Indice d'activité : 1/10 ans
<p>Risque : 8 bâtiments en priorité très forte.</p>	

Parades :

Pas de proposition de parade à ce stade, en raison du besoin de reconnaissances complémentaires pour valider la présence d'escarpements derrière les habitations.

Secteur 2	
Localisation	Rue de Liverdun
	
Phénomènes : aucun phénomène connu	
<p>Les escarpements ne sont pas accessibles.</p> <p>Léger aperçu de l'escarpement depuis la route, (escarpement altéré, allure brune terreuse). Hauteur de 4 m évaluée sur le MNT.</p> <p>A défaut de pouvoir caractériser ces zones et par mesure de sécurité, l'aléa attribué à ce secteur a été défini par rapport au scénario le plus contraignant observé sur la commune.</p>	
Aléa : Très élevé et élevé selon la propagation	Volume mobilisable : 1 m ³ à 10 m ³ Indice d'activité : 1/10 ans
Risque : 2 bâtiments impactés en priorité très forte	
Parades : Pas de proposition de parade à ce stade, en raison du besoin de reconnaissances complémentaires pour valider la présence d'escarpements derrière les habitations.	

Secteur 3	
Localisation	Rue des Pâtureaux
	
Phénomènes : aucun phénomène connu	
<p>L'escarpement n'est pas accessible.</p> <p>Il est important de noter que de nombreux murs ont pu être identifiés derrière les habitations de la rue des Pâtureaux, il est donc possible qu'un mur soit également présent au niveau de cet escarpement.</p> <p>Hauteur de l'escarpement potentiel : 1,50 à 2 m d'après évaluation au MNT.</p> <p>A défaut de pouvoir caractériser ces zones et par mesure de sécurité, l'aléa attribué à ce secteur a été défini par rapport au scénario le plus contraignant observé sur la commune.</p>	
Aléa : Très élevé	Volume mobilisable : 1 m ³ à 10 m ³ Indice d'activité : 1/10 ans
Risque : 1 bâtiment en priorité très forte	
Parades : Pas de proposition de parade à ce stade, en raison du besoin de reconnaissances complémentaires pour valider la présence d'escarpements derrière les habitations.	

Secteur 4	
Localisation	Rue de Liverdun
Phénomènes : aucun phénomène connu	
<p>L'escarpement n'est pas accessible.</p> <p>Il est important de noter que de nombreux murs en pierres sèches ont pu être identifiés derrière les habitations de la rue de Liverdun, il est possible que ce soit le cas dans ce secteur.</p> <p>Hauteur de l'escarpement évaluée à 2 m d'après le MNT.</p> <p>A défaut de pouvoir caractériser ces zones et par mesure de sécurité, l'aléa attribué à ce secteur a été défini par rapport au scénario le plus contraignant observé sur la commune.</p>	
Aléa : Très élevé	Volume mobilisable : 1 m ³ à 10 m ³ Indice d'activité : 1/10 ans
Risque : 1 bâtiment impacté en priorité très forte	
Parades : Pas de proposition de parade à ce stade, en raison du besoin de reconnaissances complémentaires pour valider la présence d'escarpements derrière les habitations.	

Secteur 5	
Localisation	Rue du Vau
	
Phénomènes : aucun phénomène connu	
<p>Escarpement rocheux :</p> <p>Affleurements calcaire de 1 à 3 m de haut maximum sous couvert végétal, très fracturé créant des pierres de volume < 0,05 m³</p>	
Aléa : Modéré	<p>Volume mobilisable : < 0, 05 m³</p> <p>Indice d'activité : 1/an</p>
Risque : 5 bâtiments impactés en priorité forte	
<p>Parades :</p> <p>Il n'y a actuellement pas de parade sur ce secteur.</p> <p>La solution de parade à priori la plus adaptée, au vu des faibles volumes en jeu et de la faible hauteur des escarpements, serait un mur de soutènement ou du béton projeté, en veillant à assurer un drainage efficace.</p>	

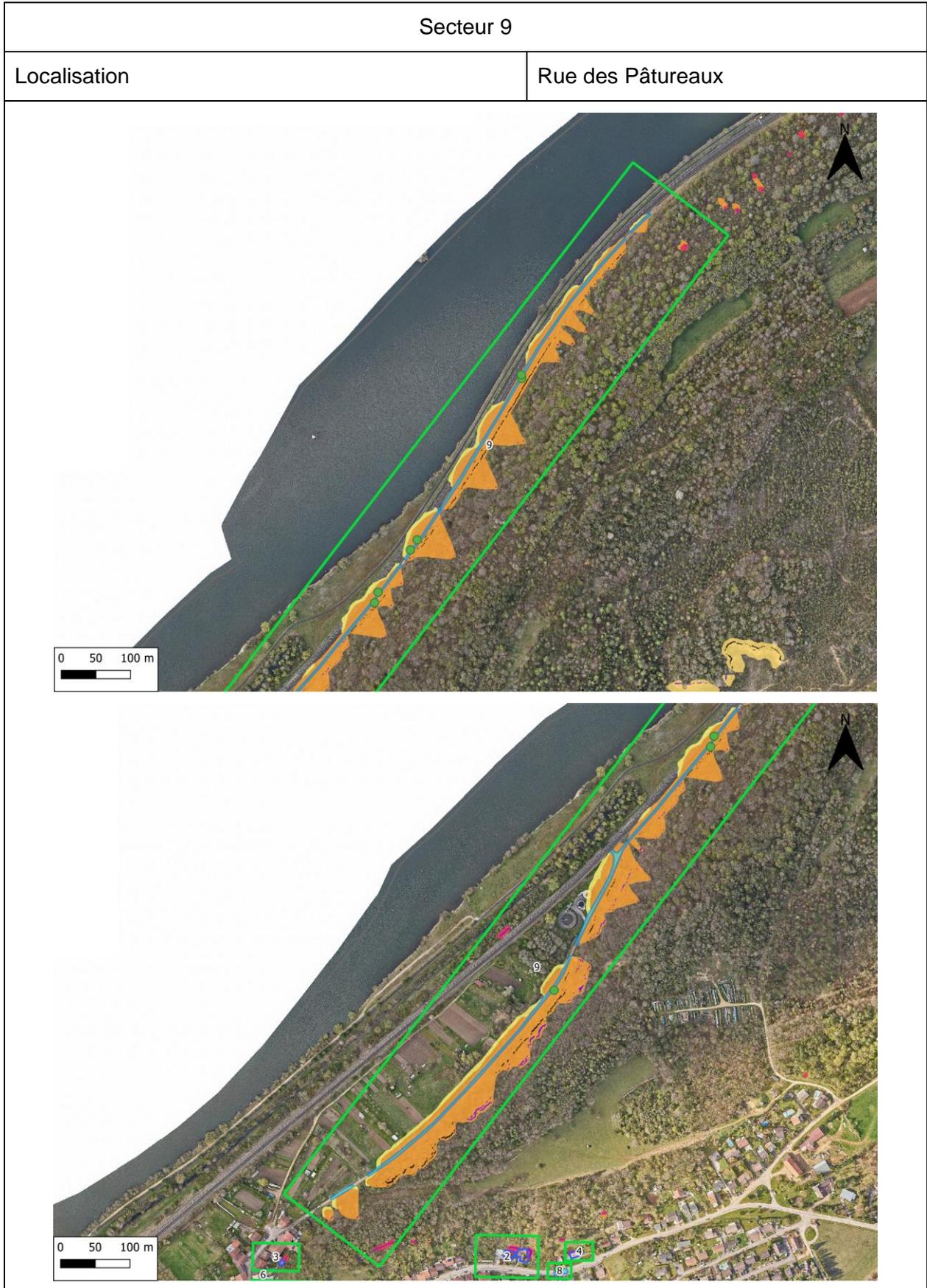
Secteur 6	
Localisation	Rue de Liverdun, Parking
	
Phénomènes : aucun phénomène connu	
<p>Escarpements rocheux :</p> <p>Au droit de l'habitation la plus à l'ouest (A67) : affleurement calcaire de 2 m de haut, relativement propre mais fracturé par endroit découpant des petits blocs de volume inférieur à 0,05 m³.</p> <p>Au droit de l'habitation au point A35 : affleurement de 3 à 4 m de hauteur formé par deux ensemble :</p> <p>Partie inférieure banc massif calcaire découpé verticalement par des fissures de largeur centimétriques à métriques d'extension plurimétrique (découpant l'ensemble de l'escarpement).</p> <p>Partie supérieure présentant un débit en plaquette avec des volumes inférieurs à 0.01 m³. D'après l'occupante des lieux, débit annuel de pierres de volumes < à 0,01 m³.</p> <p>La maison repose en partie sur l'affleurement.</p> <p>Au droit du parking (A34) : affleurement de 4 à 6 m très altéré et constitué de calcaire marneux créant de petits bloc se détachant à la suite de l'altération. Pas de fracturations visibles.</p>	

Aléa : Modéré	Volume mobilisable : < 0, 05 m ³ Indice d'activité : 1/an
Risque : 3 bâtiments en priorité forte	
<p>Parades :</p> <p>Reconnaitances complémentaires pour valider la présence d'escarpements derrière l'habitation ;</p> <p>Présence d'un ouvrage de protection existant. Il s'agit d'un merlon en maçonnerie d'environ 1 m de hauteur pour 40 cm de large et 20 m de long.</p> <p>Il est nécessaire de voir l'état de l'ouvrage et de vérifier si son dimensionnement est adéquat. La présence d'un merlon est une solution adaptée vu la configuration du site.</p> <p>La végétation en aval de l'affleurement doit être maintenue.</p>	

Secteur 7	
Localisation	Voie verte, sud de la D 90
	
<p>Phénomènes : de multiples chutes de blocs ont été observés le long du chemin :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 blocs observés le long de la voie verte, côté est, de volume d'intensité faible compris entre 0,05 m³ et 0,250 m³ ; <p>Nombreux blocs de volume inférieur 0,05 m³</p>	
<p>Escarpement rocheux :</p> <p>Du point A5 à A8 : affleurements calcaires ponctuels de 1 à 2 m de hauteur débitant des pierres de volume inférieur à 0,05 m³ majoritairement. Présence d'un bloc potentiellement mobilisable de volume > 1 m³ (fracturation transversale importante et début de bascule).</p> <p>Au point A4 : banc calcaire d'une puissance de 1 à 2 m sur un talus d'environ 2 m de haut. Altération du banc inférieur menant à un surplomb du banc le plus induré. Fracturations obliques et transversales induisant des blocs potentiellement mobilisables de volumes inférieurs à 0,25 m³ jusqu'au mètre cube.</p>	
<p>Aléa : Très élevé, élevé et modéré selon l'escarpement de départ</p>	<p>Les volumes mobilisables sont de l'ordre de :</p> <p>Inférieur à 0,05 m³ (indice d'activité 1/an)</p> <p>Entre 0,05 m³ et 0,25 m³ (indice d'activité 1/10 ans)</p>

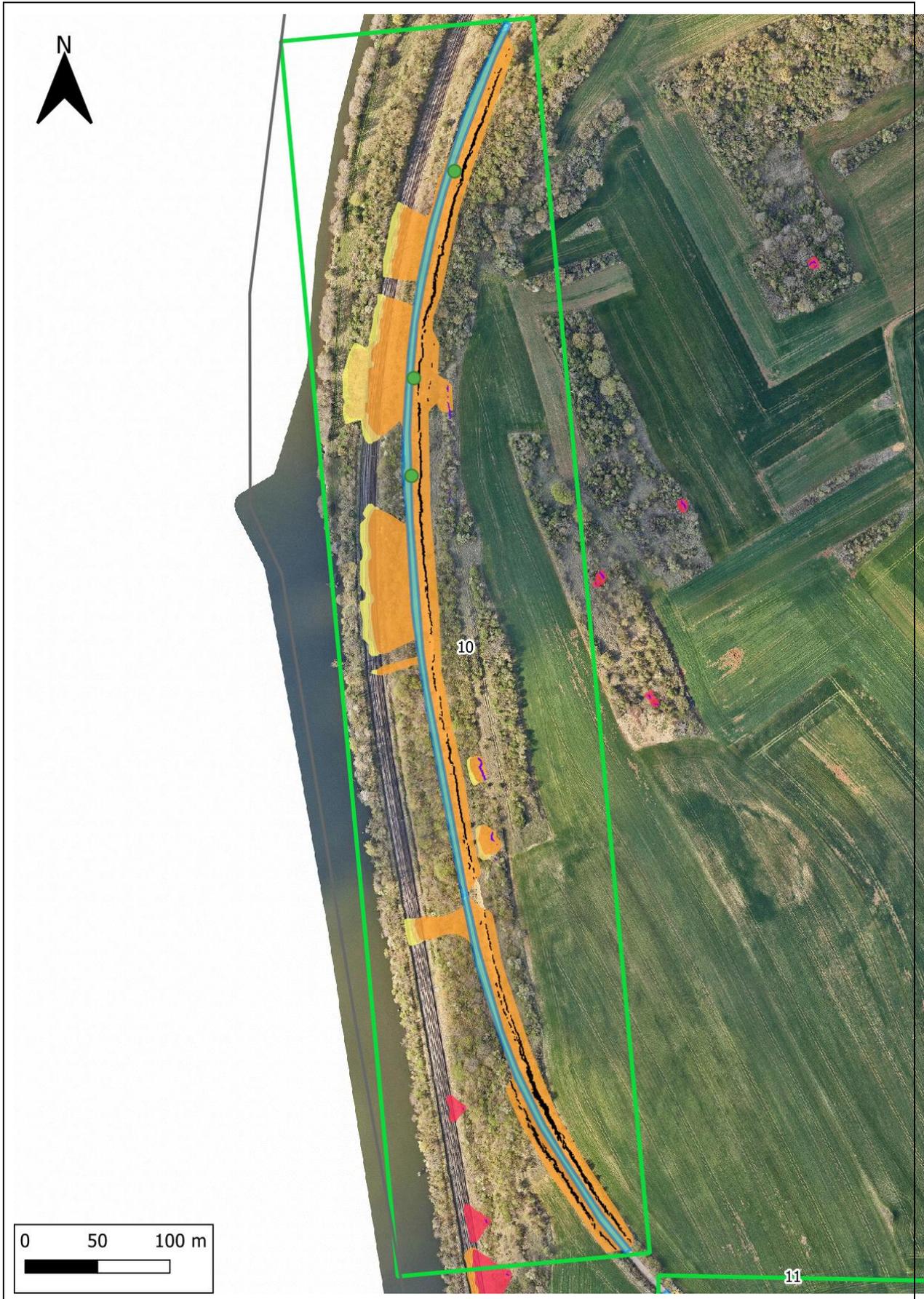
	<p>0,25 à 1 m³ (indice d'activité 1/10 ans) 1 m³ à 10 m³ (indice d'activité 1/10 ans)</p>
<p>Risque : 171 m de linéaire de chemin impactés dont 17 m en priorité forte</p>	
<p>Le point A4 étant le synclinal d'Aingeray, cet affleurement représente une curiosité géologique attirant les étudiants en géologie de la région.</p> <p>Parades :</p> <p>Maintien de la végétation dans les zones de propagation ;</p> <p>Au vu de la configuration du site, il peut être envisagé d'effectuer des purges régulières de la paroi (inspection tous les 1-2 ans et purges en fonction des besoins);</p> <p>Ou bien de mettre en place un merlon le long du chemin vert au vue de l'intérêt géologique et pédagogique que représente le site (un filet gênerait la vue de l'affleurement) ;</p> <p>Le bloc instable n°B5 identifié étant le seul bloc observé de volume compris entre 1 m et 10 m, il pourrait être purgé.</p>	

Secteur 8	
Localisation	Rue de Liverdun
<p>Phénomènes : pierres < 0,05 m³ le long du trottoir dans la bande enherbée. 1 bloc de volume inférieur à 0,05 m³ relevé sur le trottoir lors de la campagne de terrain.</p>	
<p>Escarpement rocheux : Affleurement calcaire d'environ 1 m de hauteur fracturé en blocs de volume < 0,05 m³.</p>	
Aléa : Modéré et faible selon la propagation	<p>Les volumes mobilisables sont de l'ordre de : Inférieur à 0,05 m³ (indice d'activité 1/an)</p>
<p>Risque : 18 m de linéaire de route en priorité moyenne</p>	
<p>Parades :</p> <p>Maintien de la végétation sur la zone de propagation.</p> <p>Un grillage est présent sur une partie le long du trottoir mais il n'est pas possible de définir s'il s'agit d'un ouvrage de parade dimensionné en conséquence des chutes de blocs.</p> <p>La solution de parade a priori la plus adaptée, au vu des faibles volumes en jeu et de la faible hauteur de l'escarpement, serait de mettre en place un filet plaqué sur l'affleurement.</p>	

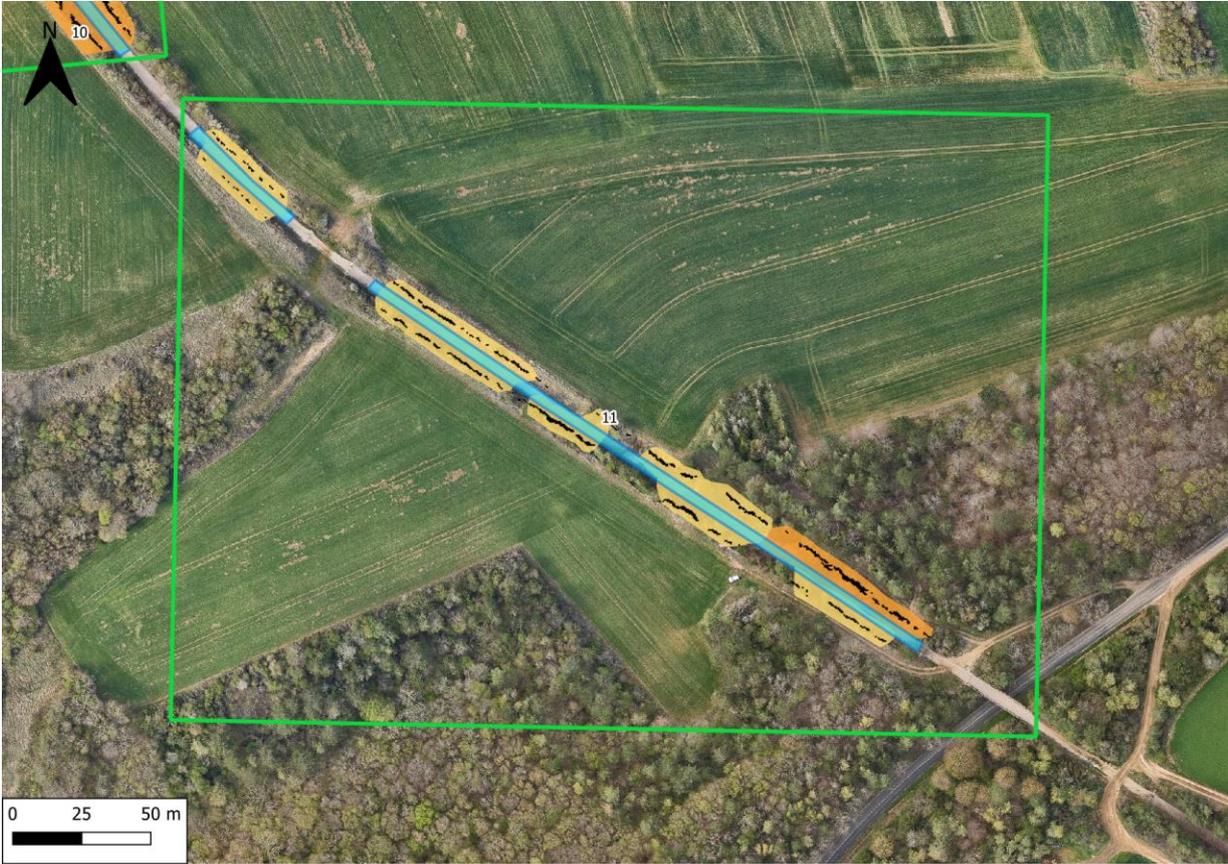


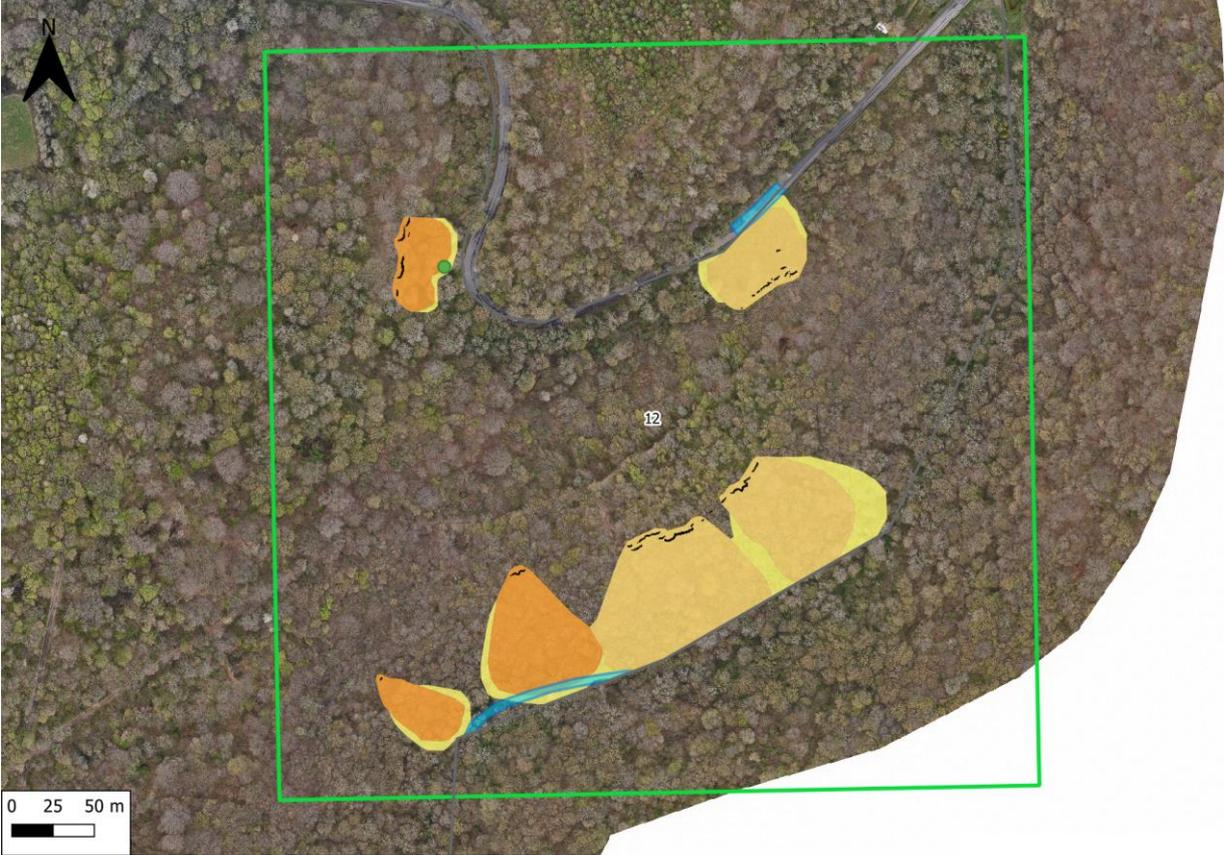
<p>Phénomènes : 8 chutes de blocs ont été observés le long du chemin bordant la voie ferrée :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 6 blocs observés le long du chemin de volume d'intensité faible compris entre 0,05 m³ et 0,250 m³ ; • 2 blocs observés le long du chemin de volume d'intensité très faible inférieur à 0,05 m³. <p>Certains de ces blocs traversent la largeur du chemin et finissent sur la bande d'herbe longeant la voie ferrée.</p>	
<p>Escarpement rocheux :</p> <p>Affleurements calcaire de 2 à 4 m de haut maximum au sein de la forêt, en sommet de pente abrupte pour les escarpements ayant pu être observés.</p> <p>L'ensemble des escarpements n'a pas pu être visualisé par manque d'accès (végétation dense). Les zones de départs potentiels non accessibles étant de hauteur similaire (2 à 4 m d'après évaluation sur MNT) et étant positionnés au même niveau dans la pente que les escarpements caractérisés aux points A41, A42 et A43, se verront attribué un aléa identique à ces points.</p>	
Aléa : Elevé et faible selon la propagation	<p>Volume mobilisable : < 0, 05 m³</p> <p>Indice d'activité : 1/an</p> <p>Volume mobilisable : 0, 05 m³ à 0,250 m³</p> <p>Indice d'activité : 1/10ans</p> <p>Volume mobilisable : 0, 250 m³ à 1 m³</p> <p>Indice d'activité : 1/10ans à 1/100ans</p> <p>Volume mobilisable : 1 m³ à 10 m³</p> <p>Indice d'activité : 1/100ans</p>
<p>Risque : 1 495 m linéaire de chemin impactés dont 1425 en priorité moyenne</p>	
<p>Parades :</p> <p>Maintien de la végétation sur la zone de propagation (versant boisé) ;</p> <p>Le secteur ne dispose pas de parade actuellement. Au vu de la dimension des blocs mobilisables et de la propagation des blocs atteignant le chemin, la parade appropriée serait de mettre en place un merlon le long du chemin.</p>	

Secteur 10	
Localisation	Voie verte, amont de la voie ferrée



<p>Phénomènes : 3 chutes de blocs ont été observées le long de la voie :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 blocs observés de volume d'intensité faible compris entre 0,05 m³ et 0,250 m³ ; • 1 bloc de 0,5 m³ <p>Nombreux blocs de volume inférieur 0,05 m³ de part et d'autres de la voie verte. 2 Blocs de volume inférieur à 0,25 m³ potentiellement mobilisables au niveau du point A18.</p>	
<p>Escarpement rocheux :</p> <p>Escarpements de 8 à 14 m de hauteur caractérisés par des bancs indurés sus-jacents à des bancs plus altérés créant des zones de surplomb. Les blocs se propagent au-delà des parades actuellement en place.</p>	
<p>Aléa : Elevé, modéré et faible selon la propagation</p>	<p>Les volumes mobilisables sont de l'ordre de :</p> <p>Inférieur à 0,05 m³ (indice d'activité 1/ ans) Entre 0,05 m³ et 0,25 m³ (indice d'activité 1/10 ans) 0,25 à 1 m³ (indice d'activité 1/100 ans)</p>
<p>Risque : 890 linéaire de chemin en priorité moyenne</p>	
<p>Parades :</p> <p>Le long du chemin un ouvrage de parade de type enrochement est déjà présent. Il conviendrait de vérifier l'état de cette parade et son dimensionnement ;</p> <p>Le long du côté aval du chemin, un grillage est présent et empêche les blocs de plus petits volumes de se propager au-delà du chemin. Il n'est pas possible de définir s'il s'agit d'un ouvrage de parade dimensionné spécialement pour la chute de blocs ;</p> <p>Il peut être envisagé d'effectuer des purges régulières de la paroi (inspection tous les 1-2 ans et purges en fonction des besoins) ;</p> <p>La solution de parade a priori la plus adaptée, au vu des volumes en jeu et de la hauteur des escarpements serait de mettre en place un merlon le long du chemin côté amont.</p>	

Secteur 11	
Localisation	Voie verte, nord-ouest de la D 90
	
Phénomènes : Aucun phénomène connu	
<p>Escarpement rocheux :</p> <p>Affleurements calcaire de 2 m de hauteur, altéré et créant des blocs < 0,05 m³.</p> <p>2 blocs de volume inférieur à 0,05 m³ potentiellement mobilisables au niveau du point A13.</p>	
Aléa : Elevé et modéré	<p>Les volumes mobilisables sont de l'ordre de :</p> <p>Inférieur à 0,05 m³ (indice d'activité 1/an)</p> <p>Entre 0,05 m³ et 0,25 m³ (indice d'activité 1/10 ans)</p>
Risque : 237 m de linéaire de chemin dont 65 m en priorité moyenne	
<p>Parades :</p> <p>Maintien de la végétation sur les zones de propagation ;</p> <p>Au vu de la configuration du site, il peut être envisagé d'effectuer des purges régulières de la paroi (inspection tous les 1-2 ans et purges en fonction des besoins);</p> <p>Ou bien de mettre en place des filets plaqués sur les affleurements.</p>	

Secteur 12	
Localisation	Chemin forestier à l'extrémité est de la commune, et route communale D90
	
Phénomènes : Aucun phénomène connu	
<p>Escarpement rocheux :</p> <p>A60 : affleurement calcaire de 3 m de hauteur, surplombant un pierrier recouvert de mousse et de jeunes arbres (avec des blocs potentiellement remobilisables), création de blocs < 0,05 m³.</p> <p>A61 et A62 : affleurement calcaire de 3 à 4 m de hauteur, présence de surfaces d'arrachement fraîches de blocs < 0,05 m³.</p> <p>A63 : affleurement calcaire de 2 m de hauteur, bloc > 1 m³ fracturé transversalement initiant un potentiel basculement. La base de ce bloc s'altère et se fracture en blocs < 0,05 m³.</p>	
Aléa : Elevé, modéré et faible	<p>Les volumes mobilisables sont de l'ordre de :</p> <p>Inférieur à 0,05 m³ (indice d'activité 1/an)</p> <p>Entre 1 m³ et 10 m³ (indice d'activité 1/100 ans)</p>
Risque : 98 m de linéaire de route et chemin dont 23 m de route en priorité moyenne	

Parades :

Maintien de la végétation pour les deux versants ;

Un fossé est présent en bord de route (côté sud de la D 90), il convient de vidanger le fossé des blocs chutés à échéance régulière selon les chutes).

6. Conclusion

La cartographie de l'aléa sur la commune de Aingeray a été réalisée en suivant une approche de type expert basée sur la méthode MEZAP 2021.

Cette cartographie a permis d'identifier 67 escarpements (inventaire non exhaustif des escarpements) et 17 phénomènes de chute de blocs sur la commune d'Aingeray. Bien que pour les blocs, cet inventaire ne soit évidemment pas exhaustif, il permet de cibler les zones particulièrement exposées.

Les données récupérées sur le terrain et les données topographiques ont permis de définir pour chacune des zones de départ, l'indice d'intensité (ce qui part) et l'indice d'activité (avec quelle fréquence), ainsi que la probabilité d'atteinte. Le croisement de ces deux indices avec la probabilité d'atteinte a permis d'évaluer l'aléa chute de blocs.

Le territoire communal d'Aingeray d'une surface de 12,9 km² est impacté par de l'aléa chute de blocs sur 147 195 m² soit 1,13 % de sa surface :

- 0,08 % du territoire communal en aléa faible ;
- 0,19 % du territoire communal en aléa modéré ;
- 0,72 % du territoire communal en aléa élevé ;
- 0,14 % du territoire communal en aléa très élevé.

Sur la base de la cartographie de l'aléa, un ciblage des zones à risque a été réalisé et des propositions de parades ont été formulées. Pour ce faire, la vulnérabilité des enjeux, scindés en deux catégories, bâtiment et voie de communication, a été évaluée. Le croisement des classes d'aléa et de vulnérabilité a permis de hiérarchiser les zones par priorité de mise en œuvre des solutions de parade. 12 secteurs ont été hiérarchisés avec les priorités suivantes au niveau communal :

- 12 bâtiments sont classés en priorité très forte ;
- 8 bâtiments sont classés en priorité forte ;
- 17 m de voie de communication (chemin) sont classés en priorité forte ;
- 2 580 m de voie de communication sont classés en priorité moyenne dont 17 m concernant une route communale, 18 m concernant la route départementale n°90 et 2 545 m concernant des chemins ;
- 312 m de voie de communication sont classés en priorité faible dont 10 m concernant une route communale et la route départementale n°90, ainsi que 302 m concernant des chemins.

Ces informations sont reprises dans le tableau suivant :

Priorité pour la mise en place de parade	Nombre de bâtiments			Linéaire voie de communication (m)			Total secteur	
	Très forte	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne	Faible	Nombre de bâtiments	Linéaire route (m)
Secteur 1	8	0	0	0	0	0	8	0
Secteur 2	2	0	0	0	0	0	2	0
Secteur 3	1	0	0	0	0	0	1	0
Secteur 4	1	0	0	0	0	0	1	0
Secteur 5	0	5	0	0	0	0	5	0
Secteur 6	0	3	0	0	0	0	3	0
Secteur 7	0	0	0	17	134	20	0	171
Secteur 8	0	0	0	0	18	0	0	18
Secteur 9	0	0	0	0	1425	70	0	1495
Secteur 10	0	0	0	0	890	0	0	890
Secteur 11	0	0	0	0	65	172	0	237
Secteur 12	0	0	0	0	48	50	0	98
Total commune	12	8	0	17	2580	312	20	3248

Illustration 41 – Tableau récapitulatif des enjeux par secteur à risque au sein de la commune de Aingeray

7. Bibliographie

- Berger** (2009) – Pour une meilleure prise en compte des forêts à fonction de protection vis-à-vis des risques naturels dans les plans de prévention des risques naturels prévisibles, les aménagements forestiers et les chartes forestières de territoire. Programme « Risque Décision Territoire ».
- Colas B.** (2015) – Commune d'Ocana (2A). Cartographie de l'aléa chute de blocs. Rapport final. BRGM/RP-65423-FR
- Chèvremont Ph.** (2004) – Carte géologique harmonisée du département de Meurthe-et-Moselle. Rapport BRGM/RP-53501-FR, 100 p., 3 fig., 18 tabl., 1 ann., 3 pl. hors texte
- Effendiantz L., Guillemain P., Pauly J.C., Payany M., Rochet L.** (2004) – Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux – Guide technique – LCPC.
- Gutierrez T., Garnier C., Colas B.** (2016) – Cartographie de l'aléa chute de blocs de l'ancienne carrière de Casevecchie (Ville-di-Pietrabugno, Haute Corse). Rapport final. BRGM/RP-65916-FR, 105 pages, 74 illustrations, 2 annexes.
- Hantz D., Guillemot A., Epinat C., D'Amato J., Guerin A., Jaboyedoff M., Alber S., Abellan A.** (2018) – Rockfall release frequency for different rock wall types. 4th International Symposium Rock Slope Stability, Chambéry 83-84.
- Jaboyedoff M., Labiouse V.** (2011) - Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. NHESS.
- Maquaire O. et Gigot P.** (1998) – Reconnaissance par sismique réfraction de la décompression et de l'instabilité des falaises vives du Bessin (Normandie, France). *Geodinamica Acta* (Paris) 2, 3, 150-159.
- MARCOT N., GIRARD A.** (2013) – Projet Massa Alcotra n°65 (Medium and Small Size rock fall hazard Assessment) : Evaluation de l'aléa lié aux chutes de blocs et aux éboulements de volume intermédiaire. 186 p.
- Moiriat D., S. Colin et R. Dufrenoy** (2008) – Aléa chutes de blocs sur le territoire départemental de Meurthe et Moselle (54) : Etat des connaissances et cartographie de l'aléa au 1/ 50 000 – Rapport BRGM/RP-56628-FR, 65 p, 23 ill., 6 tab., 53 planches cartographiques hors texte, 2 CD-ROM.
- Moon V.G. et Healy T.** (1994) – Mechanisms of coastal cliff retreat and hazard zone delineation in soft flysch deposits. *Journal of Coastal Research* 10, 3, 663-680.
- Rabin M., Le Goff J.** (2019) – Inventaire des zones de départ de chute de blocs sur la commune d'EPINAL (88 – Vosges). Rapport BRGM/RP-69020-FR, 84 p., 59 ill., 11 ann., 1 carte hors-texte (A0).
- Société Suisse de Géomorphologie** (Août 2009) – Fiches géomorphologique de la montagne, les mouvements gravitaires – 15 p.
- Vallet A., Hannion Y.** (2018) - Evaluation de l'aléa chute de blocs - Rue Emile Tabarant - Commune de Laroche-Saint-Cydroine (Yonne). Rapport final. BRGM/RP-68502-FR, 115 p., 4 ann., 1 CD

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

Vincent P.L. (1984) – Carte géologique France (1/50 000), feuille Toul n° 229. Orléans : BRGM. Notice explicative par Vincent P.L., Le Roux J., Flageollet J.C., Timbal J., Guillaume Ch., Delaunay J., Ricour J., Vogt J. (1984), 57 p.

Zany D. (2008) – Le synclinal d'Aingeray. Académie Nancy-Metz. 6p.

Annexe 1 :

Identification de quelques escarpements sur le terrain et caractérisation de leur aléa (liste non exhaustive)

Identifiant	Volume mobilisable unitaire (m ³)	Indice d'intensité	Indice d'activité	Formation géologique	Hauteur de l'escarpement	Commentaire
A1	< 0,05 0,05 à 0,25 1 à 10	Très faible Faible Elevée	1/an 1/10 ans 1/100 ans	Calcaire	7 à 10 m	Affleurement de calcaire de 7 à 10 m de hauteur
A2	< 0,05 0,05 à 0,25 1 à 10	Très faible Faible Elevée	1/an 1/10 ans 1/100 ans	Calcaire	8 à 10 m	Affleurement de calcaire de 8 à 10 m de hauteur, le banc inférieur est sain, le banc supérieur crée du bloc
A3	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	2 m	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur
A4	< 0,05 0,05 à 0,25 0,25 à 1	Très faible Faible Modérée	1/an 1/10 ans 1/10 ans	Calcaire	2 m	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur, curiosité géologique : synclinal d'Aingeray.
A5	< 0,05 0,05 à 0,25 0,25 à 1 1 à 10	Très faible Faible Modérée Elevée	1/an 1/10 ans 1/10 ans 1/10 ans	Calcaire	2 m	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur
A6	< 0,05 0,05 à 0,25 0,25 à 1	Très faible Faible Modérée	1/an 1/10 ans 1/10 ans	Calcaire	2 m	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur
A7	< 0,05 0,05 à 0,25 0,25 à 1	Très faible Faible Modérée	1/an 1/10 ans 1/10 ans	Calcaire	2 m	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur
A8	< 0,05 0,05 à 0,25 0,25 à 1	Très faible Faible Modérée	1/an 1/10 ans 1/10 ans	Calcaire	2 m	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur
A9	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	1 m	Affleurement de calcaire inférieur à 1 m de hauteur
A10	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	2 m	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur
A11	< 0,05 0,05 à 0,25	Très faible Faible	1/an 1/10 ans	Calcaire	2 m	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur
A12	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	2 m	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur
A13	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	2 m	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur
A14	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	2 m	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur
A15	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	2 m	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur
A16	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	2 m	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur

Identifiant	Volume mobilisable unitaire (m ³)	Indice d'intensité	Indice d'activité	Formation géologique	Hauteur de l'escarpement	Commentaire
A17	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	2 m	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur
A18	< 0,05 0,05 à 0,25	Très faible Faible	1/an 1/10 ans	Calcaire	10 m	Affleurement de calcaire d'environ 10 m de hauteur, les bancs supérieurs créent les blocs de plus gros volume
A19	< 0,05 0,05 à 0,25	Très faible Faible	1/an 1/10 ans	Calcaire	10 m	Affleurement de calcaire d'environ 10 m de hauteur, les bancs supérieurs créent les blocs de plus gros volume
A20	< 0,05 0,05 à 0,25	Très faible Faible	1/an 1/10 ans	Calcaire	8 à 10 m	Affleurement de calcaire de 8 à 10 m de hauteur
A21	< 0,05 0,05 à 0,25	Très faible Faible	1/an 1/10 ans	Calcaire	8 à 10 m	Affleurement de calcaire de 8 à 10 m de hauteur
A22	< 0,05 0,05 à 0,25	Très faible Faible	1/an 1/10 ans	Calcaire	8 à 10 m	Affleurement de calcaire de 8 à 10 m de hauteur
A23	< 0,05 0,05 à 0,25	Très faible Faible	1/an 1/10 ans	Calcaire	8 à 10 m	Affleurement de calcaire de 8 à 10 m de hauteur
A24	< 0,05 0,05 à 0,25	Très faible Faible	1/an 1/10 ans	Calcaire	8 à 10 m	Affleurement de calcaire de 8 à 10 m de hauteur
A25	< 0,05 0,05 à 0,25 0,25 à 1	Très faible Faible Modérée	1/an 1/10 ans 1/100 ans	Calcaire	6 m	Affleurement de calcaire de 10 à 14 m de hauteur, de nombreux blocs < 250 L de l'autre côté du chemin dans le grillage, grillage abimé.
A26	< 0,05 0,05 à 0,25 0,25 à 1	Très faible Faible Modérée	1/an 1/10 ans 1/100 ans	Calcaire	6 m	Affleurement de calcaire de 10 à 14 m de hauteur, de nombreux blocs < 250 L de l'autre côté du chemin dans le grillage, grillage abimé.
A27	< 0,05 0,05 à 0,25 0,25 à 1	Très faible Faible Modérée	1/an 1/10 ans 1/100 ans	Calcaire	6 m	Affleurement de calcaire de 10 à 14 m de hauteur, de nombreux blocs < 250 L de l'autre côté du chemin dans le grillage, grillage abimé.
A28	< 0,05 0,05 à 0,25 0,25 à 1	Très faible Faible Modérée	1/an 1/10 ans 1/100 ans	Calcaire	6 m	Affleurement de calcaire de 10 à 14 m de hauteur, de nombreux blocs < 250 L de l'autre côté du chemin dans le grillage, grillage abimé.

Identifiant	Volume mobilisable unitaire (m ³)	Indice d'intensité	Indice d'activité	Formation géologique	Hauteur de l'escarpement	Commentaire
A29	< 0,05	Très faible	1/10 an	Calcaire	1 m	Affleurement inférieur à 1 m, sous couvert végétal et à la suite d'un mur de soutènement.
A30	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	2 m	Affleurement inférieur à 2 m, sous couvert végétal. Derrière hangar agricole.
A31	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	2 m	Affleurement inférieur à 2 m, sous couvert végétal. Derrière hangar agricole.
A32	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	3 m	Affleurement inférieur à 3 m, sous couvert végétal. Derrière hangar agricole.
A33	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	3 m	Affleurement inférieur à 3 m, sous couvert végétal. Derrière hangar agricole.
A34	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	4m	Affleurement de 4 m au droit du parking en face de l'école. Très altéré, aspect argileux. Présente des blocs de volume unitaire inférieur à 0,05 m ³
A35	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	2 m	Affleurement inférieur à 2 m de calcaire très lité se débitant en pierres < 50 L, majoritairement < à 1 L. Présence d'un bloc à quelques cm d'être appuyé contre la maison. Le pendage est dirigé vers l'habitation.
A36	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	1 m	Affleurement inférieur à 1 m, lité.
A37	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	5 m	Affleurement de 5 m se trouvant dans une ancienne carrière. Affleurement très fracturé.
A38	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	5 m	Affleurement de 5 m se trouvant dans une ancienne carrière. Affleurement très fracturé.

Identifiant	Volume mobilisable unitaire (m ³)	Indice d'intensité	Indice d'activité	Formation géologique	Hauteur de l'escarpement	Commentaire
A39	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	10 m	Affleurement de 8 à 10 m se trouvant dans une ancienne carrière. L'affleurement est très altéré, nombreux blocs < 50 L.
A40	< 0,05 0,05 à 0,25	Très faible Faible	1/an 1/10 ans	Calcaire	10 m	Affleurement de 8 à 10 m se trouvant dans une ancienne carrière. L'affleurement n'est peut-être pas d'origine naturel, risque tout de même de remobilisation des blocs présents le long de la pente. Le terrain est anthropisé et à l'abandon.
A41	< 0,05 0,05 à 0,25 1 à 10	Très faible Faible Elevée	1/an 1/10 ans 1/100 ans	Calcaire	3 m	Affleurement calcaire de 3 m de hauteur maximum, bancs inférieurs très altérés / fracturés utilisés par des animaux comme abris, bancs supérieurs plus cohérents. L'altération et la chute de blocs des bancs sous-jacents peuvent entraîner le départ de blocs supérieurs de plus gros volumes
A42	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	1 m	Affleurement calcaire de 1 m de hauteur sous couverture végétale
A43	< 0,05 0,05 à 0,25 0,25 à 1	Très faible Faible Modérée	1/an 1/10 ans 1/100 ans	Calcaire	2 m	Affleurement calcaire de 2 m de hauteur
A44	< 0,05 0,25 à 1	Très faible Modérée	1/an 1/100 ans	Calcaire	2 m	Affleurement calcaire de 2 m de hauteur, constitué de 4 blocs de volume moyen
A45	< 0,05 0,05 à 0,25	Très faible Faible	1/an 1/10 ans	Calcaire	1 m	Affleurement calcaire d'1 m de hauteur, altéré. Pente altéré.
A46	< 0,05 0,05 à 0,25	Très faible Faible	1/an 1/10 ans		2 m	non visible
A47					2 m	non visible
A48	< 0,05 0,05 à 0,25 0,25 à 1	Très faible Faible Modérée	1/an 1/10 ans 1/100 ans	Calcaire	2 m	Affleurement de 2 m de hauteur
A49					2 m	non visible

Identifiant	Volume mobilisable unitaire (m ³)	Indice d'intensité	Indice d'activité	Formation géologique	Hauteur de l'escarpement	Commentaire
A50	< 0,05 0,25 à 1	Très faible Modérée	1/an 1/100 ans	Calcaire	2 m	Affleurement de 2 m de hauteur
A51	< 0,05 0,25 à 1	Très faible Modérée	1/an 1/100 ans	Calcaire	2 m	Affleurement de 2 m de hauteur
A52	< 0,05 0,25 à 1	Très faible Modérée	1/an 1/100 ans	Calcaire	2 m	Affleurement de 2 m de hauteur
A53	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	1 m	Affleurement de moins de 1 m de hauteur sous couvert végétal
A54	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	1 m	Affleurement de moins de 1 m de hauteur sous couvert végétal
A55	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	1 m	Affleurement de moins de 1 m de hauteur sous couvert végétal
A56	< 0,05 1 à 10	Très faible Elevée	1/an 1/100 ans	Calcaire	4 m	Affleurement de 4 m de hauteur
A57	< 0,05 1 à 10	Très faible Elevée	1/an 1/100 ans	Calcaire	4 m	Affleurement de 4 m de hauteur
A58	< 0,05 1 à 10	Très faible Elevée	1/an 1/10 ans	Calcaire	4 m	Affleurement de 4 m de hauteur
A59	< 0,05 1 à 10	Très faible Elevée	1/an 1/100 ans	Calcaire	4 m	Affleurement de 2 à 4 m de hauteur. Nombreux arbres déracinés pouvant entraîner la chute de blocs.
A60	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	3 m	Affleurement de 3 m de hauteur surplombant un pierrier recouvert de mousse et de jeunes arbres
A61	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	3 m	Affleurement de 3 m de hauteur
A62	< 0,05	Très faible	1/an	Calcaire	4 m	Affleurement de 4 m de hauteur, présence de surfaces d'arrachement fraîches.
A63	< 0,05 1 à 10	Très faible Elevée	1/an 1/100 ans	Calcaire	2 m	Affleurement de 2 m de hauteur
A64	< 0,05 0,05 à 0,25	Très faible Faible	1/an 1/10 ans	Calcaire	4 m	Affleurement de 4 m de hauteur maximum. Fracturation très marquée en blocs < à 50 L pouvant atteindre l'inférieur à 250 L.

Identifiant	Volume mobilisable unitaire (m ³)	Indice d'intensité	Indice d'activité	Formation géologique	Hauteur de l'escarpement	Commentaire
A65	< 0,05 0,05 à 0,25	Très faible Faible	1/an 1/10 ans	Calcaire	4 m	Affleurement de 4 m de hauteur maximum. Fracturation très marquée en blocs < à 50 L pouvant atteindre l'inférieur à 250 L.
A66	< 0,05 1 à 10	Très faible Elevée	1/an 1/100 ans	Calcaire	2 m	Affleurement de 2 m de hauteur, Fracturations multiples verticales perpendiculaires à l'affleurement, également des fracturations transversales créant des blocs > 1 m ³ . Grande fracturations en petites pierres < 50 L où seul reste en surplomb une couche rocheuse d'environ 50 cm d'épaisseur sur laquelle repose des arbres, risque d'arrachement par chute d'arbre (nombreux arbres déracinés lors du relevé terrain à la suite des fortes précipitations/vent).
A67	< 0,05 1 à 10	Très faible Elevée	1/an 1/100 ans	Calcaire	2 m	Affleurement de 2 m de hauteur derrière habitation, affleurement propre dans sa majorité, produit des pierres < 50 L par endroit.

Illustration 42 – Caractérisation des escarpements observés sur le terrain

Identifiant	Indice d'activité pour un volume inférieur à 0,05 m ³	Indice d'activité pour un volume de 0,05 à 0,25 m ³	Indice d'activité pour un volume de 0,25 à 1 m ³	Indice d'activité pour un volume de 1 à 10 m ³	Aléa pour une propagation extrêmement forte	Aléa pour une propagation très forte	Aléa pour une propagation forte	Aléa pour une propagation moyenne	Aléa pour une propagation faible
A1	annuel	10 ans		100 ans	élevé	élevé	élevé	faible	faible
A2	annuel	10 ans		100 ans	élevé	élevé	élevé	faible	faible
A3	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A4	annuel	10 ans	10 ans		élevé	élevé	moyen	moyen	faible
A5	annuel	10 ans	10 ans	10 ans	très élevé	élevé	élevé	élevé	faible
A6	annuel	10 ans	10 ans		élevé	élevé	moyen	moyen	faible
A7	annuel	10 ans	10 ans		élevé	élevé	moyen	moyen	faible
A8	annuel	10 ans	10 ans		élevé	élevé	moyen	moyen	faible
A9	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A10	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A11	annuel	10 ans			élevé	moyen	faible	faible	faible
A12	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A13	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A14	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A15	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A16	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A17	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A18	annuel	10 ans			élevé	moyen	faible	faible	faible
A19	annuel	10 ans			élevé	moyen	faible	faible	faible
A20	annuel	10 ans			élevé	moyen	faible	faible	faible
A21	annuel	10 ans			élevé	moyen	faible	faible	faible
A22	annuel	10 ans			élevé	moyen	faible	faible	faible
A23	annuel	10 ans			élevé	moyen	faible	faible	faible
A24	annuel	10 ans			élevé	moyen	faible	faible	faible
A25	annuel	10 ans	100 ans		élevé	moyen	moyen	faible	faible
A26	annuel	10 ans	100 ans		élevé	moyen	moyen	faible	faible
A27	annuel	10 ans	100 ans		élevé	moyen	moyen	faible	faible
A28	annuel	10 ans	100 ans		élevé	moyen	moyen	faible	faible
A29	10 ans				moyen	faible	faible	faible	nul
A30	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A31	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A32	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A33	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A34	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A35	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A36	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A37	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible

Identifiant	Indice d'activité pour un volume inférieur à 0,05 m3	Indice d'activité pour un volume de 0,05 à 0,25 m3	Indice d'activité pour un volume de 0,25 à 1 m3	Indice d'activité pour un volume de 1 à 10 m3	Aléa pour une propagation extrêmement forte	Aléa pour une propagation très forte	Aléa pour une propagation forte	Aléa pour une propagation moyenne	Aléa pour une propagation faible
A38	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A39	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A40	annuel	10 ans			élevé	moyen	faible	faible	faible
A41	annuel	10 ans		100 ans	élevé	élevé	élevé	faible	faible
A42	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A43	annuel	10 ans	100 ans		élevé	moyen	moyen	faible	faible
A44	annuel		100 ans		élevé	élevé	moyen	faible	faible
A45	annuel	10 ans			élevé	moyen	faible	faible	faible
A46	annuel	10 ans			élevé	moyen	faible	faible	faible
A47									
A48	annuel	10 ans	100 ans		élevé	moyen	moyen	faible	faible
A49									
A50	annuel		100 ans		élevé	moyen	moyen	faible	faible
A51	annuel		100 ans		élevé	moyen	moyen	faible	faible
A52	annuel		100 ans		élevé	moyen	moyen	faible	faible
A53	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A54	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A55	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A56	annuel			100 ans	élevé	élevé	élevé	faible	faible
A57	annuel			100 ans	élevé	élevé	élevé	faible	faible
A58*	annuel			10 ans	très élevé	élevé	élevé	élevé	faible
A59	annuel			100 ans	élevé	élevé	élevé	faible	faible
A60	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A61	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A62	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible
A63	annuel			100 ans	élevé	élevé	élevé	faible	faible
A64	annuel	10 ans			élevé	moyen	faible	faible	faible
A65	annuel	10 ans			élevé	moyen	faible	faible	faible
A66	annuel			100 ans	élevé	élevé	élevé	faible	faible
A67	annuel				moyen	moyen	faible	faible	faible

Illustration 43 - Caractérisation de l'aléa des escarpements observés sur le terrain

* En rouge, scénario maximal observé sur la commune d'Aingeray

Annexe 2:

Carte de reconnaissance des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain (fond scan 25 de l'IGN)

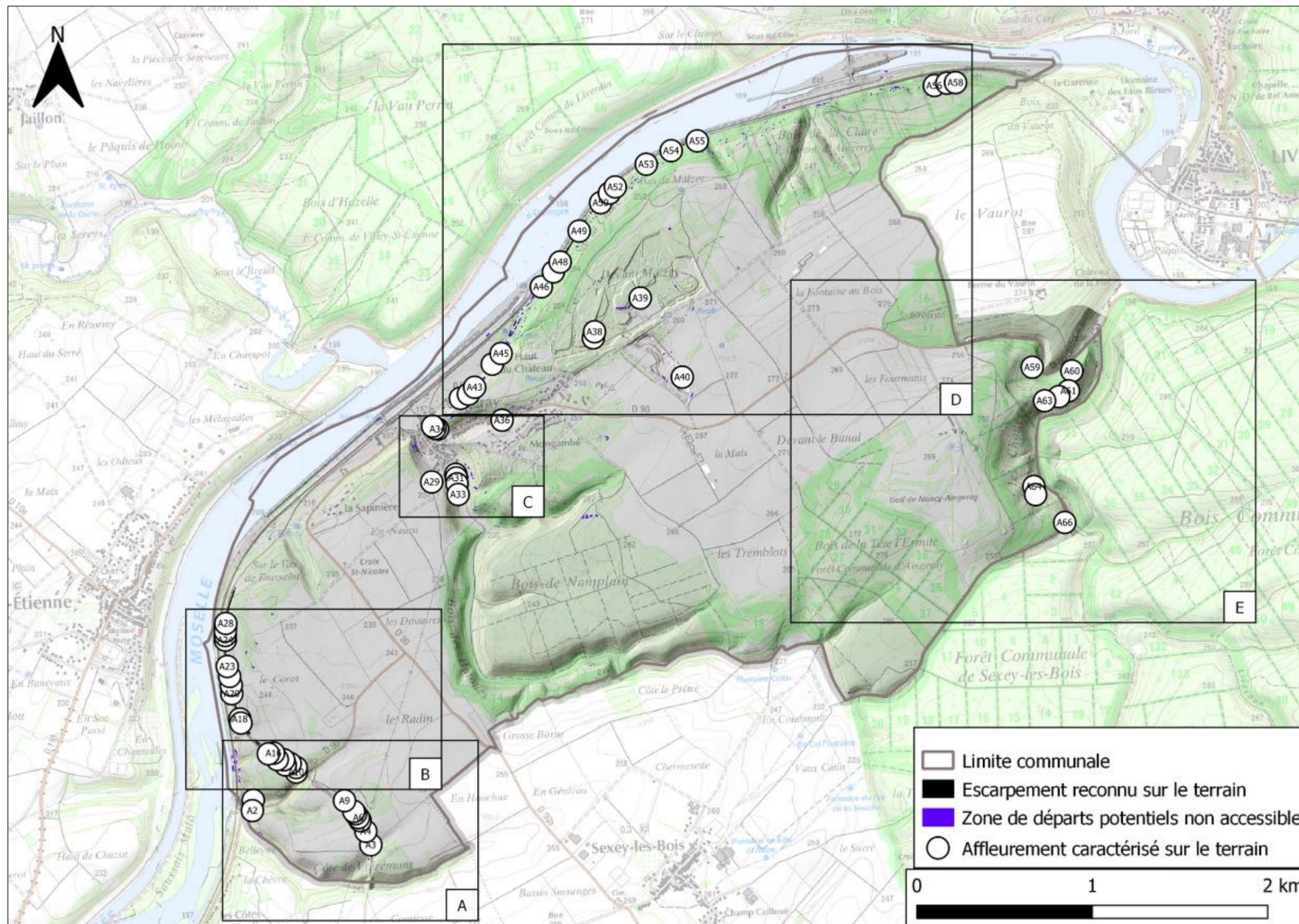


Illustration 44 - Carte de reconnaissance des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain (1/25 000)

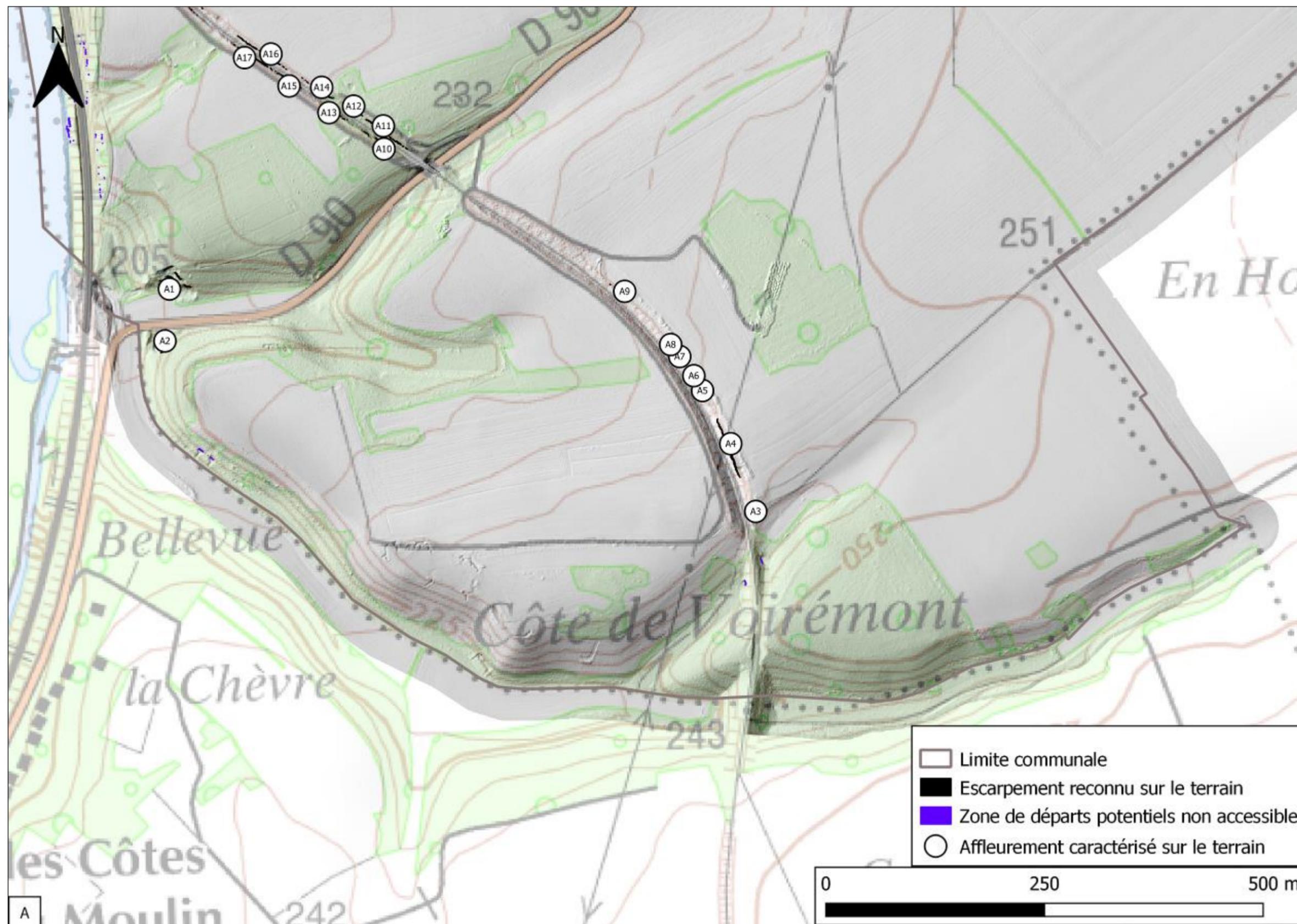


Illustration 45 - Carte de reconnaissance « A » des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain

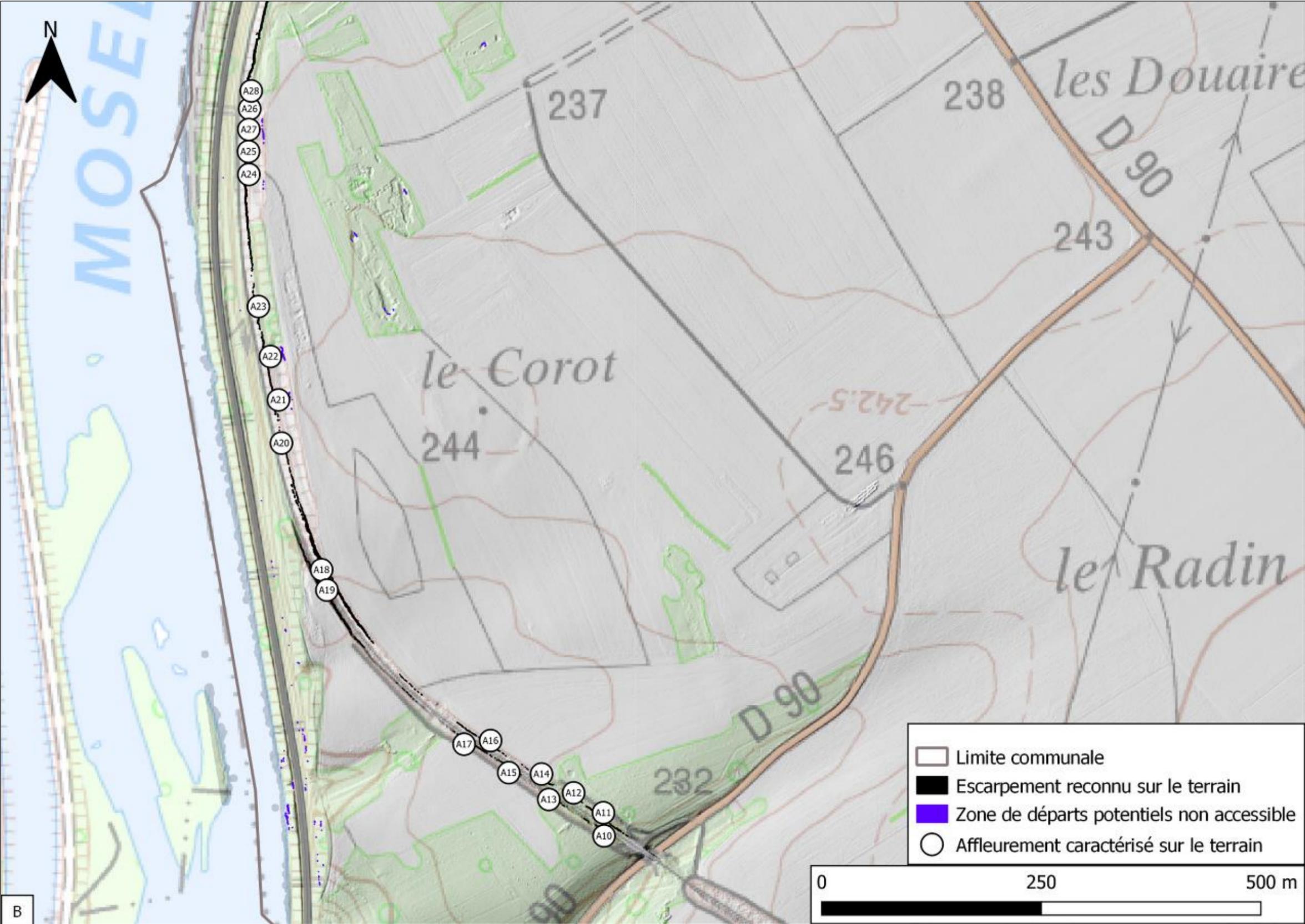


Illustration 46 - Carte de reconnaissance « B » des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain

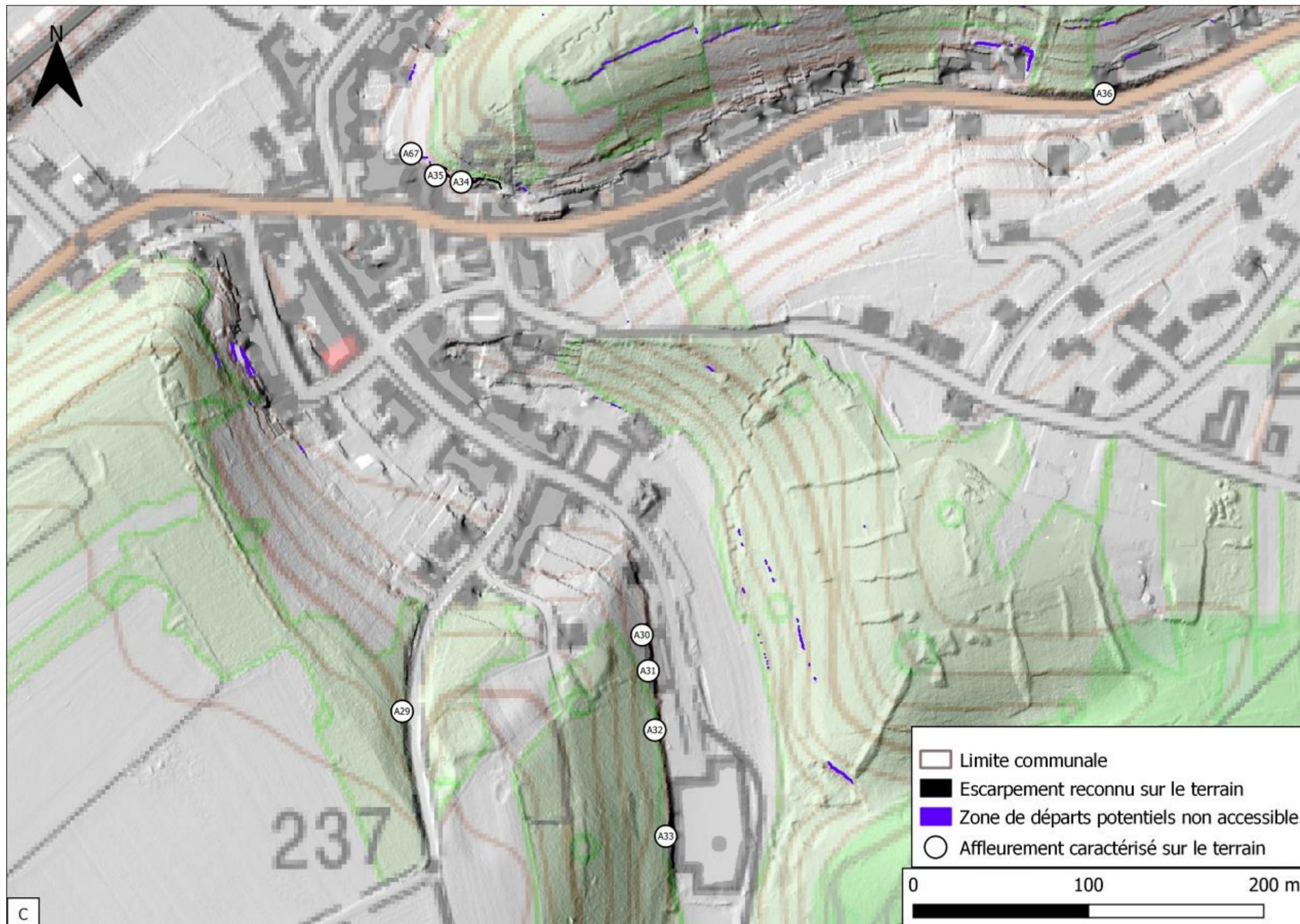


Illustration 47 - Carte de reconnaissance « C » des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain

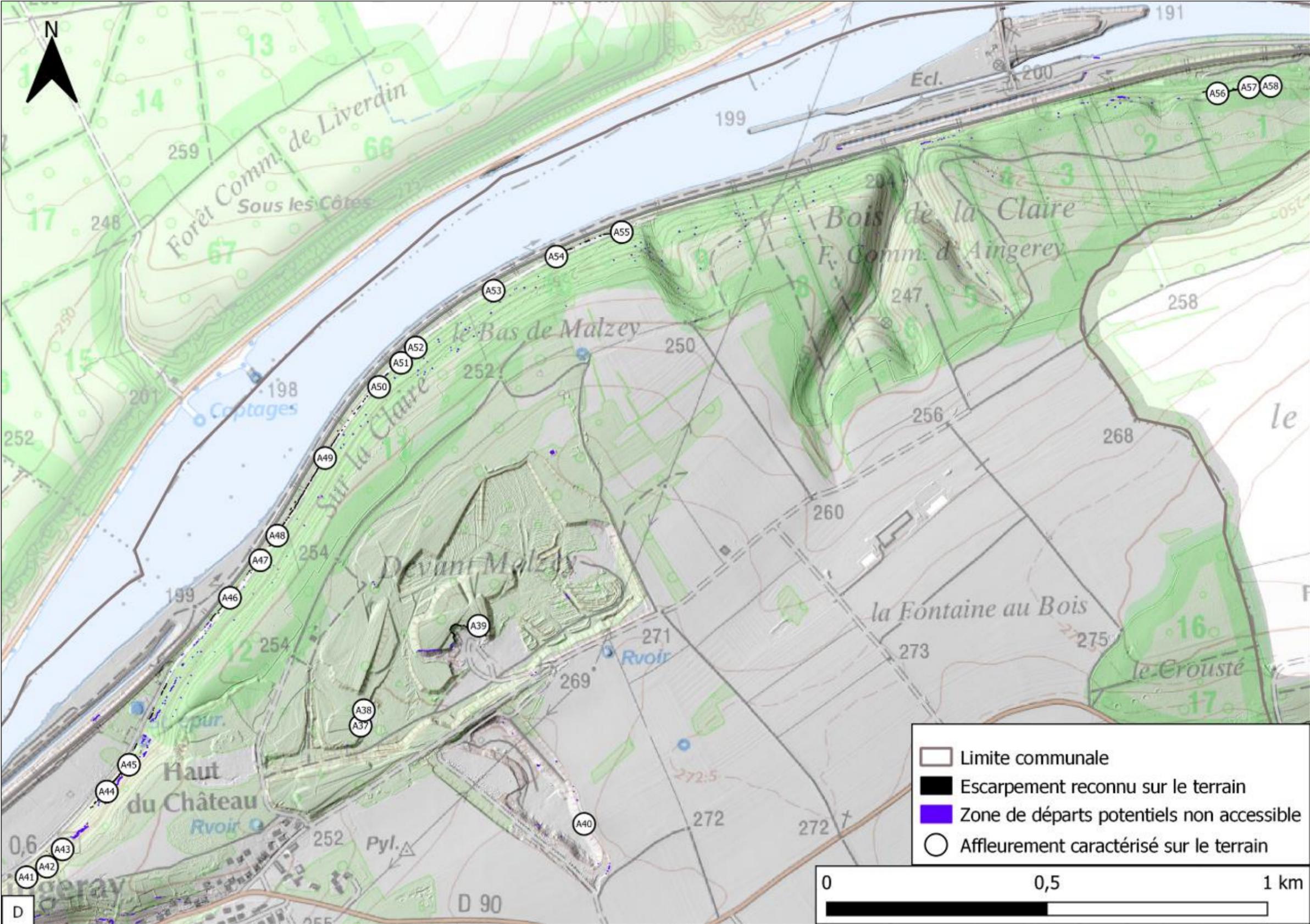


Illustration 48 - Carte de reconnaissance « D » des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain

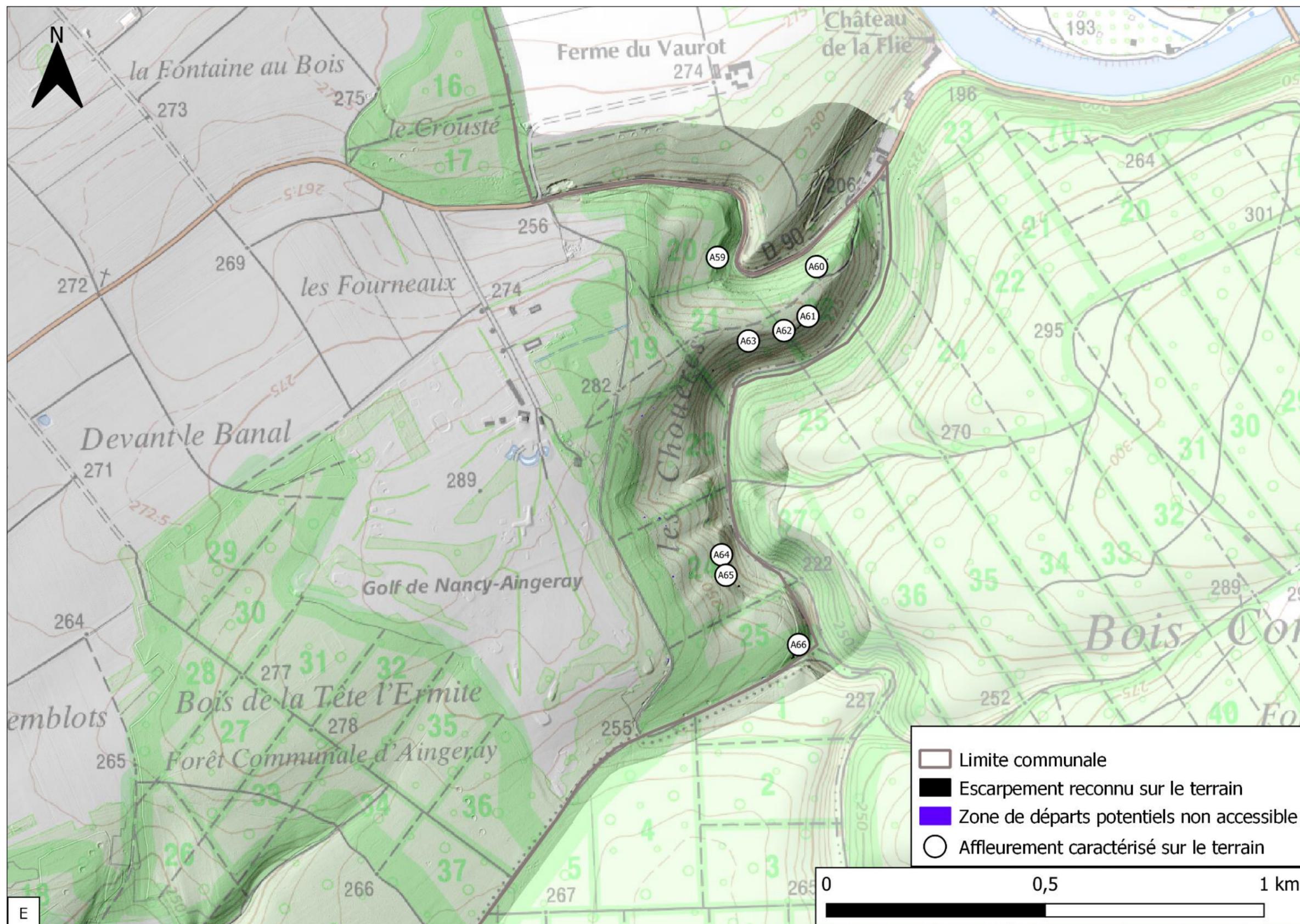


Illustration 49 - Carte de reconnaissance « E » des affleurements rocheux par levé LIDAR et par levé de terrain

Annexe 3 :

Fiches des escarpements types réalisées à partir des données acquises sur le terrain

CDB AINGERAY		 Géosciences pour une Terre durable brgm
FICHE DE SITE	Date : 29/04/2021	ID : A58, B13
Localisation / Description		
Profil : A		
Propagation / sol Propagation : pente forestière en amont d'un cours d'eau		
Formation Géol : Calcaire		
Photo : B13 :		
		
Géométrie		
Hauteur	4 m	
Volume total estimé	1 ≤ V < 10 m ³	
Volume unitaire	1 ≤ V < 10 m ³ et < 0,05 m ³	
Indice d'intensité	Elevé / Très faible	
Mode de rupture		
Mécanisme de rupture	Basculement / Glissement plan	
Fracturation principale	Oblique transversale ouverte d'une dizaine de cm, recoupée par une fracturation verticale rentrant dans le massif	
Facteurs de prédisposition	Végétation, eau, pesanteur	
Facteurs aggravants	Gel - dégel, racines	
Blocs dans la pente	Pierres < 0,05 m ³	
Indice d'activité	Moyen (10 ans) / Fort (1 an)	

Illustration 50 - Fiche affleurement A58

CDB AINGERAY		 <small>Géosciences pour une Terre durable</small>
FICHE DE SITE	Date : 29/04/2021	ID : A59, B14
Localisation / Description		
Profil : A		
Propagation / sol Propagation : pente forestière en amont d'une route départementale		
Formation Géol : Calcaire		
Photo : B14 :		
Géométrie		
Hauteur	entre 2 et 4 m	
Volume total estimé	1 ≤ V < 10 m ³	
Volume unitaire	1 ≤ V < 10 m ³ et < 0,05 m ³	
Indice d'intensité	Elevé / Très faible	
Mode de rupture		
Mécanisme de rupture	Basculement	
Fracturation principale	Verticale transversale ouverte de 5 à 10 cm, comblement de terre dans la fracture.	
Facteurs de prédisposition	Végétation, eau, pesanteur	
Facteurs aggravants	Gel - dégel, racines	
Blocs dans la pente	Pierres < 0,05 m ³	
Indice d'activité	Faible (100 ans) / Fort (1 an)	

Illustration 51 - Fiche affleurement A59

CDB AINGERAY		
FICHE DE SITE	Date : 29/04/2021	ID : A63, B15
Localisation / Description		
Profil : B		
Propagation / sol Propagation : pente forestière en amont d'un chemin forestier		
Formation Géol : Calcaire		
Photo :		
		
<p>Bloc B15 , fracturation verticale et oblique dans le sens du pendage, à 100 ans. La base du bloc est altéré et débite en bloc < 50 L.</p>		
Géométrie		
Hauteur	2 m	
Volume total estimé	1 ≤ V < 10 m ³	
Volume unitaire	1 ≤ V < 10 m ³ et < 0,05 m ³	
Indice d'intensité	Elevé / Très faible	
Mode de rupture		
Mécanisme de rupture	Basculement / glissement	
Fracturation principale	Fracturation verticale et oblique dans le sens du pendage	
Facteurs de prédisposition	Végétation, eau, pesanteur	
Facteurs aggravants	Gel - dégel, racines	
Blocs dans la pente	Pierres < 0,05 m ³	
Indice d'activité	Faible (100 ans) / Fort (1 an)	

Illustration 52 - Fiche affleurement A63

CDB AINGERAY		 <small>Géosciences pour une Terre durable</small>
FICHE DE SITE	Date : 27/04/2021	ID : A4, B4, P3
Localisation / Description		
Profil : B		
Propagation / sol Propagation : pente altérée, marnes menant à un chemin vert, fréquenté		
Formation Géol : Banc calcaire induré sus-jacent à un banc altéré		
Photo :		
B4 :		P3 :
		
		
Géométrie		
Hauteur	2 m	
Volume total estimé	0,25 ≤ V < 1 m ³	
Volume unitaire	0,25 ≤ V < 1 m ³ , 0,05 ≤ V < 0,25 m ³ et V ≤ 0,05 m ³	
Indice d'intensité	Moyen / Faible / Très faible	
Mode de rupture		
Mécanisme de rupture	Basculement	
Fracturation principale	Verticale transversale	
Facteurs de prédisposition	Végétation, eau, pesanteur	
Facteurs aggravants	Gel - dégel, racines, altération et départs du banc inférieur	
Blocs dans la pente	Pierres < 0,05 m ³ et phénomène d'intensité faible	
Indice d'activité	Moyen (10 ans) / Moyen (10 ans) / Fort (1 an)	

Illustration 53 - Fiche affleurement A4

CDB AINGERAY		 <small>Géosciences pour une Terre durable</small>
FICHE DE SITE	Date : 27/04/2021	ID : A26, P6, P7
Localisation / Description		
Profil : B		
Propagation / sol Propagation : pente altérée, menant à un chemin vert fréquenté, en amont de la voie ferrée, la propagation dépasse le chemin par endroit, nombreux blocs dans grillage		
Formation Géol : Banc calcaire induré sus-jacent à un banc altéré, provoquant un basculement		
Photo :		
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>P6 : 500 L</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>P7 : < 250 L</p> </div> </div>		
Géométrie		
Hauteur	10 à 15 m, entre 2 et 4 m pour le banc produisant des blocs	
Volume total estimé	0,25 ≤ V < 1 m ³	
Volume unitaire	0,25 ≤ V < 1 m ³ , 0,05 ≤ V < 0,25 m ³ et V ≤ 0,05 m ³	
Indice d'intensité	Moyen / Faible / Très faible	
Mode de rupture		
Mécanisme de rupture	Basculement	
Fracturation principale		
Facteurs de prédisposition	Végétation, eau, pesanteur	
Facteurs aggravants	Gel - dégel, racines, altération et départs du banc inférieur	
Blocs dans la pente	Pierres < 0,05 m ³ et phénomènes d'intensité faible à moyen	
Indice d'activité	Faible (10 ans) / Moyen (10 ans) / Fort (1 an)	

Illustration 54 - Fiche affleurement A26

CDB AINGERAY		
FICHE DE SITE	Date : 29/04/2021	ID : A55
Localisation / Description		
Profil : B		
Propagation / sol Propagation : pente forestière en amont du chemin bordant la voie ferrée		
Formation Géol : Banc calcaire altéré sous couvert végétal		
Photo :		
		
Géométrie		
Hauteur	1 m	
Volume total estimé	$V \leq 0,05 \text{ m}^3$	
Volume unitaire	$V \leq 0,05 \text{ m}^3$	
Indice d'intensité	Très faible	
Mode de rupture		
Mécanisme de rupture	Altération / Glissement	
Fracturation principale	Multiples, les blocs sont déjà désunis	
Facteurs de prédisposition	Végétation, eau	
Facteurs aggravants	Racines, altération	
Blocs dans la pente	Pierres < 0,05 m ³	
Indice d'activité	Fort (1 an)	

Illustration 55 - Fiche affleurement A55

CDB AINGERAY		 Géosciences pour une terre durable
FICHE DE SITE	Date : 30/04/2021	ID : A39
Localisation / Description		
Profil : D		
Propagation / sol Propagation : terrain non exploité, réhabilitation de la carrière en bois.		
Formation Géol : Calcaire oolithique très altéré et fractionné en petits blocs.		
Photo :		
		
Géométrie		
Hauteur	8 à 10 m	
Volume total estimé	$V \leq 0,05 \text{ m}^3$	
Volume unitaire	$V \leq 0,05 \text{ m}^3$	
Indice d'intensité	Très faible	
Mode de rupture		
Mécanisme de rupture	Altération / Glissement	
Fracturation principale		
Facteurs de prédisposition	Végétation, eau	
Facteurs aggravants	Racines, altération	
Blocs dans la pente	Eboulis de pierres < 0,05 m ³	
Indice d'activité	Fort (1 an)	

Illustration 56 - Fiche affleurement A39

Annexe 4 :

Liste des blocs potentiellement mobilisables identifiés sur le terrain

Identifiant bloc	Identifiant affleurement	Blocs potentiellement mobilisables	Date de visite de terrain	Description affleurement	Formation géologique visible sur le terrain	Hauteur de l'escarpement	Mécanisme	Profil	Propagation	Sol propagation
B1	A1	1 bloc < 250 L	27/04/2021	Affleurement de calcaire de 7 à 10 m de hauteur	Calcaire	7 à 10 m	Basculement	D	Aucun enjeu	Sol forestier
B2	A1	1 bloc < 250 L	27/04/2021	Affleurement de calcaire de 7 à 10 m de hauteur	Calcaire	7 à 10 m	Basculement	D	Aucun enjeu	Sol forestier
B3	A1	1 bloc > 1 m3	27/04/2021	Affleurement de calcaire de 7 à 10 m de hauteur	Calcaire	7 à 10 m	Basculement	D	Aucun enjeu	Sol forestier
B4	A4	1 bloc < 1 m3 en surplomb, présentant une fracturation verticale transversale	27/04/2021	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur, curiosité géologique : synclinal	Calcaire	2 m	Basculement/ Surplomb	B	Talus, chemin	Talus
B5	A5	1 bloc > 1 m3 en basculement présentant une fracture ouverte de 20 cm avec soutirage des horizons sus-jacents	27/04/2021	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur	Calcaire	2 m	Basculement	B	chemin	Talus
B6	A6	1 bloc < 250 L	27/04/2021	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur	Calcaire	2 m	Basculement	B	chemin	Talus
B7	A7	1 bloc < 250 L	27/04/2021	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur	Calcaire	2 m	Basculement	B	chemin	Talus
B8	A11	1 blocs < 250 L	27/04/2021	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur	Calcaire	2 m	Basculement	B	chemin	Talus
B9	A13	2 blocs < 50 L (proche 50 L)	27/04/2021	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur	Calcaire	2 m	Basculement	B	chemin	Talus
B10	A18	2 blocs < 250 L	27/04/2021	Affleurement de calcaire d'environ 10 m de hauteur, les bancs supérieurs créent les blocs de plus gros volume	Calcaire	10 m	Basculement	B	chemin	Talus
B11	A50	Bloc potentiel d'intensité moyenne < 1 m3	29/04/2021	Affleurement de 2 m de hauteur	Calcaire	2 m	Basculement	B	Chemin, voie ferrée	Sol forestier
B12	A56	1 bloc > 1 m3 en basculement, nombreuses fracturations verticales	29/04/2021	Affleurement de 4 m de hauteur	Calcaire	4 m	Basculement	A	Cours d'eau	Sol forestier
B13	A58	2 blocs > 1 m3 avec fracturation oblique transversale ouverte d'une dizaine de centimètres, recoupée par une fracturation verticale rentrant perpendiculairement dans le massif	29/04/2021	Affleurement de 4 m de hauteur	Calcaire	4 m	Basculement	A	Cours d'eau	Sol forestier
B14	A59	1 bloc > 1 m3 à 10 ans, par basculement, fracturation verticale traversant la longueur du bloc, ouverture d'une dizaine de centimètres	29/04/2021	Affleurement de 2 à 4 m de hauteur. Nombreux arbres déracinés pouvant entraîner la chute de blocs.	Calcaire	4 m	Basculement	A	Route départementale	Sol forestier

Identifiant bloc	Identifiant affleurement	Blocs potentiellement mobilisables	Date de visite de terrain	Description affleurement	Formation géologique visible sur le terrain	Hauteur de l'escarpement	Mécanisme	Profil	Propagation	Sol propagation
B15	A63	1 bloc > m3 en basculement, fracturation verticale et oblique dans le sens du pendage, à 100 ans. La base du bloc est altéré et débite en bloc < 50 L.	29/04/2021	Affleurement de 2 m de hauteur	Calcaire	2 m	Basculement	B	Chemin forestier	Sol forestier

Illustration 57 - Liste des blocs potentiellement mobilisables identifiés sur le terrain

Annexe 5 :

Liste des phénomènes de chute de blocs identifiés sur le terrain

Identifiant phénomène	Identifiant affleurement	Date de visite de terrain	Description affleurement	Formation géologique visible sur le terrain	Hauteur de l'escarpement	Mécanisme	Profil	Enjeux atteint par la propagation	Sol de propagation	Présence de blocs dans la pente
P1	A1	27/04/2021	Affleurement de calcaire de 7 à 10 m de hauteur	Calcaire	7 à 10 m	Basculement	D	Aucun enjeu	Sol forestier	1 phénomène d'un volume total < 5 m ³ , 1 bloc > 1m ³ , les autres blocs sont < 1 m ³ et < à 0,250 m ³
P2	A4	27/04/2021	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur, curiosité géologique : synclinal	Calcaire	2 m	Basculement/ Surplomb	B	chemin	Talus	1 phénomène blocs < 250 L
P3	A4	27/04/2021	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur, curiosité géologique : synclinal	Calcaire	2 m	Basculement/ Surplomb	B	chemin	Talus	1 phénomène blocs < 250 L
P4	A5	27/04/2021	Affleurement de calcaire inférieur à 2 m de hauteur	Calcaire	2 m	Basculement	B	chemin	Talus	1 phénomène < 250 L
P5	A24	27/04/2021	Affleurement de calcaire de 8 à 10 m de hauteur	Calcaire	8 à 10 m	Basculement	A	chemin	Talus	1 phénomène, Volume total < 250 L, volume unitaire 60 L
P6	A26	27/04/2021	Affleurement de calcaire de 10 à 14 m de hauteur, de nombreux blocs < 250 L finissent leur course de l'autre côté du chemin dans le grillage, grillage abimé.	Calcaire	10 à 14 m	Basculement	A	chemin	Talus	1 phénomène de 550 L
P7	A26	27/04/2021	Affleurement de calcaire de 10 à 14 m de hauteur, de nombreux blocs < 250 L finissent leur course de l'autre côté du chemin dans le grillage, grillage abimé.	Calcaire	10 à 14 m	Basculement	A	chemin	Talus	1 phénomène < 250 L sur la suite du chemin au nord du point A26
P8	A45	29/04/2021	Affleurement calcaire d'1 m de hauteur, altéré. Pente altéré.	Calcaire	1 m	Altération / Surplomb	B	Chemin	Pente forestière	pierres < 50 L, 1 phénomène : bloc < 50 L arrivé en bordure de chemin sur le replat.
P9	A46	29/04/2021	non visible		2 m	Basculement	B	Chemin, voie ferrée	Pente forestière	Bloc < 250 L, un au sud légèrement avant le point A46 qui n'a pas passé le chemin

Identifiant phénomène	Identifiant affleurement	Date de visite de terrain	Description affleurement	Formation géologique visible sur le terrain	Hauteur de l'escarpement	Mécanisme	Profil	Enjeux atteint par la propagation	Sol de propagation	Présence de blocs dans la pente
P10	A46	29/04/2021	non visible		2 m	Basculement	B	Chemin, voie ferrée	Pente forestière	1 bloc < 250 L qui a traversé le chemin et se retrouve coté voie ferrée.
P11	A47	29/04/2021	non visible		2 m					Phénomène : 1 bloc < 250 L côté voie ferrée
P12	A47	29/04/2021	non visible		2 m					Phénomène : 1 bloc < 250 L côté voie ferrée
P13	A49	29/04/2021	non visible		2 m					
P14	A59	29/04/2021	non visible		2 m					Phénomène : Bloc de 40 L à la bordure de la voie ferrée provenant de la chute d'un volume totale < 250 L, surface d'arrachement visible.
P15	A49	29/04/2021	Affleurement de 2 à 4 m de hauteur. Nombreux arbres déracinés pouvant entraîner la chute de blocs.	Calcaire	4 m	Basculement	A	Route départementale	Pente forestière	1 bloc < 50 L au bord du fossé routier
P16	A29	30/04/2021	Affleurement inférieur à 1 m, sous couvert végétal et à la suite d'un mur de soutènement.	Calcaire	1 m	Altération	B	Bord de chemin	pente végétalisée	1 phénomène, Volume total < 250 L, volume unitaire < 50 L
P17	A36	30/04/2021	Affleurement inférieur à 1 m, lité.	Calcaire	1 m	Altération	D	Trottoir, route.	pente végétalisée	1 phénomène, 1 bloc < 50 L sur le bord du trottoir.

Illustration 58 - Liste des phénomènes de chute de blocs identifiés sur le terrain

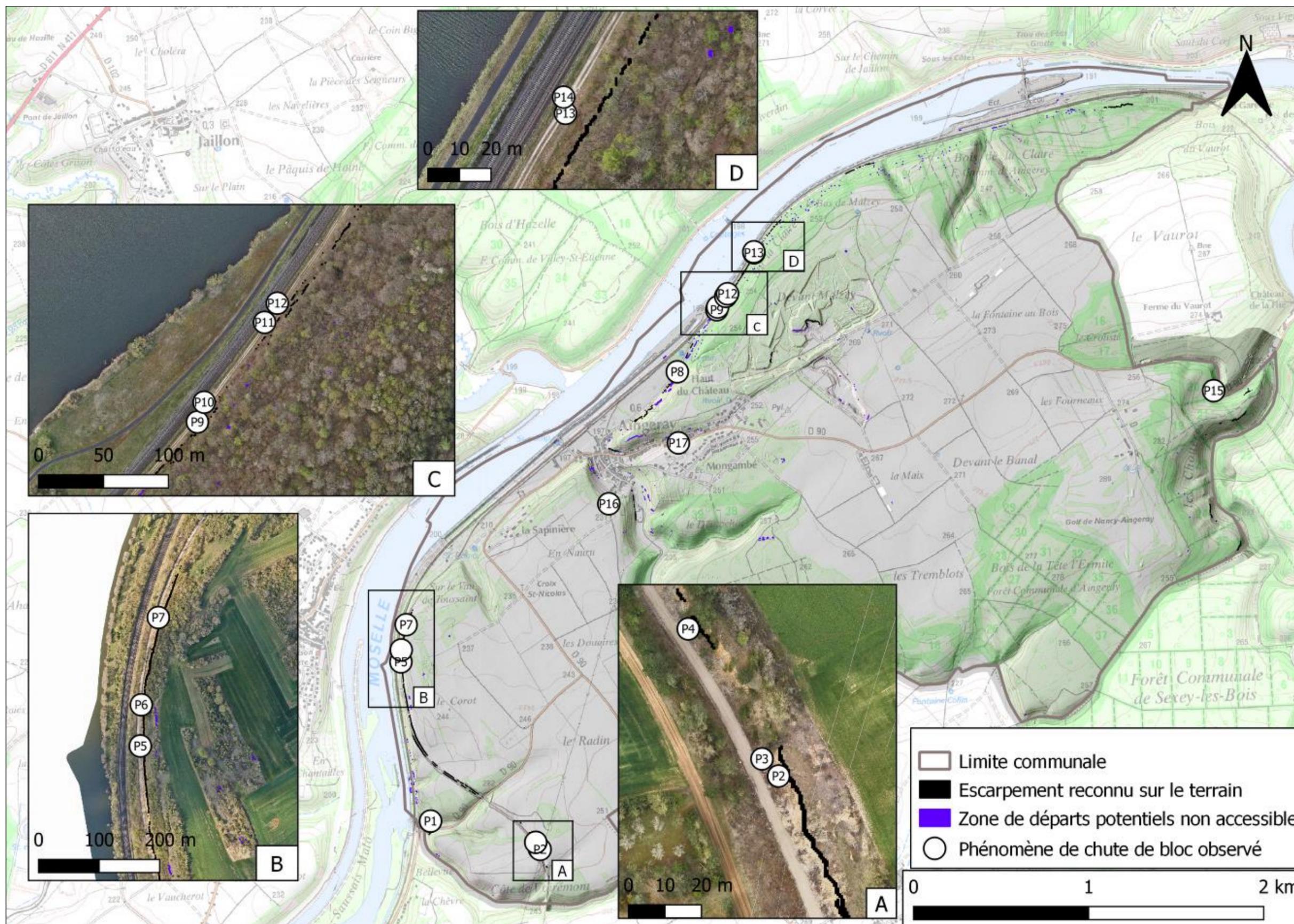


Illustration 59 - Carte de localisation des phénomènes observés sur le terrain (1/17 000)

Annexe 6 :

Carte de propagation

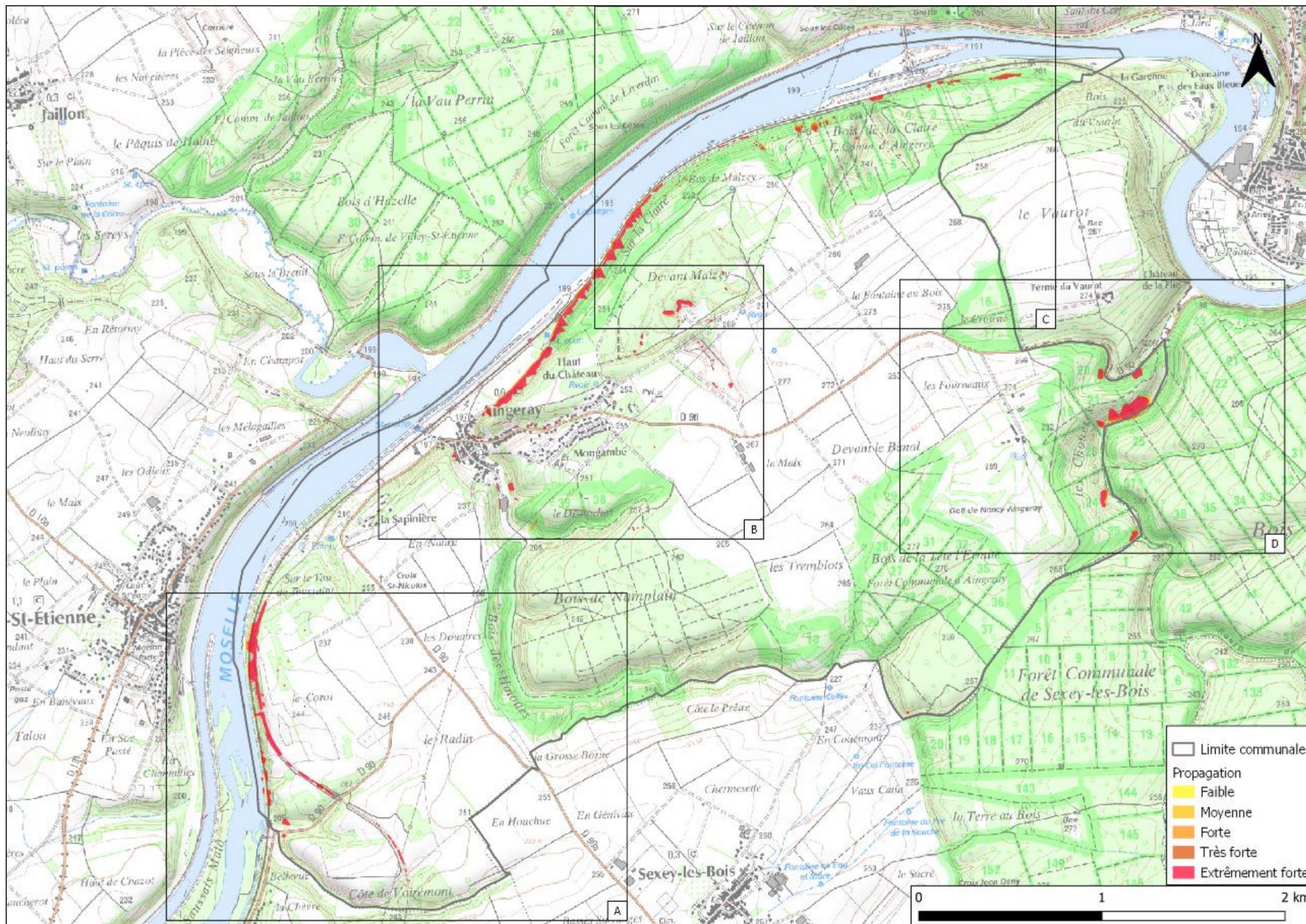


Illustration 60 - Carte de propagation sur la commune d'Aingeray (1/17 000, fond Scan25 de l'IGN)

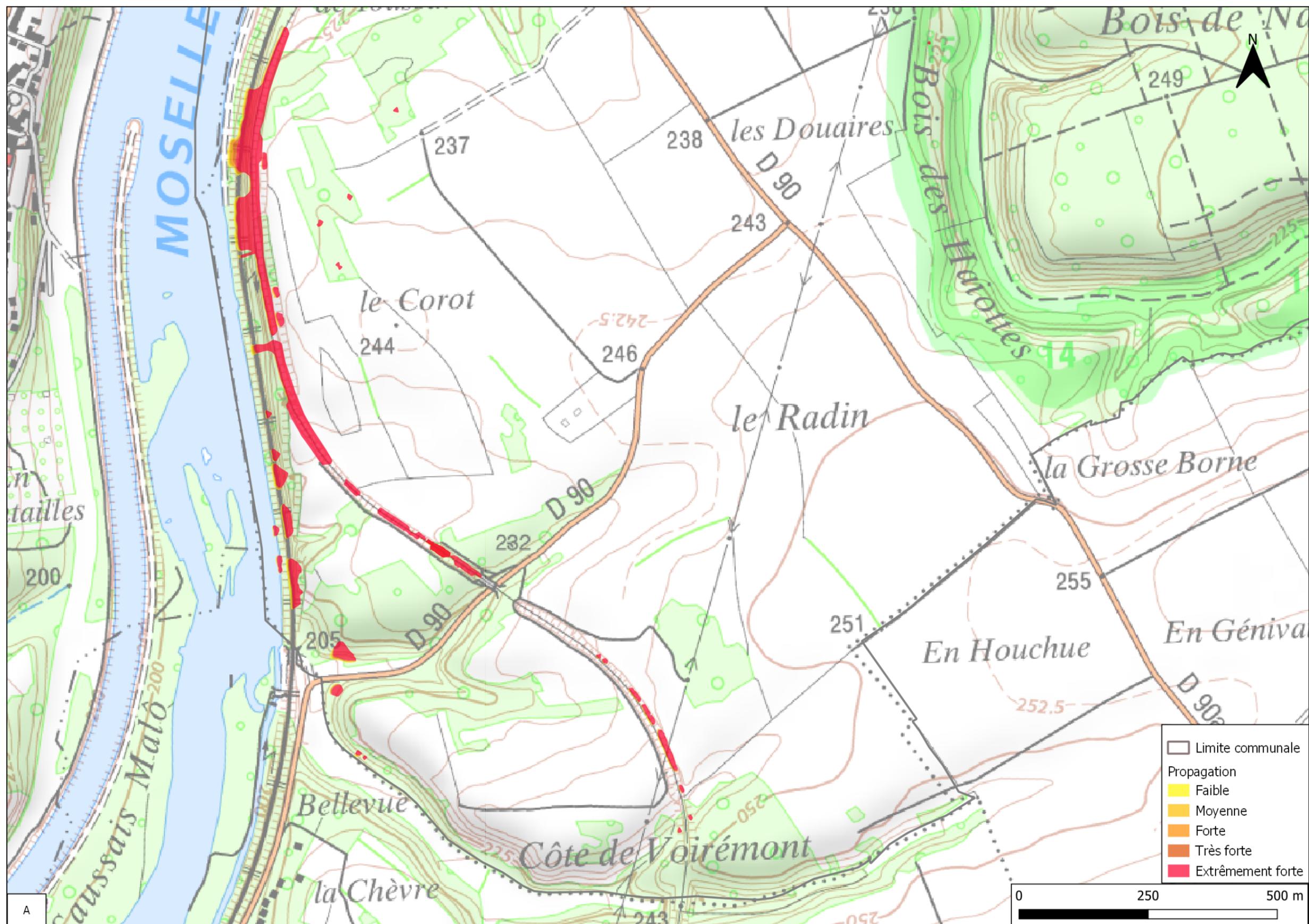


Illustration 61 - Carte de propagation "A", (fond Scan25 de l'IGN)

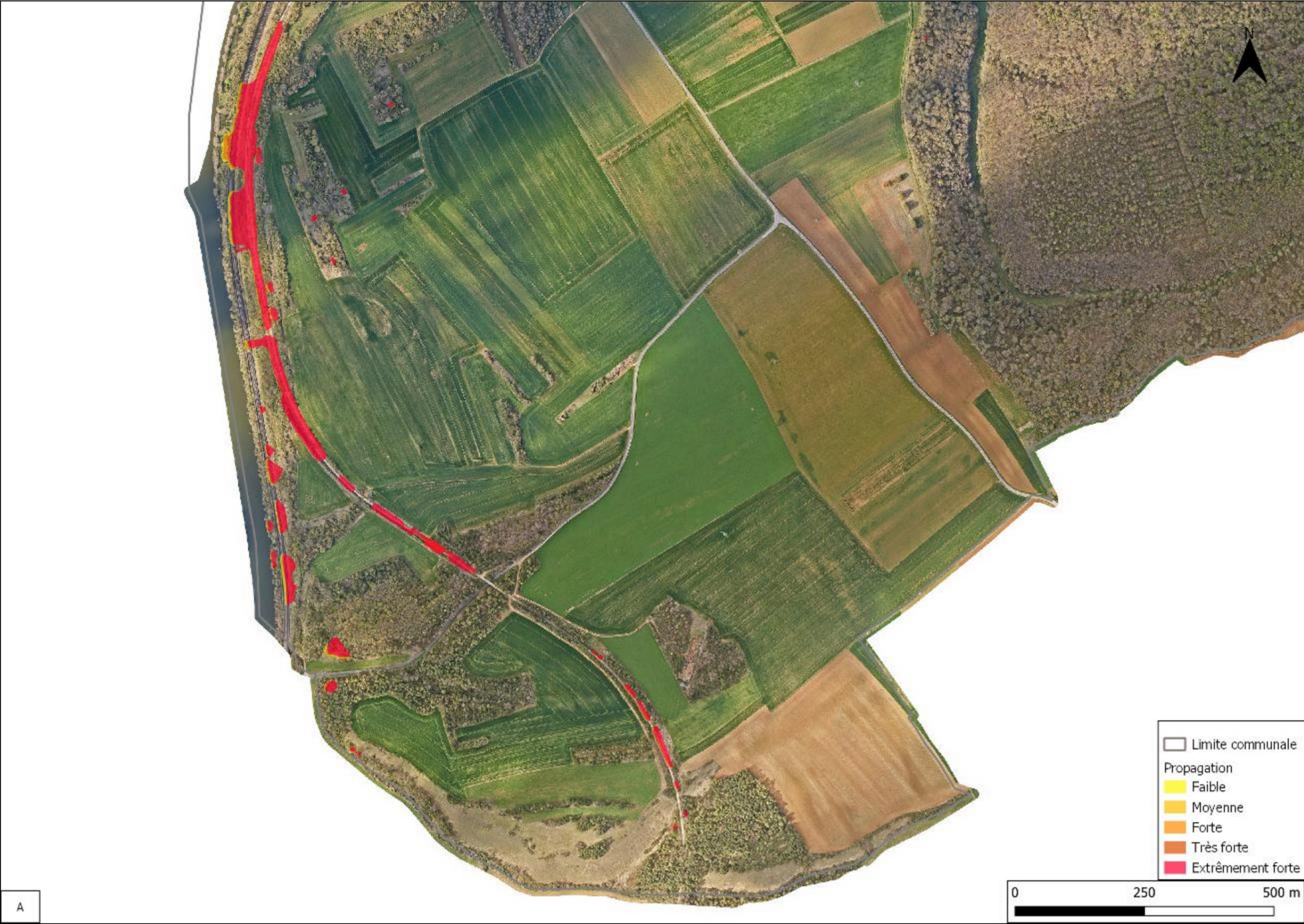


Illustration 62 - Carte de propagation "A", (fond orthophotographie, 2019)

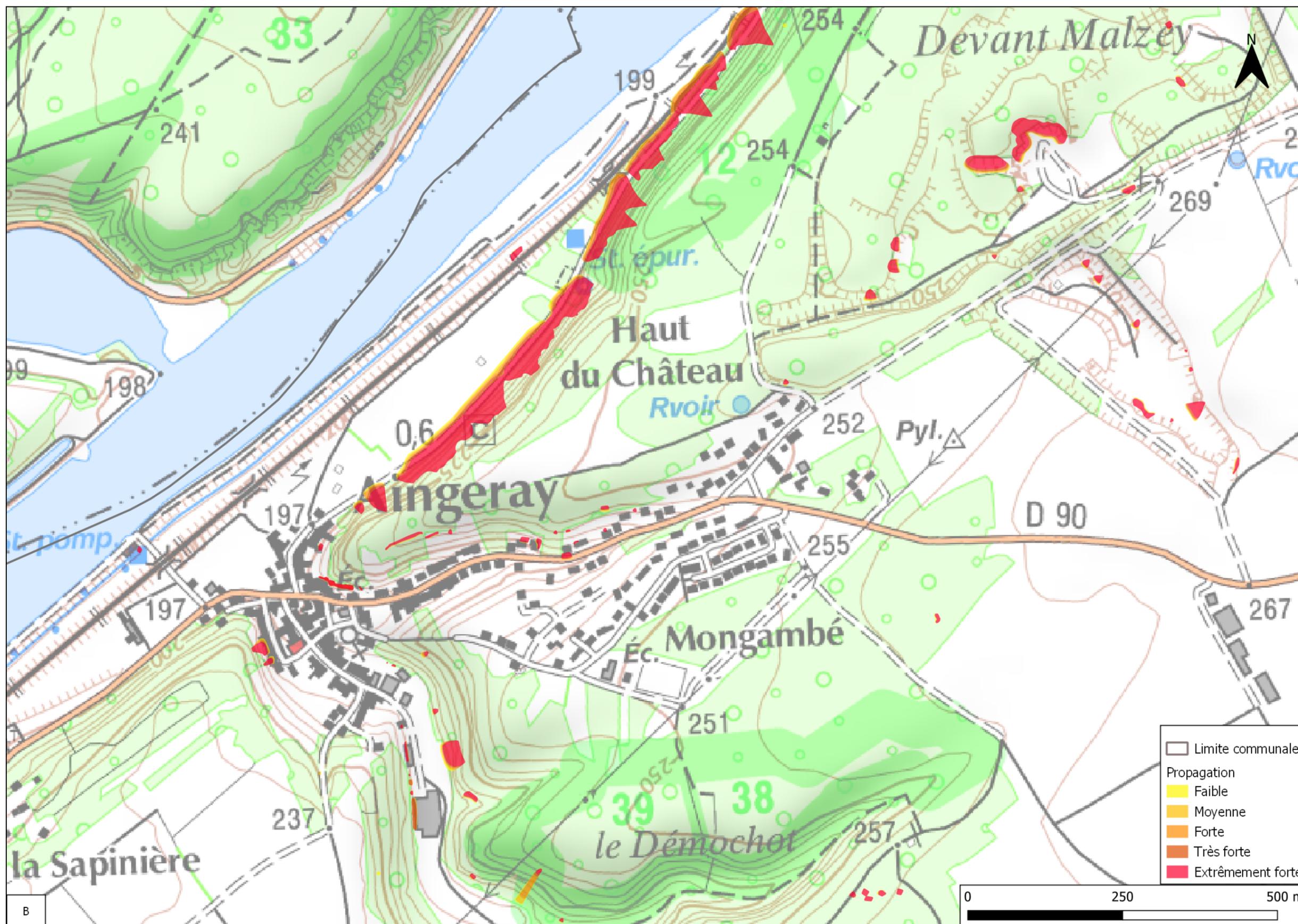


Illustration 63 - Carte de propagation "B", (fond Scan25 de l'IGN)

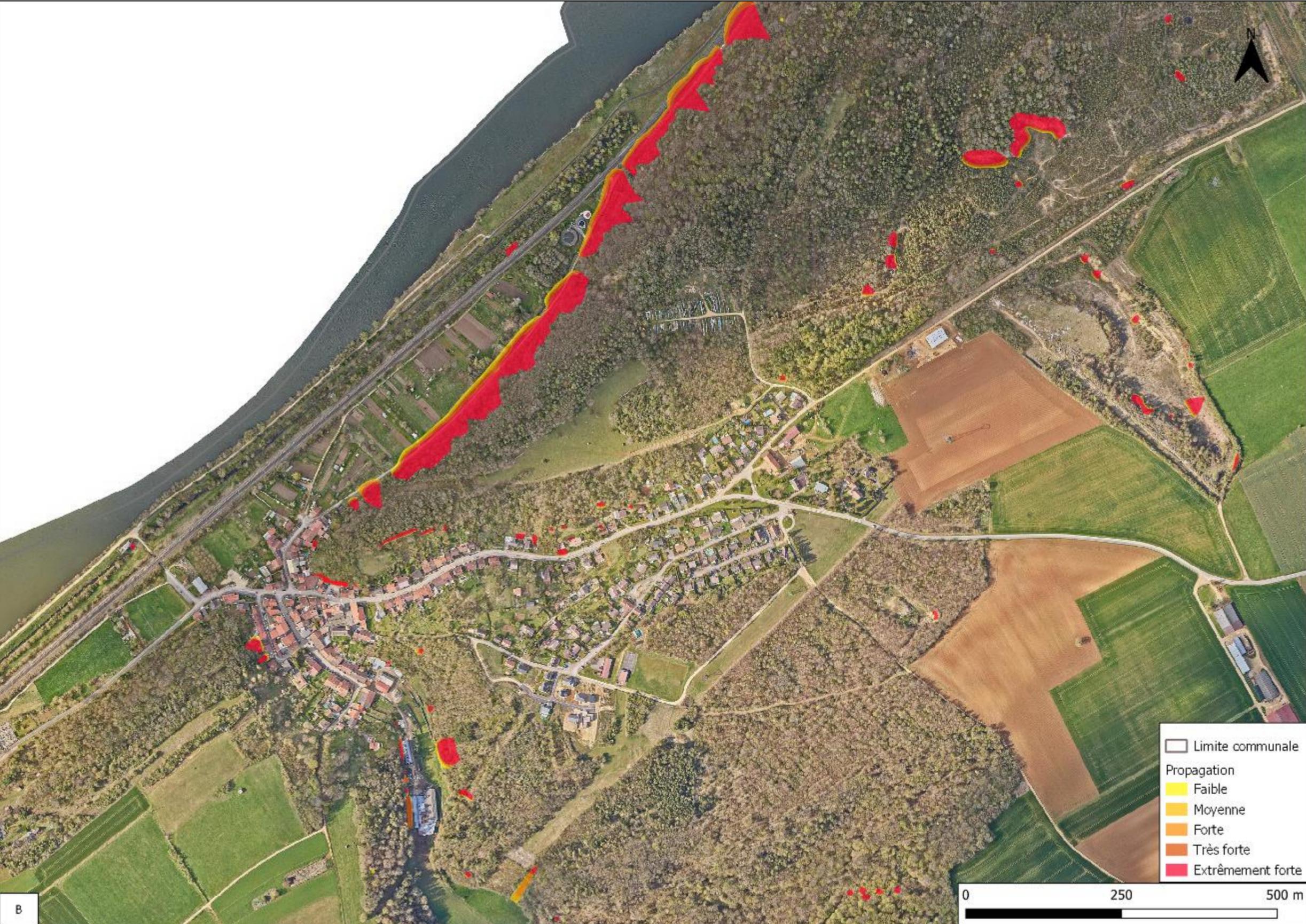


Illustration 64 - Carte de propagation "B", (fond orthophotographie, 2019)

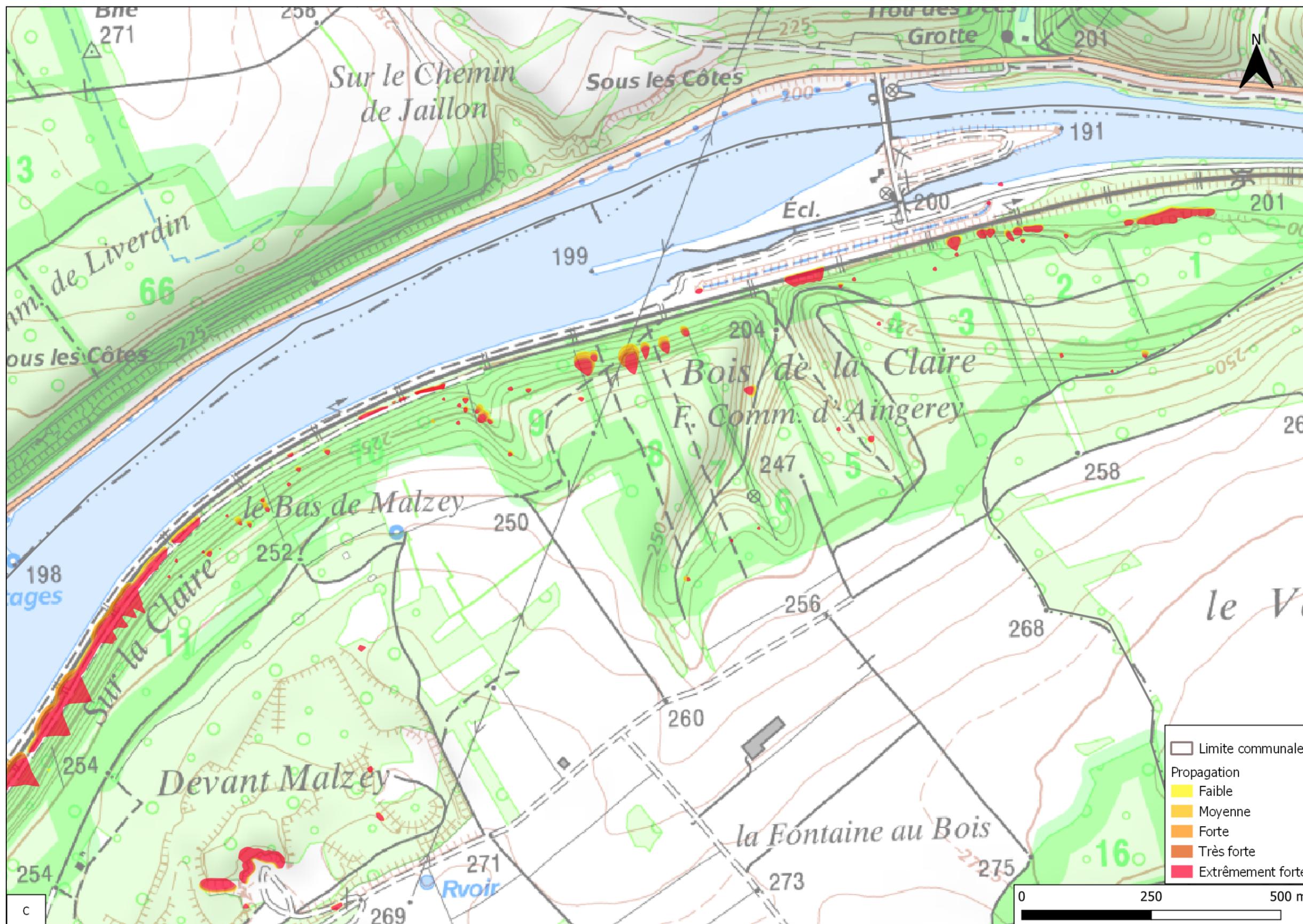


Illustration 65 - Carte de propagation "C", (fond Scan25 de l'IGN)



Illustration 66 - Carte de propagation "C", (fond orthophotographie, 2019)

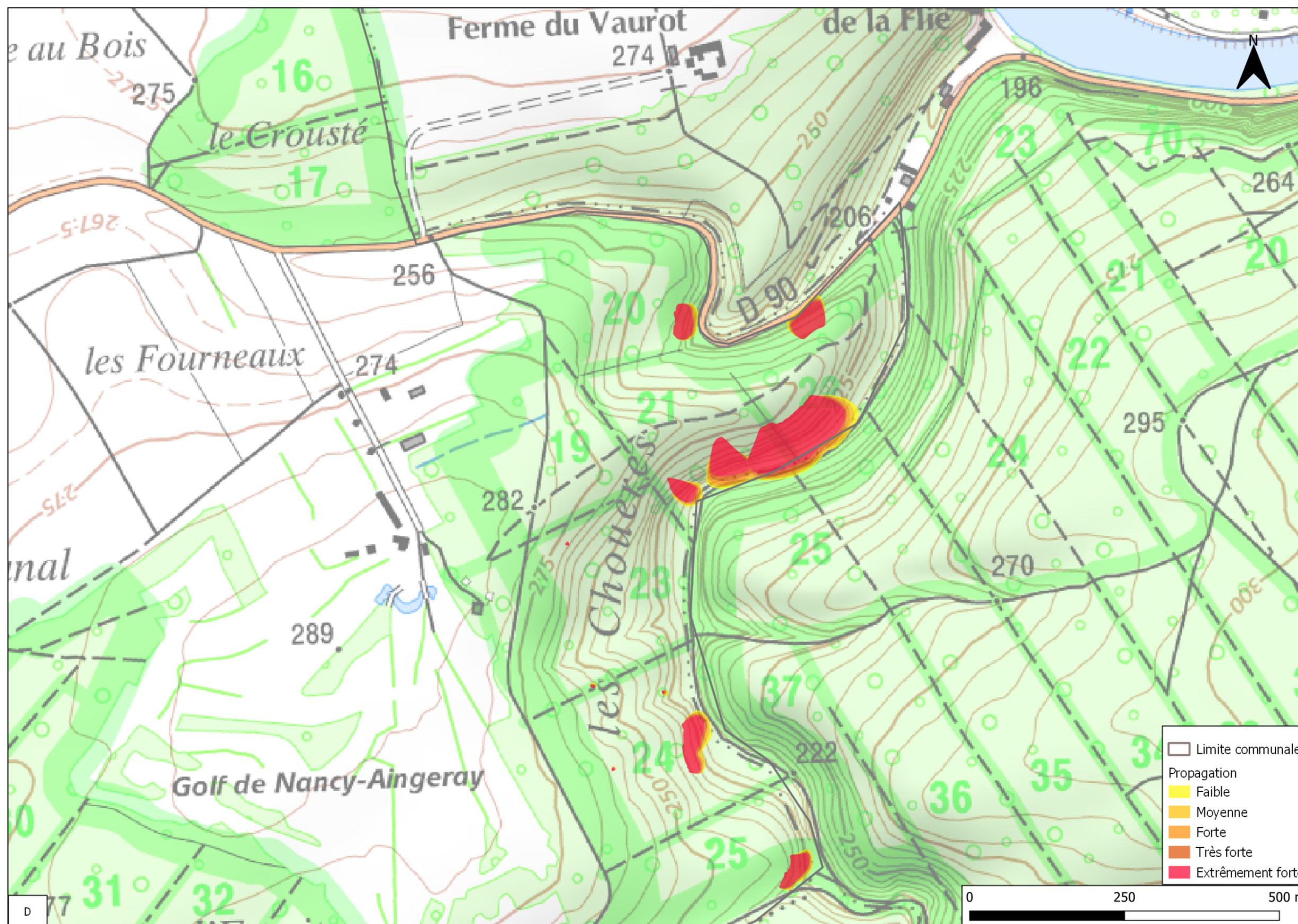


Illustration 67 - Carte de propagation "D", (fond Scan25 de l'IGN)



Illustration 68 - Carte de propagation "D", (fond orthophotographie, 2019)

Annexe 7 :

Carte de l'aléa chute de blocs

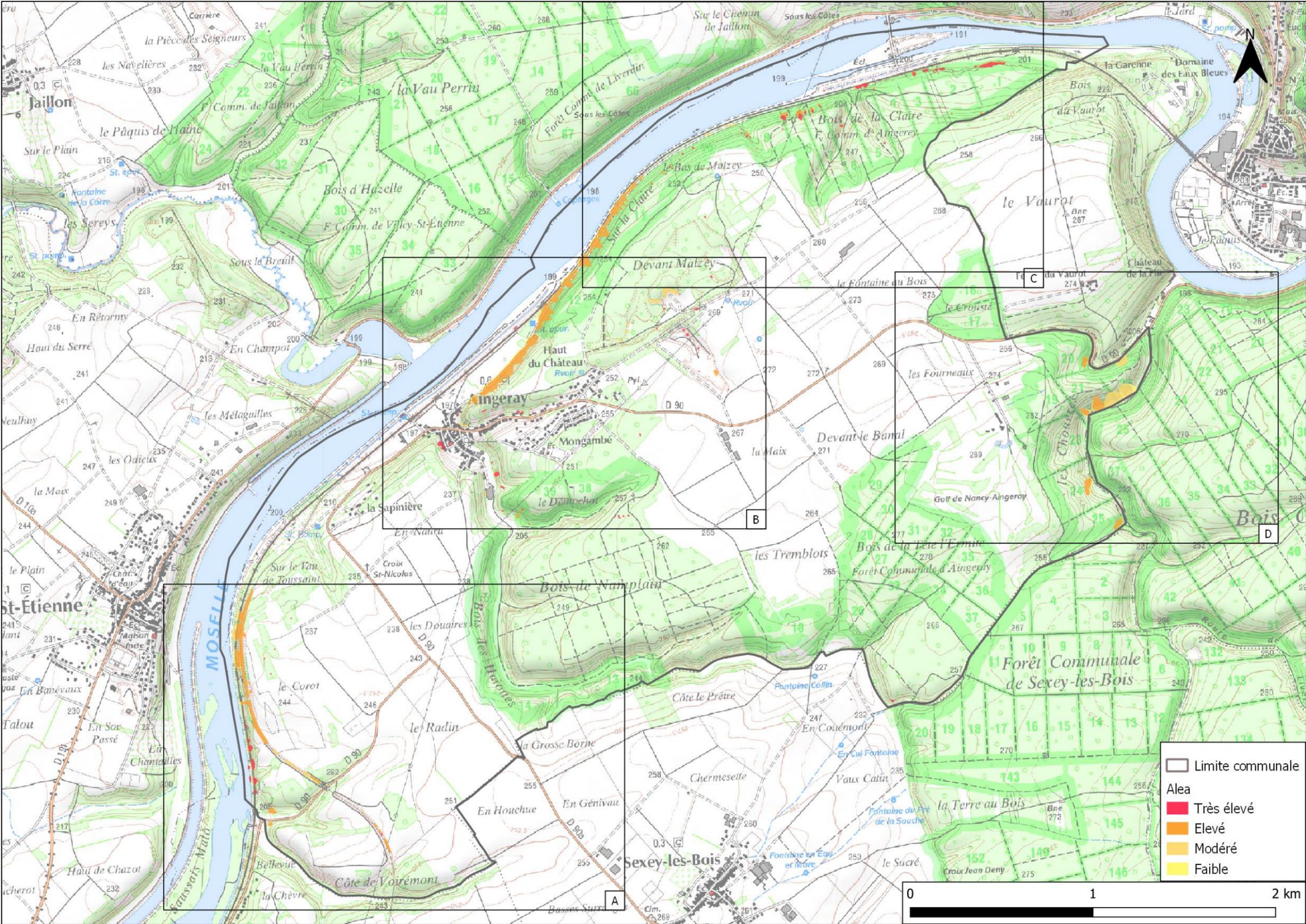


Illustration 69 – Carte de l'aléa chute de blocs sur la commune d'Aingeray (1/17 000, fond Scan25 de l'IGN)

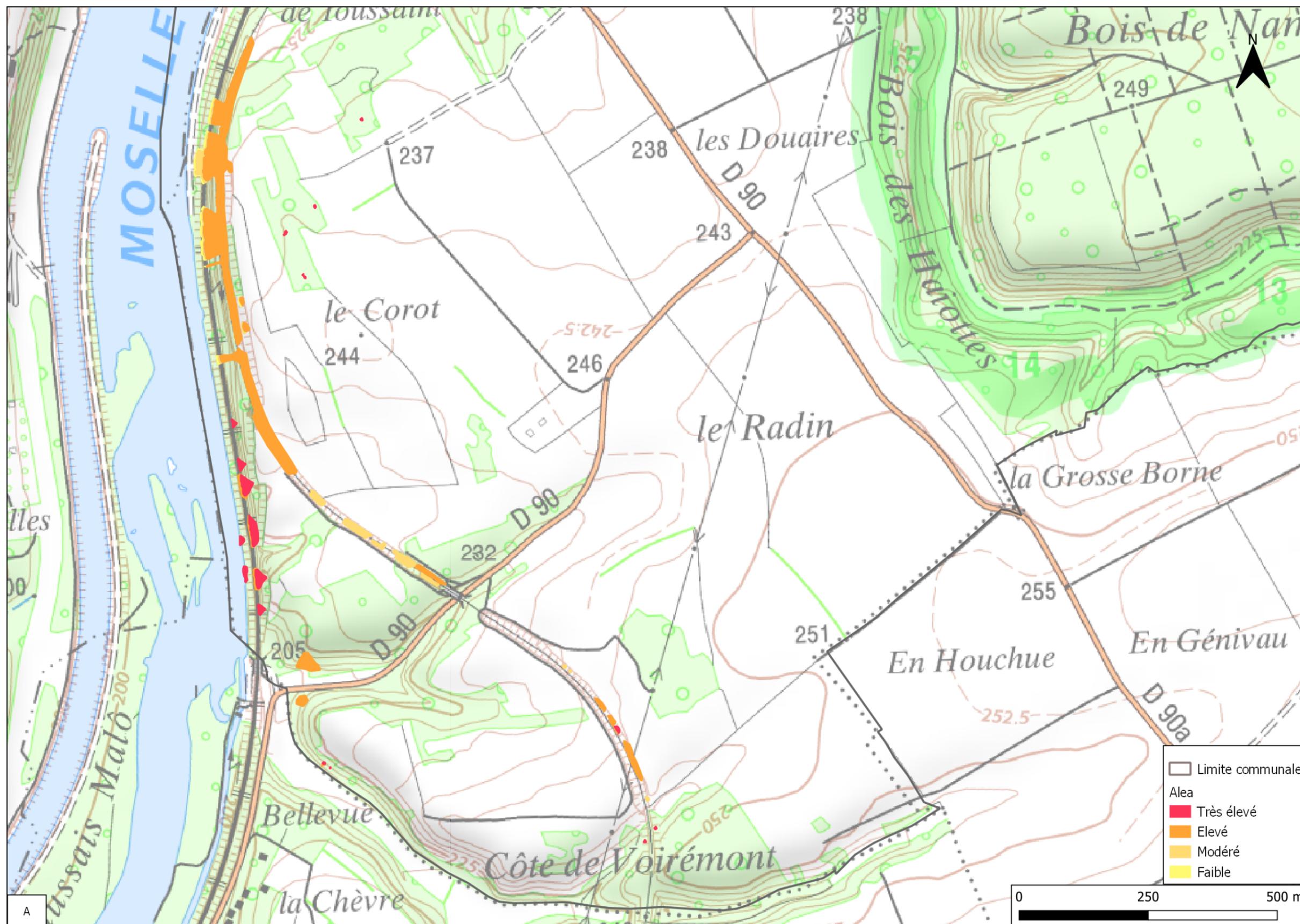


Illustration 70 – Carte de l'aléa chute de blocs "A" (fond Scan25 de l'IGN)



Illustration 71 – Carte de l'aléa chute de blocs "A" (fond orthophotographie, 2019)

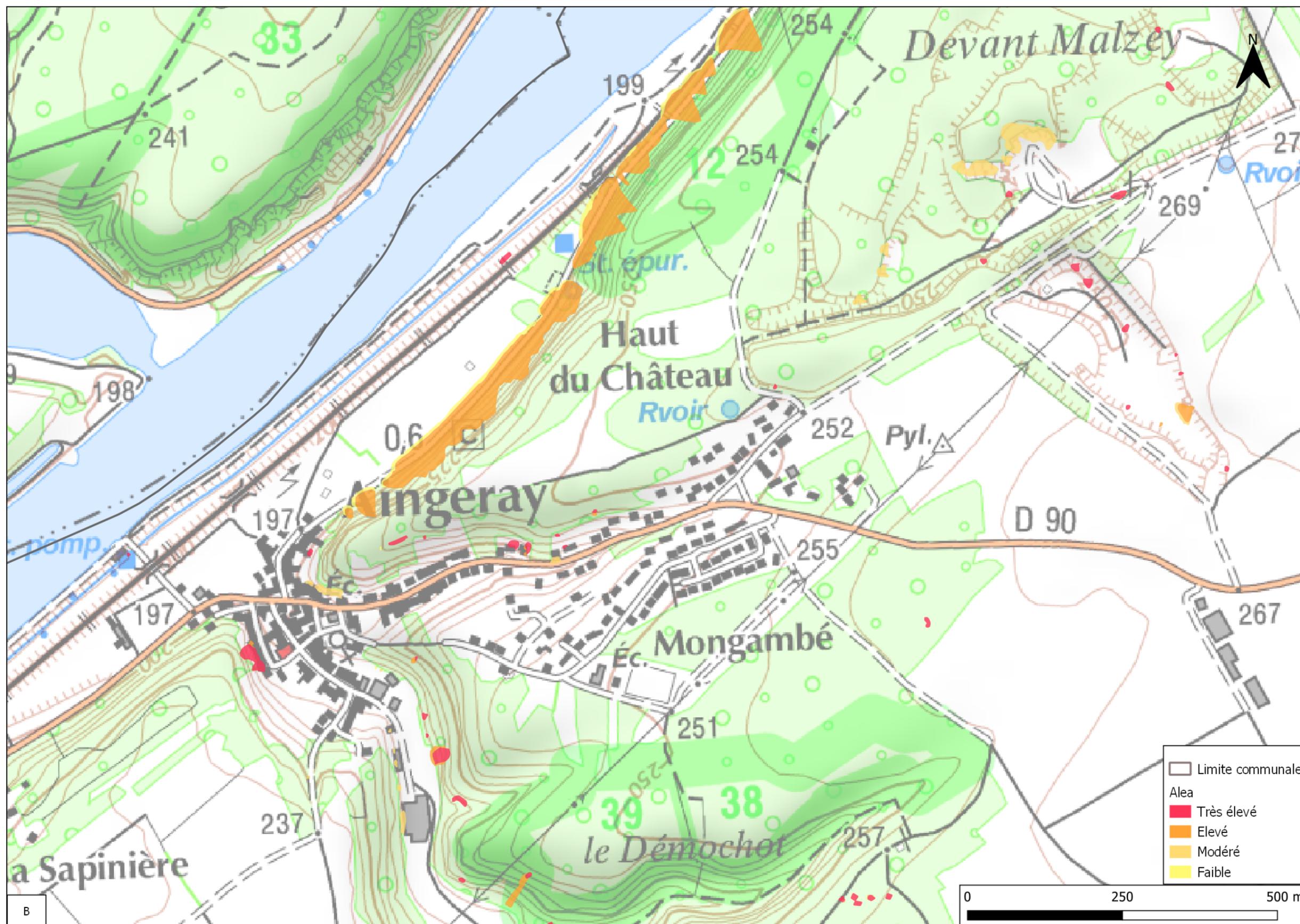


Illustration 72 – Carte de l'aléa chute de blocs "B" (fond Scan25 de l'IGN)

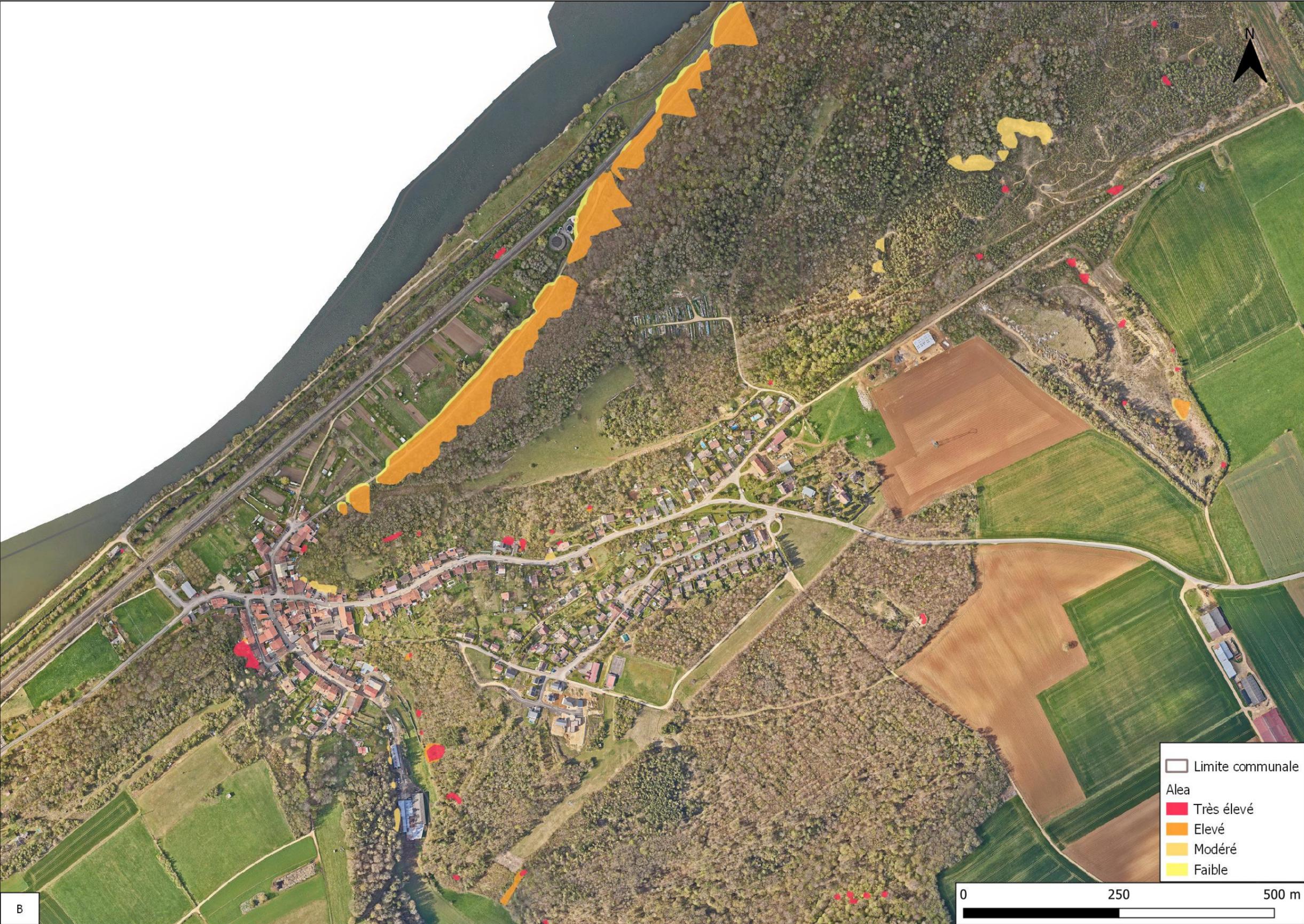


Illustration 73 – Carte de l'aléa chute de blocs "B" (fond orthophotographie, 2019)

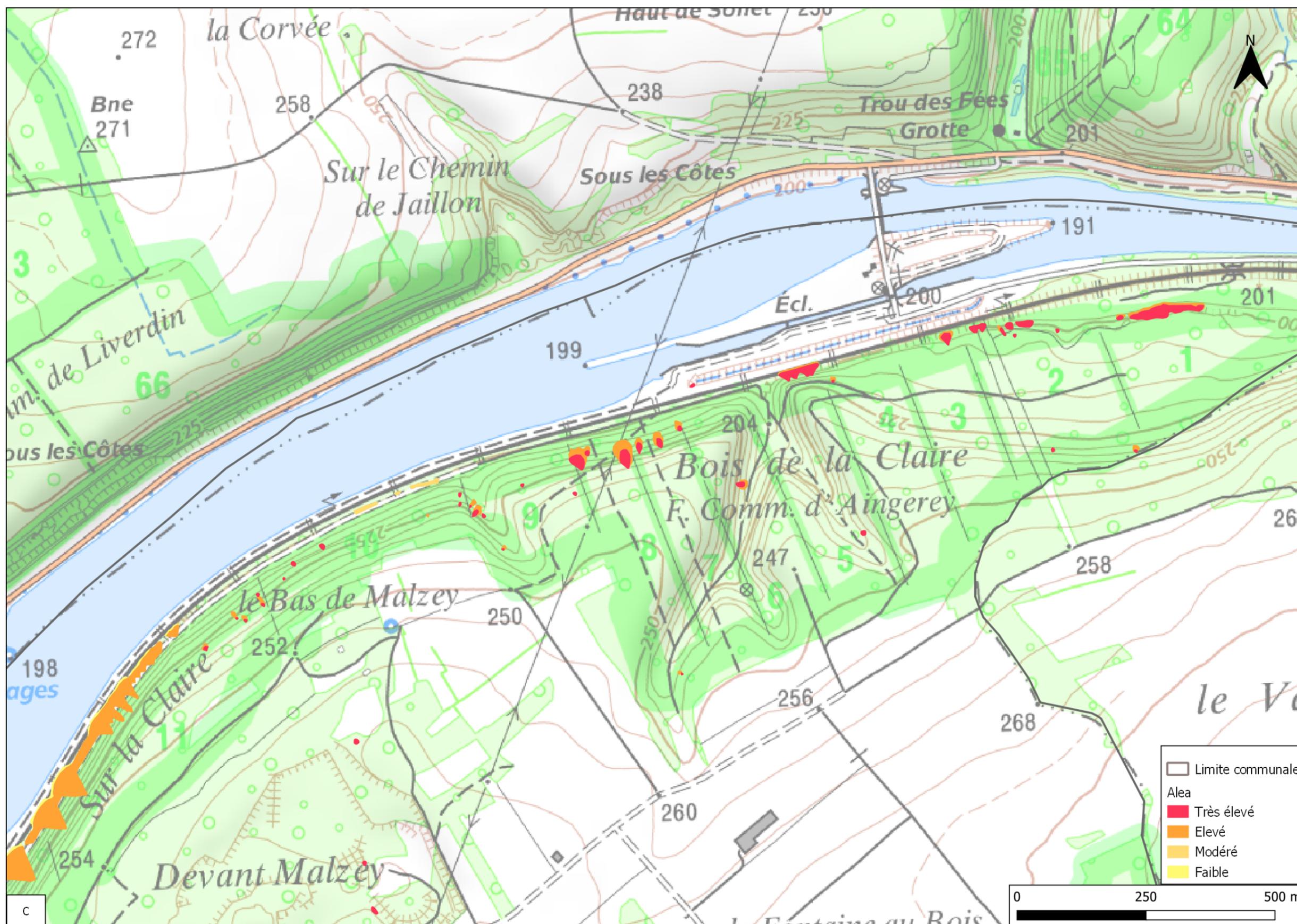


Illustration 74 – Carte de l'aléa chute de blocs "C" (fond Scan25 de l'IGN)



Illustration 75 – Carte de l'aléa chute de blocs "C" (fond orthophotographie, 2019)

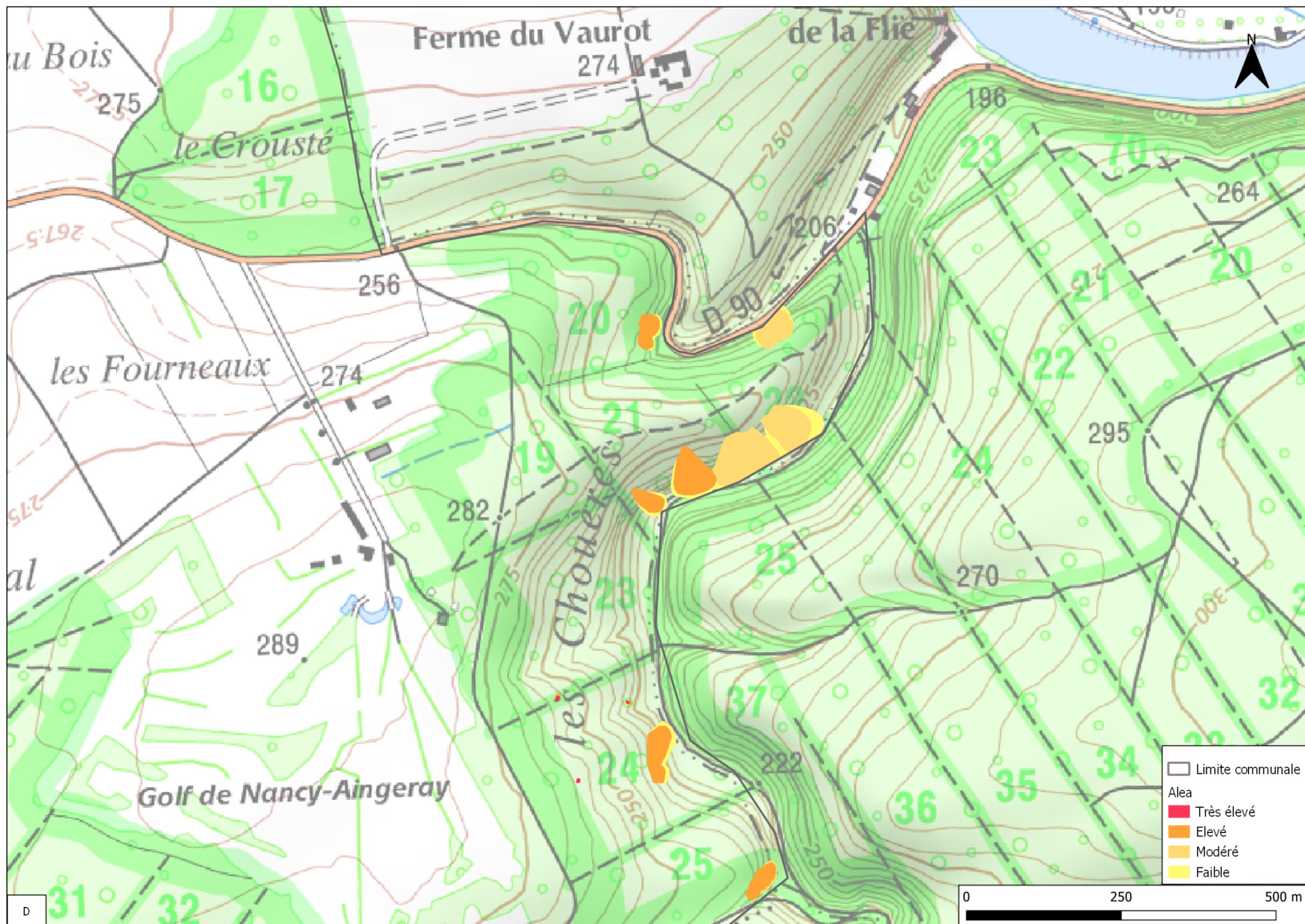


Illustration 76 – Carte de l'aléa chute de blocs "D" (fond Scan25 de l'IGN)



D

Illustration 77 – Carte de l'aléa chute de blocs "D" (fond orthophotographie, 2019)

Annexe 8 :

Tableaux synthétiques des parades pour les chutes de blocs

Parades actives (s'oppose à la manifestation du phénomène)		Capacité
Purge	purges douces (manuelles)	Purges d'éléments du dm ³ à qqs m ³
	purges à l'explosif (exceptionnelle)	
Reprofilage et abattage		Variable, en fonction du volume rocheux instable à abattre
soutènement	contrefort	Dépend du volume rocheux instable
	buton en béton	
	buton métallique	
	pilier	
Ancrage	passif (barre scellée sur toute la longueur dans le trou de forage, plaque d'appui et écrou de serrage à l'extrémité libre), exemple : cloutage	Type d'ancrage (actif ou passif) déterminé par les essais de convenance. Masse de blocs retenus en fonction de la profondeur et du type d'ancrage
	actif (barres ou câbles scellés en fond de trou, mise en tension, réglage de la surface d'appui), exemple : tirant	
Béton projeté		technique de protection et non de soutien
Filets et grillages plaqués		Aucune capacité à supporter les éboulements de masse
végétalisation	Peut dans certain cas destabiliser la zone de départ et provoquer le phénomène	
Drainage	de surface ou profond	

Illustration 78 - Exemple de parades actives

Parades passives (une fois le phénomène déclenché)			Capacité	
Merlon			jusqu'à 100 000 kJ	
BARRIERE = ECRAN	FIXE / STATIQUE	écran à structure rigide	échelle de perroquet	100 kJ pour les structures légères, jusqu'à 100 000kJ pour les écrans très massifs
			blocs bétons liaisonnés empilés	
			gabions	
			palplanches	
		barrière fixe (ou écran statique) de grillage ou de filet	grillage double nappe, double torsion	10 kJ
			grillage simple nappe, double torsion	
			filets en cable métallique	qqs 100 kJ (classe 1 à 3 : norme NF P 95-308)
			filets métalliques type ASM	qqs 1000 kJ
	dyna	écran déformable (dynamique) de filet	filets en cable métallique	qqs 1000 kJ
			filets métalliques type ASM	
grillage ou filet pendu		grillage simple simple ou double torsion	Chute fréquente d'éléments < à quelque 100 dm ³ . Peut être associé avec un filet.	
		filets métalliques type ASM	Pour des blocs entre quelque 0,1 et 1 m ³	
Fosse de réception		Variable selon les dimensions de l'ouvrage, elles mêmes dépendantes de la configuration topographique du site d'implantation (pente, hauteur du talus)		
Déviateur latéral		N'arrête pas les blocs mais les détourne des enjeux à protéger		

Illustration 79 - Exemple de parades passives

Annexe 9 :

ELANA (Energy Line Angle Normalized Area)

ELANA a été développé pour utiliser les lois empiriques 2D présentées précédemment 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 (Illustration 20). ELANA permet d'obtenir le raster des zones de propagation faible, moyenne et forte, très forte et extrêmement forte à partir des lois empiriques proposées. 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 n'est pas effectuée pour les pixels de départ situés dans la direction de plus grande pente d'un autre pixel de départ, ici nommés pixels « aval » par opposition aux pixels conservés pour la suite des calculs, ici nommés « amont ».

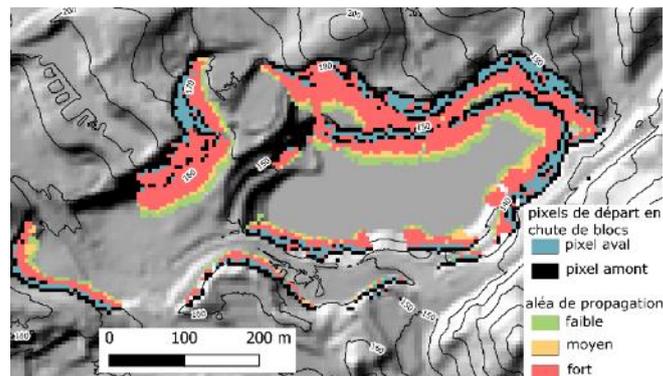


Illustration 80 – Exemple des résultats fourni par ELANA à partir du MNT 5 m d'une ancienne carrière et d'un raster de même dimension où l'utilisateur déclare les pixels de départ en chute de blocs. ELANA classe les pixels de départ en pixels « amont » et « aval » et permet d'obtenir le raster des zones de propagation faible, moyenne et fortes à partir des lois empiriques proposées

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° (illustration 21a) ;
- la sélection des directions autour de la plus grande pente dans un cône d'ouverture 2α et pour des pentes initiales supérieures à 26° (illustration 21a). α est défini par l'utilisateur comme une appréciation de la dispersion latérale des trajectoires. Par ex., $\alpha \leq 15^\circ$ pour des versants réglés de pente moyenne supérieure à 30° et/ou chenalisés ;
- 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 (illustration 21a) ;
- le calcul des couples (A_n, β) obtenus pour chaque point des profils topographiques (illustration 21b) et leur comparaison avec les lois empiriques. En chaque point du profil, on précise la probabilité de propagation (extrêmement forte, très forte, forte, moyenne, faible ou nulle, (illustration 21b) ;
- le report des probabilités de propagation obtenues pour chaque profil (Illustration 21c) dans un « raster de propagation » (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**d). 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.

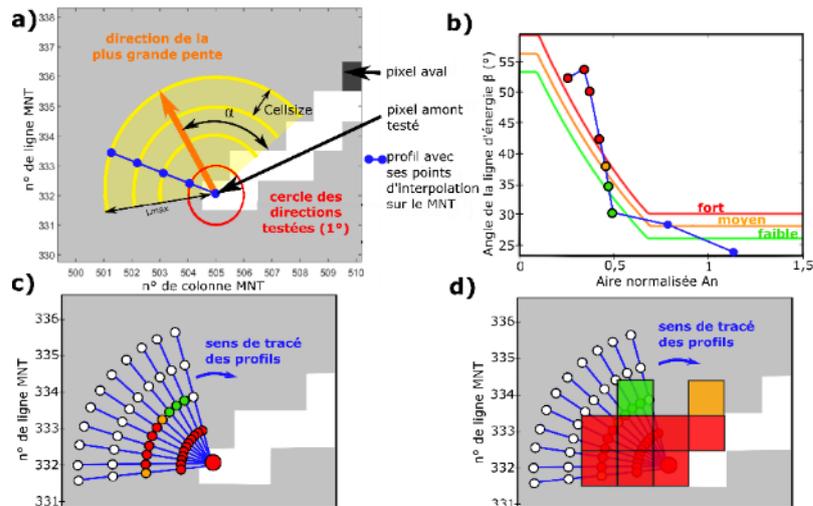


Illustration 81 – a) Exemple des étapes d'ELANA pour un pixel de départ en chute de blocs : recherche de la direction de plus grande pente autour du pixel, sélection des directions autour de la plus grande pente dans un cône d'ouverture 2α et exemple de l'interpolation d'un profil topographique de longueur 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 (extrêmement forte, très forte, forte, moyenne, faible ou nulle). c) et d) Reports des probabilités de propagation obtenus 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.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain - BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Grand Est – Site de Nancy
1 rue Jean Zay
54500 – Vandœuvre-lès-Nancy – France
Tél. : 03.83.44.81.49