VILLE DE BELFORT
PLAN LOCAL D'URBANISME

TITRE I - RAPPORT DE PRÉSENTATION
Partie I - État des lieux et analyse des éléments nécessaires à la construction du projet
Annexe 4 : cartographie des aléas – Étude du BRGM



PLU APPROUVÉ
PAR DÉLIBÉRATION EN DATE DU 10 FEVRIER 2021

Cartographie des aléas :

- **Effondrement/affaissement lié au karst**
- **Glissement de terrain**
- **Chute de blocs**

PLU BELFORT 2035

VILLE DE BELFORT
BELFORT.FR



Document public

Cartographie des aléas effondrement/affaissement lié au karst, glissement de terrain et chute de blocs sur la commune de Belfort (90)

Rapport final

BRGM/ RP-69009-FR
Mai 2019

L'État a contribué au financement de cette étude au titre des Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM)

VILLE DE BELFORT
BELFORT.FR

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
PRÉFET DU TERRITOIRE DE BELFORT

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Cartographie des aléas effondrement/affaissement lié au karst, glissement de terrain et chute de blocs sur la commune de Belfort (90)

Rapport final

BRGM/ RP-69009-FR

A. Vallet, G. Noury, M. Rabin, E. Husson

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : B. Colas	Nom : M. Parizot
Fonction : Ingénieur géotechnicien	Fonction Directeur régional Bourgogne-Franche-Comté :
Date : 06/06/2019	Date : 09/06/2019

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

L'État a contribué au financement de cette étude au titre des Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM)

VILLE DE BELFORT
BELFORT.FR

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
PRÉFET DU TERRITOIRE DE BELFORT

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Avertissement

Le tirage initial de ce rapport, en nombre fixé par convention, est diffusé à son commanditaire. Sa communicabilité ultérieure à des tiers est liée à la prise d'une décision administrative formelle à laquelle il concourt, conformément à la loi n° 78-753 du 17 Juillet 1978. **Passé le 30 juin 2021, ce rapport devient communicable à tout tiers extérieur qui en ferait la demande ; le BRGM ne peut plus être tenu comme responsable de l'usage qui pourrait en être fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.**

Mots-clés : Mouvement de terrain , Risques naturels, Cartographie d'aléa, Effondrement / affaissement karstique, Glissement de terrain, Chute de blocs, Éboulement, Cavités, Bourgogne-Franche-Comté, Territoire de Belfort, Belfort

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Vallet A., Noury G., Rabin M., Husson E. (2019) – Cartographie des aléas effondrement/affaissement lié au karst, glissement de terrain et chute de blocs sur la commune de Belfort (90). Rapport final. BRGM/RP-69009-FR, 200 p., 66 ill., 8 ann., 1 USB.

© BRGM, 2019, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

À la demande de la mairie de Belfort, dans le cadre de la prise en compte des risques naturels dans le Plan Local d'Urbanisme, le BRGM a été sollicité afin de mener une étude de cartographie multi-aléas concernant les risques naturels d'effondrement/affaissement karstique, de glissement de terrain, et de chute de blocs sur le territoire de la commune de Belfort (carte d'aléa au 1/5 000). Ce rapport présente un état actualisé des connaissances sur les mouvements de terrain précités en intégrant une compilation des archives disponibles, des investigations de terrain et des enquêtes réalisées auprès des services de la mairie notamment.

L'approche utilisée pour l'évaluation de l'aléa est de type expert. La démarche a consisté à évaluer les probabilités d'occurrence des phénomènes redoutés, décrit par leur niveau d'intensité, à l'échelle du territoire. La période de référence retenue est de 100 ans conformément à la doctrine nationale sur les Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRn). Les résultats sont exprimés de manière qualitative.

L'analyse est basée sur des observations in-situ, la bibliographie existante, une synthèse géologique couvrant le territoire de la commune de Belfort, spécialement réalisée dans le cadre de cette étude. Ne sont pas pris en compte les phénomènes concernant les phénomènes de retrait-gonflement, les affaissements et effondrements liés à la présence de cavités anthropiques ainsi que les coulées de boue.

Il a été constaté lors des campagnes terrain que les modèles numériques de terrain issus des levées LIDAR sont peu représentatifs et de nombreux éléments géomorphologiques (corniches rocheuses, rupture de pente…) et anthropiques (rempart en calcaires taillés, affleurement de roche pris dans des remparts, murs de soutènement…) ne sont pas modélisés. La faible représentativité des MNT LIDAR peut affecter ponctuellement la résolution et la précision de la cartographie d'aléa des phénomènes de chute de blocs et de glissement de terrain. La cartographie de l'aléa pour le phénomène d'effondrement/affaissement est peu affectée.

En complément de la cartographie des aléas, une pré analyse de risque a été réalisée pour chaque phénomène en croisant les enjeux par le niveau d'aléa évalué.

Aléa effondrement/affaissement lié à des cavités karstiques

La méthode mise en œuvre est celle en cours de développement, à la demande de la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (DGPR), par le BRGM et le CEREMA. Il s'agit d'une approche multicritères analysant les différents processus pouvant aboutir à un désordre en surface suivant une série de critères géologiques, hydrogéologiques et géotechniques. Malgré des incertitudes assez fortes sur deux secteurs, l'aléa a pu être cartographié sur l'ensemble de la commune. Celle-ci se révèle essentiellement soumise à un phénomène de soutirage des matériaux recouvrant le karst calcaire et pouvant générer des effondrements/affaissements en surface, comme en témoigne quelques évènements observés ces dernières années. Le niveau de cet aléa va de nul à moyen. En termes de surface il est majoritairement très faible à faible. L'aléa moyen concerne essentiellement les berges de la Savoureuse, les bords du vallon descendant de l'étang des Forges et un secteur situé au sud du quartier Hatry et au nord de la Pépinière (secteur où se concentre la plupart des désordres récemment observés). La rupture mécanique du toit rocheux de cavités est considérée comme très peu probable, à l'exception éventuelle de la zone de la grotte de Cravanche, grotte ayant fait l'objet d'un diagnostic spécifique distinct de la présente étude (SOCOTEC, 2019).

Aléa glissement de terrain

La méthodologie adoptée est en cours de développement au sein du BRGM. Elle est basée sur la caractérisation de la probabilité d'occurrence et de l'intensité attendue de phénomènes. Les règles de classifications et de croisement des différents paramètres valorisés sont issues de travaux menés dans des contextes lithologiques et morphologiques similaires. L'analyse s'est basée sur les données disponibles au moment de sa réalisation, il s'agit principalement des modèles numériques de terrains, des cartes géologiques et des relevés et observations effectués sur le terrain. L'aléa a été classé en quatre classes allant de « Nul » à « Fort ».

Les zones d'aléa sont principalement concentrées sur les reliefs (massif du Salbert, massif du Mont, citadelle de Belfort, fort et bois de la Miotte, fort de la Justice et bois des fourches, fort et massif des Perches). Les zones fortifiées constituent également des zones d'aléas (la Citadelle, le fort de la Justice et le fort de la Miotte, le fort enterré Hatry, le fort des Basses Perches). Les berges de la Savoureuse ont également été caractérisées en aléa faible au titre des glissements de terrain pouvant être induits par le phénomène d'érosion de berge. La majeure partie de la zone urbanisée se situe en zone d'aléa nul.

Aléa chute de blocs

L'approche utilisée pour l'évaluation de l'aléa chute de blocs est de type expert, basée sur la méthode en cours de développement MEZAP[1] qui a été adaptée au contexte local. Cette analyse est basée sur des observations in-situ et la bibliographie existante. L'analyse des données numériques et les investigations de terrain ont permis de cartographier des zones de départ (corniches rocheuses) et de définir pour chacune d'elles, un indice d'activité, un indice d'intensité et une probabilité d'atteinte. Le croisement de ces indices a permis d'évaluer l'aléa chute de blocs. Une proportion importante de corniches rocheuses a été taillée pour former des remparts et/ou sont surmontées ou prises dans des murs de fortifications. Ces corniches ont été prises en compte dans la cartographie de l'aléa chute de blocs. L'aléa a été classé en quatre classes allant de « Nul » à « Fort ». Le zonage d'aléa chute de blocs est discontinu et ponctuel à l'échelle du territoire communale de Belfort et est principalement localisé sur les versants des reliefs (massif du Salbert, massif du Mont, citadelle de Belfort, fort et bois de la Miotte, fort de la Justice et bois des fourches).

Une pré-analyse de risque a été mise en œuvre en croisant les bâtiments de plus de 10m^2 recensés dans la BDTop de l'IGN et les zonages d'aléa. Sur les 9724 bâtiments inventoriés sur le territoire de la commune de Belfort, tous types d'aléa confondus :

- 26 bâtiments sont touchés par un aléa fort ;
- 2162 bâtiments sont touchés par un aléa moyen ;
- 5513 par un aléa faible ;
- 1295 par un aléa très faible.

[1] MEZAP : « Méthode pour l'Évaluation du Zonage de l'Aléa chute de Pierres ». Méthode développée par un groupe de travail piloté par IRSTEA pour le compte du MTES (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire)

Sommaire

1. Introduction 11

2. Collecte et structuration des données 13

2.1. DONNÉES DISPONIBLES 13

2.2. LEVÉ LIDAR 13

3. Contexte géologique et morphologique 15

3.1. SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE 15
3.1.1. Contexte général 15
3.1.2. Formations géologiques présentes sur la commune de Belfort 20
3.1.3. Contexte morphologique général 21

4. Aléa « Effondrements/affaissements lié au karst» 27

4.1. MÉTHODOLOGIE 28
4.1.1. Méthodologie globale 28
4.1.2. Précisions sur la méthodologie utilisée pour la présente étude 28

4.2. RÉSULTATS DES ANALYSES ET CARTOGRAPHIE 31
4.2.1. Analyse bibliographique 31
4.2.2. Caractérisation de la zone d'étude 38
4.2.3. Détermination de la probabilité d'occurrence 43
4.2.4. Détermination de l'intensité 44
4.2.5. Détermination de l'aléa 45

5. Aléa « Glissement de terrain » 49

5.1. MÉTHODE GÉNÉRALE 49
5.1.1. La probabilité d'occurrence 49
5.1.2. L'intensité 49
5.1.3. L'aléa 50
5.1.4. La propagation 51
5.1.5. Cas particulier 51

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ALÉA « GLISSEMENT DE TERRAIN » SUR LA COMMUNE DE BELFORT 51
5.2.1. Inventaire des phénomènes historiques 52
5.2.2. Caractérisation de la probabilité d'occurrence 56
5.2.3. Caractérisation de l'intensité 60
5.2.4. Cas particuliers 61
5.2.5. Caractérisation de l'aléa 64

6. Aléa « Chute de blocs » 69

6.1. MÉTHODE GÉNÉRALE 69
6.2. ÉTAPE N° 1 – HISTORIQUE ÉVÈNEMENTIEL 72
6.3. ÉTAPE N° 2 – RECONNAISSANCE DES ZONES DE DÉPART ET VALIDATION TERRAIN 72
6.4. ÉTAPE N° 3 – DÉFINITION DU(DES) SCÉNARIO(S) DE RÉFÉRENCE POUR CHAQUE ZONE DE DÉPART HOMOGÈNE 79
6.5. ÉTAPE N° 4 - ÉVALUATION DE LA PROPAGATION (PROBABILITÉ D'ATTEINTE) 89
6.5.1. La méthode de la « ligne d'énergie » 89
6.5.2. Cartographie de la probabilité d'atteinte 93
6.6. ÉTAPE N° 5 – ÉVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA CHUTE DE BLOCS 99
6.6.1. Phénomène de recul des corniches 99
6.6.2. Aléa remobilisation de blocs en versant 99
7. Pré-analyse de risque : croisement des aléas et du bâti 103
7.1. MÉTHODE 103
7.2. ALÉA « EFFONDREMENT/AFFAISSEMENT KARSTIQUE » 105
7.3. ALÉA « GLISSEMENT DE TERRAIN » 109
7.4. ALÉA « CHUTE DE BLOCS » 113
7.5. MULTI-ALÉA 117
8. Conclusions 121
8.1. ALÉA « EFFONDREMENT/AFFAISSEMENT LIÉ À DES CAVITÉS KARSTIQUES » 121
8.2. ALÉA « GLISSEMENT DE TERRAIN » 121
8.3. ALÉA « CHUTE DE BLOCS » 122
8.4. PRÉ-ANALYSE DE RISQUE 122
9. Livrable électronique 125
10. Bibliographie 127

Liste des figures

Illustration 1 : Présentation de la zone d'étude. 12

Illustration 2 : Localisation des environs de Belfort sur une carte géologique simplifiée de la région (d'après Contini et al., 2000). 15

Illustration 3 : Cartes géologiques de la commune de Belfort et localisation des traits de coupes présentées en Illustration 11 (en rouge emprise communale). 16

Illustration 4 : Coupes géologiques schématiques des parties Ouest et Est de la commune de Belfort. Réalisées à partir des cartes géologiques au 1/50 000. 17

Illustration 5 : Log sédimentaire des formations mésozoïques affleurantes sur la commune de Belfort (Jurassique et Triasique). Certaines de ces formations sont karstifiées et abritent des réseaux karstiques à l'origine de sources karstiques (calcaires du Kimméridgien, du Bajocien, Lias calcaire et du Muschelkalk). Ces niveaux sont entrecoupés par des formations moins ou non karstifiables (marnes du Lias, marno-calcaires du Dogger, séries détritiques du Trias…). 19

Illustration 6 : Tableau récapitulatif des formations géologiques rencontrées sur la commune de Belfort – oui* (colonne glissement) correspond aux formations à dominante rocheuse considérées néanmoins comme potentiellement source de glissements de terrain en raison de présence possible (et non forcément détectable) d'horizon altéré meuble en surface. 23

Illustration 7 : Altitude et pente sur le territoire de la ville de Belfort d'après le MNT 25 m de la BDalti de l'IGN. 25

Illustration 8 : Typologie des différents types de désordres se développant en contexte calcaire. 29

Illustration 9 : Liste des cavités figurant à la BD Cavités sur les communes de Belfort, Cravanche et Essert. 32

Illustration 10 : Carte des mouvements attribuables à des cavités retenus pour la présente étude. 34

Illustration 11 : Liste des mouvements attribuables à des cavités retenus pour la présente étude. 35

Illustration 12 : Extrait de l'atlas CEREMA « mouvements de terrain » (2012). 37

Illustration 13 : Localisation des deux zones d'incertitude majeures concernant les formations du Jurassique et du Trias sous recouvrement quaternaire (alluvions de la Savoureuse, lœss, éboulis, remblais…). Les points noirs correspondent aux forages atteignant le substratum jurassique ou triasique. 40

Illustration 14 : Carte interprétative de la nature karstique supposée des formations Jurassique et Triasique sur la commune de Belfort. Le substratum non karstifiable correspond aux formations du socle primaire et aux formations détritiques du Trias. Le recouvrement quaternaire est indiqué à titre de rappel. 41

Illustration 15 : Table d'analyse pour qualifier la probabilité d'occurrence d'un mouvement lié au karst. ..43

Illustration 16 : Carte de probabilité d'occurrence de mouvements de terrain liés au soutirage par le karst. 44

Illustration 17 : Carte d'intensité de mouvements de terrain liés au soutirage par le karst. 45

Illustration 18 : Carte d'aléa de mouvements de terrain liés au soutirage par le karst. 47

Illustration 19 : Tableau de caractérisation de l'intensité en fonction des impacts sur le bâti issus de Rey A. (2016). 50

Illustration 20 : Matrice de caractérisation de l'aléa (issue de la méthode MEZAP). 51

Illustration 21 : Localisation GPS des points d'observations. 53

Illustration 22 : Carte des indices de déstabilisation cartographiés sur la commune de Belfort. 53
Illustration 23 : Photographies (BRGM) de quelques indices de déstabilisation cartographiés sur la commune de Belfort. 54
Illustration 24 : Inventaire des indices de déstabilisations gravitaires identifiés sur le terrain. 55
Illustration 25 : Matrice de croisement pour caractériser la probabilité d'occurrence. 56
Illustration 26 : Classement des formations en fonction de leur sensibilité aux glissement de terrain. 57
Illustration 27 : Carte des pentes issues du MNT à 25 m sur la commune de Belfort. 58
Illustration 28 : Carte des zones d'influence des facteurs aggravants pris en compte dans la caractérisation de la probabilité d'occurrence. 59
Illustration 29 : Carte de probabilité d'occurrence de la commune de Belfort. 60
Illustration 30 : Tableau de caractérisation de l'intensité attendue sur les talus locaux. 61
Illustration 31 : Tables de caractérisation de la probabilité d'occurrence (à gauche) et de l'intensité (à droite) dans le cas de prise en compte des remparts. 62
Illustration 32 : Croisement probabilité d'occurrence/intensité dans le cas des remparts avec une probabilité d'occurrence très faible. 62
Illustration 33 : Photographie (BRGM) du rempart sud du fort de la Justice partiellement effondré. 63
Illustration 34 : Tableau récapitulatif de la caractérisation de l'aléa sur les remparts. 64
Illustration 35 : Cartographie de l'aléa « glissement de terrain » sur la commune de Belfort. 67
Illustration 36 : Indices d'intensité définis par la MEZAP (source : MEZAP) 70
Illustration 37 : Indices d'activité définis par la MEZAP (source : MEZAP). 70
Illustration 38 : Matrice de probabilité d'occurrence (source : document MEZAP). 71
Illustration 39 : Matrice d'évaluation de l'aléa adapté au contexte local (source : modifié d'après document MEZAP) 71
Illustration 40 : Inventaire non exaustif des pierres/blocs observés sur le terrain. 72
Illustration 41 : Identification et clasiffication préliminaire des zones de départ. 74
Illustration 42 : Illustration de la mauvaise représentativité du LIDAR pour la détection de corniche rocheuse. 75
Illustration 43 : Cartographie des zones de départ après validation terrain et trace GPS des zones investiguées. 77
Illustration 44 : Description des zones de départ et défintion d'un ou des scénario(s) de référence pour chaque zone homogène de départ. 85
Illustration 45 : Indice d'intensité pour chaque zone de départ. 86
Illustration 46 : Indice d'activité pour chaque zone de départ. 87
Illustration 47 : Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β (Berger, 2009b). 90
Illustration 48 : Représentation schématique de la méthode de cônes (d'après Jaboyedoff et Labiouse, 2011). 91
Illustration 49 : Exemples de modulation (à titre indicatif) apportées sur les intervalles d'angles de la méthode de la oigne d'énergie en fonction des principaux types de profil topographique des versants (orange/rose/rouge pointillé : niveaux de probabilité d'atteinte forte / moyenne /faible) (source MEZAP, à paraître). 92
Illustration 50 : Seuils de valeurs d'angle de la méthode de la ligne d'énergie en fonction de l'aire normalisée d'un versant (rapport BRGM RP-66589-FR) 93

Illustration 51 : Profils topographiques réalisés et probabilités d'atteinte estimées avec la relation statistique entre aire normalisé des profils et angle de la méthode de la ligne d'énergie. 94
Illustration 52 : Gamme de distance de probabilité d'atteinte pour les corniches subverticales (utilisée à titre indicatif). 95
Illustration 53 : Cartographie des zones de propagation des phénomènes de chute de blocs. 97
Illustration 54 : Représentation schématique du phénomène de recul de corniches rocheuses. 99
Illustration 55 : Cartographie de l'aléa remobilisation de blocs. 100
Illustration 56 : Cartographie de l'aléa chute de blocs. 101
Illustration 57 : Emprise cartographique de la BDTopo avec fond de carte orthophographique. 104
Illustration 58 : Nombre et pourcentage de bâtiment en fonction du niveau d'aléa effondrement/affaissement. 105
Illustration 59 : Cartographie des bâtiments en fonction des niveaux d'aléa effondrement/affaissement. 107
Illustration 60 : Nombre et pourcentage de bâtiment en fonction du niveau d'aléa glissement de terrain. 109
Illustration 61 : Cartographie des bâtiments en fonction des niveaux d'aléa glissement de terrain. 111
Illustration 62 : Nombre et pourcentage de bâtiment en fonction du niveau d'aléa chute de blocs. 113
Illustration 63 : Cartographie des bâtiments en fonction des niveaux d'aléa chute de blocs. 115
Illustration 64 : Nombre et pourcentage de bâtiment en fonction du niveau d'aléa, tous types d'aléa confondus. 117
Illustration 65 : Présentation graphique des pourcentages de bâtiment en fonction du niveau d'aléa, tous types d'aléa confondus. 117
Illustration 66 : Cartographie des bâtiments en fonction des niveaux d'aléa tous aléas confondus. 119

Liste des annexes

Annexe 1 - Cartographie de l'aléa « effondrement / affaissement » 131
Annexe 2 - Cartographie de l'aléa « glissement de terrain » 135
Annexe 3 - Cartographie de l'aléa « chute de blocs » 139
Annexe 4 - Les glissements de terrain – généralités 143
Annexe 5 - Chute de blocs et éboulement rocheux– généralités....149
Annexe 6 - Histoire sédimentaire, géodynamique et structurale du secteur de Belfort et des environs ..155
Annexe 7 - Planche photographique des zones d'aléa glissement de terrain 177
Annexe 8 - Planche photographique des zones de départ de chute de blocs 181

1. Introduction

À la demande de la mairie de Belfort, dans le cadre de la prise en compte des risques naturels dans le Plan Local d'Urbanisme, le BRGM a été sollicité afin de mener une étude de cartographie multi-aléas concernant les **risques naturels d'effondrement/affaissement lié au karst, de glissement de terrain, et de chute de blocs** sur le territoire de la commune de Belfort (carte d'aléa au 1/5 000). En complément de la cartographie, une hiérarchisation des zones à risque a été réalisée pour chaque phénomène en croisant les enjeux par le niveau d'aléa.

Ce rapport présente un état actualisé des connaissances sur les mouvements de terrain précités en intégrant une compilation des archives disponibles, des investigations de terrain et des enquêtes réalisées auprès des services de la mairie notamment.

L'évaluation de l'aléa, traduisant la probabilité d'occurrence d'un phénomène d'une intensité donnée dans une période donnée, ne pourra pas être réalisée au sens strict compte tenu de la complexité importante de ce type d'analyse avec les données disponibles ou qui seront acquises. La cartographie de l'aléa reflétera la susceptibilité des formations, et de leur contexte géomorphologique, à l'apparition des différents phénomènes selon une hiérarchisation qualitative de l'aléa.

L'approche développée dans cette étude pour cartographier l'aléa repose sur une démarche de type expert combinant une analyse des observations in-situ et de la bibliographie existante. L'évaluation des différents aléas se base également sur une synthèse géologique couvrant le territoire de la commune de Belfort qui a été réalisée pour cette étude.

Pour cette étude, ne sont pas pris en compte les phénomènes concernant les phénomènes de retrait-gonflement, les affaissements et effondrements liés à la présence de cavités anthropiques ainsi que les coulées de boue. L'aléa lié aux chutes de pierres qui pourraient provenir des murs délabrés de bâtiments ou autres structures anthropiques ne sera pas cartographié. Néanmoins, au cas où de tels phénomènes, d'ampleur exceptionnelle, seraient constatés, le BRGM les mentionne à la commune et à l'administration, au même titre que les chutes de blocs liées aux édifices en ruine.

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

La zone d'étude correspond au territoire communal de la ville de Belfort d'une surface d'environ 17 km^2 (Illustration 1). Les cartes d'aléa sont restituées sur les fonds cadastraux à l'échelle du 1/10 000, comme stipulé au cahier des charges du programme. La précision des limites des zones cartographiées au 1/10 000 est de 10 m. Théoriquement, toute opération de zoom sur une carte au 1/10 000 pour en agrandir l'échelle est à proscrire car ne reflétant que partiellement la réalité.

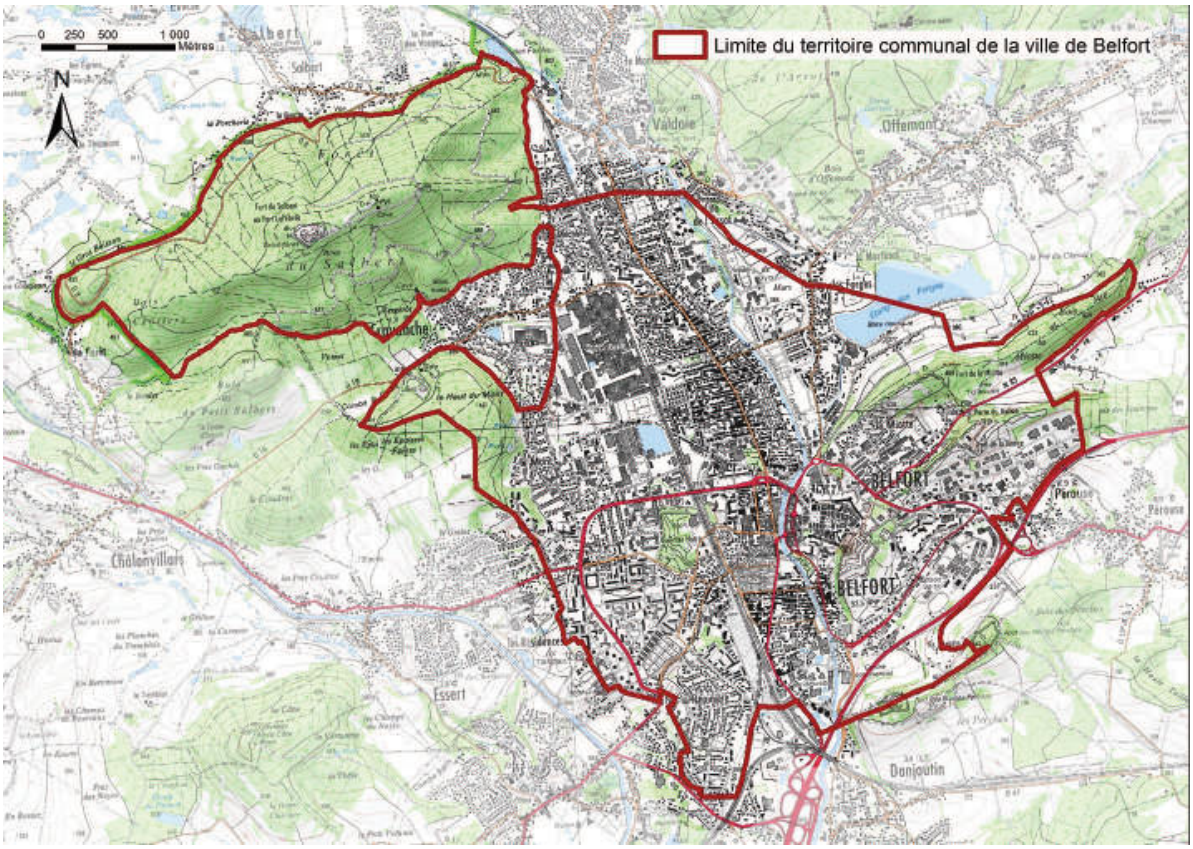


Illustration 1 : Présentation de la zone d'étude.

2. Collecte et structuration des données

2.1. DONNÉES DISPONIBLES

La phase documentaire est couplée à une reconnaissance de terrain afin de préciser la nature et la géométrie des mouvements historiques, mais également d'identifier les indices d'éventuelles instabilités non reconnues 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/) ;
- la carte géologique de la feuille de Belfort au 1/50 000ème ;
- les archives du BRGM (rapports, cartes géologiques) ;
- la base de données mouvement de terrain et cavités du portail Géorisques (http://www.georisques.gouv.fr/) ;
- l'atlas départemental des mouvements de terrain du Territoire de Belfort réalisé par le CEREMA en 2012 ;
- une analyse bibliographique rassemblant les informations transmises par les services publics (archive communale/départementale) ;
- les données spatialisées (IGN SCAN25®, IGN orthophotographie, IGN BDtopo, cadastre et IGN modèle numérique de terrain ;
- des levés LIDAR 10 m et 1 m et une orthophotographie haute-résolution fournie par la mairie de Belfort ;
- des investigations de terrain réalisées par le BRGM.

2.2. LEVÉ LIDAR

Deux levés LIDAR ont été effectués couvrant l'ensemble du territoire de la commune de Belfort :

- LIDAR de 2008 : levé de résolution 10 m ;
- LIDAR de 2017 : levé de résolution 1 m ;

Les modèles numériques de terrain (MNT) modélisés à partir de ces levés LIDAR ont été communiqués par le ville de Belfort. Les levés LIDAR utilisés n'ont pas été mis en œuvre spécifiquement pour cette étude de cartographie d'aléa. Le levé LIDAR de 2017 avait par exemple pour objectif principal de caler une orthophotographie haute résolution du secteur.

Il a été constaté lors des campagnes terrain que les modèles numériques de terrain issus de ces levées LIDAR sont peu représentatifs et que de nombreux éléments géomorphologiques (corniches rocheuses, rupture de pente…) et anthropiques (rempart en calcaires taillés, affleurement de roche pris dans des remparts, murs de soutènement…) ne sont pas modélisés.

La mauvaise qualité du MNT peut être expliqué par un levé LIDAR dont l'objectif n'était pas de réaliser un MNT haute-résolution et dont les caractéristiques de levé (densité de points, recouvrement, inclinaison…) et/ou de traitement des nuages de points (classification notamment) ne sont pas adaptées.

La faible représentativité des MNT LIDAR affecte particulièrement la résolution et la précision de la cartographie d'aléa des phénomènes de chute de blocs et de glissement

de terrain. La cartographie de l'aléa pour le phénomène d'effondrement/affaissement est peu affectée.

Pour la cartographie de l'aléa chute de blocs, la qualité du MNT impact principalement (voir section 6 pour plus de détail) :

- la détection et la cartographie de l'emprise des zones de départs ;
- l'évaluation et la cartographie des enveloppes de propagation des phénomènes de chutes de blocs (la géomorphologie des versants étant le facteur principal contrôlant la propagation des blocs).

Pour la cartographie de l'aléa « glissement de terrain », le MNT est utilisé pour calculer les valeurs de pente. Il s'agit d'un des critères principaux permettant de caractériser à la fois la probabilité d'occurrence et l'intensité attendue. Les ruptures de pentes ont donc été en majorité cartographiées sur le terrain. Sur les secteurs non accessibles, les pentes ont été caractérisées soit à partir du MNT de 25 m fourni par l'IGN, soit, dans les secteurs où cela était possible, à partir des différentes versions de LIDAR fournies par la commune.

3. Contexte géologique et morphologique

3.1. SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

3.1.1. Contexte général

La région de Belfort se situe au pied du massif des Vosges, en bordure du Fossé Rhénan et au nord du Jura (Illustration 2). En effet, au nord-est de la zone d'étude se trouve le bassin Rhénan correspondant à un bassin sédimentaire mis en place lors du Rift Ouest Européen du Crétacé à Éocène (Dèzes *et al*. 2004 ; Hinsken *et al.* 2007). Au nord, se trouve le massif principalement granitique des Vosges constituant un vestige de la chaîne Hercynienne (420 à 30 Ma environ). Au sud se trouve le massif du Jura, résultant de la propagation septentrionale de la compression Alpine (Becker 2000; Rabin *et al.* 2015; 2018).

La zone de Belfort occupe une position intermédiaire encadrée par ces trois ensembles (Jura, Vosges et Rhénan), constituée principalement par les terrains du Mésozoïque. L'histoire géologique est détaillée en Annexe 6, mais dans les prochains paragraphes seul les principaux éléments seront exposés.

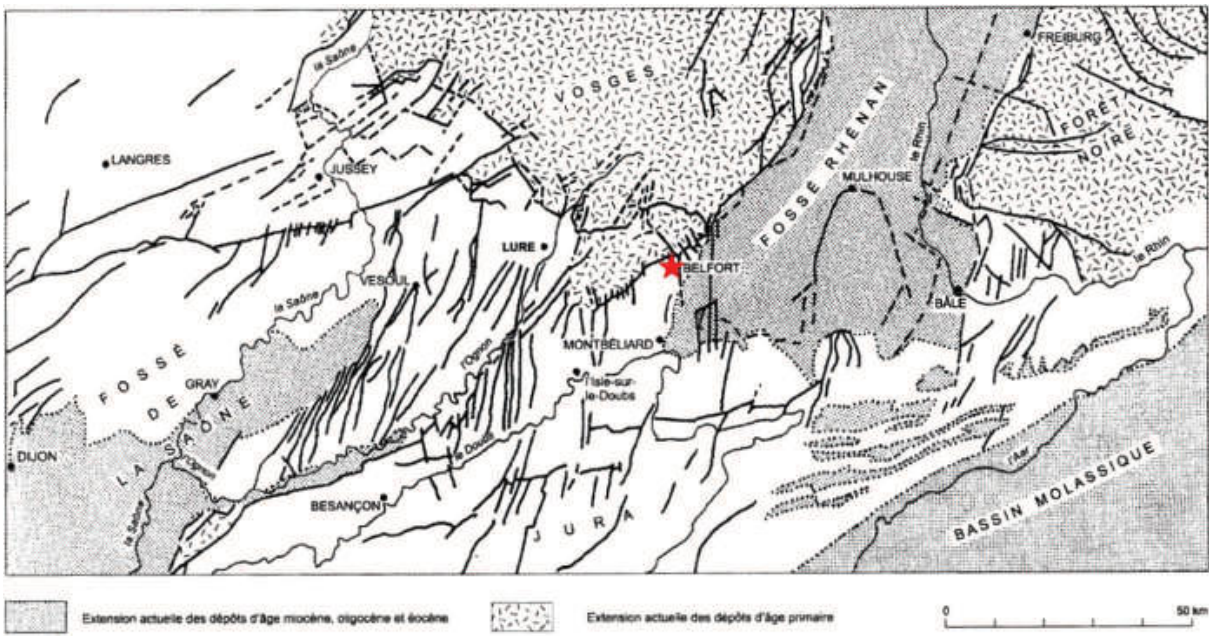


Illustration 2 : Localisation des environs de Belfort sur une carte géologique simplifiée de la région (d'après Contini et al.*, 2000).*

Plus précisément, la zone recouvre des terrains géologiques de nature et d'âge très variés allant du Dévonien (420 Ma) au Quaternaire (5 Ma à actuel). Les terrains les plus anciens sont situés au nord de la commune et se rajeunissent en allant vers le sud. Du nord au sud, on peut distinguer les unités structuro-sédimentaires suivantes (Illustration 3) :

- au nord, les contreforts des Vosges constitués par des terrains sédimentaires et volcaniques de l'ère primaire du Dévonien au Permien, métamorphisés (transformations sous l'effet de la pression et de la température) au cours de l'orogenèse Hercynienne ;
- au centre, les terrains mésozoïques du Trias et du Jurassique affleurent largement et constituent la majorité des terrains sur lesquels se trouve la commune de Belfort. Ils sont principalement issus d'une longue évolution en domaine marin ;

- au sud et à l'est, on trouve les terrains tertiaires de l'Éocène et de l'Oligocène mis en place lors de l'ouverture du fossé Rhénan, recouverts par une couche de lœss (dépôt éolien) rapporté au Quaternaire.

La zone d'étude est fortement structurée. Le cours d'eau de la Savoureuse suit la direction d'une faille orientée nord-sud. Cette faille, probablement héritée de l'orogenèse Hercynienne, a d'abord été réactivée en faille normale lors de l'ouverture du fossé Rhénan (Rift Ouest Européen, Éocène-Oligocène (55-23 Ma)) avant d'être réactivée en faille décrochante post Pliocène (2.6 Ma) (Giamboni *et al.* 2004(a); Giamboni *et al*. 2004(b); Ustaszewski & Schmid 2007). Cette faille fait partie d'un ensemble de failles d'orientation similaire affectant le massif Jurassien et la partie Sud du fossé Rhénan. À Belfort, les terrains à l'est de la Savoureuse (et de la faille associée) sont continus du Jurassique supérieur au Trias inférieur, qui est discordant sur le socle primaire (Illustration 3 et Illustration 4Illustration 4, coupe Est). Tandis qu'à l'ouest de cette faille les calcaires du Jurassique moyen sont en contact par faille avec le socle primaire qui constitue un Horst (ensemble structural surélevé à la faveur de failles normales, ici présentes au nord et au sud du massif du Salbert) (Illustration 4, coupe Ouest). La faille mettant en contact ces terrains fait partie d'une famille de failles orientées N60°E, héritées de l'orogenèse Hercynienne également et ayant connu plusieurs réactivations possibles. Ces failles sont plus nombreuses au nord-est de la commune où elles montrent un fonctionnement en faille décrochante et/ou en faille normale (Théobald N. & Devantoy J. 1963; Contini, 2000).

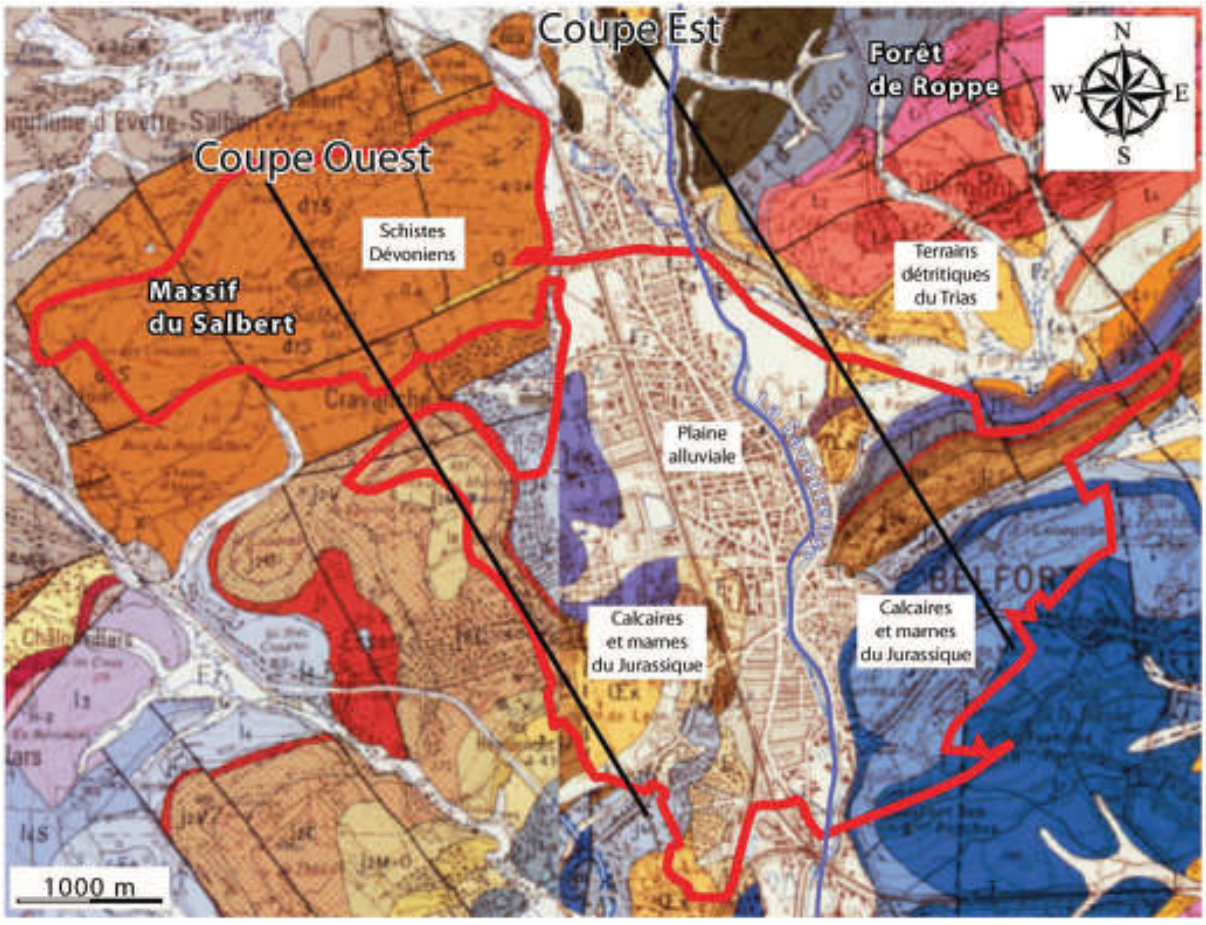


Illustration 3 : Cartes géologiques de la commune de Belfort et localisation des traits de coupes présentées en Illustration 11 (en rouge emprise communale).

Coupe Ouest

Coupe

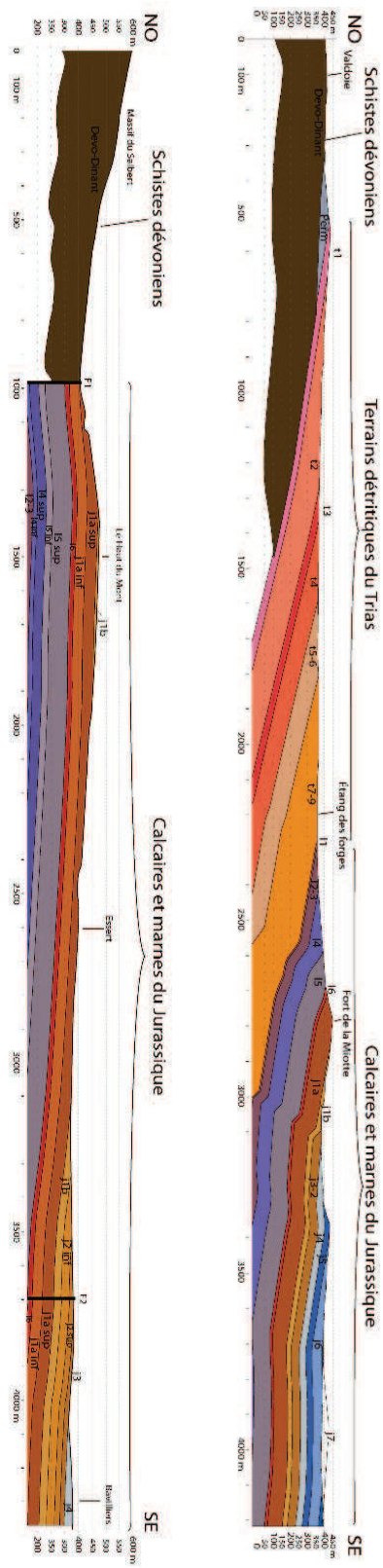


Illustration 4 : Coupes géologiques schématiques des parties Ouest et Est de la commune de Belfort. Réalisées à partir des cartes géologiques au 1/50 000.

L'ensemble des terrains sédimentaires du Mésozoique présentent un plongement moyen d'environ 30° vers le sud en partie Est (Est de la Savoureuse), tandis qu'ils sont proches de l'horizontales en partie Ouest.

Le log stratigraphique en Illustration 5 présente les successions lithologiques sur le secteur.

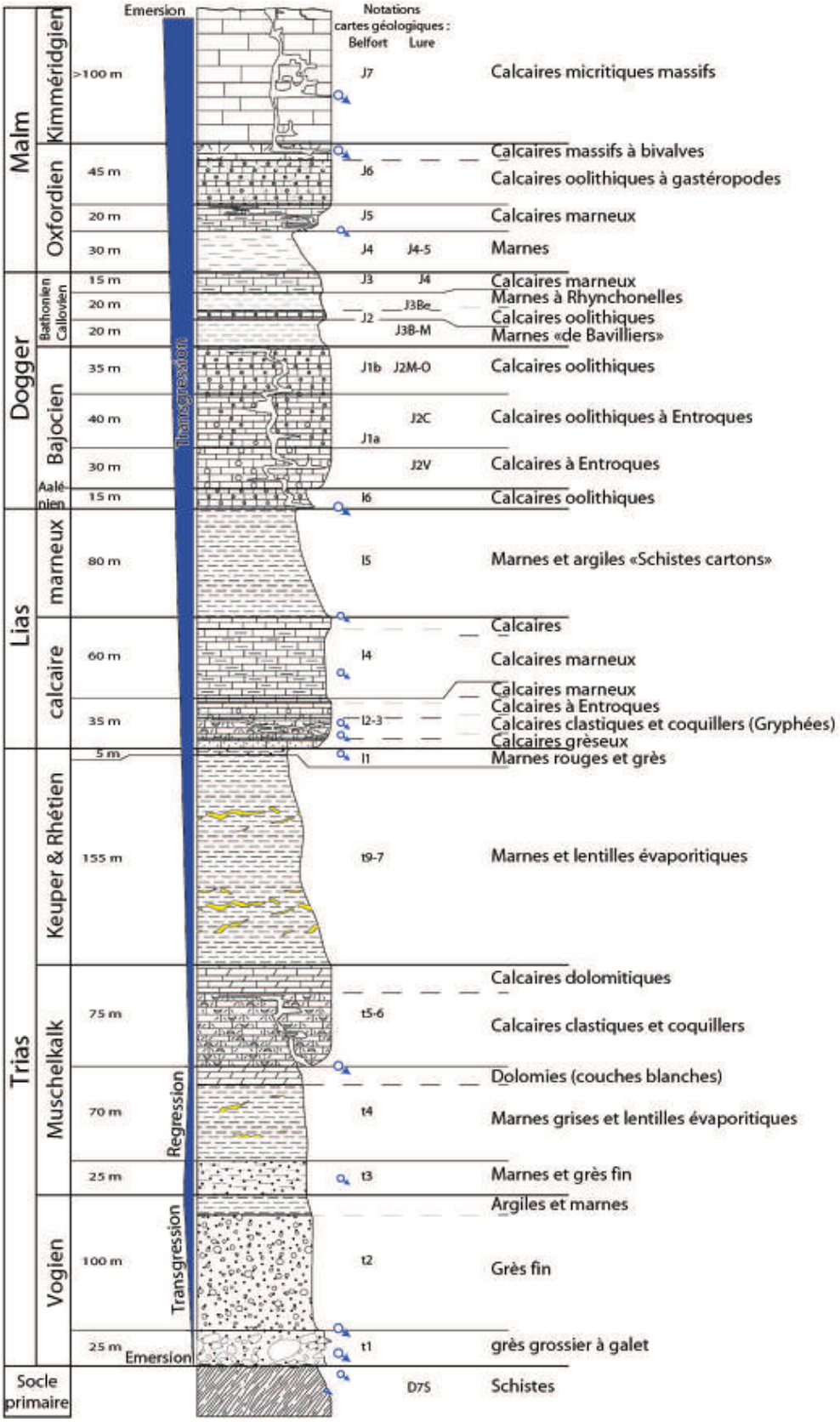


Illustration 5 : Log sédimentaire des formations mésozoïques affleurantes sur la commune de Belfort (Jurassique et Triasique). Certaines de ces formations sont karstifiées et abritent des réseaux karstiques à l'origine de sources karstiques (calcaires du Kimméridgien, du Bajocien, Lias calcaire et du Muschelkalk). Ces niveaux sont entrecoupés par des formations moins ou non karstifiables (marnes du Lias, marno-calcaires du Dogger, séries détritiques du Trias…).

3.1.2. Formations géologiques présentes sur la commune de Belfort

Seules les formations du Dévonien et du Jurassique sont présentes à l'affleurement sur la commune de Belfort. Elles sont décrites dans le tableau en Illustration 6, notamment d'après les informations décrites dans la carte géologique harmonisée de la région Bourgogne-Franche-Comté. La plaine alluviale étant très fortement urbanisée, les alluvions n'ont pas été rencontrées à l'affleurement lors de cette étude. Les notations sont reprises de la carte géologique vectorisée et harmonisée à l'échelle nationale. Le niveau noté j5c2-j6aM correspond aux étages de l'Oxfordien moyen au Kiméridgien inférieur (d'après la classification nationale). À Belfort, cet étage a été séparé en deux niveaux afin de mieux correspondre au contexte local (d'après la carte géologique imprimée au 1/50000^{e}), j5c2 pour l'Oxfordien moyen (anciennement appelé Argovien et Rauracien) et le j6aM pour le Kiméridgien inférieur (anciennement appelé Séquanien).

Description géologique (carte harmonisée Bourgogne-Franche-Comté)					Sensibilité aux aléas		
Couche géologique	Description	Type lithologique	Formations affleurantes	Carbonaté	Cavité	Glissement	Chute de blocs
D6-7 (Vo) : Dévonien	Schistes et grès du Salbert (Dévonien supérieur)	schiste	Oui	Non	Non	Oui*	Oui
h1-2Q(Vo) : Tournaisien – Viséen	Filons de quartzite	quartzite	Oui	Non	Non	Non	Oui
t3 : Muschelkalk inférieur	Marnes et grès fin	marneux – gréseux	Non	Non	Non	Non (non affleurante)	Non (non affleurante)
t4M : Muschelkalk moyen	Grès anhydritique	grès	Non	Non	Oui	Non (non affleurante)	Non (non affleurante)
t5c : Muschelkalk supérieur	Calcaires et dolomites	calcaire - dolomitique	Non	Oui	Oui	Non (non affleurante)	Non (non affleurante)
t6-7 : Keuper	Marnes bariolées	marneux	Non	Non	Non	Non (non affleurante)	Non (non affleurante)
t7 : Rhétien	Marnes et grès indifférenciés avec lentilles évaporitiques	Marnes/grès	Oui	Non	Oui (++)	Oui	Non
l1-2(Be)(FRC) : Hettangien/Sinémurien	Calcaire ocreux et marnes schistoïdes à micas	marno-calcaire	Oui	Oui	Oui (+)	Oui	Non
l3(FRC) : Sinémurien supérieur - Pliensbachien	Marnes schistoïdes	marneux	Oui	Non	Oui (++)	Oui	Non
l4(FRC) : Toarcien	Marnes grasses et schistes	marneux	Oui	Non	Oui (++)	Oui	Non
l4b-c(FRC) : Toarcien moyen et supérieur	Marnes micacées à nodules calcaires	marneux	Oui	Oui	Oui (++)	Oui	Non

Description géologique (carte harmonisée Bourgogne-Franche-Comté)					Sensibilité aux aléas		
j1 (FRC) : Toarcien supérieur - Aalénien	Calcaires en plaquettes centimétriques, oolithique et ferrugineux	calcaire	Oui	Oui	Oui (++)	Oui*	Oui
j2E (FRC) : Bajocien inférieur	Calcaires bioclastiques et/ou entroques	calcaire	Oui	Oui	Oui (++)	Oui*	Oui
j2POE(FRC) : Bajocien moyen	Calcaires bioclastiques et/ou entroques	calcaire	Oui	Oui	Oui (++)	Oui*	Oui
j2OM(FRC) : Bajocien supérieur	Calcaire oolitique en bancs irréguliers décimétriques	calcaire	Oui	Oui	Oui (++)	Oui*	Oui
j3(FRC) : Bathonien inférieur	Marnes à Rhynchonelles formant des dépressions topographiques	marneux	Oui	Non	Oui (+)	Oui	Non
j3aMC(FRC) : Bathonien inférieur	Alternance de marnes et de fins niveaux calcaires (Marnes de Bavilliers)	marno-calcaire	Oui	Oui	Oui (+)	Oui	Non
j4DN(FRC) : Callovien	Calcaires oolithiques ferrugineux peu épais à débit centimétrique (Dalle nacrée)	calcaro-marneux	Oui	Oui	Oui (+)	Oui*	Non
j4-5O(FRC) : Oxfordien inférieur	Marnes	marneux	Oui	Non	Oui (+)	Oui	Non
j5c2 (FRC) : Oxfordien moyen - supérieur	Ensemble de calcaires souvent compacts et de marnes	calcaire	Oui	Oui	Oui (++)	Oui*	Oui
j5CC(FRC) : Oxfordien supérieur	Calcaires compacts, blancs crayeux surmontant des calcaires oolithiques	calcaire	Oui	Oui	Oui (++)	Oui*	Oui

Description géologique (carte harmonisée Bourgogne-Franche-Comté)					Sensibilité aux aléas		
J6aM (FRC) : Kiméridgien inférieur	Calcaire blanc micritique compact	calcaire	Oui	Oui	Oui	Oui*	Non
LP(Rh) Mindel - Riss	Limons des plateaux, loess, lehms	limon	Oui	Non	Oui (si recouvrant substratum karstifiable)	oui	Non
Fx(Vo) Riss	Alluvions anciennes d'origine vosgienne	alluvions	Oui	Non		oui	Non
Fz Holocène - Actuel	Alluvions fluviatiles actuelles et récentes	alluvions	Oui	Non		non	Non
E Quaternaire - Actuel	Dépôts de pente / Éboulis calcaires	éboulis	Oui	Oui		oui	Non

Illustration 6 : Tableau récapitulatif des formations géologiques rencontrées sur la commune de Belfort – oui (colonne glissement) correspond aux formations à dominante rocheuse considérées néanmoins comme potentiellement source de glissements de terrain en raison de présence possible (et non forcément détectable) d'horizon altéré meuble en surface.*

3.1.3. Contexte morphologique général

La ville de Belfort est localisée dans la sus nommée trouée de Belfort, seuil topographique d'une vingtaine de kilomètres entre les massifs montagneux des Vosges et du Jura où les réseaux de communication se sont historiquement développés.

Le territoire communal présente un relief contrasté avec des altitudes variant de 350 à 650 m et des pentes de 0 à 37° d'après le MNT 25m de la BDalti de l'IGN (Illustration 7).

La ville de Belfort prend place dans une plaine alluviale traversée par la rivière de la Savoureuse entourée de reliefs plus ou moins marqués :

- au nord-est, le massif du Salbert constitué de schiste du dévonien avec des intrusions de filons de quartzite ;
- à l'ouest au niveau du massif du Mont et à l'est au niveau des forts (Perches, Citadelle et de la Justice), secteurs qui ressortent à la faveur des formations marno-calcaires du Jurassique. La morphologie de ces versants est significativement impactée par la mise en place des fortifications (déblais en versant, corniche rocheuse taillée, fosse, merlon…).

L'urbanisation est principalement localisée sur la plaine alluviale et en pied de versant des reliefs qui sont généralement peu occupés et en grande partie recouverts par des zones naturelles et où des corniches rocheuses peuvent être présentes, principalement en tête de versant.

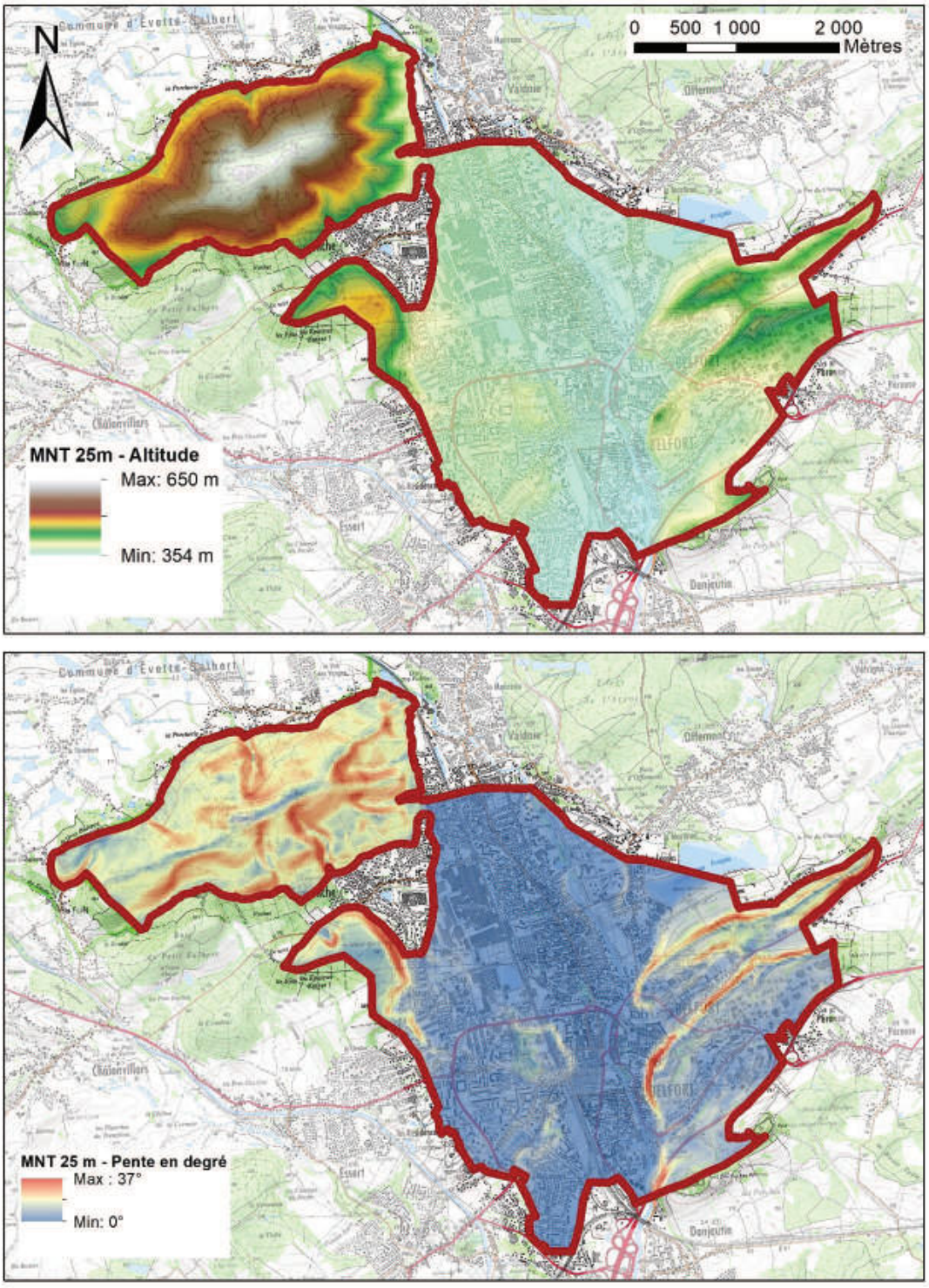


Illustration 7 : Altitude et pente sur le territoire de la ville de Belfort d'après le MNT 25 m de la BDalti de l'IGN.

4. Aléa « Effondrements/affaissements lié au karst »

L'aléa effondrement/affaissement considéré est uniquement lié à la présence de cavités naturelles. Pour mémoire, la présence de cavités anthropiques (ouvrages civils ou militaires) peut également engendrer des désordres en surface de type effondrement/affaissement. L'aléa associé à de tels cavités anthropiques n'est ici pas étudié.

Les cavités naturelles affectant les formations présentes (cf. Illustration 8) sont :

- celles liées au karst des calcaires, dolomites et marnes du Trias et du Jurassique ;
- et celles liées à la dissolution des gypses présents en niveaux lenticulaires dans les formations des grès coquillers, marneux et anhydritique du Trias (Muschelkalk).

La karstification est un processus de dissolution qui affecte les roches carbonatées (calcaires, dolomies, craies…) et les roches solubles comme les évaporites (gypse, anhydrite, etc.). Il s'agit d'un ensemble de processus évolutifs complexes, associant des altérations physico-chimiques et mécaniques, qui élargissent les vides initiaux de la roche encaissante et établit progressivement un réseau de galeries organisé le long de chemins préférentiels d'écoulement (discontinuités géologiques). Ces processus s'effectuent sur le temps long géologique (plusieurs dizaines à centaines de milliers d'années).

Les vides naturels karstiques ainsi constitués représentent un point de faiblesse mécanique des terrains. Ces vides peuvent se manifester :

- soit en surface (dolines, pertes, émergences, inversacs, gouffres, avens, puits, grottes, etc.) ;
- soit dans les matériaux de couverture (dans le cas de leur soutirage) ;
- soit sous le toit du calcaire (cavité, conduit, galerie).

La présence de ces vides peut conduire à des ruptures suivant différents processus possibles dont notamment :

- rupture du toit calcaire au droit de la cavité ;
- soutirage des matériaux de recouvrement vers les vides présents en profondeur ;
- débourrage de conduits colmatés.

Ces ruptures profondes ou en surface peuvent engendrer des désordres en surface :

- effondrements : apparition en surface d'un vide localisé (fontis) ;
- ou affaissements : déformation en surface de type tassement ou cuvette.

Les vides liés aux dissolutions de gypse (roche soluble de la classe des évaporites) engendrent potentiellement les mêmes conséquences que les vides des karsts carbonatés. Il convient néanmoins de mentionner que les notions de « réseaux » sont moins caractéristiques et que surtout l'évolution des dissolutions peut s'opérer très rapidement (à l'échelle humaine) contrairement aux phénomènes lents dans les carbonates.

4.1. MÉTHODOLOGIE

4.1.1. Méthodologie globale

L'aléa est classiquement défini par le croisement de la probabilité d'occurrence et de l'intensité (cf. guide MEDDE, 2012). Il n'existe actuellement pas de méthode établie pour cartographier la probabilité d'occurrence de mouvements de terrain d'origine karstique. Une telle méthode est toutefois en cours d'élaboration par le BRGM et le CEREMA et à la demande du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (Direction Générale de la Prévention des Risques). Cette méthode privilégie une approche multicritère car cela permet non seulement de s'affranchir d'un inventaire exhaustif ou représentatif des désordres (souvent inexistant ou alors comportant des lacunes), mais aussi de viser une certaine prédictibilité et enfin d'offrir une robustesse permettant de préciser ou de compléter l'évaluation suivant les besoins et les possibilités (avec par exemple l'apport de nouvelles connaissances). Les désordres connus servent à la fois d'alerte sur un territoire et de calage de la méthode.

La notion d'aléa de référence est définie comme le plus fort événement historique connu sur le secteur d'étude (ou dans les environs proches) sur une période donnée ou l'événement de grande ampleur le plus vraisemblable. La période de récurrence de 100 ans souvent retenue pour les études PPR est liée aux inondations. Elle est plus difficilement applicable pour les mouvements de terrain, ceux-ci étant généralement moins bien enregistrés dans la mémoire humaine (archives, témoignages).

4.1.2. Précisions sur la méthodologie utilisée pour la présente étude

La méthodologie utilisée ici est celle en cours d'élaboration par le BRGM et le CEREMA (Perrin *et al*., 2013, 2014a, 2014b, 2016 et Noury *et al*., 2018) et qui devrait donner lieu à un guide méthodologique à usage national en 2020.

Cette méthodologie consiste tout d'abord à caractériser la zone d'étude (ici, la commune de Belfort) suivant une série de critères influant l'apparition de désordres d'origine karstique. Ces critères sont listés et analysés au § 4.2.2

Typologie des phénomènes

Les processus de déstabilisation pouvant exister sur la zone d'étude sont ensuite retenus. Il existe en effet plusieurs processus à l'origine de mouvements de terrain en domaine karstique. Dans les milieux carbonatés, on en retient cinq qui sont 1) le soutirage, 2) le débourrage, 3) la rupture mécanique du toit, 4) l'extrusion et 5) la consolidation différentielle ou l'hydrocompaction (Illustration 8).

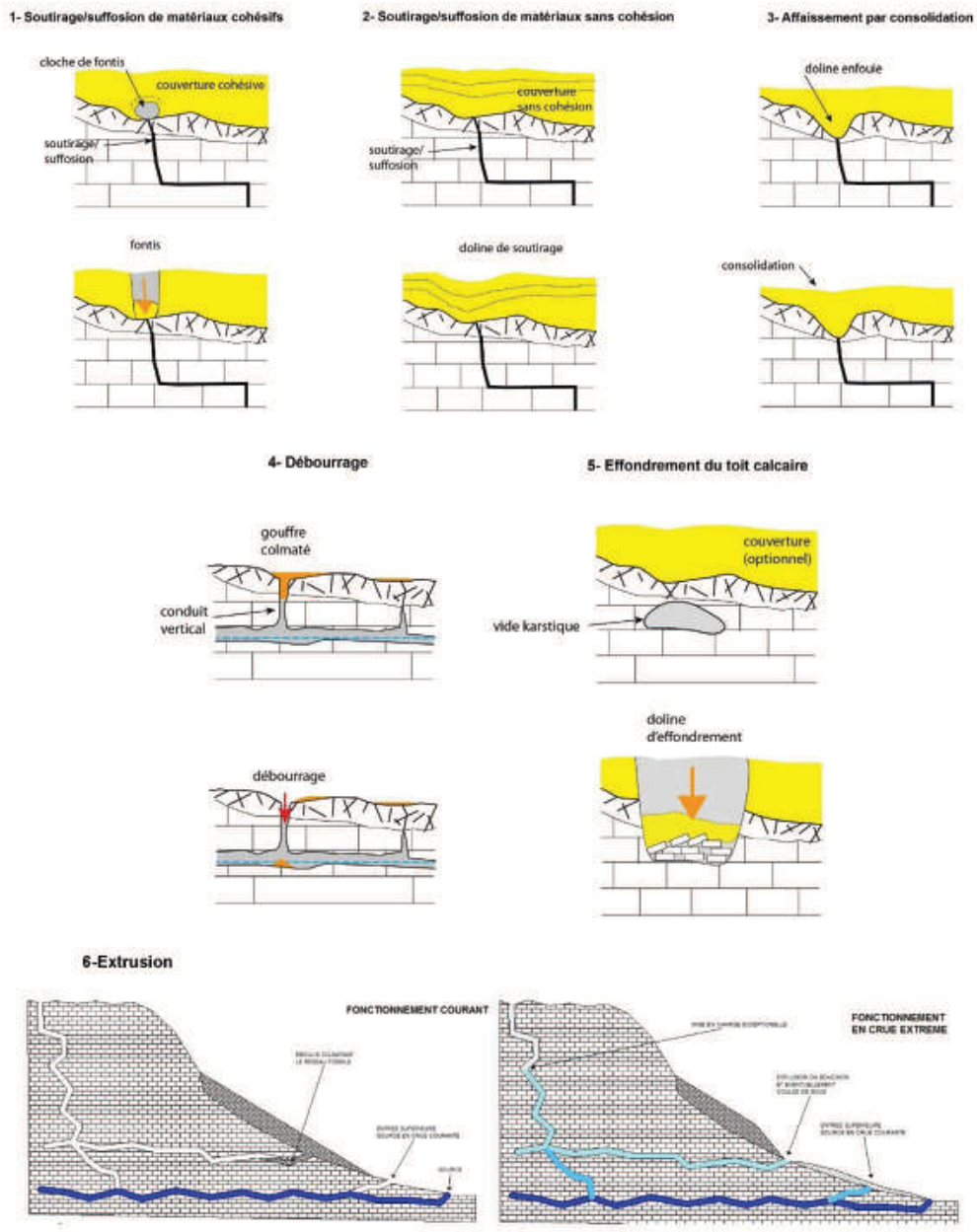


Illustration 8 : Typologie des différents types de désordres se développant en contexte calcaire. Le débourrage et l'effondrement du toit calcaire peuvent se produire avec ou sans couverture.

Pour ce qui concerne le secteur d'étude :

- il n'est très vraisemblablement pas concerné par l'extrusion qui est un processus actif uniquement dans des secteurs à topographie marquée ;
- la consolidation différentielle est un processus de faible intensité. Il est en général considéré comme un aléa très faible, diffus sur l'ensemble des contextes de karst couvert ou sous couverture. Il ne peut être caractérisé que par des études géotechniques détaillées ;
- la rupture mécanique du toit d'une cavité nécessite de connaitre précisément plusieurs paramètres : la configuration souterraine du vide (localisation, géométrie du vide, épaisseur de matériaux rocheux, etc.) et sa résistance mécanique à court et long terme. A ce jour et à notre connaissance :

- les seules explorations spéléologiques disponibles concernent la grotte de Cravanche. Cette dernière a fait l'objet d'un diagnostic spécifique (SOCOTEC, 2019). La présente étude n'a pas pour objet de réviser ce diagnostic,
- les observations de vide en forage sont rares (sondages sur les berges de la Savoureuse : sondages SP4 et SC1 de Hydrogéotechnique, 2016 + sondage SP5-1 de Althéa Ingénierie, 2018 + inspection FloDim, 2018). Elles n'ont pas mis en évidence de grand volume de vide.

Sans autre information, l'aléa lié à la rupture mécanique du toit ne peut pas être caractérisé de manière rigoureuse sur l'ensemble de la commune. Vu l'apparente rareté de grandes cavités, cet aléa est ici considéré comme nul, à l'exception notable de la grotte de Cravanche. Pour cette dernière, nous renvoyons le lecteur au diagnostic précité ;

- le débourrage ne peut pas non plus être caractérisé de manière rigoureuse sur l'ensemble de la commune. Il faut en effet pour cela connaitre la configuration des conduits colmatés existant dans les systèmes karstiques, ce qui n'est pas le cas ici. Les rares observations disponibles permettent en l'état de considérer cet aléa comme nul sur l'ensemble de la commune.

À ces égards, dans le cadre de cette étude, **seul le processus de soutirage est considéré**. En l'état actuel des connaissances, il n'est en revanche pas possible de lui associé l'un et/ou l'autre des types de mouvements possibles (affaissement / effondrement). Ces deux types de mouvements sont ainsi considérés comme possibles : l'aléa évalué est un aléa effondrement/affaissement. Il est évalué sur l'ensemble de la commune.

Pour mémoire, le diagnostic de la grotte de Cravanche est également rappelé.

Caractérisation de l'aléa

L'étape suivante, consiste à déterminer la probabilité d'occurrence d'un mouvement de terrain d'origine karstique. Cela se fait en déclinant la caractérisation de la zone d'étude, pour le processus retenu, en termes de notes : une note est donnée à chacun des critères. Le choix de ces notes est fait à dire d'expert et suivant l'expérience du BRGM. Une note finale est obtenue par combinaison des notes unitaires. Cette dernière note reflète la probabilité d'occurrence d'un mouvement de terrain d'origine karstique.

Le même cheminement peut être mené pour l'intensité du phénomène attendu, mais ici, pour des raisons développées au § 4.2.2 (en particulier les nombreuses incertitudes existantes), une réflexion plus simple, basée sur l'historique des mouvements connus dans le secteur a été réalisée.

La combinaison de la probabilité d'occurrence et de l'intensité permet enfin d'aboutir à l'aléa « mouvement de terrain d'origine karstique ».

4.2. RÉSULTATS DES ANALYSES ET CARTOGRAPHIE

4.2.1. Analyse bibliographique

Concernant les cavités

Les informations disponibles sur les cavités existant sur la commune de Belfort sont celles issues de la BD Cavités complétées par d'autres sources spécifiques (Illustration 9) :

- sur la commune de Belfort, sept cavités sont référencées (cinq ouvrages militaires et deux cavités naturelles) :
    - les ouvrages militaires n'intéressent pas l'aléa mouvement de terrain lié au karst,
    - le site de la « diaclase du chemin de la justice » a fait l'objet d'une visite de terrain qui a observé une faille mais pas de diaclase ni de figure karstique,
    - la grotte de Cravanche ;
- sur les communes limitrophes, les autres cavités naturelles connues sont au nombre de sept. Elles concernent les communes de Cravanche (3 cavités), Essert (2 cavités) et Bavilliers (2 cavités). Elles se trouvent toutes à l'Est de Belfort.

Trois des cavités naturelles donnent accès à un réseau souterrain et ont été explorées par des spéléologues (grottes de Cravanche, de la Glacière, du Puits). Le « trou la Dame » est une perte dans le lit de la rivière « La Douce » sur la commune de Bavilliers. Seule la grotte de Cravanche a, à notre connaissance, fait l'objet d'une étude détaillée, en particulier pour ce qui concerne sa stabilité (SOCOTEC, 2019).

Commune	Identifiant	Nom	Type	Sources d'informations complémentaires	Développement (en m)	Dénivelé (en m)
Belfort	FRCAA0000884	Fort de la Miotte	ouvrage militaire			
Belfort	FRCAA0000881	fort des haute Perches	ouvrage militaire			
Belfort	FRCAA0000843	Fort de la justice	ouvrage militaire			
Belfort	FRCAA0000874	Fort, citadelle le Lyon	ouvrage militaire			
Belfort	FRCAA0000840	diaclase du chemin de la justice	naturelle			
Belfort	FRCAA0000882	quartier Hatry fort des Barres	ouvrage militaire			
Belfort	FRCAA0000828	grotte de Cravanche	naturelle	https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_cavit%C3%A9s_naturelles_les_plus_longues_du_Territoire_de_Belfort http://www.speleo-mandeure.fr/spip.php?article506 https://www.lieux-insolites.fr/belfort/cravanche/cravanche.htm http://www.mairie-de-cravanche.fr/les-grottes-de-cravanche/	290	11
Cravanche	FRCAA0000831	Grotte de la glacière	naturelle		160	21
Cravanche	FRCAA0000829	grotte du puits	naturelle		135	18
Cravanche	FRCAA0000830	Puits de la grande carrière	naturelle			
Cravanche	FRCAA0000832	Fort du Salbert	ouvrage militaire			
Essert	FRCAA0000823	Doline	naturelle			
Essert	FRCAA0000839	puits de l'école	naturelle			
Bavilliers	FRCAA0000825	Résurgence	naturelle			
Bavilliers	FRCAA0000824	Trou la Dame	naturelle	http://patrimoine90.fr/Bavilliers.html http://www.douce-savoureuse.com/riv-douc.html		

Illustration 9 : Liste des cavités figurant à la BD Cavités sur les communes de Belfort, Cravanche et Essert.Plusieurs opérations de sondages/forages ont également détecté des cavités dans les terrains traversés :

- il s'agit de cavités vides pour deux sites :
  - le diagnostic géotechnique (Hydrogéotechnique, 2018) réalisé au niveau du cimetière de Bellevue indique des vides dans les argiles (alluviales ?) recouvrant le calcaire. Nous interprétons ces vides comme le résultat d'un soutirage de la couverture par le karst sous-jacent (voir aussi paragraphe suivant traitant les mouvements),
  - sur les berges de la Savoureuse au niveau du quai Vauban (Hydrogéotechnique, 2015 et 2016, Athéa 2018 – sondages SP5-1 et SP6-1). Un des sondages ayant rencontré du vide a donné lieu à une inspection vidéo et sonar (Flodim, 2018) qui a visualisé un vide (mesure : hauteur = 1 m ; extension horizontale = 0.25m), situé dans le calcaire, entre 12.8 et 13.8 m de profondeur ;
- il s'agit enfin de cavités ou de fractures colmatées pour les études géotechniques suivantes :
  - 1993, Hydrogéotechnique, groupe scolaire Martin Luther King,
  - 1994, Hydrogéotechnique, rue de Stockholm – projet « centre Léon Blum »,
  - 2003, Hydrogéotechnique, projet « école Pergaud – résidences Ouest »,
  - 2017, Hydrogéotechnique, nouvel équipement nautique du quartier Résidences.
  - 2018, Hydrogéotechnique, rues Zaparojie et Bastier – projet « centre culturel »,
  - 2018, Althea, berges de la Savoureuse – sondages SP4-1 et SP6-1.

Concernant les mouvements de terrain a priori liés à des cavités

La commune de Belfort a été marquée par quelques mouvements de terrain a priori attribuables au karst. Jusqu'à présent, aucun de ces mouvements n'était référencé dans la BD Mouvements de terrain. Les informations collectées pour la présente étude auprès de la mairie et sur Internet ont permis d'en recenser sept sur la commune (Illustration 10 et Illustration 11) :

- aucune information n'est disponible pour celui situé au 22 rue du Capitaine de Lalaurancie ;
- celui situé au 13 rue des Perches est vraisemblablement lié à un défaut d'ouvrage plutôt qu'à une origine karstique. Sans diagnostic spécifique, il est toutefois conservé dans la liste de mouvements pouvant être associés à des cavités karstiques ;
- pour les autres :
  - deux mouvements sont concomitants à des ruptures de canalisation d'eau (28 avenue du Château d'eau en 2003 puis 2012 ; entre les rues Soufflot et Perrault en 2017), ce qui peut induire des biais d'observations et/ou d'interprétation : 1) bien que probable, la rupture de canalisation peut avoir une autre origine qu'un mouvement karstique, 2) les arrivées massives d'eau suite aux fuites ont certainement contribué à agrandir les dimensions initiales des effondrements,
  - les trois autres mouvements semblent davantage imputables à des cavités :
    - croisement rue Verlaine et av. Gal Leclerc (27 avril 2010) ;
    - angle Sud-Ouest du cimetière de Bellevue (avant 2013, 2013 et 2018) ;
    - 2 rue du Luxembourg (en 2016).

En l'état actuel des connaissances, l'effondrement ayant eu lieu au 2, rue du Luxembourg, est le plus grand connu sur la commune (diamètre 7 m, profondeur 5.5 m). Il est à ce titre à considérer comme l'aléa de référence.

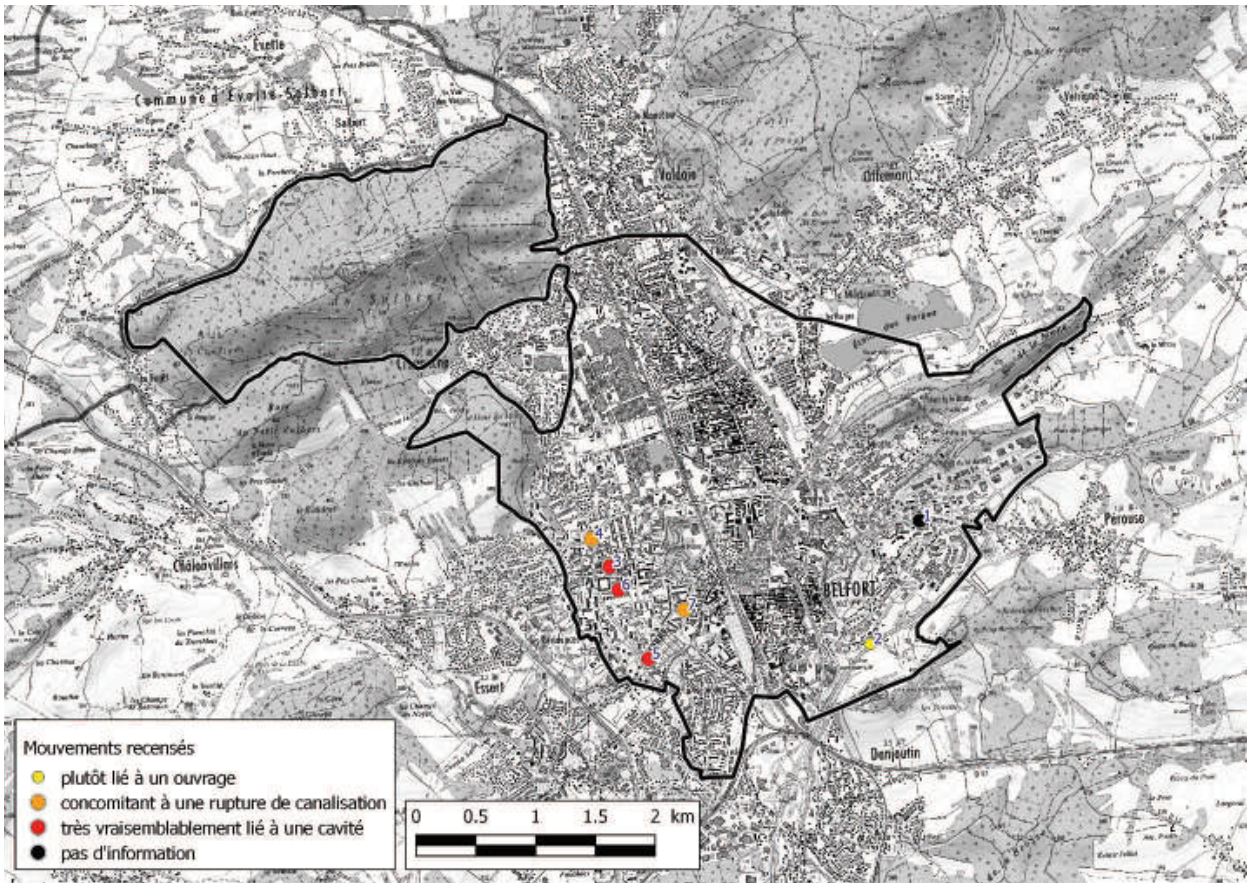


Illustration 10 : Carte des mouvements attribuables à des cavités retenus pour la présente étude.

	Adresse	X	Y	Nature mouvement	Diamètre (m)	Profondeur (m)	Date mouvement	Sources
1	22 av. du Cptne de Lalaurencie	990821	6733639	Inconnu	inconnu	inconnu	inconnue	mail commune Belfort
2	13 rue des Perches	990409	6732608	Plutôt lié à un ouvrage	-	-	17/05/2008	1 article Est Républicain
3	croisement rue Verlaine et av. Gal Leclerc	988228	6733254	Effondrement	1	2	27/04/2010	1 article Est Républicain
4	28 av. du Château d'Eau	988077	6733486	Associé à une rupture de canalisation, suite à un 1er mouvement en 2003	inconnu	inconnu	2003, puis 23/09/2012	1 article L'Alsace
5	angle Sud-Ouest du cimetière de Bellevue	988555	6732485	Effondrements et affaissements	3	2	avant 2013, 2013, 2018	diagnostic Hydrogéotechnique
6	2 rue du Luxembourg	988304	6733060	Effondrement	7	5.5	avant le 24/06/2016	2 articles Est Républicain, diagnostic Hydrogéotechnique, rapport activité Com Com
7	entre les rues Soufflot et Perrault	988853	6732894	Associé à une rupture de canalisation	inconnu	inconnu	03/01/2017	1 article Est Républicain

Illustration 11 : Liste des mouvements attribuables à des cavités retenus pour la présente étude.

Concernant l'atlas départemental du CEREMA (2012) traitant de l'aléa affaissement/effondrement

Dans son « atlas mouvements de terrains – Territoire de Belfort » (2012), le CEREMA traite l'aléa affaissement et effondrement associé aux cavités naturelles :

- la méthode est décrite en pages 25 et 26.

  Elle se base sur les éléments ponctuels recensés :

  - analyse faite des points ressortant sur la carte d'aléa au niveau de la commune de Belfort, la majorité de ces éléments ponctuels sont ceux de la BD cavités (voir plus haut),
  - seul un élément, situé au sud de la commune, n'existe pas dans la BD Cavités. Le rapport du CEREMA ne fournit pas d'autres informations à son sujet. Il s'agit visiblement d'un élément d'une base de données interne au CEREMA (base de données « dolines »). Même si les autres éléments disponibles (carte IGN, MNT) indiquent une zone plus basse à cet endroit, il semble qu'il s'agit davantage d'une reculée ponctuelle du coteau que d'une véritable doline. La zone n'apparait en tout cas pas particulièrement instable. Elle n'est par conséquent pas retenue pour la présente étude.

  À partir de ces éléments ponctuels, le CEREMA calcule ensuite une densité d'élément :

  - pour « *2 à 3 points* » [l'unité de surface n'est pas indiquée], la densité est considérée comme faible,
  - pour « *4 points et plus* », la densité est considérée comme moyenne.

  Les contours obtenus sont ensuite « *redéfinis manuellement en incorporant la lecture d'indices topographiques tel que les lignes de niveaux* […] » ;
- la carte finale présente un « aléa effondrement/affaissement » (Illustration 12) avec :
  - les éléments ponctuels recensés,
  - la densité des indices.

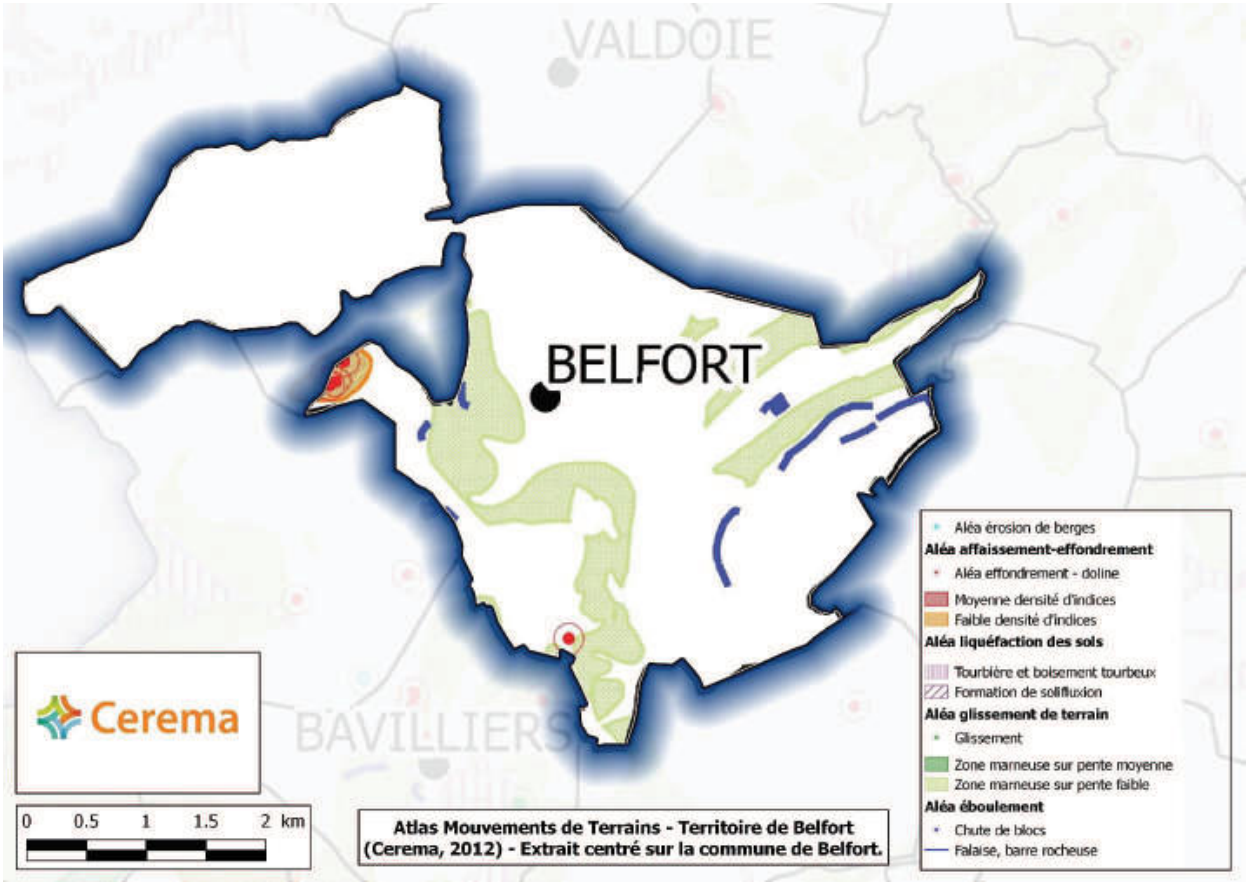


Illustration 12 : Extrait de l'atlas CEREMA « mouvements de terrain » (2012).

Analyse faite de cette étude CEREMA, la carte « aléa affaissement/effondrement » présentée consiste davantage en un état des lieux approfondi qu'en une véritable carte d'aléa. Le présent travail prend bien sûr en compte cette étude CEREMA. Elle évalue l'aléa suivant une autre méthode plus détaillée et plus adaptée à l'échelle du site ici étudié (voir paragraphes suivants).

Synthèse de l'analyse bibliographique

Les documents présentés ci-dessus confirment la présence de vides karstiques dans les calcaires du secteur d'étude (grottes et réseaux souterrains, vides en sondages).

Sur la période de 10 ans précédant la présente étude, de 3 à 7 mouvements de terrains seraient imputables à cette configuration.

D'après les documents en notre possession, le plus grand désordre connu date de 2016 et se situe au niveau du 2, rue du Luxembourg. Ses dimensions sont : diamètre = 7 m ; profondeur = 5.5 m. En considérant que la grotte de Cravanche ne risque pas de s'effondrer (suivant SOCOTEC, 2019), cet effondrement du 2, rue du Luxembourg, peut actuellement être qualifié d'aléa de référence (cf. rappel de la définition au § 4.1.1). Les deux autres mouvements avec des dimensions connus ont des diamètres de 1 et 3 m et des profondeurs de 2 m.

Vis-à-vis de l'étude CEREMA de 2012 (pour rappel : réalisée à l'échelle du département), ces évènements confirment l'intérêt d'une nouvelle évaluation de l'aléa : ils n'ont en effet pas été pris en compte dans cette étude.

4.2.2. Caractérisation de la zone d'étude

L'objectif est de caractériser la zone d'étude suivant plusieurs critères qui permettent ensuite d'évaluer l'aléa à partir de la probabilité d'occurrence des phénomènes de référence déterminés. Cette analyse se déroule en 3 étapes :

- hiérarchisation du potentiel karstique (présence de vides potentiels) au sein des formations du substratum à partir des critères prédéfinis ;
- caractérisation de la couverture quaternaire potentiellement mobilisable ;
- évaluation des facteurs aggravant l'occurrence des phénomènes : facteurs de forçage hydrogéologique et hydrologique.

Hiérarchisation du potentiel karstique

Généralités sur la karstification de la zone d'étude

La zone d'étude est constituée de plusieurs formations karstifiées. Des sources drainent ces formations, dont le fonctionnement typique nous indique le degré de karstification. Sur le territoire de la commune, plusieurs niveaux renferment ce type d'aquifère (Illustration 11):

- les grès coquillers, marneux et anhydritique du Trias (Muschelkalk) renferment une nappe karstique ;
- une nappe karstique est également présente dans les calcaires à Gryphée (Lias inférieur) avec des débits faibles qui se troublent par temps de pluie ;
- les calcaires du Jurassiques moyen sont fortement karstifiés. Le plus important niveau de résurgence de ces réseaux karstiques se situe à la base de l'Aalénien (Dogger), au contact des marnes du Toarcien (Lias supérieur), avec des débits parfois important compte tenu de l'étendue des bassins d'alimentation ;
- les calcaires du Jurassique supérieur sont également fortement karstifiés. Les exsurgences de ces réseaux sont localisées plus au sud, en dehors de la commune de Belfort, où la nappe est captive et protégée sous la série essentiellement marneuse du Tertiaire (Jauffret, 1996).

L'histoire de la karstification du Territoire de Belfort, n'a jamais fait l'objet d'une étude en soit, en revanche, la lecture de l'histoire géologique nous indique plusieurs périodes propices à la formation de karsts. Après le dépôt des formations jurassiques, la région est considérée comme émergée durant le Crétacé. Les éventuels dépôts (s'il y en a eu) sont érodés pendant cette période et les terrains jurassiques potentiellement karstifiés. À noter que dans le Jura les calcaires sont faiblement émergés dans un paysage de plateaux côtiers sous un climat tropical très favorable à la karstification (fortes précipitations et végétation abondante). Puis au Paléogène, se produit un soulèvement provoquant l'apport détritique du sidérolithique et une phase de karstification associée puisqu'on retrouve ces faciès du sidérolithique (argile rouge riche en fer) en surface sur le Jurassique et piégés au sein de poches karstiques. À l'Oligocène, la distension provoquant l'ouverture du fossé Rhénan provoque une intense fracturation de la couverture sédimentaire avec la réactivation d'ancien accident de socle, à l'origine des failles qui traversent la commune de Belfort. Au Miocène, le régime de compression se met en place sous l'action de la poussée alpine ; le sud du fossé Rhénan est émergé et le restera jusqu'à nos jours. La karstification des terrains calcaires jurassiques s'intensifie et s'approfondie sous l'effet de la surrection et de l'inclinaison des terrains (Lauritzen, 1996).

Sur les plateaux et dans les bassins sédimentaires, tel que le secteur de Belfort, l'évolution karstique est principalement guidée par les failles Hercyniennes et Alpines et par l'hydrologie de surface dont le tracé est modifié tout au long du Plio-Quaternaire par le plissement de la chaine du Jura (Giamboni, *et al*. 2004; Ziegler & Fraefel 2009 ; Rabin, 2016).

Le fossé de Dannemarie (secteur de Belfort) est drainé vers le sud-ouest jusqu'au début du Quaternaire (2.6 Ma). La partie Nord et Est de ce fossé sera ensuite capturé par le réseau présent plus au nord, et s'écoulant vers le nord, sous l'effet de la forte subsidence de la partie nord du fossé Rhénan (Giamboni, *et al.* 2004; Ziegler & Fraefel 2009) pour former le Rhin actuel. La ligne de partage des eaux se situe au nord-est et à l'est de Belfort de sorte que seule la partie la plus méridionales de Vosges est drainée par la Savoureuse qui traverse Belfort. Les réseaux karstiques ont probablement continué d'évoluer suite aux derniers épisodes glaciaires du Riss (130 ka) et du Würm (25 – 17 ka) (Campy 1992; Buoncristiani & Campy 2004). En effet, la région de Belfort reste hors glace durant ces épisodes glaciaires (Seret *et al*. 1990; Ehlers & Gibbard 2004), et l'alimentation en eaux froides (fort potentiel de dissolution) associée à l'abaissement des rivières à probablement entrainé un approfondissement des réseaux (Bini et al. 1998; Ziegler et Fraefel 2009).

À la lecture de ces évènements, on peut conclure que les terrains jurassiques et triasiques ont subi plusieurs phases de karstification :

- une première phase majeure crétacée et paléogène dont la nature est de type karstification sous couverture et proche du niveau de base, avec une altération poussée, provoquant l'altération des terrains carbonatées ;
- puis une deuxième phase provoquée par des surrections et des chutes du niveau de base répétées en lien avec les déformations alpines. Cette deuxième phase va permettre de purger et débourrer les anciens karsts précédemment formés, situé au-dessus du nouveau niveau de base ;
- enfin une dernière en lien avec les chutes du niveau de base provoquée par les variations climatique du Quaternaire.

<u>Nature du substratum et identification des formations susceptibles de contenir des vides karstiques</u>

Des formations karstifiables, nous distinguerons par la suite :

- les formations réservoirs potentiellement les plus karstifiables :
  - Trias :
    - les grès anhydritiques du Muschelkalk moyen (lentilles de gypse),
    - les calcaires et dolomites du Muschelkalk supérieur,
    - les marnes rouges du Rhutien ;
  - Jurassique :
    - les calcaires du Lias,
    - les calcaires de l'Aalénien, du Bajocien, de l'Oxfordien moyen (Jurassique moyen et supérieur) ;
- des niveaux les moins karstifiables qui regroupent les formations marneuses (épontes locales et régionales) constitués par :
  - Trias :
    - les marnes du Muschelkalk inférieur (Trias) ;
  - Jurassique :
    - les marnes du Lias (séparant les aquifères du Lias inférieur et du Dogger),
    - les marnes du Bathonien et du Callovien,
    - les marnes de l'Oxfordien (séparant les aquifères du Dogger et du Jurassique supérieur).

Enfin ne seront pas pris en comptes, ni cartographiées, les formations non karstifiables comme :

- les formations du socle paléozoïque et ;
- les formations détritiques du Trias (Buntsandstein, Keuper).

Étant donné les imprécisions de la carte géologique harmonisée, la cartographie de ces formations est basée sur le tracé des cartes géologiques de Lure et de Belfort. La partie centrale de la commune de part et d'autre de la Savoureuse est recouvert par ces alluvions et certaines formations superficielles (éboulis, lœss…).

Les formations carbonatées et anhydritiques potentiellement karstifiables se retrouvent donc cachées sous ces formations, ce qui entrainent la présence d'un risque plus difficile à cibler et à caractériser. Des études géophysiques et quelques forages nous permette de reconnaitre ces formations en profondeur, mais certaines zones de la commune restent non investiguées ou trop peu (Illustration 13). Un écorché anté-formations superficielles a donc été réalisé sur la base des données disponibles (carte géologique et données de forage). La carte de la nature du substratum qui en découle est donc une interprétation (Illustration 14). À défaut d'informations supplémentaires, deux zones constituent des aires d'incertitude majeures.



Illustration 13 : Localisation des deux zones d'incertitude majeures concernant les formations du Jurassique et du Trias sous recouvrement quaternaire (alluvions de la Savoureuse, lœss, éboulis, remblais…). Les points noirs correspondent aux forages atteignant le substratum jurassique ou triasique.

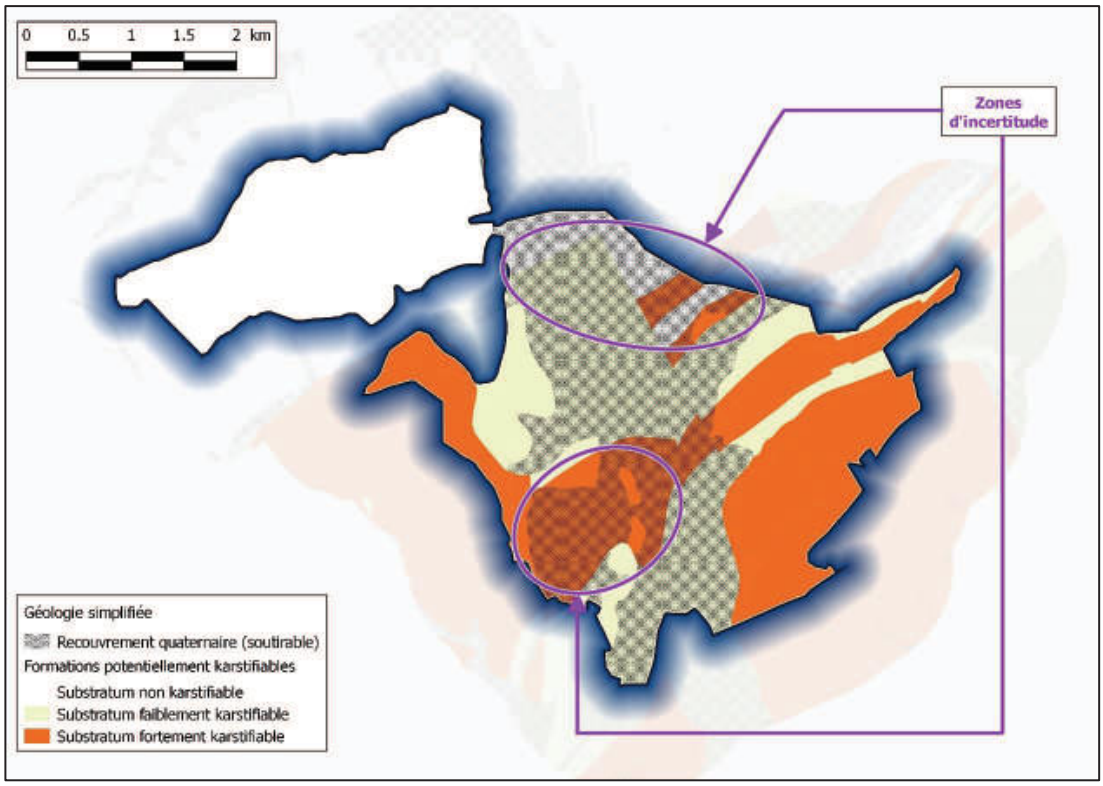


Illustration 14 : Carte interprétative de la nature karstique supposée des formations Jurassique et Triasique sur la commune de Belfort. Le substratum non karstifiable correspond aux formations du socle primaire et aux formations détritiques du Trias. Le recouvrement quaternaire est indiqué à titre de rappel.

Polyphasage de la karstification

Compte tenu des quelques informations sur l'histoire géologique de la karstification du territoire de Belfort, nous avons distingué les formations du Jurassique et du Trias pour ce critère. La karstification issue des phases d'altération ayant régnées au cours du Crétacé et du Tertiaire (avant l'érosion de la vallée de la Savoureuse) nous incite à proposer un indice plus fort pour les formations jurassiques et plus faible pour les formations du Trias.

Colmatage du karst

Ce choix est basé sur la bibliographie, mais cette caractéristique demande une connaissance de terrain et une expertise non mise en œuvre dans le cadre de cette étude. Nous avons fait le choix de considérer les zones karstifiables comme « purgées », avec la présence de vide dans l'ensemble non colmatée. Ce choix est un choix sécuritaire vis-à-vis du soutirage (qui est le processus prépondérant), afin de ne pas négliger cet aspect.

Fracturations

Une zone tampon de 200 m a été retenu de part et d'autre des failles majeures observées et supposées afin de prendre en compte la fonction drainante de ses discontinuités, constituant alors une zone de faiblesse liée à la circulation des eaux souterraines et l'infiltration des eaux de surface.

Épaisseur du toit au-dessus des vides identifiés

Que ce soit au niveau des grottes reconnues (exemple de la grotte de Cravanche), des dégâts provoqués et diagnostiqués en surface, ou des indices de karst en forage, les vides sont tous situés à de faibles profondeur sous la surface ou sous le mur des formations Quaternaire (< 5 mètres). Cette donnée, bien que ponctuelle, joue comme facteur aggravant et a été pris en compte et extrapolé à l'ensemble de la zone.

Caractérisation de la couverture

Nature de la couverture

Les formations de recouvrement (alluvions anciennes et récentes, limons de plateaux, loess, éboulis, remblais) ont toutes été classées comme « non cohésives » à défaut de plus d'informations.

Épaisseur de la couverture

L'épaisseur de la couverture a été considérée :

- « fine » sur les formations sans recouvrement, car il existe toujours au moins un sol (épaisseur a priori de l'ordre de 1 à 2 m), en particulier au sein d'une agglomération ;
- « épaisse » sous les alluvions de la Savoureuse dont les forages qui les traversent donnent une épaisseur comprise entre 5 et 15 mètres.

Caractérisation hydrogéologique et hydrologique

Position de la nappe

La position critique de la nappe vis-à-vis du phénomène de soutirage concerne le cas où le toit de la nappe se trouve à l'interface entre le toit des formations karstifiées et lorsque le niveau de la nappe se trouve au-dessus de cette limite. Le premier cas constitue la situation la plus problématique car le battement provoque un noyage-dénoyage de l'interface fragilisant et sollicitant le mur de la couverture.

Mise en charge

Le processus de mise en charge (montée des eaux parfois importante) se fait à proximité des cours d'eau, des exutoires (sources karstiques) et au sein même des réseaux karstiques. Un facteur aggravant a été ajouté concernant la plaine alluviale de la Savoureuse.

Concentration des eaux de surfaces

Selon si la couverture est drainante ou non, les zones de concentration des eaux de surface sont le siège d'infiltration préférentielle ou au contraire des zones inondables. Dans ces deux cas, le soutirage karstique est favorisé. Ces zones de concentration préférentielle des eaux peuvent avoir plusieurs origines :

- le contact entre des lithologies différentes ;
- le réseau hydrographique pérenne ;
- les points bas pouvant accueillir des flux d'eau temporaires qu'ils soient naturels (vallées sèches) ou artificiels (canaux, tranchées).

Ces zones ont été cartographiées suivant les contours géologiques existants et suivant des tampons d'extension variable :

- 200 m pour le contact entre lithologies différentes et pour le réseau hydrographique pérenne. Cette valeur est issue d'études approfondies sur d'autres secteurs étudiés précédemment par le BRGM (val d'Orléans, un site en Lorraine et un site dans les Landes – cf. Perrin *et al.*, 2014b). Elle a ici été retenue telle qu'elle faute d'une population suffisamment importante de désordres sur la commune de Belfort pour procéder à une étude statistique de répartition ;
- 50 m (concentrations temporaires). Cette valeur est issue d'une analyse de la topographie du site d'étude : elle correspond à la largeur des vallons secs potentiellement inondables, jusqu'à la rupture de pente avec le relief le plus proche.

4.2.3. Détermination de la probabilité d'occurrence

La caractérisation précédemment établie de la zone d'étude est ici déclinée pour le processus déstabilisant ici retenu (le soutirage) : une note est attribuée à chacun des critères selon le tableau suivant.

			Déclinaisons des observations en probabilité			
			~~Rupture mécanique~~	~~Déboursage~~	Soutirage	~~Extrusion~~
Géologie	Substratum (karstifié)	Nature du substratum de la roche carbonatée	autre roche non traitée	marne 1	marno-calcaire 2	calcaire - dolomie 3
		Polyphasage de la karstification	1 seule phase 0	2 phases 1	3 phases 2	4 phases 3
		Colmatage du karst (que ce soit endogène ou exogène)	purgé 2 / pas purgé 1	purgé 0 / pas purgé 2	purgé 2 / pas purgé 1	purgé 2 / pas purgé 1
		Fracturation / Discontinuités	éloigné 0	proche 1		
		Configuration des vides : épaisseur du toit du substratum	fin 1 / épais 0	fin 0 / épais 0	fin 0 / épais 0	fin 0 / épais 0
	Couverture (non karstifié)	Nature de la couverture	Indurée 1	cohésif 2	non cohésif 3	
		Epaisseur de la couverture	épais 1	fin 2		
Hydrodynamisme - Rôle de l'eau	Hydrogéologie	Position habituelle de la nappe karstique	A 1 / B 2 / C 0 / D 0	A 0 / B 1 / C 0 / D 0	A 0 / B 0 / C 2 / D 1	A 0 / B 0 / C 0 / D 0
		Mise en charge du réseau karstique	non 0	oui 1		
	Hydrologie de surface	Concentration d'eaux superficiels par effet topographique	Autre 0	Point bas topographique 1		
		Concentration d'eaux superficiels par différence lithologique	Autre 0	type zone de contact 1		
		Surexposition naturelle	non 0	oui 1		
		Surexposition anthropique	non 0	oui 1		

Illustration 15 : Table d'analyse pour qualifier la probabilité d'occurrence d'un mouvement lié au karst.

Une note globale, correspondant à la probabilité d'occurrence d'un mouvement de terrain d'origine karstique est ensuite calculée. Pour cela, les notes unitaires données pour chacun des critères sont tout d'abord ramenées à une échelle allant de 0 à 1. Elles sont ensuite combinées avec une pondération accentuant le poids de certains critères, ceux jugés comme prépondérants dans l'apparition des effondrements/affaissements (suivant les études menées par le BRGM et le CEREMA) :

- la présence d'une couverture (critères « Nature de la couverture » et « Épaisseur de la couverture »). Ces critères sont pondérés par un facteur 4. Il est à noter qu'il est considéré que le karst nu sensu stricto (roche affleurante) n'est pas représenté sur la commune et que partout on peut considérer la présence d'une couverture au sens large : dépôt géologique (sous couverture relativement épaisse) ou frange d'altération / sol (sous faible couverture) ;
- la concentration d'eau superficielle par effet lithologique. Critère pondéré par un facteur 3 ;
- la position de la nappe, la concentration d'eau par effet topographique et anthropique. Critères pondérés par un facteur 2 ;
- les autres critères sont pondérés par un facteur 1 (Nature du substratum, polyphasage de la karstification, colmatage du karst, fracturation, mise en charge du réseau karstique).

Ce calcul[2] aboutit à une note globale allant en théorie de 4,2 à 21. Cette note est ensuite ramenée à une note finale s'établissant sur un intervalle allant de 0,04 à 1 (en réalisant le calcul suivant : Note finale = (Note globale - 3,5) / (21 - 3,5). La note 0 est celle des secteurs non karstifiés, identifiés dès la caractérisation de la nature du substratum.

Pour le secteur d'étude, la note finale s'établit donc entre 0 et 0,77 (Illustration 16) pour un maximum possible pouvant en théorie être de 1 (mais qui n'est pas obtenu ici étant donné la configuration de la zone).

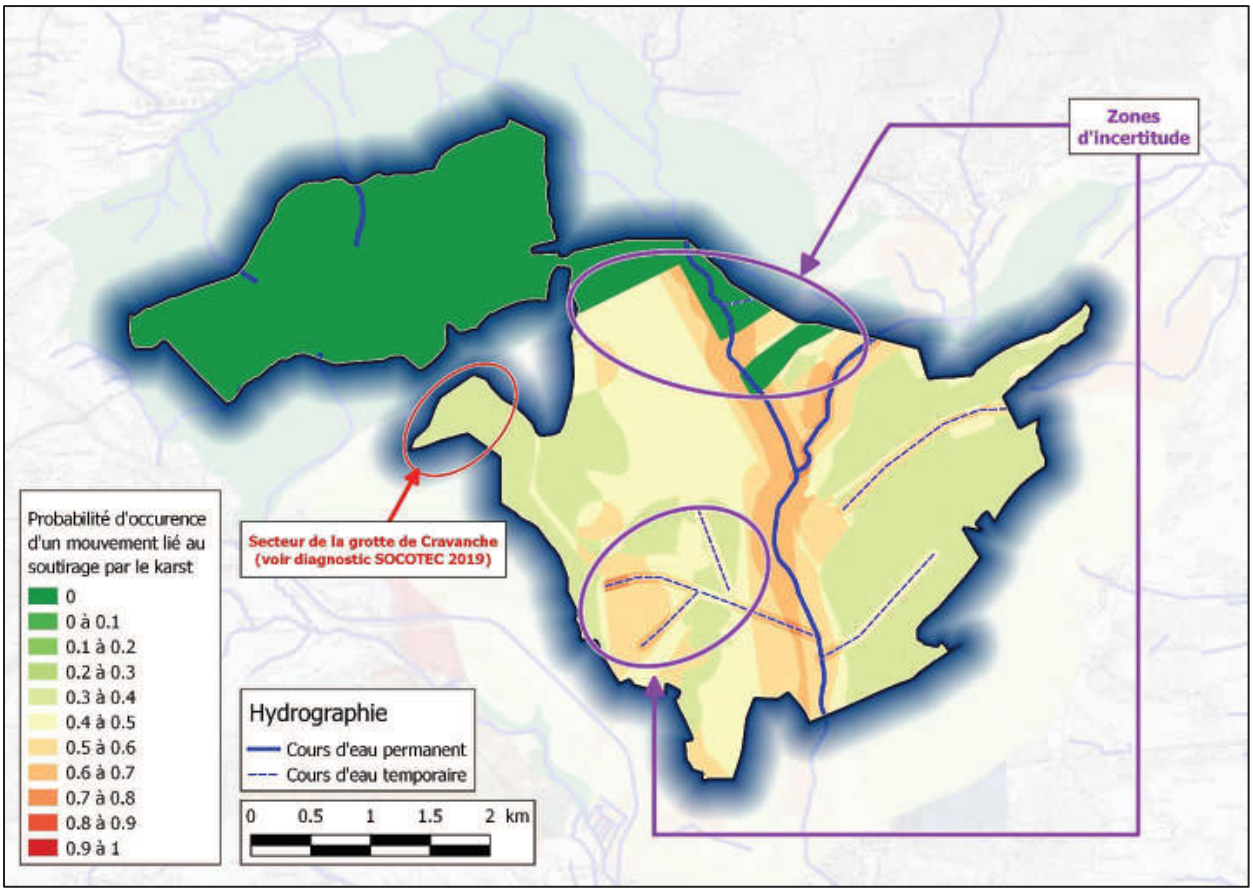


Illustration 16 : Carte de probabilité d'occurrence de mouvements de terrain liés au soutirage par le karst.

Suivant cette analyse, les mouvements de terrain liés à un soutirage karstique sont davantage probables dans les zones karstifiées, sous une couverture relativement épaisse et soumise à des sollicitations hydriques (rivières, plaine alluviale, vallons secs, etc.). À l'inverse, les zones karstifiées, avec une couverture peu épaisse et relativement « sèches» apparaissent peu sensibles à ce phénomène. Les zones non karstifiées sont affectées d'une probabilité nulle.

4.2.4. Détermination de l'intensité

Un cheminement similaire à celui fait pour la détermination de la probabilité pourrait être effectué pour déterminer l'intensité des désordres attendus en surface. Toutefois, vu les nombreuses

[2] Dans le détail, le calcul de cette note globale est le suivant :
4* [NatureCouverture/3 + EpaisseurCouverture/2]
+ 3* [SI(ConcentrationLithologique=oui,1,0)]
+ 2* [SI(PositionNappe=C,2,SI(PositionNappe=D,1,0)/2 + SI(ConcentrationTopographique=Eau,1,0) + ConcentrationNaturelle&Anthropique]
+ 1* [NatureDuSubstratum/3 + PolyphasageKarstification/3 + SI(Colmatage=purgé,2,1)/2 + Fracturation]

incertitudes existant ici, en particulier pour ce qui concerne les épaisseurs des couvertures, cette approche n'a pas été retenue ici.

L'intensité a été déterminée de manière plus arbitraire que pour la probabilité, à savoir à dire d'expert, selon l'expérience du BRGM et les connaissances acquises lors de l'analyse bibliographique (Illustration 17) :

- les zones karstifiées sous une couverture relativement épaisse ont été affectées d'une intensité « modérée ». Cette intensité correspond à des effondrements dont les diamètres vont de 3 à 10 m. Vu les connaissances actuelles sur l'épaisseur et la nature des matériaux de couverture présents sur le secteur d'étude, ces dimensions sont possibles. Le désordre le plus grand connu à ce jour, celui de 2016 au niveau du 2, rue du Luxembourg s'inscrit dans cette classe (son diamètre était de 7 m) ;
- les zones karstifiées sous faible couverture ont été affectées d'une intensité « limitée », c'est-à-dire avec des diamètres d'effondrement inférieurs à 3 m ;
- aucun secteur n'a été affecté d'une intensité élevée.

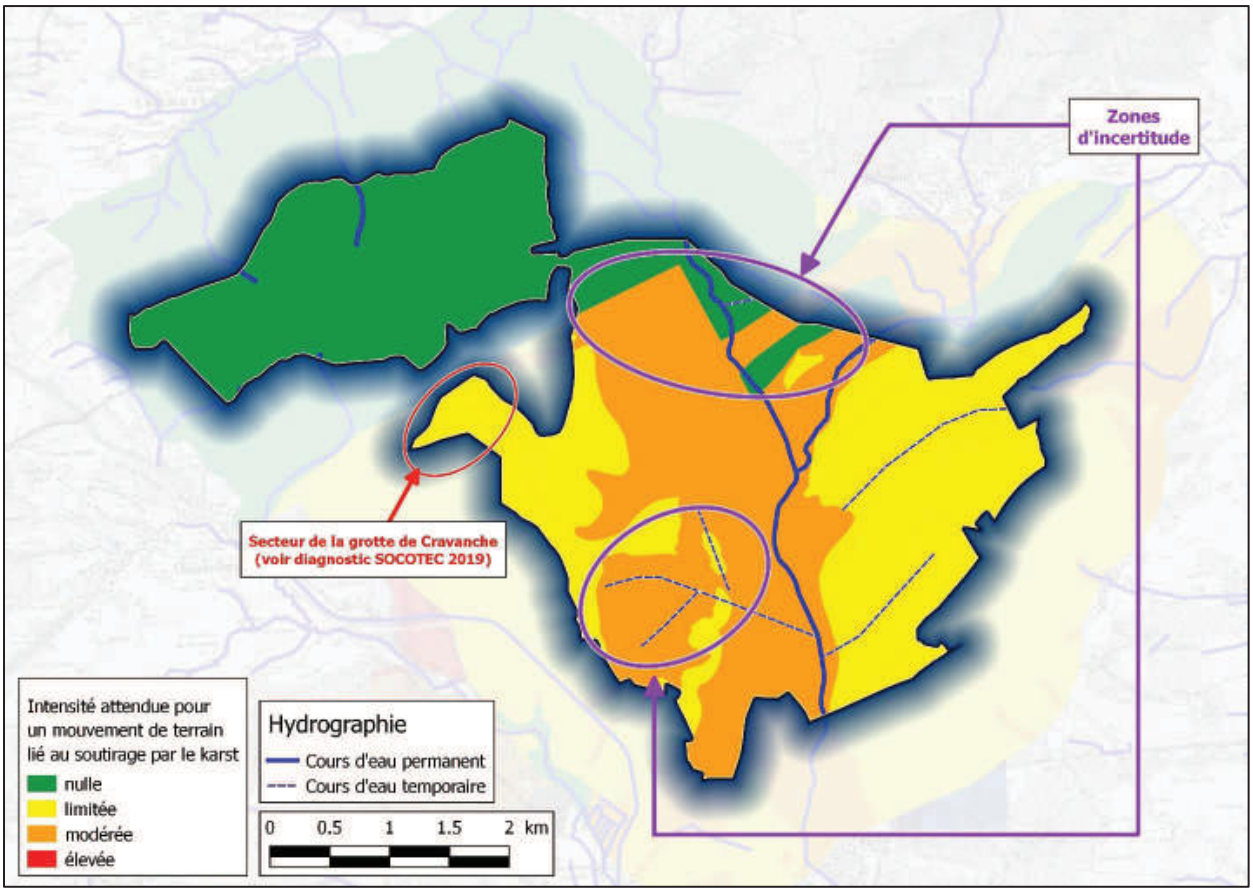


Illustration 17 : Carte d'intensité de mouvements de terrain liés au soutirage par le karst.

4.2.5. Détermination de l'aléa

L'aléa est enfin obtenu par le croisement de la probabilité et de l'intensité. Le calcul proposé est une multiplication entre la note finale établie pour la probabilité et l'intensité, cette dernière étant notée de 0 (nulle) à 1 (élevée) en passant par 0,33 (limitée) et 0,66 (modérée). Le résultat aboutit ici à des notes allant de 0 à 0,51 pour un maximum pouvant en théorie atteindre 1. Ces notes ont ensuite été classifiées en six classes d'aléa :

	Aléa
Note = 0	Nul
0 < Note < 0.2	Très faible
0.2 ≤ Note < 0.4	Faible
0.4 ≤ Note < 0.6	Moyen
0.6 ≤ Note < 0.8	Fort
0.8 ≤ Note < 1	Très fort

De légers ajustements ont été apportés aux résultats bruts, dans certains secteurs où les notes « brutes » sont proches d'un des seuils du tableau précédent. L'objectif de cet ajustement est de fournir une carte finale la plus cohérente et la plus lisible possible, que ce soit en termes cartographiques (éviter les « micro-polygones » isolés) ou pour « coller » davantage aux mouvements recensés (cf. § 4.2.1 : l'analyse historique a ici servi de calage).

La cartographie de l'aléa « Mouvements de terrain liés au karst » sur la commune de Belfort est présentée en Illustration 18, en Annexe 1,au format A3 et en planche hors-texte au format A0. Nous y rappelons la spécificité du secteur de la grotte de Cravanche. Ce réseau souterrain, le seul véritablement connu sur la commune de Belfort, a fait l'objet d'une étude spécifique s'intéressant entre autres à la stabilité du toit rocheux (processus non étudié par la présente étude : cf. § 4.1.2). Nous y rappelons également les zones d'incertitudes identifiées lors de la caractérisation de la zone d'étude (§ 4.2.2).

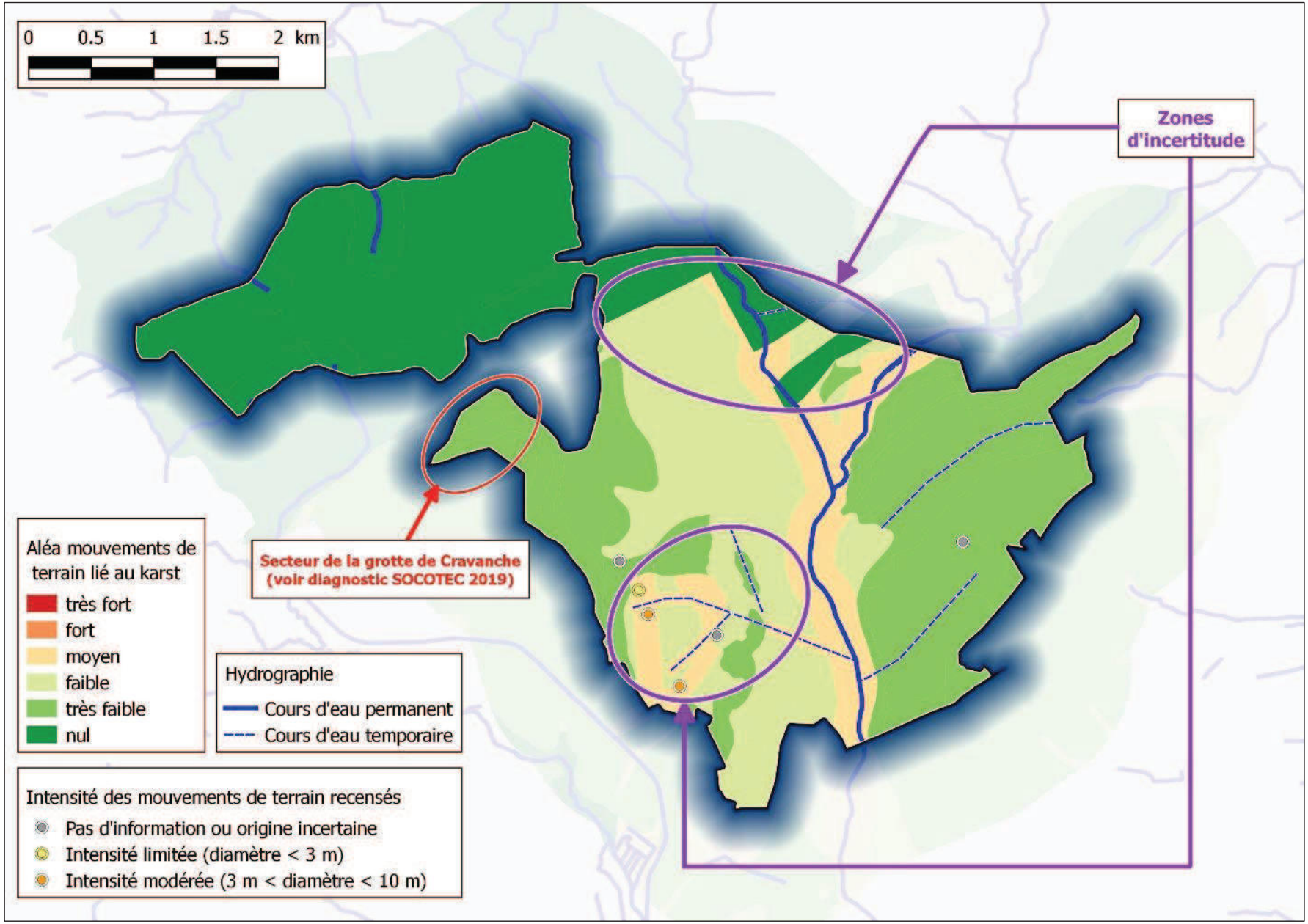


Illustration 18 : Carte d'aléa de mouvements de terrain liés au soutirage par le karst.

5. Aléa « Glissement de terrain »

Les mouvements de terrain englobent plusieurs types de mouvements gravitaires. Les mouvements de terrain pris en compte dans la cartographie de l'aléa « glissement de terrain » sont (la typologie des mouvements de terrain est détaillée en Annexe 4) :

- les mouvements avec plan de rupture ; les glissements translationnels (plans), les glissements rotationnels simples ou complexes (Philipponnat G. *et al*., 2008) ;
- les mouvements sans plan de rupture clairement identifiable ; le fluage, la solifluxion, les mouvements pelliculaires et la reptation.

Le terme « glissement de terrain » au sens large est utilisé par abus de langage pour parler de l'ensemble des phénomènes décrits ci-dessus dans l'ensemble du rapport.

5.1. MÉTHODE GÉNÉRALE

Les travaux ont été menés selon les phases d'analyses inspirées du Guide Méthodologique pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques mouvements de terrain (guide PPRmvt, Besson L. *et al.* 1999). L'aléa correspond à la manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique d'occurrence et d'intensité donnée sur une période de référence (définition du Guide PPmvt). L'approche utilisée dans cette étude est de type expert, les différents seuils et bornes de classes utilisées sont issus des retours d'expériences et de la synthèse de précédentes études menées par le BRGM dans des contextes similaires. La caractérisation des différents paramètres se fait à partir des données bibliographiques disponibles (archives, inventaires, articles), des modèles numériques de terrain et des relevés et observations de terrain. La période de référence est de 100 ans.

5.1.1. La probabilité d'occurrence

La probabilité d'occurrence correspond à la probabilité, sur 100 ans, d'apparition d'un phénomène de glissement de terrain. La probabilité d'occurrence dépend de l'état d'équilibre gravitaire des terrains. Les principaux paramètres à prendre en compte sont :

- la sensibilité lithologique des terrains au glissement de terrain.
- la morphologie et en particulier les pentes des versants ;
- la présence ou non de facteurs aggravant à l'apparition d'instabilités.

Elle est caractérisée qualitativement et classée en 4 niveaux :

- nulle (N) : aucun évènement n'est susceptible d'apparaître dans les 100 ans ;
- faible (f) : l'apparition d'un évènement dans les 100 ans ne serait pas étonnante ;
- modérée (m) : il serait étonnant qu'aucun phénomène apparaisse dans les 100 ans ;
- forte : l'apparition d'un évènement dans les 100 ans est presque sûre.

5.1.2. L'intensité

L'intensité potentielle d'un glissement de terrain dépend théoriquement du volume de matériaux déstabilisés et de la vitesse de glissement. L'évaluation du niveau d'intensité s'appuie sur l'analyse des évènements issus de l'inventaire des phénomènes historiques ainsi que les indices géomorphologiques observés lors des investigations terrains.

En pratique il est rarement possible d'obtenir les informations nécessaires à la caractérisation de ces paramètres pour l'ensemble des formations géologiques présentent sur un territoire communal. Par conséquent, le guide PPRmvt admet que l'intensité d'un phénomène puisse être caractérisée en fonction des dommages attendus sur le bâti en cas de glissement (Illustration 19).

intensité caractérisée	Incidences sur les enjeux (en un évènement)
Très élevée	Destruction de tous les bâtis de la zone
	Parades aux coûts prohibitifs ou techniquement impossible
élevée	Dommage important au bâti (gros œuvre) avec ruine probable
	Parades aux coûts prohibitifs ou techniquement impossible
modérée	Dommages au gros œuvre sans ruine probable - réparations possibles
	Parades réalisables à l'échelle d'une collectivité
faible	Pas de dommage structurel, gros œuvre très peu touché, fissuration possible à long terme
	Parades réalisables à l'échelle de la parcelle et finançable par particulier

Illustration 19 : Tableau de caractérisation de l'intensité en fonction des impacts sur le bâti issus de Rey A. (2016).

Trois niveaux d'intensité ont été caractérisés qualitativement sur la commune de Belfort :

- faible : les parades à mettre en place sont supportables par un particulier. Peu de dommages sur le gros œuvre, fissuration possible ;
- modéré : les parades à mettre en place sont supportables par un groupement de propriétaire ou une collectivité (commune…). Dommages attendus sur le gros œuvre sans mise en ruine / réparations possibles ;
- élevé : les parades ne sont supportables financièrement que par l'État ou très difficile à mettre en place. Dommages importants au bâti avec mise en ruine probable.

5.1.3. L'aléa

L'évaluation du niveau d'aléa est réalisée en croisant la probabilité d'occurrence d'un phénomène de glissement de terrain ainsi que l'intensité attendue de ce phénomène afin d'obtenir l'aléa. La méthode nationale de caractérisation de l'aléa « chute de blocs » (MEZAP) en cours de validation propose une matrice de croisement donnant plus de poids à l'intensité qu'à la probabilité parfaitement adaptée aux cartographies ayant pour vocation de servir de base de réflexion pour des décisions réglementaires (Illustration 20).

		intensité		
		faible	*modérée*	*élevée*
probabilité d'occurrence	*forte*	M	F	F
	modérée	f	M	F
	faible	f	M	F

Illustration 20 : Matrice de caractérisation de l'aléa (issue de la méthode MEZAP).

5.1.4. La propagation

La cartographique des zonages de niveau d'aléa nécessite également d'évaluer la propagation des phénomènes de glissement de terrain afin de prendre en compte la zone d'atterrissement des matériaux en aval. En raison de l'absence constatée sur le territoire communal de fortes propagations de glissements de terrain, l'étendue des zones de propagation a été directement intégrée, par expertise terrain, dans les emprises cartographiques des zonages d'aléa.

La potentielle régression de la zone de départ (niche d'arrachement…) en amont et l'éventuelle propagation latérale du phénomène est également cartographiée à dire d'expert et intégrée à l'emprise des aléas.

5.1.5. Cas particulier

Sur la commune de Belfort, certains cas particuliers ont été traités à part selon leur morphologie ou leur état structurel (cas des ouvrages de soutènements) :

- les talus localisés, dont l'intensité dépend, en plus des paramètres cité précédemment, de la hauteur de talus ;
- les remparts retenant ou contenant des matériaux mobilisables, dont l'intensité dépend de leur hauteur et la probabilité d'occurrence dépend de leur état structurel ;
- les berges de cours d'eau permanent, dont l'intensité dépendra principalement de la hauteur des berges.

5.2. CARACTÉRISATION DE L'ALÉA « GLISSEMENT DE TERRAIN » SUR LA COMMUNE DE BELFORT

Les différents documents cartographiques valorisés pour caractériser l'aléa glissement de terrain sont :

- les cartes de pente issues des modèles numériques de terrain (MNT) au pas de 25 m de l'IGN et des relevés LIDAR au pas de 1 m et de 10 m fournis par la commune de Belfort ;
- les cartes géologiques levées au 1/50 000[I] couvrant la commune de Belfort (cartes de Belfort et de Lure) ;
- les cartes topographiques de l'IGN et les photographies aériennes fournies par la commune ;
- les données bibliographiques (ayant permis de réaliser la synthèse géologique en Annexe 6);
- les données de forages présentes dans la banque de données BSS (BRGM) ;
- le rapport de cartographie des mouvements de terrains sur le territoire de Belfort (CETE 2012).

5.2.1. Inventaire des phénomènes historiques

Synthèse bibliographique

Le territoire de Belfort a fait l'objet d'une cartographie multi aléa à l'échelle départementale en 2012 par le CETE de Lyon (Illustration 12). Cette cartographie ne caractérisait l'aléa que sur les couches marneuses réparties en fonction de 2 classes de pentes : inférieure à 10° (aléa faible), supérieure à 10° (aléa moyen).

Aucune occurrence de glissement de terrain n'a été trouvée dans les archives communales ou celles du BRGM.

Un seul évènement de glissement de terrain est répertorié dans la banque de données du BRGM (BDMVT, dans un rayon de 5 km autour de Belfort) à environ 3 km au sud-ouest de la commune, sur la commune de Bavilliers. Les informations disponibles sur cet évènement n'ont pas permis d'en connaître ses dimensions ou son intensité. Sa localisation le place dans les calcaires à Entroques du Bajocien inférieur. À Belfort, ces terrains ne sont présents que sur le versant nord du bois de la Miotte (partie est de la commune) qui ne présentent pas les mêmes caractéristiques géomorphologiques (structure géologique, gamme de pentes…) que le site de Bavilliers.

Investigation de terrain

La présence de glissement avéré et/ou d'indice géomorphologique de déstabilisation témoigne de la sensibilité des terrains à la déstabilisation et permet également d'avoir une idée du type et de l'intensité apparente des phénomènes attendus. Les indices de mouvements de terrains observables sur le terrain sont :

- les arbres pipés, penchés ou tordus, constituent des repères courants sur les versants. Ils sont le plus souvent caractéristiques de glissements superficiels (reptation, solifluxion) ;
- la présence d'anomalies topographiques, comme des bourrelets, des contre pentes ou des moutonnements qui caractérisent une instabilité gravitaire locale. Ces indices peuvent être annonciateurs de glissements profonds (bourrelets ou contre pentes) mais également de glissements plus superficiels (moutonnement). Dans le cas des indices de type bourrelets de bas de pente ou certaines contre pentes peu marquées, il n'est pas toujours possible d'identifier le type de glissement associé ;
- la présence de cicatrices d'arrachements qui témoignent, le plus souvent, de glissements rotationnels (niches d'arrachement circulaires) ou plans.

Les relevés de terrain ont été réalisés au cours de quatre campagnes de 2 jours chacune entre le mois de mars et d'avril 2019. L'ensemble des observations réalisées a été reporté sur la carte en Illustration 21.

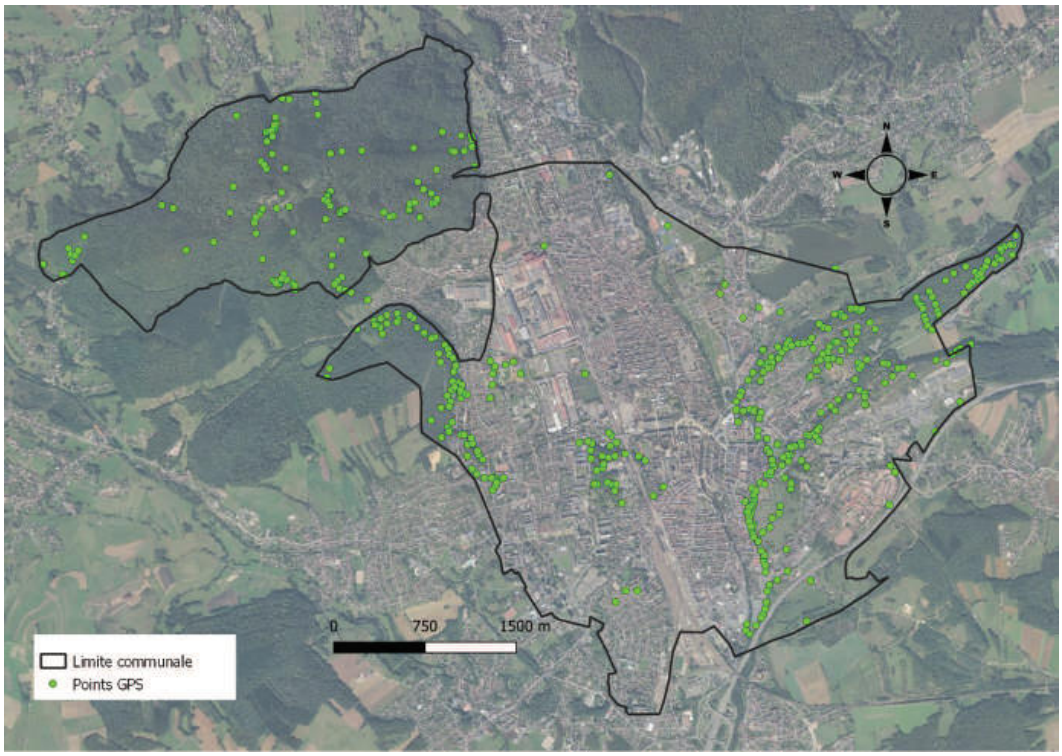


Illustration 21 : Localisation GPS des points d'observations.

Seuls quelques indices de déstabilisations superficielles ont été identifiés sur le terrain. Il s'agit de trace de glissements superficiels n'affectant que la couche superficielle de sol (4 occurrences) et d'arbres pipés ou penchés (12 occurrences) (Illustration 23). L'ensemble de ces indices a été cartographié sur des pentes de plus de 30 % dans les formations marneuses du Toarcien, les calcaires à débit décimétriques du Bajocien et de l'Oxfordien moyen (j1, j2 et j5) et les schistes dévoniens (Illustration 24).

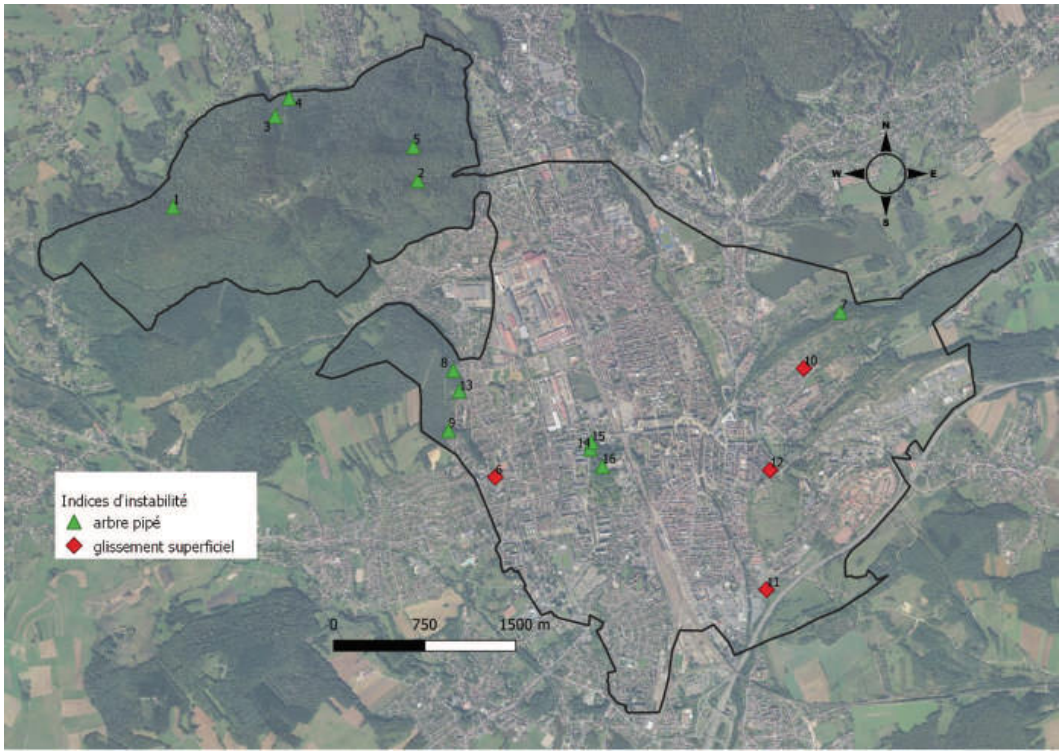


Illustration 22 : Carte des indices de déstabilisation cartographiés sur la commune de Belfort.



Illustration 23 : Photographies (BRGM) de quelques indices de déstabilisation cartographiés sur la commune de Belfort.

ID	Type d'indice	X (lon)	Y (lat)	NomZone	couche géologique	sensibilité	pente
1	arbre pipé	6.8021	47.659	Massif du Salbert	Schistes Dévoniens (d6-7)	modérée	>50 %
2	arbre pipé	6.829	47.66	Massif du Salbert	Schistes Dévoniens (d6-7)	modérée	>50 %
3	arbre pipé	6.8138	47.666	Massif du Salbert	Schistes Dévoniens (d6-7)	modérée	>50 %
4	arbre pipé	6.8154	47.667	Massif du Salbert	Schistes Dévoniens (d6-7)	modérée	>50 %
5	arbre pipé	6.8287	47.663	Massif du Salbert	Schistes Dévoniens (d6-7)	modérée	>50 %
6	glissement superficiel	6.8359	47.638	Massif du Mont	Calcaires en plaquettes de l'Aalénien (j1(FRC))	modérée	>50 %
7	arbre pipé	6.8746	47.649	Bois de la miotte	Calcaires en plaquettes de l'Aalénien (j1(FRC))	modéré	30-50 %
8	arbre pipé	6.8319	47.646	Massif du Mont	Calcaires à débit décimétriques du Bajocien (j2E(FRC))	faible	>50 %
9	arbre pipé	6.8311	47.642	Massif du Mont	Calcaires à débit décimétriques du Bajocien (j2E(FRC))	faible	>50 %
10	glissement superficiel	6.8703	47.645	Bois de la miotte	Calcaires à débit décimétriques du Bajocien (j2OM(FRC))	faible	>50 %
11	glissement superficiel	6.865	47.629	Plaine alluviale	Calcaires argileux à débit décimétriques de l'Oxfordien (j5c2-6aM(FRC))	modérée	>50 %
12	glissement superficiel	6.866	47.638	Citadelle	Calcaires argileux à débit décimétriques de l'Oxfordien (j5c2-6aM(FRC))	modérée	>50 %
13	arbre pipé	6.8324	47.645	Massif du Mont	Marnes du Toarcien (l4b-c(FRC))	forte	>50 %
14	arbre pipé	6.8464	47.64	Bois d'Essert	Marnes du Toarcien (l4b-c(FRC))	forte	30-50 %
15	arbre pipé	6.8466	47.641	Bois d'Essert	Marnes du Toarcien (l4b-c(FRC))	forte	30-50 %
16	arbre pipé	6.8477	47.639	Bois d'Essert	dépôts anthropiques (X)	modérée	>50 %

Illustration 24 : Inventaire des indices de déstabilisations gravitaires identifiés sur le terrain.

Sur le territoire communal de Belfort, l'inventaire seul des phénomènes historiques ne permet pas de préciser la probabilité d'occurrence et l'intensité des phénomènes selon les contextes représentés sur le territoire. De ce fait, l'approche retenue a consisté en une transposition de méthodes utilisées dans des contextes géo-morphologiques similaires au territoire étudié. En l'occurrence, la méthode mise en place en Lorraine sur des terrains marneux et calcaires (Cartannaz, C., 2015) est valorisée. Elle propose de caractériser la probabilité d'occurrence aux glissements de terrain en fonction de la sensibilité des formations aux glissements et de classes de pente définies à partir d'évènements consolidés à l'échelle régionale.

5.2.2. Caractérisation de la probabilité d'occurrence

La matrice définissant l'occurrence est élaborée à partir du couple lithologie-pente. Les valeurs seuils retenues sont celles du contexte Lorrain adaptées au territoire communal.

		Pentes (%)						
		0-5 (0-2°)	5-10 (2-6°)	10-15% (6-8,5°)	15-20% (8,5-11°)	20-30% (11-17°)	30-50% (17-27°)	>50 % (>27°)
Sensibilité des terrains au glissement	Forte	N	f	f	M	M	F	F
	Modérée	N	f	f	f	M	M	F
	faible	N	f	f	f	f	M	M
	Très faible	N	f	f	f	f	f	M

Illustration 25 : Matrice de croisement pour caractériser la probabilité d'occurrence.

Sensibilité des terrains au glissement

La sensibilité des formations lithologiques a été caractérisée, sur le terrain, de façon qualitative à partir de la nature des matériaux et de ses caractéristiques géo-mécaniques selon leur état (altération, fracturation, degré de remaniement, etc.).

Sur la commune de Belfort la majorité des terrains géologiques sont marneux et calcaires. Seul le massif du Salbert, au nord, est composé essentiellement de schistes dévoniens dont la sensibilité a été caractérisée de modérée sur la base des observations de terrain (présence de quelques indices de déstabilisation et d'un débit en plaquette centimétrique). Les formations lithologiques ont été classées en quatre niveaux de sensibilité (Illustration 26).

Sensibilité des formations déstabilisables	Description générale	Terrains concernés
forte	Matériaux remaniés dominante rocheuse et formations non indurées	Marnes et grès du trias (Réthien), marnes du Toarcien, du Bathonien et de l'Oxfordien, ensembles marno-calcaires du Lias, alluvions, éboulis, limons des plateaux et remblais
modérée	Matériaux peu indurés très fracturés	Schistes dévoniens, silts et grès du Permien, calcaires à débit centimétrique de l'Aalénien et de l'Argovien, et dépôts anthropiques grossiers
faible	Matériaux indurés fracturés	Calcaires à débit décimétrique du Bajocien
très faible	Matériaux rocheux compacts et massifs	Calcaire oolithique et micritique, massif et compact du Rauracien et Séquanien

Illustration 26 : Classement des formations en fonction de leur sensibilité aux glissement de terrain.

Comme précisé en Illustration 26, certaines formations à dominante rocheuse sont considérées comme potentiellement source de glissements de terrain en raison de présence possible (et non forcément détectable) d'horizon altéré meuble en surface.

Morphologie des versants

Deux MNT ont été utilisés pour calculer les pentes sur la commune de Belfort, le MNT à 25 m de la BD Alti de l'IGN et les données LIDAR fournies par la commune (résolution 1m). La carte des pentes présentée en Illustration 27 a été calculée à partir du MNT au pas de 25 m de l'IGN. Les données LIDAR n'étaient pas exploitables sur l'ensemble de la commune, certaines zones de fortes pentes étaient tronquées et les pentes en haut de versant étaient régulièrement sous évaluées et excessivement lissées, il ne nous a pas été possible d'améliorer ce MNT. Néanmoins, les secteurs de pentes faibles et moyennes étaient analysables et ont permis de proposer un zonage plus fin de l'aléa, notamment pour les gammes de pentes de 0 à 20 %. Les pentes ont donc été classées en en intervalles de 5 % sur cette plage de valeurs puis les classes de pentes issues de la méthode de Lorraine (élaborée pour un MNT au pas de 25 m) ont été appliquées pour les pentes de 20 % et plus.

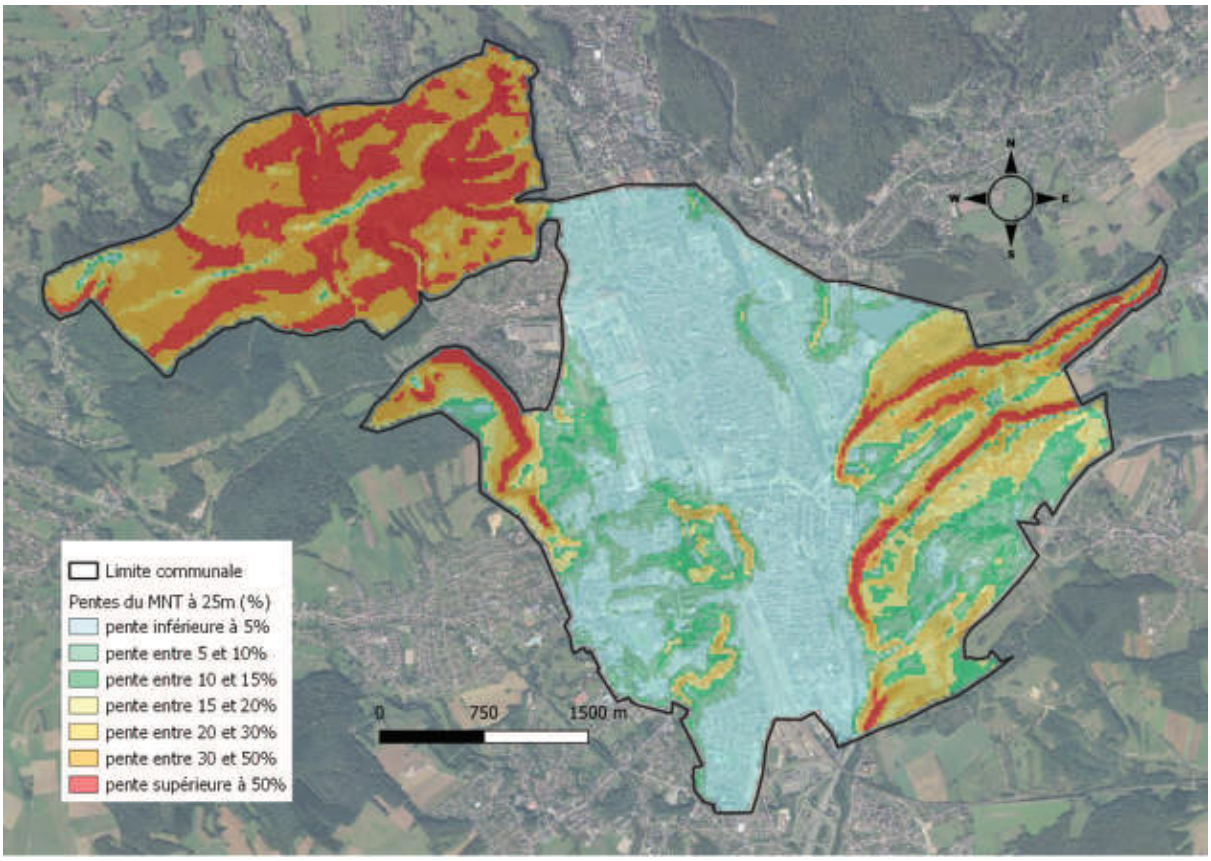


Illustration 27 : Carte des pentes issues du MNT à 25 m sur la commune de Belfort.

Facteurs aggravants/déclenchants pouvant augmenter les risques d'apparition d'un glissement de terrain

En présence d'un facteur aggravant la probabilité d'occurrence est augmentée d'un niveau à partir de la probabilité caractérisée dans le même contexte géomorphologique sans facteur aggravant.

Indices hydrologiques

L'eau, quelle que soit son origine, a plusieurs actions dans les glissements de terrain. Les rôles de l'eau sont multiples :

- forces d'écoulement néfastes à la stabilité dans le cas de gradients hydrauliques (remontées de nappes, nappes perchées, écoulements souterrains, etc.) ;
- augmentation des pressions interstitielles et diminution de la contrainte effective au niveau de la surface de glissement ;
- dans le cas de saturation de sols initialement non saturés, disparition des effets de succion capillaire en général favorables à la stabilité des terrains (cas des zones d'eaux stagnantes par exemple) ;
- modification des propriétés mécaniques des sols (cohésion et angle de frottement) par augmentation de teneur en eau ;
- érosion.

Au-delà, l'eau peut agir comme facteur externe responsable du déclenchement de mouvement (sape des berges d'un cours d'eau par érosion déstabilisant le versant amont).

Sur la commune de Belfort, les indices hydrologiques relevés sont :

- les cours d'eau permanents (la Savoureuse) ;
- les zones de circulations temporaires tels que les talwegs ;
- les sources non captées et les zones humides.

En dehors des talwegs, très peu d'indices hydrologiques ont été observés sur la commune.

Pendage des terrains

La stabilité des pentes pour certaines formations est directement liée au contexte géologique structural. En effet des plans de discontinuités (stratification, schistosité, voire accidents tectoniques comme des faille), orientés sensiblement parallèlement à la topographie peuvent favoriser des mouvements en raison de caractéristiques mécaniques médiocres au niveau des joints de discontinuité. On parle alors d'aval pendage. Ce critère peut favoriser les glissements d'altérites sur substrat rocheux notamment.

La carte des facteurs aggravant pris en compte dans la caractérisation de la probabilité d'occurrence est présentées en Illustration 28.

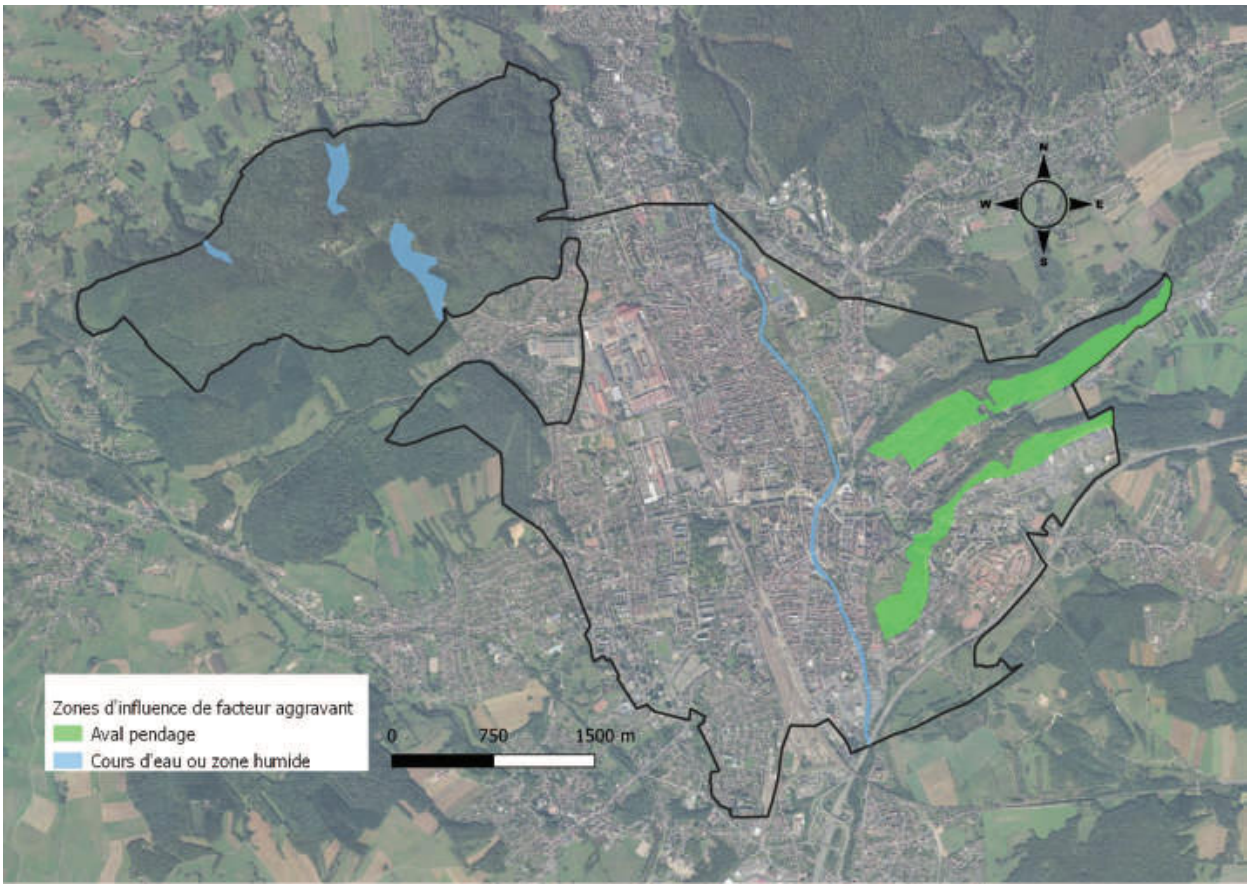


Illustration 28 : Carte des zones d'influence des facteurs aggravants pris en compte dans la caractérisation de la probabilité d'occurrence.

La carte de probabilité d'occurrence finale avec facteur aggravant/déclenchant est présentée en Illustration 29.

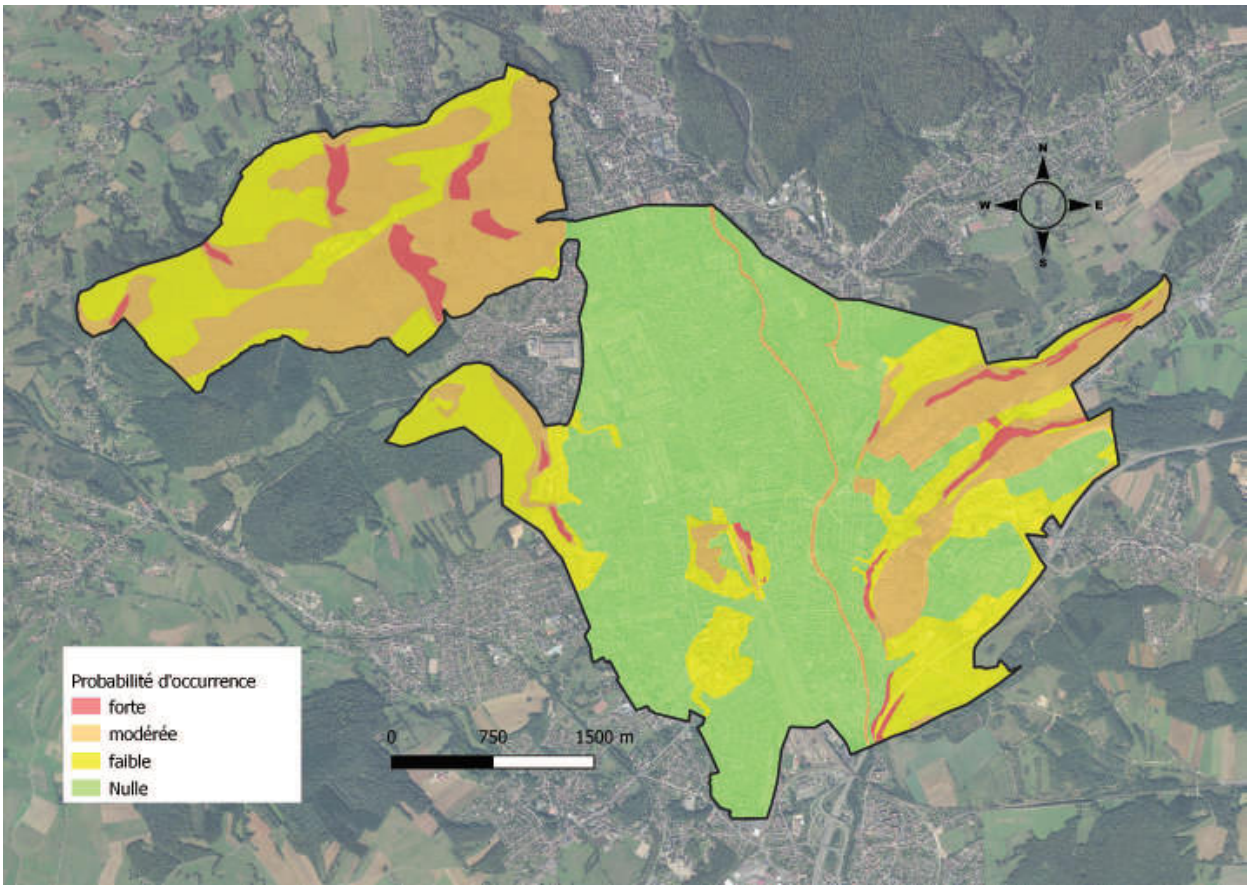


Illustration 29 : Carte de probabilité d'occurrence de la commune de Belfort.

5.2.3. Caractérisation de l'intensité

L'appréhension de l'intensité de phénomènes de glissement est difficile lorsque comme sur la commune de Belfort peu d'évènements sont répertoriés. Dans ces conditions, la démarche a consisté à évaluer l'intensité à partir de l'épaisseur de terrain potentiellement mobilisable selon les formations géologiques rencontrées. Couplée à la surface redoutée de phénomènes, cette information permet d'estimer le niveau de dommages à redouter. L'épaisseur des terrains mobilisables en glissement de terrain a été hiérarchisée en trois niveaux à partir de l'expertise de terrain notamment :

- Faible : moins de 0.5 m d'épaisseur ; glissements superficiels attendus uniquement ne pouvant pas toucher le gros œuvre ou en très rare cas (identifiés sur le terrain) ;
- Moyenne : de 0.5 à 3 m d'épaisseur ; glissements peu profond pouvant éventuellement affecter le gros œuvre ;
- Forte : plus de 3 m d'épaisseur : glissements profonds affectant presque systématiquement le gros œuvre, sauf en de rares cas (identifiés sur le terrain).

Ce paramètre a permis de guider la caractérisation de l'intensité en délimitant des secteurs en fonction de l'épaisseur de terrain potentiellement mobilisable. Au sein de ces secteurs, l'intensité a été évaluée sur le terrain à dire d'expert.

5.2.4. Cas particuliers

Les talus localisés

Les talus localisés, souvent anthropiques, peuvent représenter des zones d'aléa locales. Les probabilités d'occurrence dépendent, comme pour un versant classique, de la sensibilité des terrains mobilisables et de la pente du versant tandis que l'intensité attendue sur ce type de relief dépend fortement de la hauteur du versant (qui contrôle le volume glissé) et de l'épaisseur de terrain mobilisables (Illustration 30).

hauteur	intensité
<3m	non pris en compte, intégré dans le niveau d'aléa environnant
3-5m	faible
5-10m	modérée au maximum (selon épaisseur de terrain mobilisable)
>10m	forte au maximum (selon épaisseur de terrain mobilisable)

Illustration 30 : Tableau de caractérisation de l'intensité attendue sur les talus locaux.

Les remparts

De nombreux remparts comme ceux de la Citadelle ou d'anciens forts plus ou moins vétustes sont présents sur la commune de Belfort. Ces remparts sont parfois surmontés de talus anthropiques et retiennent potentiellement d'importants volumes de remblais et de matériaux non cohésifs. Un autre type de rempart, avec des largeurs de 5 à 15 mètres, est remplis de terre et remblais. En accord avec la commune de Belfort ces remparts ont été pris en compte dans l'aléa glissement de terrain car, en cas de rupture de mur, d'importants volumes présents en arrière de ces murs et remparts pourraient être déstabilisés. Lors des campagnes de terrain, plusieurs évènements de glissement de terrain liés à la rupture de remparts ont pu être observés et ont permis de dresser un tableau pour aider à la caractérisation de l'aléa dans ce genre de cas (Illustration 31).

Les murs de soutènements (digues et bords de canal également, applicable aux remparts)			
Inspection visuelle	**probabilité d'occurrence**	**hauteur**	**Intensité**
murs massifs (plus de 0,5m d'épaisseur) sans aucune trace de déstabilisation sur le linéaire et non sous dimensionné (cas exceptionnel type mur de citadelle)	très faible	<2m	non pris en compte, intégré dans le niveau d'aléa environnant
murs de moins de 0,5m d'épais sans aucune trace de déstabilisation sur le linéaire avec présence de drains et non sous dimensionné (cas exceptionnel type mur de citadelle)	faible	2-5m	faible
murs avec quelques traces de déstabilisations mineures (fissuration, sans bombement ou inclinaison) ou murs de moins de 0,5m sans drains visibles ou sous dimensionné (cas de la plupart des murs)	modérée	5-10m	modérée
murs présentant des indices de déstabilisations (bombement important fracturation avec décalage, inclinaison vers l'aval, effondrement partiel)	forte	>10m	élevée

Illustration 31 : Tables de caractérisation de la probabilité d'occurrence (à gauche) et de l'intensité (à droite) dans le cas de prise en compte des remparts.

Un niveau de probabilité d'occurrence très faible a été ajouté afin de tenir compte des remparts de la Citadelle. En effet, ces remparts datent du 17e siècle et ne montrent aucun indice de déstabilisation, ils sont en grès et épais de plus de 50 cm au minimum. Une probabilité de rupture (ou d'occurrence de phénomène) très faible leur a donc été assignée. La caractérisation de l'aléa a alors été réalisée en croisant cette probabilité très faible avec l'intensité attendue selon le tableau ci-dessous (Illustration 32) :

	Intensité		
Probabilité d'occurrence	*faible*	*modérée*	*élevée*
très faible	**f**	**f**	**M**

Illustration 32 : Croisement probabilité d'occurrence/intensité dans le cas des remparts avec une probabilité d'occurrence très faible.

Sur la commune de Belfort, cinq secteurs sont impactés par la présence de fortifications.

Le premier et le plus important correspond à la Citadelle de Belfort, située à l'est de la Savoureuse. Les remparts de cette citadelle, datant du 17e siècle, sont principalement constitués de grès et sont épais de plus 50 cm. Aucune trace d'instabilité n'a été observée lors des campagnes de terrain sur ces remparts. Leur probabilité de rupture a donc été qualifiée de très faible. La hauteur des remparts excédant régulièrement les 10 m, les intensités attendues en cas de rupture peuvent être élevées. Afin d'éviter le micro-zonage d'aléa sur ce secteur, l'ensemble de la Citadelle a été caractérisée en aléa « Moyen ».

Trois autres forts sont présents sur la commune :

- le fort de la Justice, à l'est de la citadelle ;
- le fort de la Miotte situé au nord de celui de la Justice ;
- le fort des Basses Perches recoupé par la limite communale au sud de l'autoroute.

Les remparts de ces forts sont principalement composés de calcaires et leur hauteur moyenne est d'environ 10 m. Plusieurs indices d'instabilité ont été relevés sur le terrain et les remparts sont parfois partiellement effondrés (Illustration 33). Leur probabilité de rupture a été qualifiée de « modérée » et les intensités attendues sont modérées, caractérisant un aléa « Moyen » sur l'ensemble des fortifications.

La dernière zone de fortification correspond au fort Hatry sous le bois d'Essert. Il s'agit d'un fort en partie enterré sous des matériaux supposés correspondre à des remblais. L'ensemble constitue une butte anthropique avec des pentes supérieures à 30 % bordé au nord et à l'ouest par une tranchée délimitée par des murs de soutènement calcaires de 10 m de haut environ. La probabilité de rupture des remparts a été qualifiée de modérée et les intensités attendues sont modérées, caractérisant un aléa « Moyen ». Le reste de cette butte anthropique a été traitée comme un talus localisé. Bien que ces murs puissent localement mesurer jusqu'à 15 m de haut, l'aspect confiné de la tranchée (murée de chaque côté) permet de les qualifier en aléa « Moyen », évitant ainsi un micro-zonage sur le secteur.



Illustration 33 : Photographie (BRGM) du rempart sud du fort de la Justice partiellement effondré.

Zone	Caractéristiques	Probabilité d'occurrence	Intensité	Aléa
Citadelle	Remparts de grès de 0.5 m d'épaisseur dont les hauteurs varient de 5 à 20 m. Aucun indice de déstabilisation malgré une construction remontant au 17ème siècle	Très faible	élevée au vu des hauteurs	Moyen
Fort de la Justice	Remparts de calcaires de 0.2 m d'épaisseur environ sur des hauteurs inférieures à 10 m. Plusieurs indices de déstabilisations observés, parties de mur localement effondrées	modérée	modérée	Moyen
Fort de la Miotte	Remparts de calcaires de 0.2 m d'épaisseur environ sur des hauteurs inférieures à 10 m. Plusieurs indices de déstabilisations observés, parties de mur localement effondrées	modérée	modérée	Moyen
Fort de Hatry	Fort semi enterré, seuls les murs de tranché sont visibles. Remparts de calcaires d'épaisseur inconnue ne montrant pas d'indice de déstabilisation. L'ensemble forme un massif avec des pentes de plus de 50%.	faible	modérée	Moyen
Fort des basses Perches	Remparts de calcaires d'épaisseur inconnue et de hauteur de 10 m environ. Seule une partie du fort est présent sur le territoire communal. Pas d'indice de déstabilisation observé	faible	modérée	Moyen

Illustration 34 : Tableau récapitulatif de la caractérisation de l'aléa sur les remparts.

Les berges

Le pouvoir érosif des cours d'eau peut entraîner une déstabilisation des berges. Bien que ce phénomène dépende d'un aléa spécifique (érosion de berge), cette déstabilisation peut impliquer des glissements de terrain immédiatement à proximité des berges. Ce phénomène a donc été cartographié au titre de l'aléa « glissement de terrain ».

La commune de Belfort est traversée du nord au sud par un cours d'eau appelé la Savoureuse. Bien que ses berges soient murées sur la plus grande partie du linéaire traversant Belfort, l'aléa est caractérisé pour une période de cent ans et l'intégrité structurelle des murs ne peut être assurée sur cette période. Compte tenu du fait que la profondeur de ce cours d'eau n'excède pas les 2 m et que les berges n'excèdent pas les 3 m de haut sur la grande majorité du linéaire, une probabilité d'occurrence faible à modérée et une intensité faible ont été caractérisées sur l'ensemble des berges sur le ban communal. Un aléa faible a donc été cartographié sur l'ensemble des berges de la Savoureuse en prenant une zone de recul d'environ 5 m de chaque côté.

5.2.5. Caractérisation de l'aléa

L'évaluation de la probabilité d'occurrence et de l'intensité des phénomènes redoutés permet d'évaluer le niveau d'aléa glissement de terrain sur le territoire communal de la ville de Belfort (Illustration 20 et Illustration 35).

La cartographie de l'aléa « glissement de terrain » sur la commune de Belfort est présentée en Illustration 35, en Annexe 2,au format A3 et en planche hors-texte au format A0.

Les zones d'aléa fort correspondent principalement aux secteurs de pente supérieures à 50 % (26-27°) dans les remblais et éboulis présents en pied de falaises et de remparts. Dans le massif du Salbert, les zones d'aléa fort correspondent à des talweg (secteurs encaissés) avec présence de circulation d'eau temporaire et sur des pentes de plus de 50 %. Les zones de propagation ont été estimées en tenant compte tenu de la sensibilité des terrains, des hauteurs de versant potentiellement impactées et de la présence de zones humides régulièrement observés dans ces versants (cas du massif du Salbert).

Les zones d'aléa modéré correspondent à des secteurs de pente modérées sur des terrains de sensibilité modérée au glissement de terrain ou sur des pentes fortes (>50 %). Ce niveau d'aléa intègre également les zones fortifiées. Les zones de propagations estimées en cas de rupture des remparts ont été estimées, comme les distances de recul en fonction de la hauteur des remparts.

En zone d'aléa faible, les propagations ne sont pas considérées.

Des photographies illustrant les profils de terrain observés sur le terrain ainsi que des exemples de zones d'aléa faible, moyen et fort sont présentées en Annexe 7.

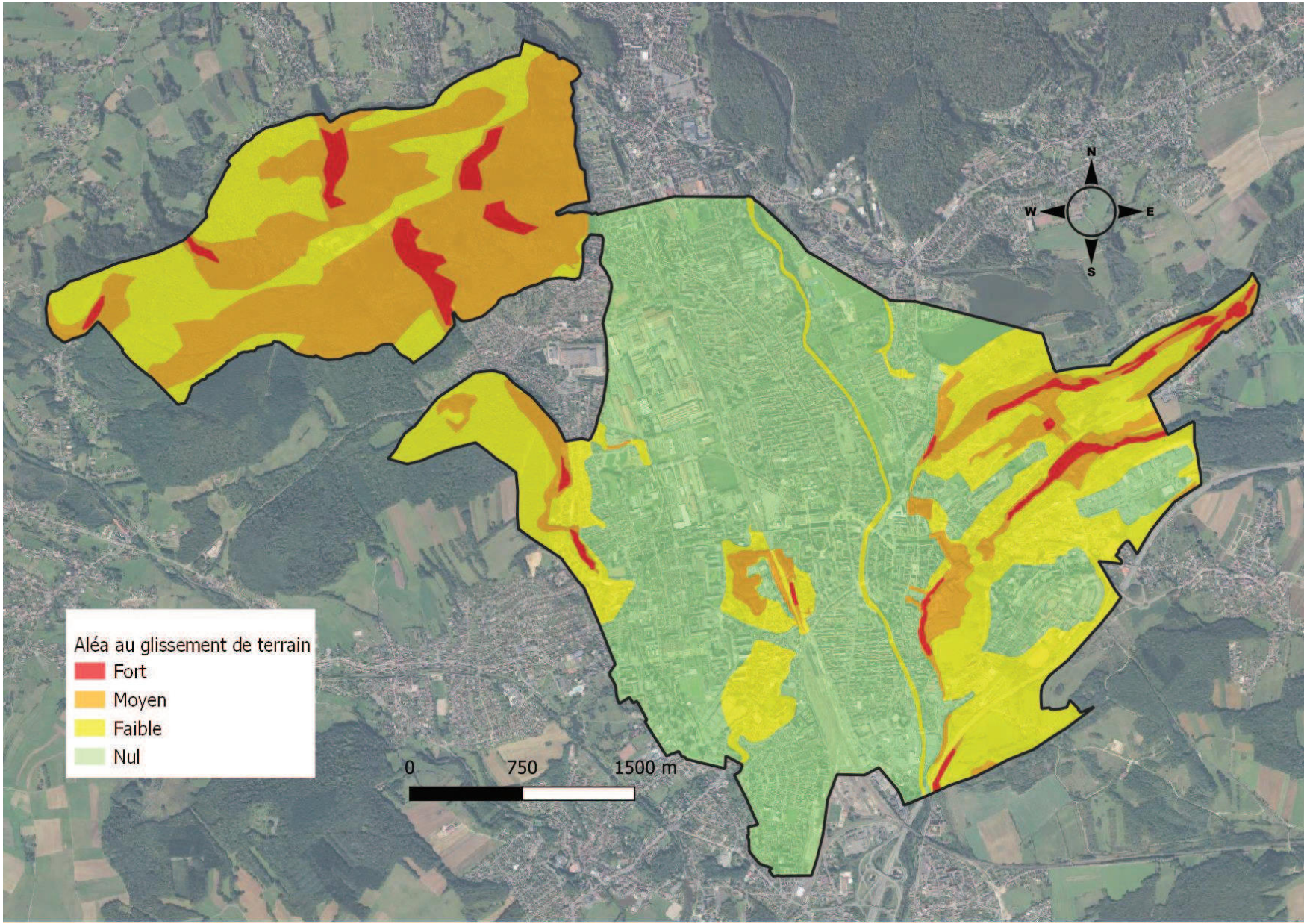


Illustration 35 : Cartographie de l'aléa « glissement de terrain » sur la commune de Belfort.

6. Aléa « Chute de blocs »

Des principes et des généralités sur les phénomènes de chute de blocs sont présentés en Annexe 5.

6.1. MÉTHODE GÉNÉRALE

Dans le cadre du projet, le BRGM valorise la méthode MEZAP[3] pour élaborer la carte d'aléa « chute de blocs ». Cette méthode en cours de déploiement vise à harmoniser les pratiques pour la cartographie de cet aléa sur l'ensemble du territoire français. Le cas échant, la méthode MEZAP peut être adaptée au contexte local.

La MEZAP est une approche qualitative et pragmatique du phénomène d'éboulement et chute de blocs. Elle permet de répondre aux questions Quoi ? Où ? et Quand ?.

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.

Pour l'aléa de chute de blocs, **le scénario de référence est caractérisé par le volume du plus gros blocs 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, inventaire des phénomènes historiques, il est proposé des zones homogènes de départ, chacune étant caractérisée par un volume unitaire de blocs (volume après fragmentation) susceptible de se propager dans la pente à une fréquence donnée définissant un **scénario de référence**. 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 et de l'inventaires des phénomènes historiques.

L'évaluation de l'aléa chute de blocs nécessite de définir 3 indices qualitatifs pour chaque scénario de référence identifié par zone homogène :

- Indice intensité (quoi ?) : 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. 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

[3] MEZAP : « Méthode pour l'Évaluation du Zonage de l'Aléa chute de Pierres ». Méthode développée par un groupe de travail piloté par IRSTEA pour le compte du MEEM (Ministère de l'Écologie, de l'énergie et de la Mer)

potentiel des enjeux engendrés par leur atteinte. Le niveau d'intensité du phénomène est défini à partir de la méthode MEZAP (Illustration 36) ;

Indice d'intensité	Volume unitaire pouvant se propager (m3)	Potentiels de dommages
Faible	Volume < 0,25	Pas de dommage au gros œuvre, peu ou pas de dommages aux éléments de façade
Modérée	0,25 ≤ Volume < 1	Dommage au gros œuvre sans ruine. Intégrité structurelle sollicitée.
Elevée	1 ≤ Volume < 10	Dommage 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 36 : Indices d'intensité définis par la MEZAP (source : MEZAP)

Dans le cadre de ce projet, au regard des nombreux départs potentiels de pierres inferieures à 50 litres, la méthode MEZAP a été adaptée au contexte locale et une nouvelle classe d'intensité « très faible » a été ajoutée pour les volumes unitaires inférieurs à 50L.

- Indice d'activité (quand ?): définit qualitativement *la fréquence* avec laquelle ce ou ces volumes de roches se mettent en mouvement. En plus de l'expertise terrain (traces de départ visibles et nombre des blocs observé 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 sont définies pour cette étude en se basant sur les recommandations du MEZAP (Illustration 37) ;

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 37 : Indices d'activité définis par la MEZAP (source : MEZAP).

- Probabilité d'atteinte (où ?) »: définit la propagation estimée 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 à dire d'expert. 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 d'atteinte** de blocs en tout point du territoire. Seulement des probabilités d'atteinte faible, moyenne et forte seront évaluées pour ce projet.

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 réalisé dans le cadre de ce projet. Les indices d'intensité et d'activité sont évalués « à dire d'expert » et peuvent être confirmés par les informations recueillies lors de l'étude de l'historique des évènements passés. Chaque site fait l'objet de visites de terrain

afin d'identifier les instabilités visibles en paroi, et de collecter les informations nécessaires à l'évaluation des indices.

À partir de l'indice d'activité et de la probabilité d'atteinte du scénario de référence considéré, la probabilité d'occurrence est évaluée d'après la méthode MEZAP (Illustration 38).

		Probabilité d'atteinte			
		Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Indice d'activité	Faible	Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
	Moyen	Modérée	Modérée	Élevée	Très élevée
	Fort	Modérée	Élevée	Élevée	Très élevée

Illustration 38 : Matrice de probabilité d'occurrence (source : document MEZAP).

Enfin, l'aléa chute de blocs est défini toujours selon la méthode MEZAP en croisant la probabilité d'occurrence et l'indice d'intensité du scénario de référence considéré

Compte-tenu de l'ajout d'une classe d'intensité « très faible » et de la non évaluation de la probabilité d'atteinte très forte, la matrice de croisement MEZAP pour l'évaluation de l'aléa a été adaptée (Illustration 39).

		Intensité				
		Très faible	Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
Probabilité d'occurrence	Faible	faible	faible	moyen	fort	fort
	Modérée	faible	faible	moyen	fort	fort
	Élevée	faible	moyen	fort	fort	Très fort

Illustration 39 : Matrice d'évaluation de l'aléa adapté au contexte local (source : modifié d'après document MEZAP).

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

En termes pratiques, l'évaluation de l'aléa chute de blocs se décompose en 5 étapes :

- étape n° 1 : historique évènementiel ;
- étape n° 2 : reconnaissance préliminaire des zones de départ et validation terrain ;
- étape n° 3 : définition du(des) scénario(s) de référence pour chaque zone de départ homogène ;
- étape n° 4 : évaluation de la propagation (probabilité d'atteinte) ;
- étape n° 5 : évaluation et cartographie de l'aléa chute de blocs.

6.2. ÉTAPE N° 1 – HISTORIQUE ÉVÈNEMENTIEL

L'absence d'évènement recensé lors la consultation de la base de données mouvement de terrain, des archives communales et départementales ainsi que de la presse locale n'a pas permis de définir un historique des évènements passés sur le territoire communal.

Cependant lors des investigations de terrain une cartographie non exhaustive de pierres/blocs éboulés a été réalisée (128 pierres/blocs) au cas par cas pour caractériser l'aléa aussi bien pour la définition du scénario de référence (intensité / activité) que pour l'estimation de la propagation (Illustration 40).

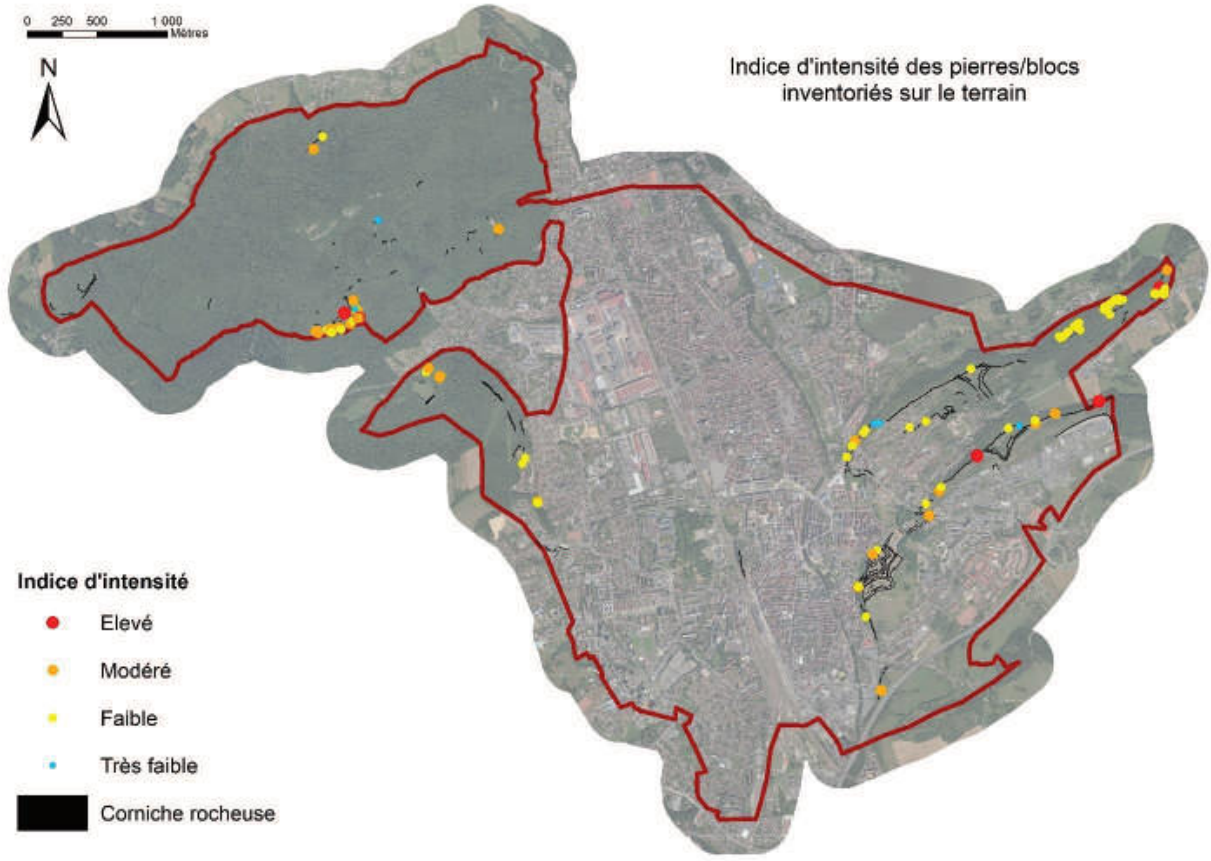


Illustration 40 : Inventaire non exaustif des pierres/blocs observés sur le terrain.

Cette analyse évènementielle met en évidence les faciès géologiques sensibles aux éboulements rocheux ainsi que les contextes morphologiques associés. Les reports correspondent aux points d'atterrissement des blocs. De façon générale la propagation des évènements est limitée, en raison en particulier des contextes de falaise verticale référencés.

6.3. ÉTAPE N° 2 – RECONNAISSANCE DES ZONES DE DÉPART ET VALIDATION TERRAIN

La reconnaissance et l'inventaire des zones de départs potentielles (corniches et barres rocheuses) lors des campagnes terrain sont une tâche laborieuse, chronophage et rendue compliquée par la végétation et les bâtiments existants. À ce titre, une analyse préliminaire réalisée par l'analyse couplée du modèle Numérique de terrain (MNT), du scan 25 de l'IGN et des orthophotographies couvrant le secteur d'étude est pertinente afin de cibler les secteurs à investiguer lors des campagnes de reconnaissance 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. À partir de ce constat, des travaux ont été menés (Berger, 2009) pour estimer empiriquement la valeur d'un seuil de pente à partir duquel la présence de corniche rocheuse est probable en fonction de la résolution de MNT (avec RES résolution du MNT):

$$\alpha = 55° . RES^{-0,075}$$

Ainsi pour le MNT disponible au pas de 1 m issu du levé LIDAR, une pente supérieure ou égale à 55° est considérée comme zone de départ potentielle. Parallèlement, cette approche est ponctuellement enrichie avec la digitalisation des barres rocheuses apparentes sur l'orthophotographie et/ou le scan 25 ainsi que les données de l'atlas mouvements de terrain du territoire de Belfort réalisé CEREMA afin de produire une carte des zones potentielles de départs la plus exhaustive possible. Afin de maximiser la reconnaissance préliminaire des zones potentielles de départ, un seuil de pente à 50° (sur MNT 1 m) a également été mise en œuvre.

Pour les corniches qui ont été détectées préliminairement par la méthode des seuils de pente, de nombreux faux positifs à l'instar des bordures de bâtiment, des talus anthropiques et des murs ont été détectés. Ces corniches potentielles ont été validées selon les étapes chronologiques suivantes (Illustration 41) :

- contextualisation de la localisation de la corniche potentielles en fonction des orthophotographies, de Google Streetview et Google Map 3D ;
- expertise des services de la mairie ;
- validation lors des investigations de terrain.

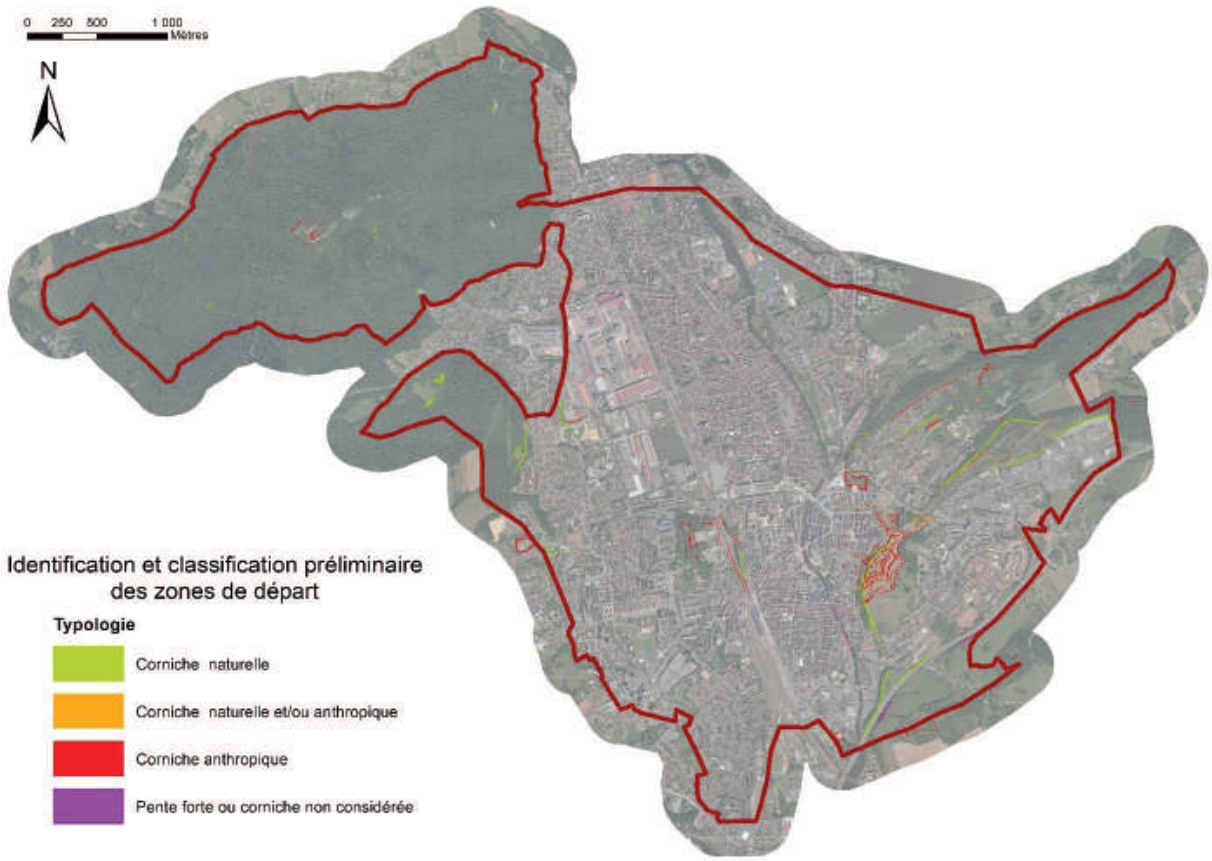


Illustration 41 : Identification et clasiffication préliminaire des zones de départ.

Un MNT de 1 m de résolution permet normalement de détecter des affleurements à partir de 3 à 4 m de hauteur. Cependant le MNT modélisé d'après le levé LIDAR est de très mauvaise qualité et un nombre significatif d'objets géomorphologiques naturels (corniches rocheuses, rupture de pente…) et anthropiques (fortification, mur de soutènement, corniche rocheuse taillée…) ne sont pas représentés. En effet, la majorité des corniches de taille significative (hauteur supérieure de 4 m) ainsi qu'une proportion importante de corniches proches ou supérieures à une dizaine de mètres de haut ont été modélisées soit que partiellement soit pas du tout (Illustration 42).

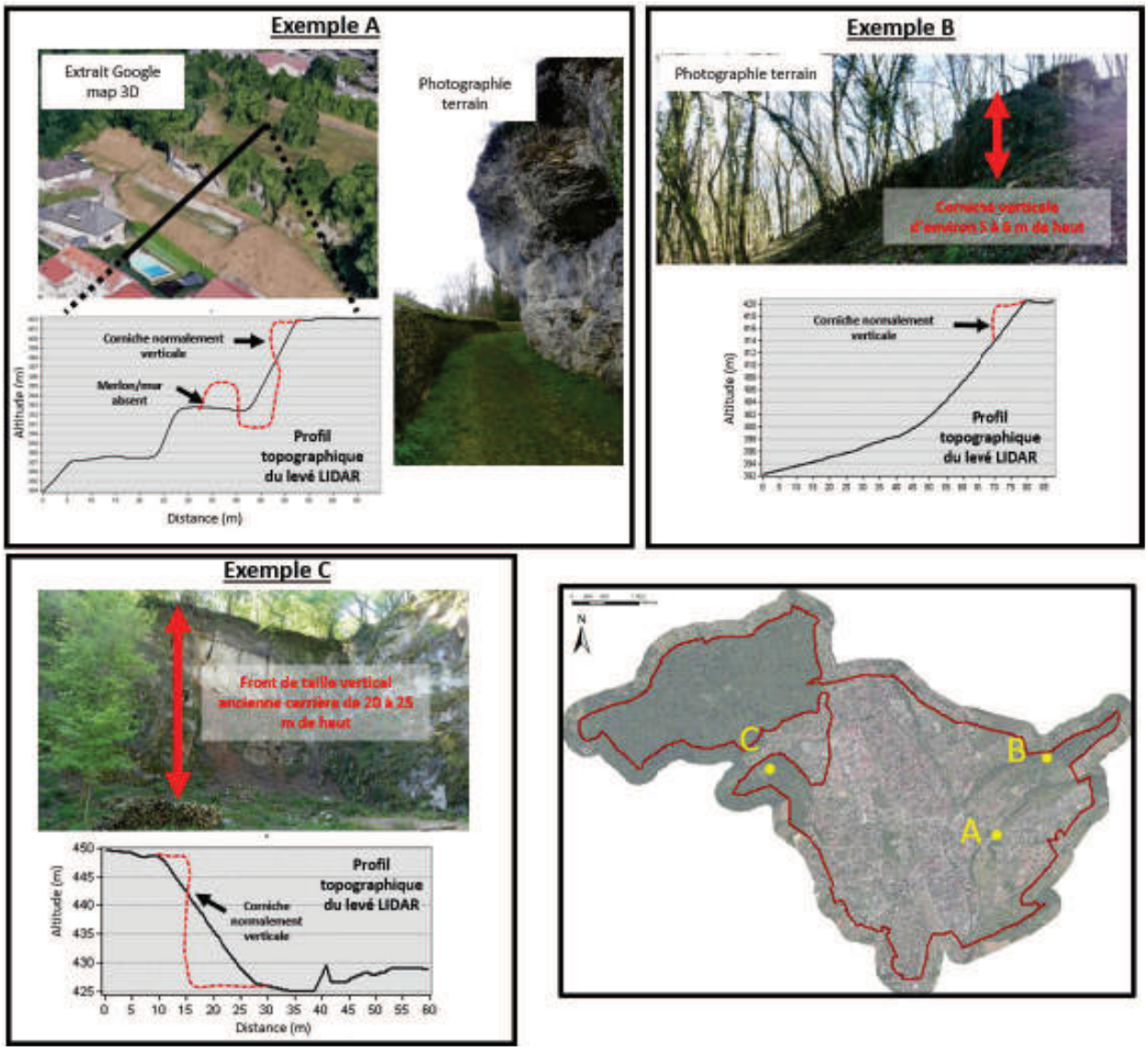


Illustration 42 : Illustration de la mauvaise représentativité du LIDAR pour la détection de corniche rocheuse.

Par conséquent sur le territoire de Belfort, la méthode des seuils de pente, n'a pas permis de réaliser une reconnaissance préliminaire convenable des zones de départ. Cette cartographie préliminaire est pourtant une étape importante afin de cibler et prioriser les secteurs à investiguer lors des campagnes de terrain

La reconnaissance des zones de départ a donc dû être réalisée principalement manuellement en ciblant les versants et les secteurs présentant des dénivelés significatifs. En zone urbanisée/ouverte la cartographie des zones de départ s'est appuyée sur le GPS de terrain, le cadastre et les photographies aériennes alors qu'en milieu boisée seul le pointage des corniches au moyen d'un GPS de terrain a pu être réalisé.

L'ensemble du territoire communal de 17 Km^2 n'a pas pu être couvert de façon exhaustive lors des investigations terrain (Illustration 43). En concertation avec la mairie de Belfort, il a notamment été décidé de ne couvrir que les routes secondaires ou forestières accessibles par un véhicule sur le massif du Salbert et de ne pas investiguer les potentielles corniches rocheuses du fort du Salbert, du fort des Perches, celles-ci étant situées dans des zones éloignées de toute urbanisation et n'ayant pas vocation à être urbanisées à long terme. De même, n'ont pas été expertisées les potentielles corniches situées à l'est de la citadelle de

Belfort, ces secteurs correspondant principalement à des murs de fortification localisés en zone non urbanisée dans le futur PLU et loin de toutes constructions.

La mauvaise qualité du MNT LIDAR a pour conséquence :

- **un temps de travail significatif consacré lors des investigations terrain à la recherche de potentielles corniches rocheuses dans les versants ;**
- **un inventaire non exhaustif des zones de départs de moins de 10 m et 5 m de haut respectivement en en milieu boisé (particulièrement sur le massif du Salbert) et urbanisé ;**
- **une cartographie des corniches rocheuses avec une précision planimétrique de 10 à 15 m en milieu boisé/couvert et de 5 à 10 m en milieu urbanisé/ouvert ;**
- **une emprise des corniches rocheuses délimitée manuellement représentant principalement l'étendue de la corniche mais étant peu représentative de leur géométrie (forme, largeur, discontinuité…).**

Pour cette étude, en accord avec la commune, les zones de départ le long des voies ferrées et d'autoroute n'ont pas été cartographiées et ne sont donc pas prises en compte pour la cartographie de l'aléa chute de blocs, car la responsabilité incombe au gestionnaire du réseau.

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

La cartographie des zones de départ (corniche rocheuse) est affichée en Illustration 43. Ces zones de départ sont regroupées en 33 zones homogènes en fonction des critères d'activité / intensité, eux même étroitement liés aux facteurs géologiques et morphologiques (Illustration 43).

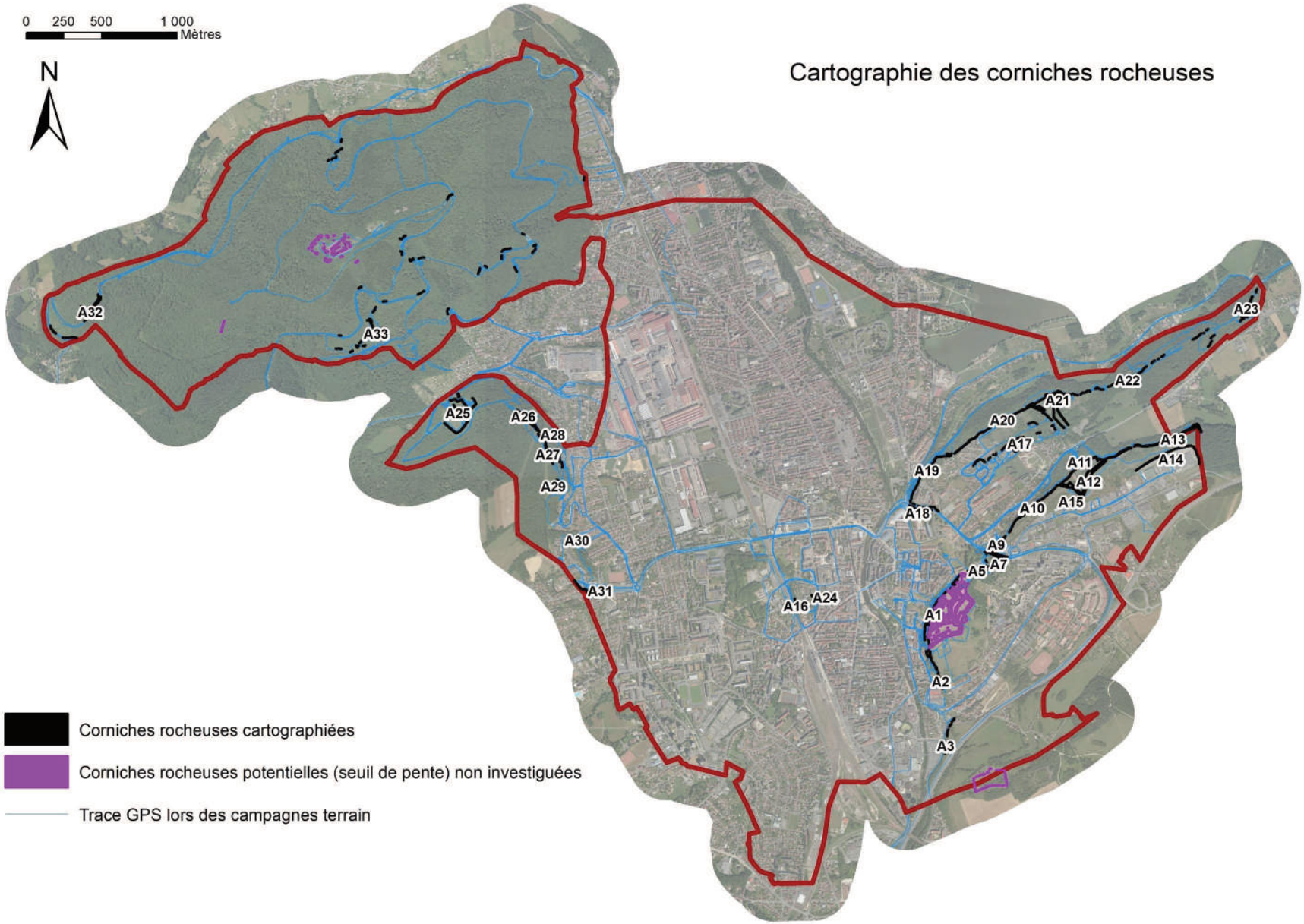


Illustration 43 : Cartographie des zones de départ après validation terrain et trace GPS des zones investiguées.

6.4. ÉTAPE N° 3 – DÉFINITION DU(DES) SCÉNARIO(S) DE RÉFÉRENCE POUR CHAQUE ZONE DE DÉPART HOMOGÈNE

Les investigations de terrain ont permis de caractériser les corniches rocheuses précédemment identifiées et de définir des zones de départ numérotées de A1 à A33 (Illustration 45).

Pour rappel, 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 réalisé dans le cadre de ce projet. Les indices d'intensité et d'activité sont évalués « à dire d'expert »et peuvent être confirmés par les informations recueillies lors de l'étude de l'historique des évènements passés.

Pour chaque zone de départ, les éléments suivants ont été caractérisés (Illustration 44) :

- description lithologique/structurale succincte de la corniche rocheuse ;
- indice d'activité et indice d'intensité et définition d'un ou des scénario (s) de référence ;
- description des blocs éboulés dans la zone de propagation lorsque ceux-ci permettent d'améliorer la cartographie de l'aléa.

Les indices d'intensité (Illustration 36) et d'activité (Illustration 37) caractérisés pour chaque zone homogène sont respectivement cartographiés dans l'Illustration 45 et Illustration 46. Une planche photographique des zones de départ est disponible en Annexe 8

Zone de départ	Description	Lithologie	Information carte géologique au 1/50000ème	Hauteur	Fracturation/pendage	Mécanisme de rupture	Volume total	Volume unitaire	Couple Indice intensité/activité	Profil versant	Atteinte estimée	Répartition des blocs éboulés	Commentaire
A1	Affleurement vertical surmonté par des murs de fortifications Ponctuellement des colonnes de plusieurs m3 se démarquent (généralement cloutés). Calcaire taillé en mur de fortification dans la partie sud.	Formations calcaires fracturées avec 2 niveaux principaux niveau 1 : calcaires marneux à débit centimétrique à décimétrique avec érosion différentielle niveau 2: calcaire massif fracturé à débit métrique avec érosion différentielle entre les bancs plus ou moins marquée	Carte 444 J5 - Argovien Calcaires marneux compacts en bancs épais de 1 à 2 m, séparés par des marnes	Hauteur variable avec un maximum de 25 à 30 m de haut Niveau 1: 0 à 8 m Niveau 2: 1 à 20 m	fracturation sub-verticale parallèle et perpendiculaire/oblique à l'affleurement pendage apparent sub-vertical	basculement glissement dièdre surplomb	Niveau 1: centaine de litre Niveau 2: plusieurs m3	Niveau 1: litre, dizaine à centaine de litre Niveau 2: plusieurs centaines de litre Ponctuellement colonne > m3	Variable sur le linéaire Elevé/modéré (pour atteinte élevée seulement car les colonnes se briseront ensuite en blocs inf. au m3) Modéré/modéré Faible/modéré Très Faible/élevé	Replat plus ou moins marqué en pied d'affleurement Merlon + rempart lion Bartholdi + fosse réception au sud	Chemin de ballade Parking en aval lion Bartholdi	Zone probablement nettoyée + nombreuses pierres inf. dizaine de litres	Béton projeté sur des horizons érodés + nombreux blocs/colonnes cloutées + filets plaqués ponctuellement Affleurement non visible derrière le Lion de Belfort. Photographies des purges de 2015 et 2017 utilisées pour estimer indice d'intensité
A2	Affleurement discontinu/ponctuel avec nombreux blocs/pierres pris dans le versant	Calcaire massif fracturé avec des bancs métriques. Localement calcaire marneux à débit irrégulier centimétrique à décimétrique Érosion différentielle provoquant des sous-cavages significatifs métriques à plurimétriques	Carte 444 J5 - Argovien Calcaires marneux compacts en bancs épais de 1 à 2 m, séparés par des marnes	Hauteur variable de 2 à 8 m	fracturation sub-verticale parallèle et perpendiculaire/oblique à l'affleurement	Surplomb basculement	Centaine de litres généralement Plusieurs m3 ponctuellement	Centaine de litres à supérieur au m3	Variable sur le linéaire Modéré/faible Faible/modéré Très faible/élevé	Zone de propagation en versant avec pente plus ou moins irrégulière selon les secteurs	Bâtiment Route Trottoir	Très nombreuses pierres inférieures à une dizaine de litre Plusieurs blocs d'une centaine de litres, un bloc d'environ 1 m3	Observation difficile du à la végétation
A3	Affleurement discontinu et déstructuré dont la hauteur est variable sur le versant	Calcaire massif fracturé à banc décimétrique à métrique voire à débit irrégulier dans certaine partie. Présence ponctuelle de sous-cavage. Une double corniche se délimite dans la partie sud	Carte 444 J5 - Argovien Calcaires marneux compacts en bancs épais de 1 à 2 m, séparés par des marnes	Hauteur variable de 3 à 17 m	Fracturation	Surplomb	Plusieurs centaines de litres	Dizaine de litres et ponctuellement centaine de litres	Faible/modéré Très faible/élevé	Replat marqué en pied de versant	Voie de circulation	Un bloc éboulé d'environ 300 litres dans la partie haute Intensité faible retenue car majorité des blocs inférieurs à 250 litres	RAS
A4	Affleurement vertical dû à un terrassement pour une construction proche	Calcaire marneux altéré à débit irrégulier centimétrique à décimétrique	Carte 444 j6 - Rauracien. Calcaires compacts, blancs crayeux surmontant des calcaires oolithiques	Hauteur de 4 à 5 m	Fracturation	Surplomb	Plusieurs dizaine de litres	Dizaine de litres	Très faible/élevé	Replat marqué en pied	Bâtiment	Nombreuses pierres en pied de corniches	RAS
A5	Affleurement vertical taillé surmonté par des murs de fortification Béton projeté sur des horizons érodés	Calcaire marneux altéré à débit irrégulier centimétrique à décimétrique avec érosion différentielle légère	Carte 444 j6 - Rauracien. Calcaires compacts, blancs crayeux surmontant des calcaires oolithiques	1 à 4 m de haut	Fracturation peu visible	surplomb	Dizaine de litres	Quelques litres	Très faible/modéré	Replat marqué en pied	Parking Route Chemin piéton	RAS	RAS
A6	Affleurement vertical taillé surmonté par des murs de fortification	Calcaire massif fracturé a débit métrique au nord	Carte 444 J5 - Argovien Calcaires marneux compacts en bancs épais de 1 à 2 m, séparés par des marnes	2 à 7 m	Fracturation perpendiculaire à l'affleurement et pendage oblique (N70 30S)	surplomb	Dizaine de litres	Quelques litres	Très faible/modéré	Replat marqué en pied	Parking	RAS	RAS
A7	Affleurement vertical taillé pris dans des murs de fortification à l'ouest et affleurement sans mur à l'est	Calcaire fracturé à débit décimétrique à métrique avec des horizons plus marneux décimétriques marneux altérés	Carte 444 j6 - Rauracien. Calcaires compacts, blancs crayeux surmontant des calcaires oolithiques	2 à 10 m	Fracturation perpendiculaire à l'affleurement et pendage oblique (N70 30S)	Surplomb Glissement dièdre	Plusieurs centaines de litres	Quelques dizaines de litres à centaine de litres	Faible/modéré Localement Modéré/modéré	Replat marqué en pied	Trottoir route	Un bloc instable de 560 litres à 2 m de haut proche de la passerelle piétonne	RAS

Zone de départ	Description	Lithologie	Information carte géologique au 1/50 000	Hauteur	Fracturation/pendage	Mécanisme de rupture	Volume total	Volume unitaire	Couple Indice intensité/activité	Profil versant	Atteinte estimée	Répartition des blocs éboulés	Commentaire
A8	Affleurement discontinu dans talus anthropique de part et d'autres de la route (aval de A7)	Calcaire massif fracturé avec un banc métrique marqué mis en exergue par une érosion différentielle provoquant un sous-cavage de ce banc	Carte 444 J5 - Argovien Calcaires marneux compacts en bancs épais de 1 à 2 m, séparés par des marnes	4 à 6 m	Fracturation perpendiculaire à l'affleurement et pendage oblique (N70 30S)	Surplomb Glissement dièdre	Plusieurs m3	Plusieurs centaines de litres à > m3	Élevé/modéré (au nord) Modéré/modéré (au sud)	Talus de 4 à 6 m de hauteur puis replat marqué	Trottoir route	RAS	Blocs clouées au nord
A9	Affleurement vertical en bord de chemin	Calcaire marneux à débit centimétrique à décimétrique avec érosion des horizons marneux puis calcaire massif fracturé avec présence de sous-cavages significatifs	Carte 444 J5 - Argovien Calcaires marneux compacts en bancs épais de 1 à 2 m, séparés par des marnes	4 à 7 m	Fracturation Présence d'une zone faillée Pendage apparent subhorizontal	Surplomb Glissement dièdre	Dizaine (à l'est) à plusieurs centaines de litres (à l'ouest)	Dizaine (à l'est) à centaine de litres (à l'ouest)	Modéré/faible Faible/modéré Très faible/élevé	Merlon/mur d'environ 2 à 3 m de haut sur le bord nord du chemin	Chemin	Nombreuses pierres inférieures à une dizaine de litre 3 blocs d'une centaine de litre	RAS
A10	Affleurement vertical en tête de versant au-dessus d'un chemin	Calcaire fracturé à débit irrégulier. Ponctuellement présence de zones faillées/déstructurées/circulation d'eau Localement présence de sous-cavages métriques à plurimétriques à la faveur de calcaire plus massif et d'intercalation de niveaux plus marneux	Carte 444 J5 - Argovien Calcaires marneux compacts en bancs épais de 1 à 2 m, séparés par des marnes	Hauteur variable de 4 à 16 m	Fracturation Présence de zones faillées/fracturées Circulation d'eau Pendage apparent subhorizontal	Surplomb Glissement dièdre	Dizaine de litres à plusieurs m3	Dizaine à centaine de litres avec ponctuellement des volumes de l'ordre du m3	Variable sur le linéaire Élevé/modéré (atteinte seulement du chemin) Modéré/faible Faible/modéré	Propagation sur le chemin puis dans le versant qui présente des pentes majoritairement régulière (irrégulières extrême sud)	Chemin Versant Bâtiment	Nombreuses pierres inférieures à une dizaine de litres, quelques blocs d'une centaine de litres et 2 blocs supérieurs au m3	Ponctuellement la végétation ne permet pas d'observer l'affleurement sur des linaires de longueur significative
A11	Affleurement vertical taillé surmonté par des murs de fortification	Calcaire massif fracturé à banc métrique taillé pour former des remparts	Carte 444 J5 - Argovien Calcaires marneux compacts en bancs épais de 1 à 2 m, séparés par des marnes	10 à 15 m	Fracturation verticale N120-130 et N10. Pendage apparent subhorizontal	Surplomb Glissement dièdre	Dizaine à plusieurs centaines de litres	Dizaine à centaine de litres	Variable sur le linéaire Faible/modéré Très faible/élevé	Replat marqué en pied de mur avec un pseudo merlon au nord du chemin	Chemin	Nombreuse pierres inférieures à une dizaine de litre et quelques blocs d'une dizaine à centaine de litre	Traces de départ récentes sur la corniche
A12	Affleurement vertical taillé surmonté par des murs de fortification	Calcaire massif fracturé seulement observé de loin	Carte 444 Principalement Carte 444 J5 - Argovien Calcaires marneux compacts en bancs épais de 1 à 2 m, séparés par des marnes Et j6 - Rauracien. Calcaires compacts, blancs crayeux surmontant des calcaires oolithiques	3 à 8 m	Fracturation et pendage peu visible (corniche rocheuse éloignée)	Surplomb Glissement dièdre	Plusieurs dizaines à centaine de litres	Dizaine à centaine de litres	Variable sur le linéaire Faible/modéré Très faible/élevé	Fosse entre 2 remparts	Chemin	Nombreuses pierres inférieures à une dizaine de litre.	RAS
A13	Affleurement discontinu et déstructuré dont la hauteur est variable sur le versant	Calcaire massif fracturé présentant un pendage aval avec des colonnes qui peuvent être délimitées par la fracturation ainsi que des sous-cavages dus à l'érosion différentielle lorsque que la hauteur de l'affleurement dépasse les 4-5 m	Carte 444 J5 - Argovien Calcaires marneux compacts en bancs épais de 1 à 2 m, séparés par des marnes	Hauteur variable de 2 à 10 m	Fracturation verticale et parallèle à l'affleurement Pendage aval	Surplomb Glissement dièdre Basculement	Centaine de litres à plusieurs mètres cubes	Dizaine de litres à plusieurs mètres cubes	Variable sur le linéaire Élevé/faible Élevé/modéré Modéré/faible	Versant naturel avec pente régulière	Champs en pied de versant	Très nombreuses pierres inférieures à une dizaine de litre, quelques blocs de plusieurs centaines de litre ainsi que la présence d'un bloc basculé d'environ 10m3	Probabilité » d'atteinte seulement faible dû à la pente d'environ 26°

Zone de départ	Description	Lithologie	Information carte géologique au 1/50 000	Hauteur	Fracturation/pendage	Mécanisme de rupture	Volume total	Volume unitaire	Couple Indice intensité/activité	Profil versant	Atteinte estimée	Répartition des blocs éboulés	Commentaire
A14	Affleurement profilé et broyé avec une pente d'environ 26°	Calcaire broyé en blocs d'une centaine de litres	Carte 444 j6 - Rauracien. Calcaires compacts, blancs crayeux surmontant des calcaires oolithiques	15 m	Non observable	glissement	Dizaine de litres à centaine de litres	Dizaine de litres à centaine de litres	Faible/modéré	Pente non naturelle. Replat marqué en pied de versant	Clôture d'un bâtiment industriel	RAS	Pente profilé à 26 degrés – atteinte faible sur l'ensemble de la zone
A15	Affleurement anthropique après terrassement	Calcaire marneux fracturé très altéré à débit centimétrique à décimétrique	Carte 444 j6 - Rauracien. Calcaires compacts, blancs crayeux surmontant des calcaires oolithiques	4 à 6 m	Fracturation Pendage apparent subhorizontal	Surplomb Glissement dièdre	Centaine de litres	Litre à dizaine de litres	Très faible/élevé	Replat marqué en pied de versant	Voie de circulation et parking	Nombreuses pierres en pied d'affleurement	RAS
A16	Affleurement anthropique de bord de route	Calcaire à banc pluridécimétrique discontinu qui ressort ponctuellement dans le versant	Carte 444 J1 a. Baiocien moyen et inférieur. Calcaires à polypiers ou oolithiques	Environ 4 à 10 m de haut	Fracturation Pendage apparent horizontal	Surplomb Glissement	Plusieurs centaines de litres	Dizaine à centaine de litres	Faible/modéré	Replat marqué en pied d'affleurement	Voie de circulation	Zone nettoyée	Observation difficile du au trafic routier et à l'absence de trottoir
A17	Affleurement principalement anthropique après terrassement/carrière. L'affleurement est majoritairement franc mais présente une partie discontinue et déstructurée dans la zone urbanisée ainsi qu'une partie prise dans les remparts au niveau du refuge SPA	Calcaire fracturé à débit principalement centimétrique/décimétrique. Affleurement plus ou moins altéré (sous-cavage au niveau des horizons plus marneux). Des colonnes instables se délimitent ponctuellement.	Carte 444 J1b - Baiocien supérieur. Calcaire oolithique avec intercalations marneuses à la base	Zone urbanisée 5 à 12 m Carrière/zone naturelle 5 à 20 m	Fracturation Pendage aval (N30 30SE) sur affleurement NE et oblique sur affleurement NO	Surplomb Glissement dièdre basculement	Dizaine de litres à plusieurs m3	Plusieurs dizaines de litres. Cependant un volume d'une centaine de litre est retenu compte tenu du débit en plaquette et de la fracturation	Variable sur le linéaire Faible/modéré Très Faible/élevé	Replat marqué en pied d'affleurement	Chemin de randonnée Jardin Bâtiment	Nombreuses pierres d'une dizaine de litre. Des colonnes plus instables d'un volume total de plusieurs centaines de litre au m3 ont été observées	Affleurement observé partiellement soit car pas d'accès à l'ensemble des propriétés (propriétaires absents) soit dû à la végétation
A18	Affleurement vertical principalement taillé pris ou surmontés par des murs de fortification	Calcaire massif fracturé à débit pluridécimétrique à métrique avec des horizons décimétriques plus marneux altérés	Carte 444 J1 a -b - Baiocien Calcaire principalement oolithique avec niveaux de calcaires à polypiers et marneux	De 2 à 8 m de haut	Fracturation Pendage oblique (N50 20SSEE)	Surplomb	Dizaine de litres à centaine de litres	Dizaine de litres à centaine de litres	Variable sur le linéaire Faible/modéré Très Faible/élevé	Replat marqué en pied d'affleurement	Trottoir route	Zone nettoyée	RAS
A19	Affleurement vertical surmonté par des murs de fortification en direction du NE	Calcaire fracturé à débit décimétrique à métrique avec des horizons décimétriques plus marneux altérés. Affleurement moins massif au centre.	Carte 444 Au nord et sud J1 a. Baiocien moyen et inférieur. Calcaires à polypiers ou oolithiques Au centre l6. Aalénien. Calcaires marneux	De 4 à 10 m de haut	Fracturation Pendage amont (N50 20SSEE)	Surplomb Glissement dièdre	Dizaine de litre à plusieurs m3	Dizaine de litre à plusieurs centaines de litre	Variable sur le linéaire Modéré/faible Faible/modéré Très faible/élevé	Replat marqué en pied d'affleurement	Place publique Route secondaire	Quelques blocs d'une centaine de litre et un bloc basculé d'environ 700 litres	Présence de filet plaqué et de tirant dans la partie sud. Affleurement peu visible dû à la végétation.
A20	Affleurement vertical taillé surmonté par des murs de fortification	Calcaire massif fracturé à banc métrique taillé pour former des remparts.	Carte 444 J1 a. Baiocien moyen et inférieur. Calcaires à polypiers ou oolithiques	De 4 à 6 m sur la partie jusqu'à 12 m sur la partie nord	Fracturation Pendage amont et pendage aval pour l'affleurement en aval du chemin	Surplomb Glissement dièdre	Dizaine de litres à plusieurs centaines de litres	Dizaine de litres à centaine de litres	Faible/modéré Très faible/élevé	Replat marqué en pied d'affleurement	Chemin	Nombreux blocs d'une dizaine de litres	RAS
A21	Affleurement vertical principalement taillée et surmonté par des murs de fortification	Calcaire plus ou moins massif fracturé à banc métrique taillé pour former des remparts avec horizon décimétrique altéré	Carte 444 J1b - Baiocien supérieur. Calcaire oolithique avec intercalations marneuses à la base	De 2 à 15 m de haut	Fracturation Pendage oblique	Surplomb	Dizaine de litre à plusieurs centaines de litres	Dizaine de litre à centaine de litres	Variable sur le linéaire Faible/modéré Très faible/élevé	Replat marqué en pied d'affleurement	Chemin	Nombreux blocs d'une dizaine de litre	Une partie de l'affleurement « non taillé » est peu visible dû à la végétation.

Zone de départ	Description	Lithologie	Information carte géologique au 1/50 000	Hauteur	Fracturation/pendage	Mécanisme de rupture	Volume total	Volume unitaire	Couple Indice intensité/activité	Profil versant	Atteinte estimée	Répartition des blocs éboulés	Commentaire
A22	Affleurement discontinu et déstructuré présent en tête de versant	Calcaire fracturé plus ou moins massif à débit irrégulier. Ponctuellement des masses instables importantes se délimitent	Carte 444 Principalement J1 a. Baiocien moyen et inférieur. Calcaires à polypiers ou oolithiques et l6. Aalénien. Calcaires marneux	Majoritairement de 2 à 4 m et ponctuellement jusqu'à une dizaine de mètres de haut	Fracturation Pendage amont	Surplomb Glissement	Dizaine de litre à plusieurs m3	Dizaine de litre à plusieurs m3	Variable sur le linéaire Élevé/faible Modéré/faible Faible/modéré Très faible/élevé	Versant naturel avec pente régulière	Pied de versant chemin	Nombreux pierre/blocs d'une dizaine de litre à la centaine de litre en pied d'affleurement et de versant	RAS
A23	Affleurement discontinu et déstructuré	Calcaire fracturé à débit principalement décimétrique avec un pendage fortement redressé d'environ N50 70SE	Carte 444 J1 a. Baiocien moyen et inférieur. Calcaires à polypiers ou oolithiques	Hauteur variable de 1 à 10 m de haut	Fracturation Pendage aval très redressé	Surplomb Glissement dièdre	Dizaine à plusieurs centaines de litre	Dizaine de litre à centaine de litre	Faible/modéré Ponctuellement modéré/faible	Versant naturel avec pente régulière	Pied de versant	Nombreux pierre/blocs d'une dizaine de litre à la centaine de litre en pied d'affleurement et de versant. Quelques blocs de plusieurs centaines de litre et un bloc de 3 m3 en pied d'affleurement	Elancement important des blocs qui ne favorise pas une forte propagation. Pierres/blocs
A24	Affleurement vertical anthropique	Calcaire massif fracturé à débit décimétrique avec passage marneux	Carte 444 E – Éboulis mais potentiellement j1 a. Baiocien moyen et inférieur. Calcaires à polypiers ou oolithiques	2 à 4 m de haut	Fracturation Pendage oblique/aval	Surplomb Glissement dièdre	Plusieurs centaines de litre	Centaine de litre	Faible/modéré	Replat marqué en pied d'affleurement	Parking Bâtiment	RAS	RAS
A25	Affleurement vertical – ancien front de taille de carrière	Calcaire à banc massif décimétrique à métrique avec passage centimétrique. Ponctuellement des masses instables significatives se délimitent	Carte 443 j2C – Bajocien moyen Calcaires à polypiers, compact ou oolithiques	Hauteur variable de de 10 à 25 m pour la carrière et de 2 à 10 m de haut pour la grotte de Cravanche et chemin menant à la carrière	Fracturation Pendage amont/aval/oblique respectivement pour les corniches orientées nord/sud/est	Surplomb Glissement	Plusieurs centaines de litre à plusieurs m3	Centaine à plusieurs centaines de litres	Variable sur le linéaire Modéré/modéré Faible/modéré Très faible/élevé	Replat marqué en pied d'affleurement	Zone non accessible (ancienne décharge) Entrée de la grotte touristique de Cravanche	Nombreuses pierres d'une dizaine de litre. Quelques blocs d'une à plusieurs centaines de litres ont été observés	Observation difficile du à la végétation sur certain linéaire
A26	Affleurement vertical en tête de versant	Calcaire fracturé à débit décimétrique à pluridécimétrique. Ponctuellement des masses instables significatives se délimitent	Carte 443 j2C – Bajocien moyen Calcaires à polypiers, compact ou oolithiques	Hauteur de 7 à 8 m de haut	Fracturation Pendage apparent horizontal	Surplomb Glissement dièdre	Plusieurs centaines de litres Ponctuellement plusieurs m3	Centaine de litre	Faible/modéré	Versant naturel avec pente régulière	Pied de versant	Pierres/blocs observés en pied de versant.	Observation difficile du à la végétation
A27	Affleurement discontinu et déstructuré épousant la pente du versant	Calcaire fracturé à banc décimétrique à pluridécimétrique pris dans le versant	Carte 443 Principalement j2C – Bajocien moyen Calcaires à polypiers, compact ou oolithiques Au sud : J2V - Bajocien inférieur Calcaires bioclastiques et/ou entroques	Hauteur variable de de 1 à 10 m au nord et de 1 à 2 m au sud	Fracturation Pendage apparent horizontal	Surplomb Glissement	Centaine de litres	Dizaine à centaine de litre	Faible/modéré	Versant naturel avec pente régulière	Pied de versant	Pierres/blocs d'une dizaine à centaine de litre observés en pied de versant	Observation difficile car affleurement plus ou moins pris dans le versant

Zone de départ	Description	Lithologie	Information carte géologique au 1/50 000	Hauteur	Fracturation/pendage	Mécanisme de rupture	Volume total	Volume unitaire	Couple Indice intensité/activité	Profil versant	Atteinte estimée	Répartition des blocs éboulés	Commentaire
A28	Affleurement ponctuel et discontinu	Bancs métriques de calcaire sur horizon décimétrique marneux altéré qui ressortent en tête de versant	Carte 443 j2C – Bajocien moyen Calcaires à polypiers, compact ou oolithiques	De 1 à 3 m de haut	Fracturation Pendage apparent horizontal	Surplomb Glissement	De l'ordre du m3	De l'ordre du m3	Modéré/faible	Versant naturel avec pente régulière	Milieu/Pied de versant	Un bloc de l'ordre du m3 en pied d'affleurement en tête de versant	Élancement important des blocs qui ne favorise pas une forte propagation. Pierres/blocs
A29	Affleurement vertical en bord de chemin/zone de captage	Calcaire fracturé et altéré à banc décimétrique à pluri décimétrique avec passage marneux altéré	Carte 443 j2V - Bajocien inférieur Calcaires bioclastiques et/ou entroques Et j1 Aalénien calcaires roux divers	Variable sur le linéaire de 2 à 6 m de haut	Fracturation Pendage apparent horizontal	Surplomb Glissement	Plusieurs centaines de litres	Dizaine à centaine de litre	Faible/modéré	Replat marqué en pied d'affleurement	Route Zone de captage	Pierres/blocs de plusieurs dizaines de litre observés en pied d'affleurement	Observation difficile du à la végétation
A30	Affleurement vertical de bord de route ou en versant	Calcaire altéré et fracturé à débit pluridécimétrique	Carte 443 j1 Aalénien calcaires roux divers	De 2 à 4 m de haut	Fracturation Pendage aval	Surplomb Glissement	Plusieurs dizaine de litres au m3	Dizaine à plusieurs centaines de litre	Variable sur le linéaire Modéré/modéré Faible/modéré	Replat marqué en pied d'affleurement ou Versant naturel avec pente régulière	Route Chemin	Nombreuse pierres et 2 blocs d'une centaine de litre ainsi qu'un bloc instable d'environ 500 litres	RAS
A31	Affleurement vertical anthropique après terrassement	Calcaire massif fracturé à débit irrégulier centimétrique à pluridécimetrique	Carte 443Au nord : j2C – Bajocien moyen Calcaires à polypiers, compact ou oolithiques Au sud : j2V - Bajocien inférieur Calcaires bioclastiques et/ou entroques	De 4 à 12 m de haut	Fracturation et pendage oblique	Surplomb	Centaine de litres	Dizaine à centaine de litres	Faible/modéré	Replat marqué en pied d'affleurement	Garage Parking mosquée	Zone nettoyée	RAS
A32	Affleurement anthropique de bord de route/piste forestière	Schiste à schistosité centimétrique à décimétrique avec fréquemment des intrusions granitoïdes plus indurées formant des affleurements plus massifs Ou Affleurement composé principalement d'intrusion de granitoïdes avec possibles passages de schistes très déformés	Carte 443 D7s -Dévonien supérieur Schistes du Salbert : épaisse série gréseuse et pélitique Ou Q –Dinantien Filons de quartzite	Variable sur le massif de 1 m à 10 m	Fracturation Schistosité	Surplomb Glissement dièdre	Dizaine de litres à centaine de litres	Dizaine de litre à centaine de litres	Variable sur le massif Modéré/modéré Faible/modéré Très faible/élevé	Replat marqué route/piste	Piste route	Nombreuses pierres d'une dizaine de litres en pied d'affleurement, plus rarement des blocs d'une centaine de litres sont observables	Seulement les routes et pistes forestières reconnues sur le massif du Salbert (inventaire non exhaustif)
A33	Affleurement naturel plus ou moins discontinu et déstructuré avec des passages plus massifs	Intrusion de granitoïdes fracturés indurés avec possibles passages de schistes voire rarement des schistes très déformés proche de l'anatexie	Carte 443 Généralement cartographié en D7s -Dévonien supérieur Mais correspond à Q –Dinantien Filons de quartzite	Variable sur le massif de 2 m à 15 m	Fracturation	Surplomb Glissement dièdre	Centaine de litres à plusieurs m3	Centaine de litres à plusieurs m3	Variable sur le massif Faible modéré Modéré/modéré Élevé/faible	Versant naturel avec pente régulière	Chemin Parcours santé du Salbert Piste Route	Nombreux blocs de la centaine de litre au m3 dans le versant et en pied de versant	Seulement les routes et pistes forestières reconnues sur le massif du Salbert (inventaire non exhaustif). Parcours sportif du Salbert impacté

Illustration 44 : Description des zones de départ et défintion d'un ou des scénario(s) de référence pour chaque zone homogène de départ.

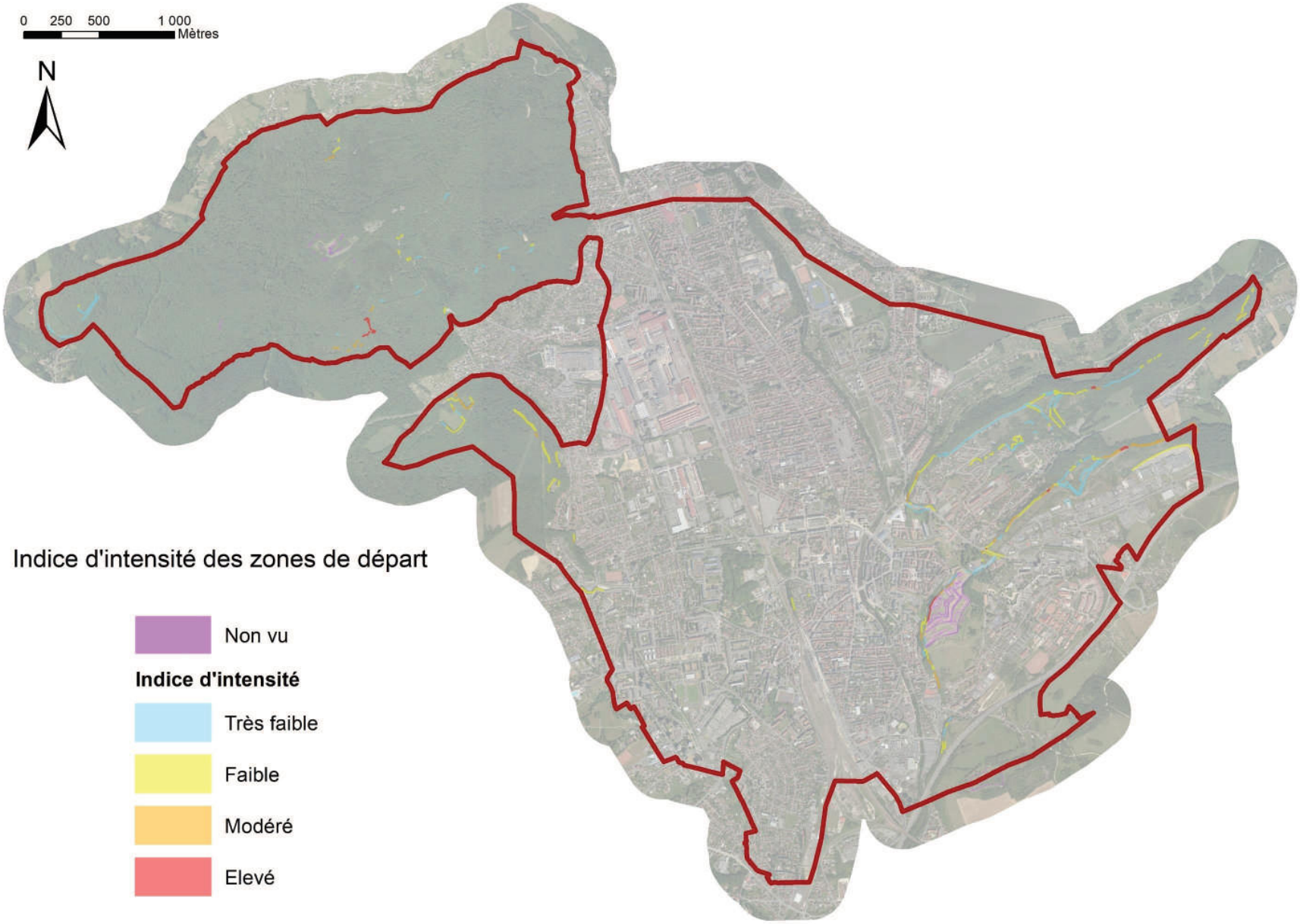


Illustration 45 : Indice d'intensité pour chaque zone de départ.

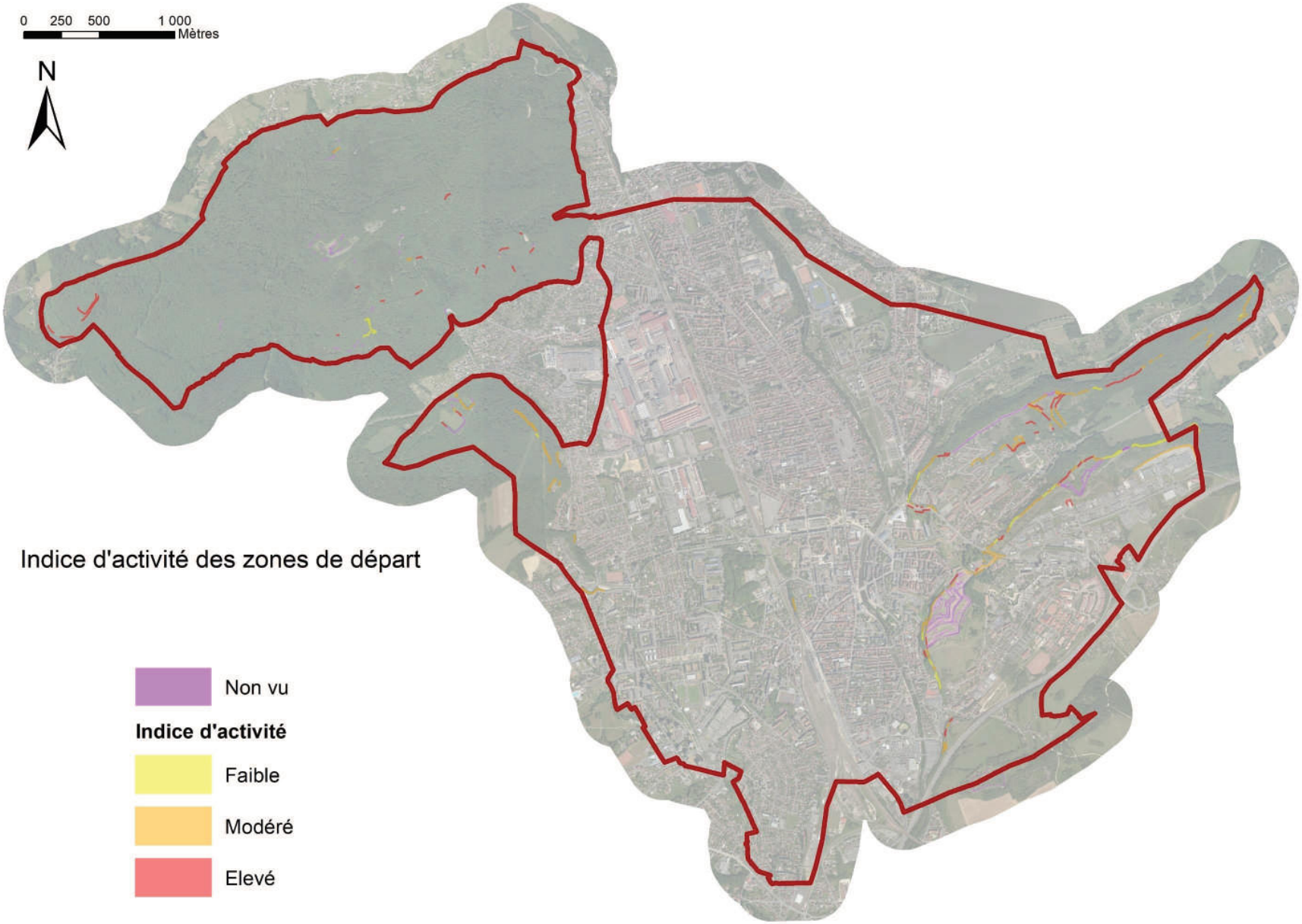


Illustration 46 : Indice d'activité pour chaque zone de départ.

6.5. ÉTAPE N° 4 - ÉVALUATION DE LA PROPAGATION (PROBABILITÉ D'ATTEINTE)

La probabilité d'atteinte caractérise **la propagation des éléments rocheux en versant**. Le volume rocheux du scenario peut se propager plus ou moins loin en fonction :

- des caractéristiques du versant étudié (pente, présence d'obstacles, nature du sol...) ;
- des caractéristiques des blocs (volume, forme…) ;
- du mécanisme de rupture.

La détermination de la probabilité d'atteinte est basée sur les retours d'expérience d'évènements passés et sur des modélisations plus ou moins complexes, validées ou « corrigées » par l'expertise de terrain. Selon les cas on définit les chemins probables des trajectoires de chutes de blocs (calculs déterministes en 2D ou 3D de trajectographie intégrant les volumes et forme 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 d'atteinte de blocs en tout point du territoire.

Les modèles déterministes à base physique sont complexes à mettre en œuvre et nécessitent d'être alimentés par de nombreuses données quantitatives. Cependant, lors de la réalisation de cartographie d'aléa, ces données sont rarement disponibles et ces outils sont réservés à des espaces restreints présentant des enjeux particuliers (guide général PPRn).

Dans le cadre de cartographie d'aléa à l'échelle d'un territoire communal, la **méthode empirique dite de « la ligne d'énergie »** (voir section suivante) est une méthode appropriée pour l'évaluation de la propagation de l'aléa chute de blocs en versant.

Il est important de préciser 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 à l'exception au cas par cas d'éléments topographiques comme les merlons ou les fosses de réception. Ces éléments sont donc considérés comme transparents à la propagation des évènements de chute de blocs conformément aux recommandations nationales en la matière.

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

La méthode de la « ligne d'énergie » est une méthode empirique développée par HEIM A. en 1932 qui permet d'estimer à partir d'une zone de départ la localisation du point d'arrêt maximal probable d'un projectile. Cette méthode empirique, qui trouve son fondement dans les phénomènes de grandes ampleurs, montre des résultats probants dans le cas de chute de blocs.

Cette méthode repose sur un principe simple et trivial : un bloc ne peut progresser sur une pente que si celle-ci est suffisamment raide :

- si la pente est supérieure à un angle limite β, il accélère ;
- si elle est inférieure à β, il ralentit.

En partant de ce constat, un bloc peut aller d'une zone de départ A jusqu'à B, point d'intersection du relief avec une ligne imaginaire partant de la zone de départ et formant un angle β avec l'horizontale (Illustration 47). Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β, l'angle de la ligne d'énergie.

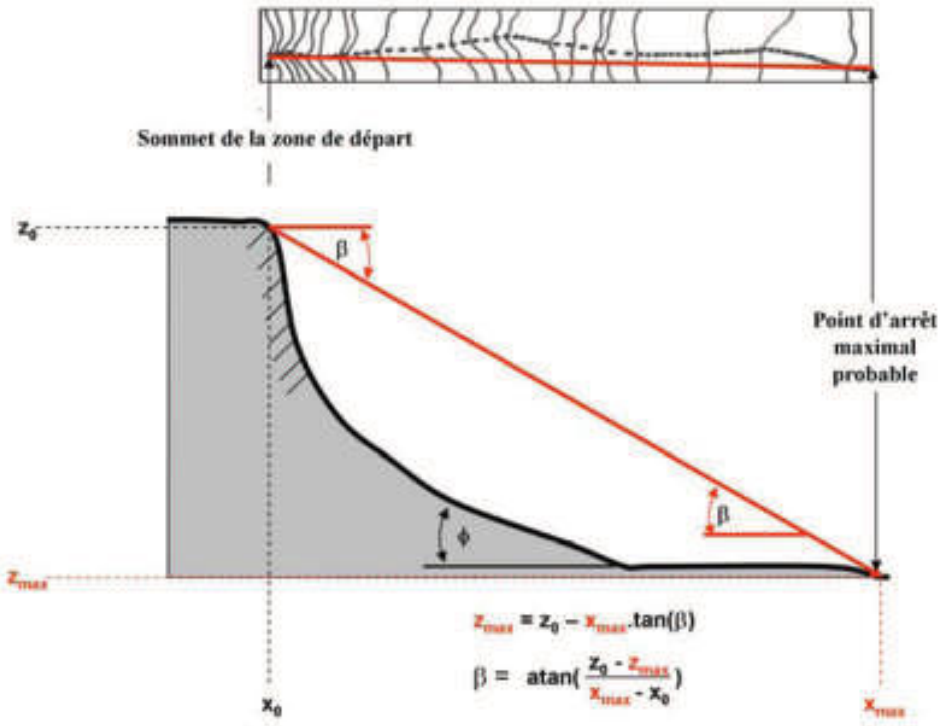


Illustration 47 : Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β (Berger, 2009b).

La méthode des lignes d'énergie permet de définir l'extension prévisible des emprises de propagation par le choix de valeurs d'angles d'énergie en fonction notamment de la morphologie des sites étudiés.

La délimitation des enveloppes de propagation s'appuie sur les résultats du logiciel CONEFALL©, sur l'application de la méthode de la ligne d'énergie sur des profils topographiques ponctuels et sur les reconnaissances de terrain.

Le logiciel CONEFALL© permet de tracer le contour des enveloppes de propagation en calculant l'intersection des lignes d'énergie avec la topographie. En introduisant une dispersion latérale des propagations des phénomènes de chutes de blocs, le logiciel fournit une représentation en 3D des enveloppes de propagation sous forme de cône de propagation (Illustration 48, méthode aussi dite des cônes).

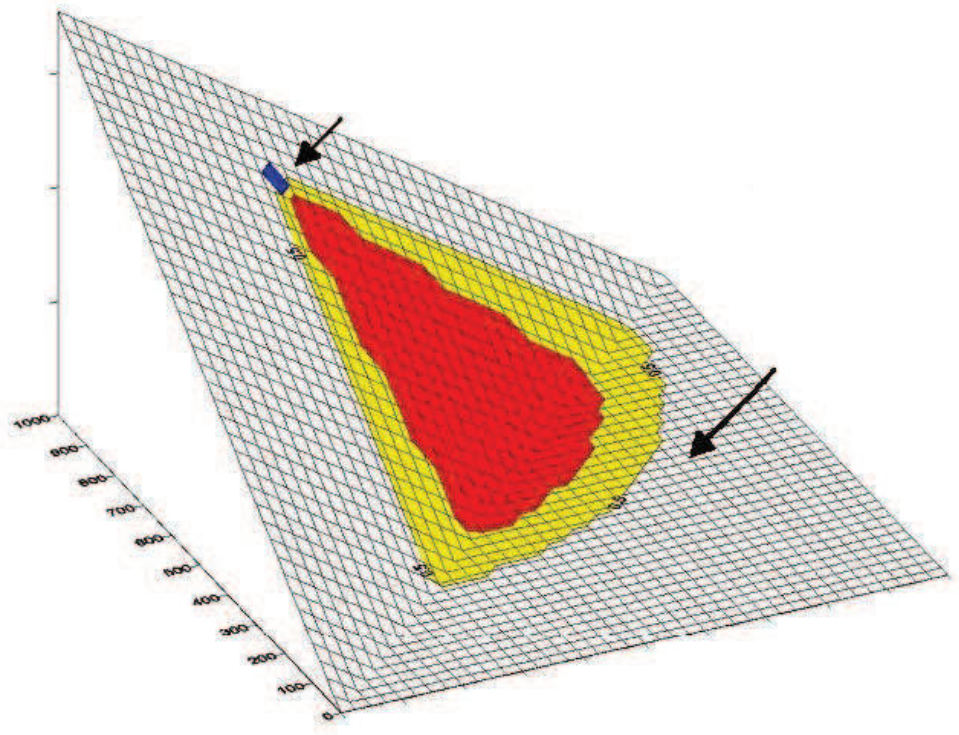


Illustration 48 : Représentation schématique de la méthode de cônes (d'après Jaboyedoff et Labiouse, 2011).

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

- la méthode fait l'hypothèse que l'angle d'énergie est constant tout le long du trajet du bloc, ce qui revient à faire l'hypothèse que la perte d'énergie se fait de manière continue au cours de la propagation. Or, dans la réalité, la perte d'énergie varie au cours de la propagation en fonction du relief, de la lithologie des terrains de réception, etc. ;
- la méthode est uniquement basée sur le profil topographique du versant et ne prend pas strictement en compte les caractéristiques des blocs (volume, forme…), le mécanisme de rupture ainsi que la nature du sol au niveau de la zone de propagation. Dans l'absolu, pour des scénarios de rupture différents on pourra être amené à proposer des valeurs d'angles variables, dans un même contexte géomorphologique. La précision de l'atteinte est par conséquent conditionnée par la résolution et la qualité du MNT utilisé.

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 évènement.

La difficulté de la mise 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 retenus pour qualifier la propagation est évalué en fonction :

- de l'expertise du site (campagne terrain, phénomènes historiques, répartition des blocs éboulés, similarité avec d'autres cas d'études, dire d'expert…) ;
- des plages indicatives de valeur d'angle proposées par le guide MEZAP (à paraitre) en fonction des principaux types de profil topographique des versants (Illustration 49) ;

- de l'analyse probabiliste et de la relation statistique mise en évidence entre l'aire normalisé 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 de 2 758 évènements de chute de blocs (Illustration 50, Rapport BRGM RP-66589-FR).

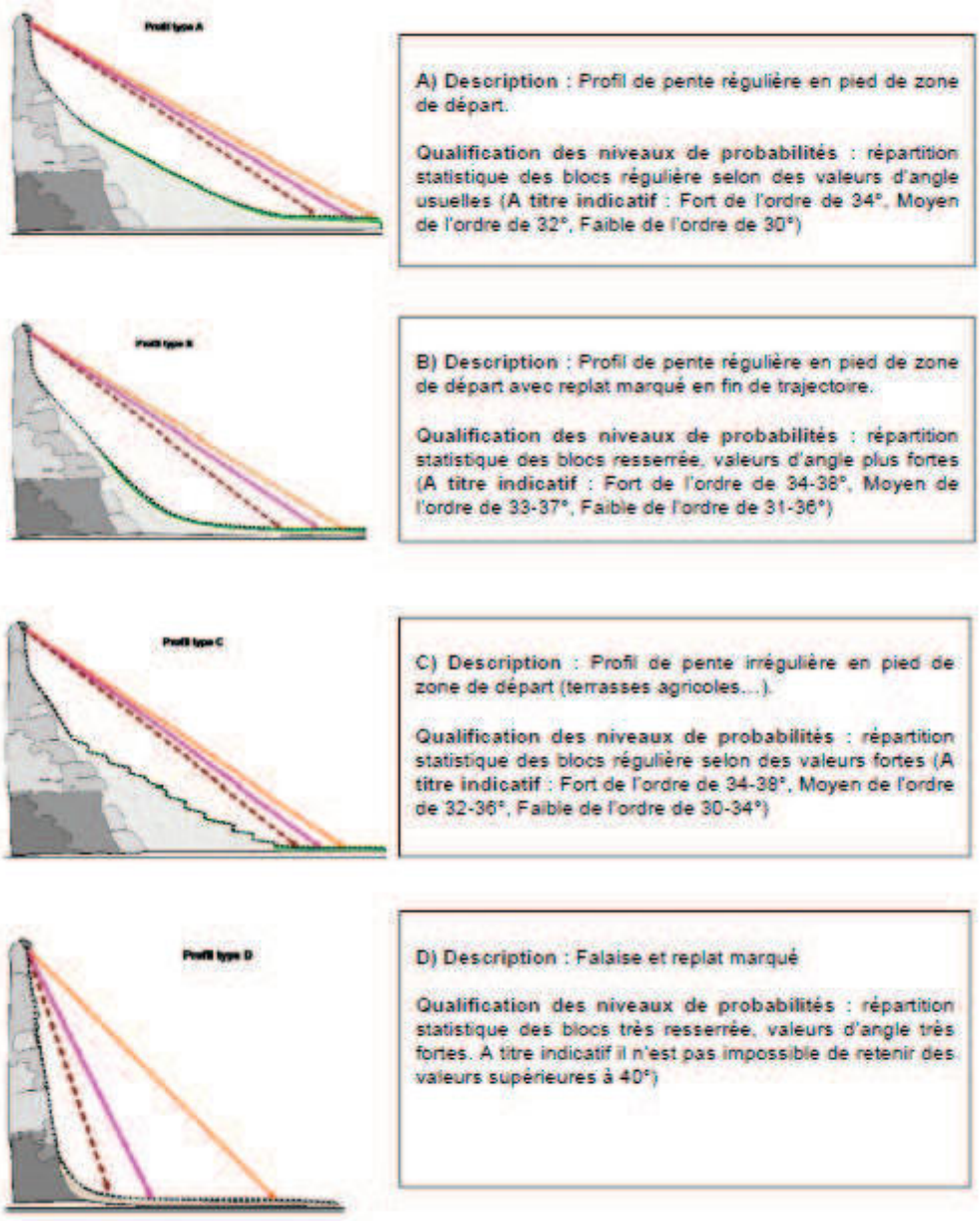


Illustration 49 : Exemples de modulation (à titre indicatif) apportées sur les intervalles d'angles de la méthode de la oigne d'énergie en fonction des principaux types de profil topographique des versants (orange/rose/rouge pointillé : niveaux de probabilité d'atteinte forte / moyenne /faible) (source MEZAP, à paraître).

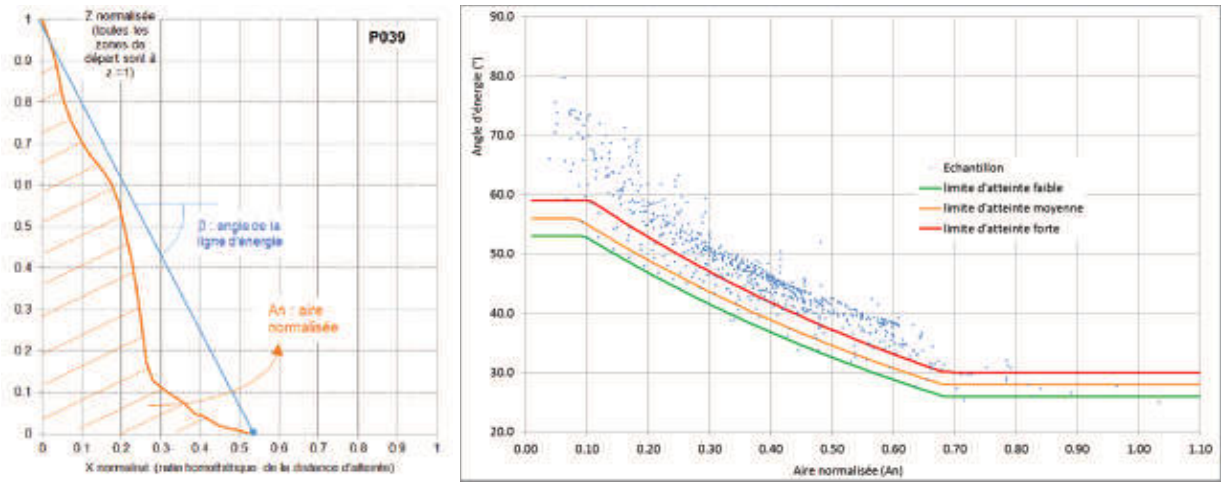


Illustration 50 : Seuils de valeurs d'angle de la méthode de la ligne d'énergie en fonction de l'aire normalisée d'un versant (rapport BRGM RP-66589-FR).

6.5.2. Cartographie de la probabilité d'atteinte

La mauvaise représentativité du terrain du MNT LIDAR pose un problème majeur à la mise en œuvre de façon pertinente et appropriée de la méthode de la ligne d'énergie qui se base uniquement sur cette source de donnée.

Par conséquent, pour cette étude, l'évaluation de l'indice de probabilité d'atteinte a été principalement évaluée à dire d'expert et en s'appuyant à titre indicatif sur les résultats de la méthode de la ligne d'énergie. L'estimation de la probabilité d'atteinte présente une incertitude significative et a été évaluée en intégrant une zone tampon sécuritaire afin de palier la faible représentativité du MNT.

La probabilité d'atteinte a été évaluée suivant deux approches différentes selon que la corniche se situe :

- dans un versant étendu avec des distances de propagation potentiellement importantes (type A, B et C de l'Illustration 49) ;
- de type sub-vertical avec un replat marqué avec des distances de propagation limitées (type D de l'Illustration 49, principalement corniche rocheuse anthropique de bord de route).

Corniche rocheuse en versant

La méthode de la ligne d'énergie n'a pas pu être mise en œuvre spatialement en 3D à l'aide du logiciel CONEFALL mais seulement sur des profils topographiques 2D qui ont été corrigés approximativement et de façon manuelle afin de tenir compte des écarts entre le MNT et les observations de terrain. Cinquante-deux profils topographiques ont été tracés et rectifiés ainsi à partir du MNT LIDAR au pas de 1 m.

Pour chaque profil approximativement corrigé, la relation statistique entre valeur de l'angle de la méthode de la ligne d'énergie et aire normalisée du profil topographique a été caractérisée ce qui a permis d'estimer pour chacun des profils les probabilités d'atteinte faible, modéré et élevé (Illustration 51). Compte-tenu de la faible qualité du MNT, les résultats ont été pris avec précaution et seulement à titre indicatif.

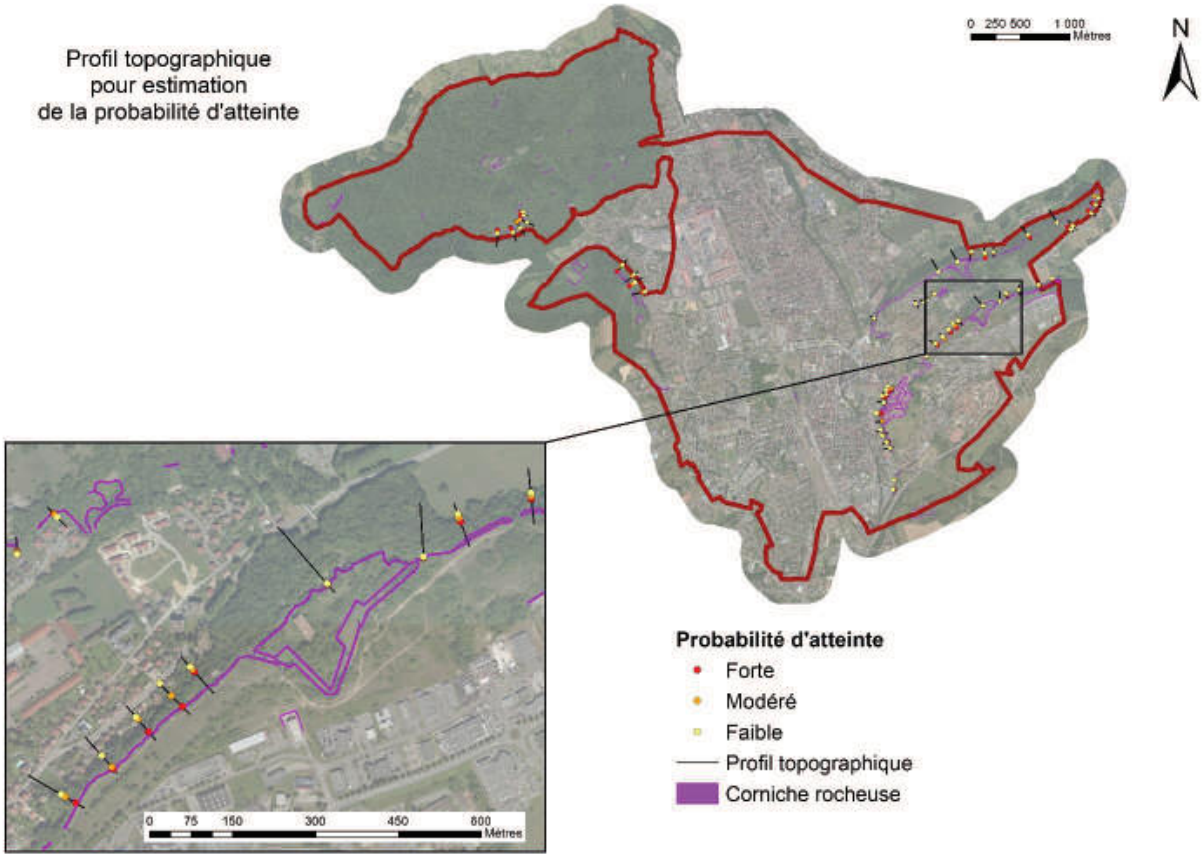


Illustration 51 : Profils topographiques réalisés et probabilités d'atteinte estimées avec la relation statistique entre aire normalisé des profils et angle de la méthode de la ligne d'énergie.

En complément, l'approche dite experte pour la caractérisation de la probabilité d'atteinte s'est également basée entre autre sur la répartition des blocs éboulés en versant observés lors des campagnes de terrain, la forme des blocs, les mécanismes de rupture ainsi que les ruptures de pentes. La cartographie finale des emprises de propagation intègre une interprétation à dire d'expert pour rendre compte de la continuité des propagations à l'échelle de restitution visée.

Corniche rocheuses sub-verticales avec un replat marqué en pied

Les valeurs d'angle de 40°, 50° et 60° ont été utilisées respectivement pour estimer les probabilités d'atteinte faible, modéré et élevé. Compte-tenu du rendu de la carte à l'échelle 1/5 000 les distances ont été simplifiées au pas de 5 m (Illustration 52). Ces résultats ont été utilisés à titre indicatif et adaptés selon le terrain et la précision de localisation de la corniche.

	Probabilité atteinte théorique(m)			Probabilité d'atteinte retenue compte-tenue de la résolution cartographique1/5 000 (m)		
Hauteur (m)	Forte (60°)	Modéré (50°)	Faible (40°)	forte	modéré	faible
2	1.2	1.7	2.4	5		
3	1.7	2.5	3.6	5		
4	2.3	3.4	4.8	5		
5	2.9	4.2	6.0	6		
6	3.5	5.0	7.2	7		
7	4.0	5.9	8.3	8		
8	4.6	6.7	9.5	5	10	
9	5.2	7.6	10.7	5	11	
10	5.8	8.4	11.9	6	12	
11	6.4	9.2	13.1	6	13	
12	6.9	10.1	14.3	7	14	
13	7.5	10.9	15.5	8	16	
14	8.1	11.7	16.7	8	17	
15	8.7	12.6	17.9	9	18	
16	9.2	13.4	19.1	9	14	19
17	9.8	14.3	20.3	10	15	21
18	10.4	15.1	21.5	10	15	22
19	11.0	15.9	22.6	11	16	23
20	11.5	16.8	23.8	12	17	24

Illustration 52 : Gamme de distance de probabilité d'atteinte pour les corniches subverticales (utilisée à titre indicatif).

La cartographie de la probabilité d'atteinte est affichée en Illustration 53.



Illustration 53 : Cartographie des zones de propagation des phénomènes de chute de blocs.

6.6. ÉTAPE N° 5 – ÉVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA CHUTE DE BLOCS

L'aléa chute de blocs résulte du croisement de l'indice d'intensité et de la probabilité d'occurrence (Illustration 39) qui est-elle même la résultante du croisement de l'indice d'activité et de la probabilité d'atteinte (Illustration 38). La carte d'aléa brute produite d'après le croisement de ces différents indices est ajustée à dire d'expert, notamment d'après les investigations de terrain, afin de produire une cartographie homogène et réaliste. Une zone tampon de sécurité (principe de précaution) a également été ajoutée dont l'ampleur est adaptée en fonction de la précision de la cartographie et de l'étendu de la zone de propagation.

6.6.1. Phénomène de recul des corniches

Le phénomène de recul des corniches rocheuses correspond à un déplacement en amont des corniches rocheuses, suite à des évènements répétés de chute de blocs ou d'éboulement en masse (Illustration 54). L'évaluation de l'aléa de recul des corniches rocheuses a été considéré en général de façon forfaitaire à 4 m de distance sur l'ensemble du territoire (adaptée en fonction de la précision de la cartographie) considérant qu'aucun phénomène d'éboulement en masse pouvant provoquer des reculs supérieurs n'est répertorié sur le secteur.

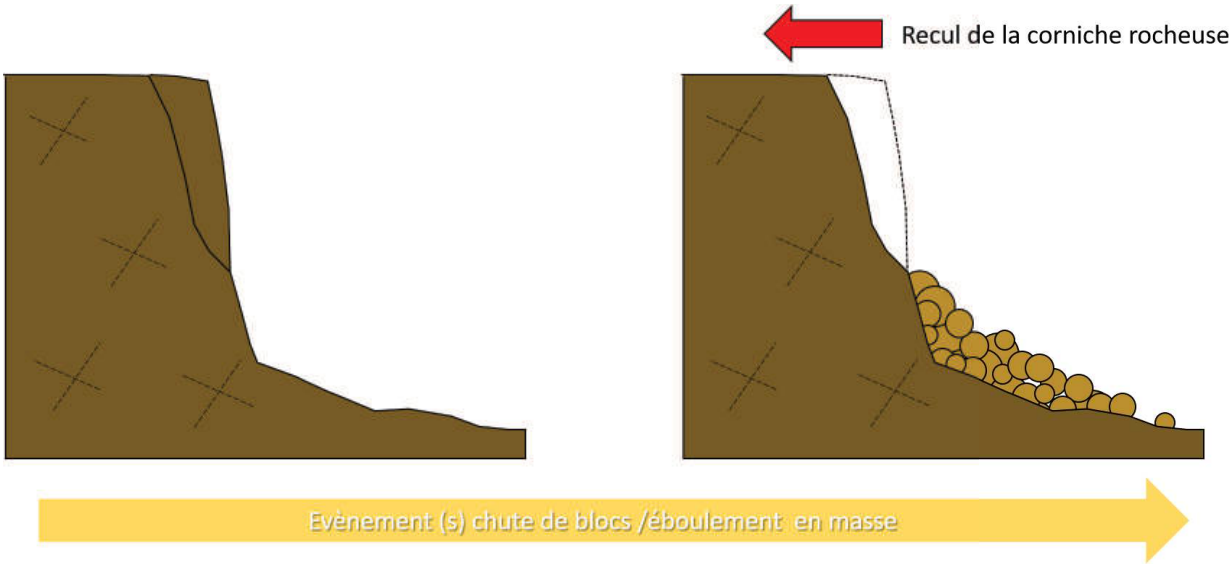


Illustration 54 : Représentation schématique du phénomène de recul de corniches rocheuses.

6.6.2. Aléa remobilisation de blocs en versant

La cartographie de l'aléa remobilisation de blocs prend en compte la problématique de remobilisation éventuelle des blocs unitaires partiellement enveloppés dans de la terre et/ou qui seraient posés à la surface de pentes raides.

D'après les investigations de terrain, l'aléa rocheux sur le territoire de la ville de Belfort est localisé principalement dans les versants avec une pente supérieure à 20-25° en contexte géologique calcaire (éboulis, formations en place déstructuré à l'affleurement avec une hauteur faible…). Aucun aléa rocheux n'a été observé sur le massif du Salbert où les formations du schiste du Dévonien affleurent principalement. L'ensemble des versants n'a pu être couvert par les

investigations de terrain et les secteurs investigués présentant ce type de phénomène ont été extrapolés pour les contextes géomorphologiques similaires.

Un aléa remobilisation de blocs a par conséquent été caractérisé sur le territoire de Belfort sur les versants naturels (les zones de fortes pentes dues aux aménagements anthropiques n'ont pas été caractérisées) présentant des pentes supérieures à 20-25° sur des surfaces significatives en contexte calcaire. L'aléa rocheux présente une propagation limitée généralement cantonnée aux pentes supérieures à 20°. C'est pourquoi la propagation de l'aléa remobilisation de blocs n'a pas été caractérisée. Pour les zones d'aléa remobilisation un niveau d'aléa faible a été qualifié sur l'ensemble du territoire communal (vitesse de propagation faible et volumes majoritairement observés de faible intensité et donc énergie destructrice généralement associée faible).

L'emprise cartographique de l'aléa remobilisation est basée sur les pentes issues du MNT du levé LIDAR 1 m fourni par la commune. Par conséquent, les incertitudes évoquées dans les paragraphes précédents concernant la qualité du MNT LIDAR s'appliquent également pour la précision de la cartographie de l'aléa remobilisation.

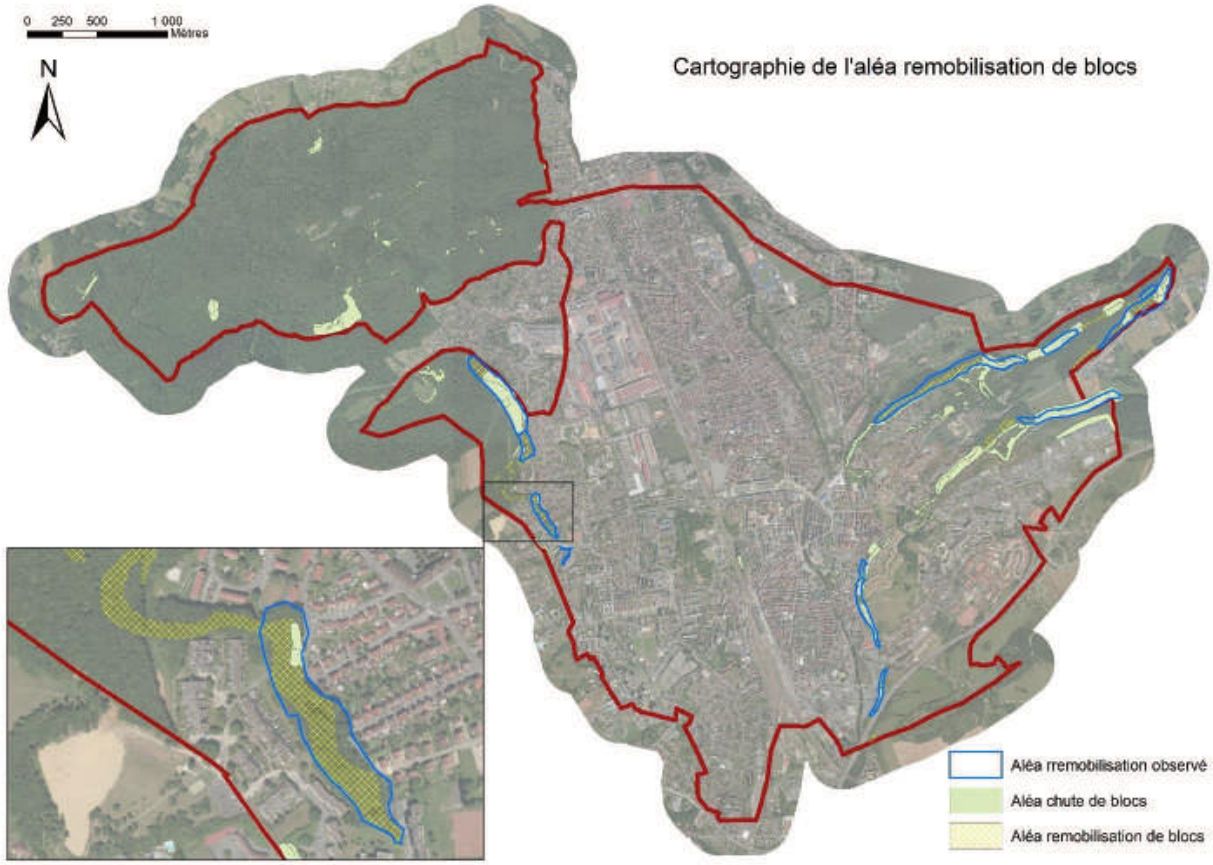


Illustration 55 : Cartographie de l'aléa remobilisation de blocs.

La cartographie de l'aléa « Chute de blocs » sur la commune de Belfort est présentée en Illustration 56 et en Annexe 3, au format A3 et en planche hors-texte au format A0. L'aléa a été classé en quatre classes allant de « Nul » à « Fort ». Le zonage d'aléa chute de blocs est discontinu et ponctuel à l'échelle du territoire communale de Belfort et est principalement localisé sur les versants des reliefs (massif du Salbert, massif du Mont, citadelle de Belfort, fort et bois de la Miotte, fort de la Justice et bois des fourches).

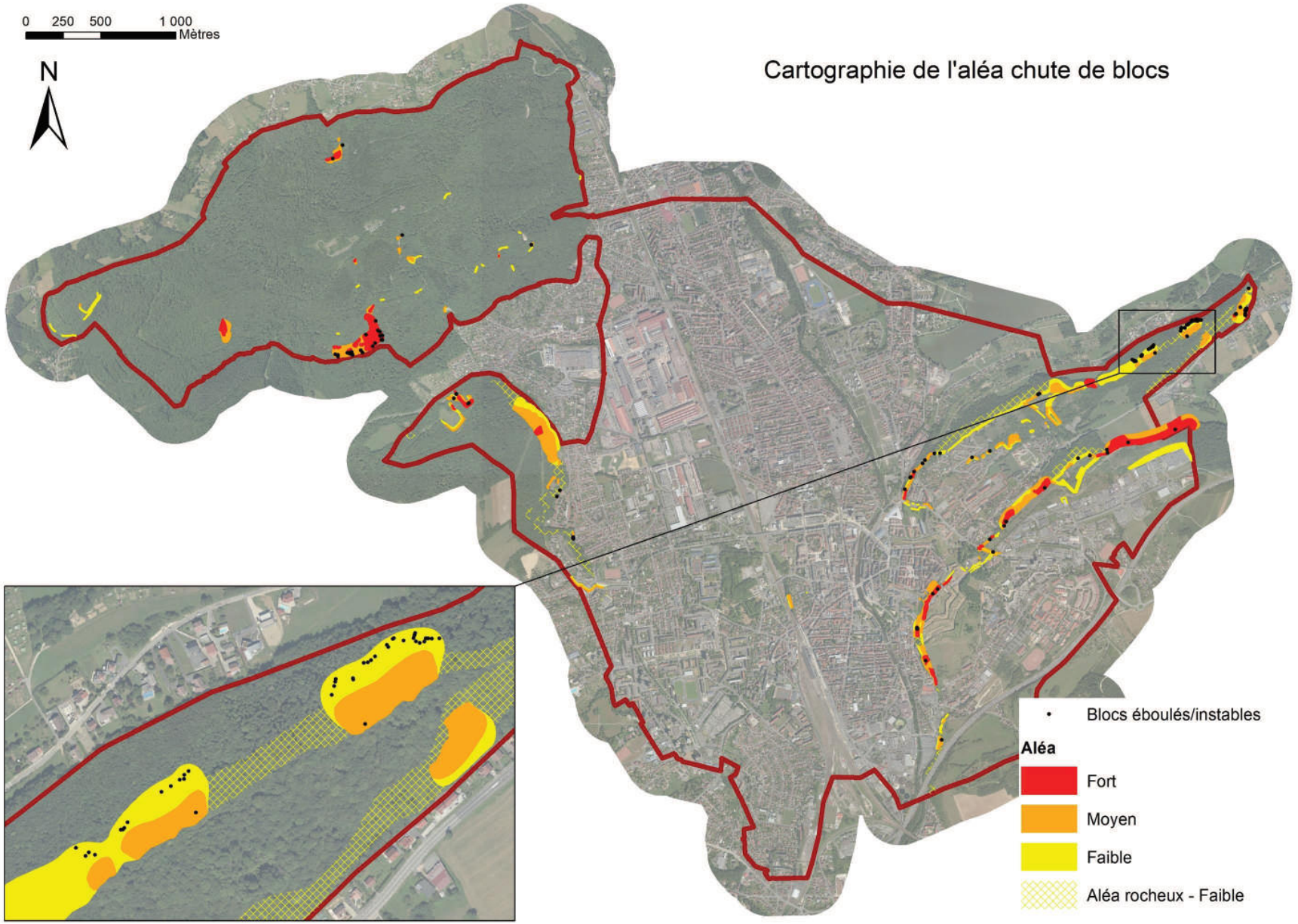


Illustration 56 : Cartographie de l'aléa chute de blocs.

7. Pré-analyse de risque : croisement des aléas et du bâti

Une pré-analyse de risque permet d'identifier des secteurs prioritaires pour la réalisation de travaux de mise en sécurité. Cette analyse a été traitée de façon indépendante pour chacun des aléas sur la base d'une méthode commune.

7.1. MÉTHODE

Théoriquement, le risque correspond au croisement du niveau d'aléa et de la vulnérabilité des enjeux. Dans le cadre du projet dont l'objectif est de prendre en compte les risques naturels dans le cadre de l'établissement d'un PLU, l'analyse se borne à la hiérarchisation du **risque pour les constructions** uniquement.

La vulnérabilité est la mesure des dommages de toutes sortes (matériels et humains) rapportés à l'intensité de l'aléa. La vulnérabilité d'un enjeu caractérise la capacité de résistance à un aléa d'une d'intensité donnée (fondation, structure, ouverture…). L'étude de vulnérabilité est donc avant tout basée sur l'analyse des enjeux (nature des constructions, aptitude à résister, population exposée, valeur financière, nature de l'activité, etc.) et de leur comportement face à tel ou tel aléa, afin d'apprécier le coût potentiel de la survenance de l'aléa considéré. L'évaluation de la vulnérabilité peut également intégrer des notions fonctionnelles (établissement recevant du public ou bâtiment industriel par exemple).

La définition de la vulnérabilité de la structure du bâti par exemple est fonction des dispositions constructives (matériaux utilisés, fondation, agencement des bâtiments, ouverture, régularité des bâtiments en élévation…) et du phénomène attendu (pour cette étude effondrement/affaissement, glissement de terrain et chute de blocs).

Enfin l'analyse de risque peut en complément distinguer les dommages directs (destruction de bâti / coupure de route (partielle, totale…) / victimes le cas échéant) et les dommages indirects qui résultent notamment des pertes de fonction (quelles conséquences d'une coupure de route sur des interventions sanitaires ? quels couts liés à la mise en place de déviations ? quelle perte d'activité économique si ruine de l'accès à une usine ? …).

Par conséquent, une analyse fine du risque est complexe et nécessite de nombreuses données. Ne disposant pas de ces informations, l'analyse de vulnérabilité est réduite à sa plus simple expression en considérant uniquement les dommages directs (sans en distinguer la nature) et la présence des enjeux (in fine considérés comme « vulnérables ») comme soumis aux aléas décrits :

Risque = f (Aléa ; présence de bâtiment)

Les enjeux considérés sont les bâtiments de la BDtopo de l'IGN (Construction légère + Bâti remarquable + Bâti industriel + Bâti indifférencié). Par conséquent, l'analyse réalisée exclut :

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

Afin de ne pas surévaluer le risque, les bâtiments dont la superficie totale dans la BDtopo est inférieure à 10 m^2, potentiels abris de jardin/garage, ont été exclus de l'analyse. À l'issue du traitement, un total de 9 724 bâtiments sur 10 729 (soit 90,6 %) a été conservé sur le territoire communal de la ville de Belfort.

L'utilisation de la BDtopo pour la pré-analyse peut introduire un biais de sur-estimation ou de sous-estimation des enjeux impactés par un aléa dû aux observations suivantes (terrain et traitement SIG, Illustration 57) :

- bâtiments recensés dans la BDTopo n'existent plus ;
- nouvelles constructions non intégrées dans la mise à jour de la BDtopo utilisée ;
- différences d'emprise cartographique entre la BDTopo et l'orthophotographie ;
- découpages en plusieurs parties de certains bâtiments.

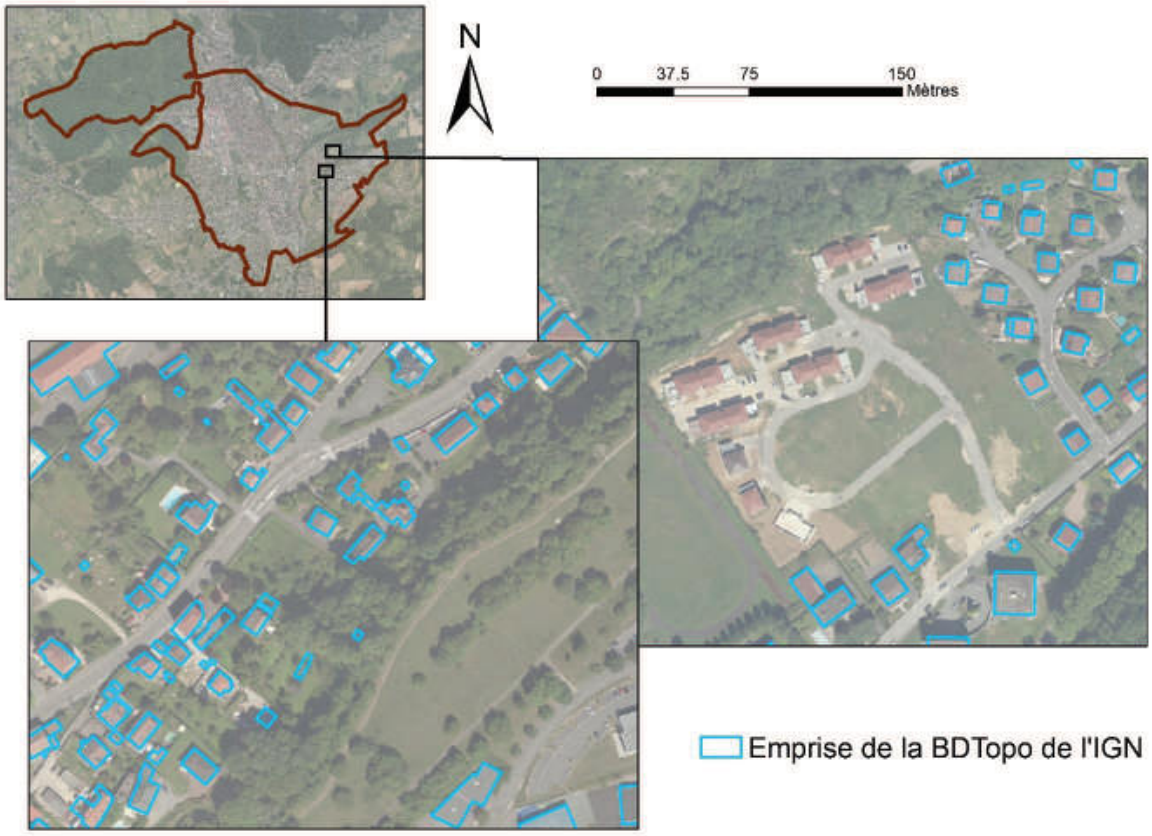


Illustration 57 : Emprise cartographique de la BDTopo avec fond de carte orthophographique.

Une liste d'établissement recevant du public (ERP) recensant 1 046 établissements a été fournie par la ville de Belfort au format fichier « shape » type point. Le croisement entre la BDtopo de l'IGN et la liste d'ERP a permis d'identifier 669 bâtiments pouvant accueillir un ou des ERP soit environ 7 % des bâtiments de plus de 10 m^2.

Pour chaque bâtiment affecté par un aléa, le niveau d'aléa le plus élevé lui est attribué (par exemple un bâtiment touché par un aléa modéré et élevé se verra attribué un aléa élevé). Cette attribution de niveau d'aléa est réalisée de façon indépendante pour les 3 phénomènes de mouvement de terrain : effondrement/affaissement karstique, glissement de terrain et chute de blocs.

7.2. ALÉA « EFFONDREMENT/AFFAISSEMENT KARSTIQUE »

Aléa	Nombre de bâtiment	Pourcentage par rapport au nombre de bâtiment sur la commune	Nombre de bâtiment ERP	Pourcentage par rapport au nombre de bâtiment ERP sur la commune
Fort	0	0,0 %	0	0,0 %
Moyen	2 066	21,2 %	241	36,0 %
Faible	4 510	46,4 %	331	49,5 %
Très Faible	2 395	24,6 %	87	13,0 %
Total	8 971	92,3 %	659	98,5 %

Illustration 58 : Nombre et pourcentage de bâtiment en fonction du niveau d'aléa effondrement/affaissement.

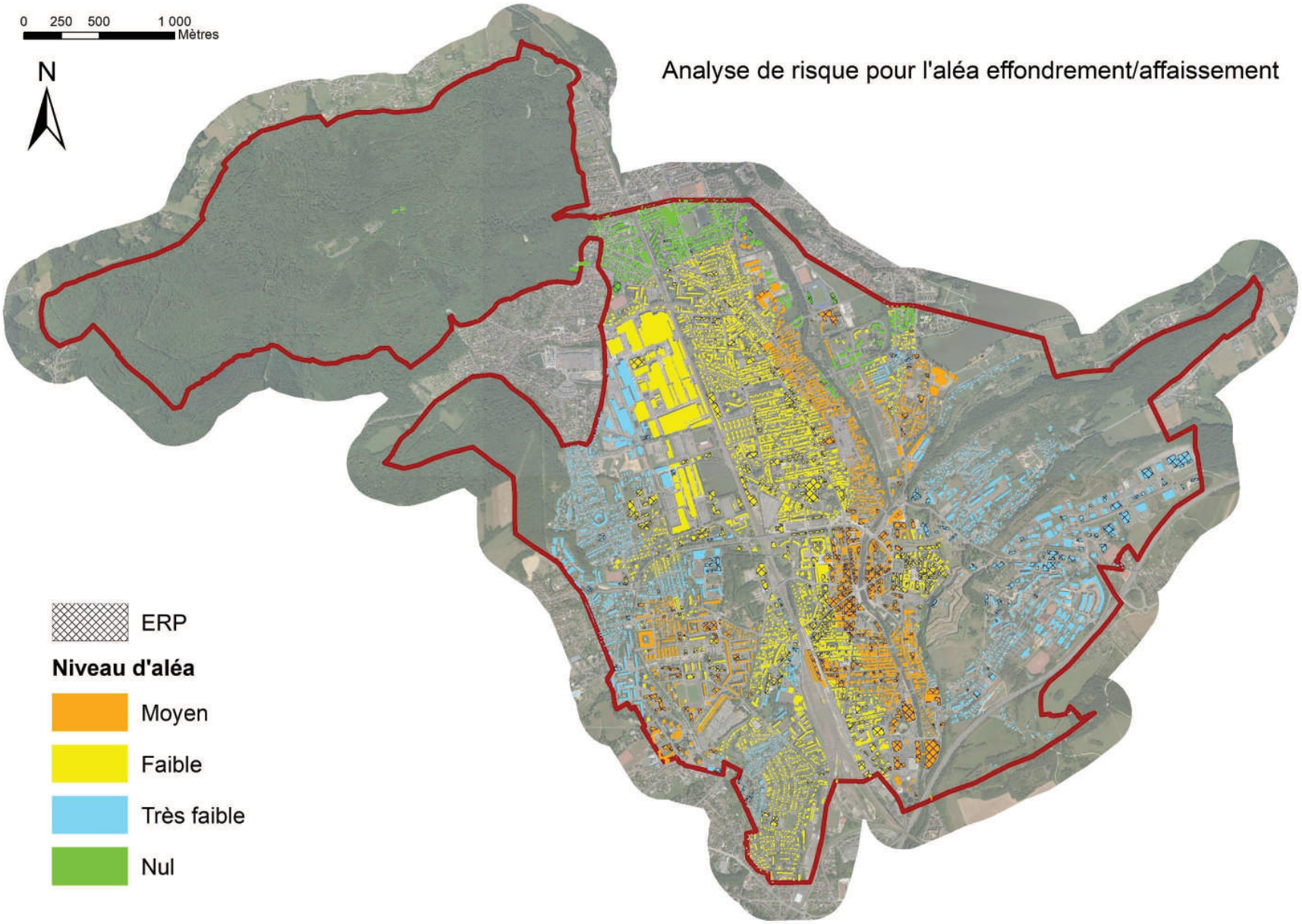


Illustration 59 : Cartographie des bâtiments en fonction des niveaux d'aléa effondrement/affaissement.

7.3. ALÉA « GLISSEMENT DE TERRAIN »

Aléa	Nombre de bâtiment	Pourcentage par rapport au nombre de bâtiment sur la commune	Nombre de bâtiment ERP	Pourcentage par rapport au nombre de bâtiment ERP sur la commune
Fort	21	0,2 %	1	0,1 %
Moyen	100	1,0 %	8	1,2 %
Faible	1 447	14,9 %	54	8,1 %
Très faible	0	0,0 %	0	0,0 %
Total	1 568	16,1 %	63	9,4 %

Illustration 60 : Nombre et pourcentage de bâtiment en fonction du niveau d'aléa glissement de terrain.

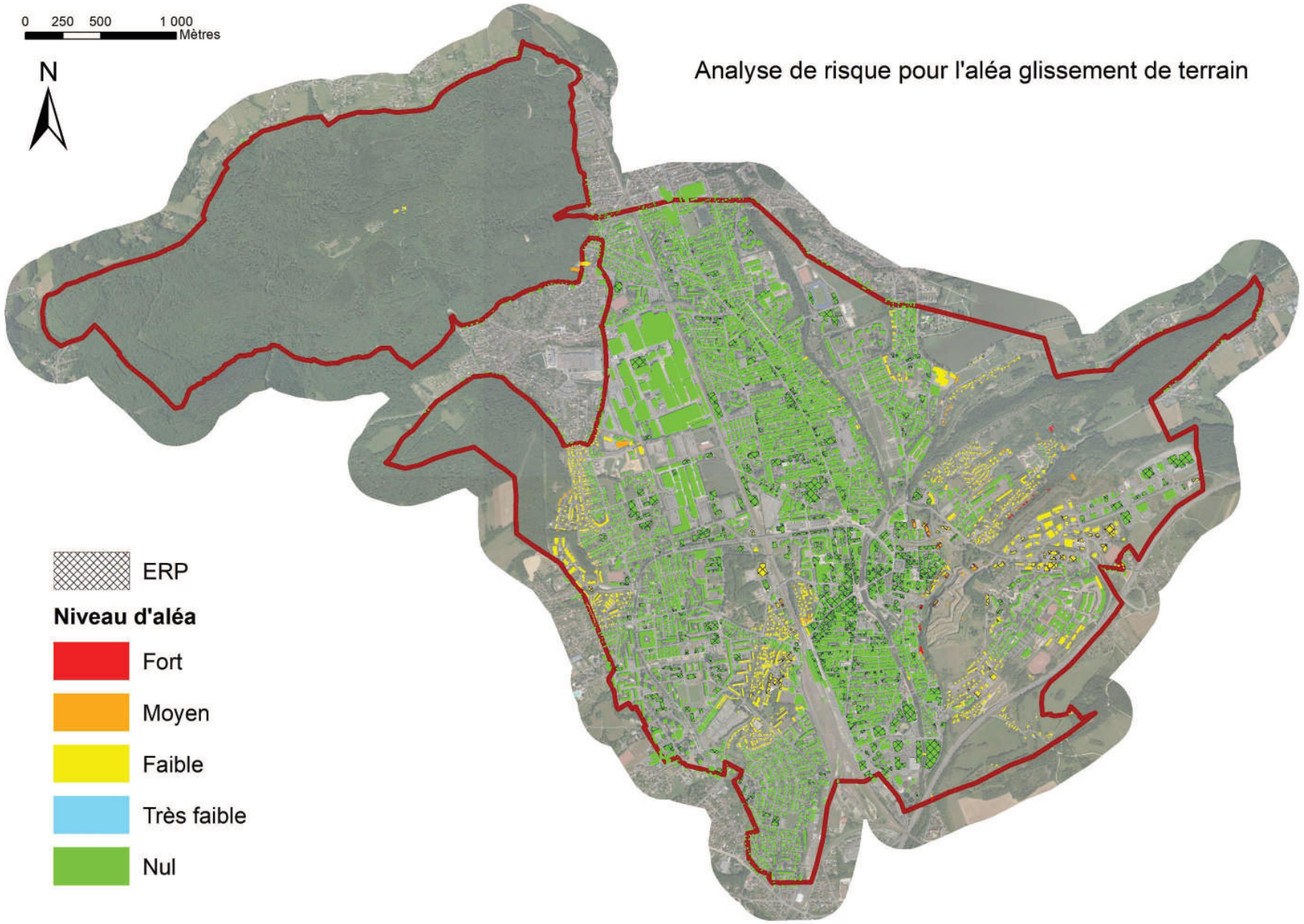


Illustration 61 : Cartographie des bâtiments en fonction des niveaux d'aléa glissement de terrain.

7.4. ALÉA « CHUTE DE BLOCS »

Aléa	Nombre de bâtiment	Pourcentage par rapport au nombre de bâtiment sur la commune	Nombre de bâtiment ERP	Pourcentage par rapport au nombre de bâtiment ERP sur la commune
Fort	11	0,1 %	1	0,1 %
Moyen	28	0,3 %	1	0,1 %
Faible	19	0,2 %	1	0,1 %
Très Faible	0	0,0 %	0	0,0 %
Total	58	0,6 %	3	0,4 %

Illustration 62 : Nombre et pourcentage de bâtiment en fonction du niveau d'aléa chute de blocs.

Il est important de noter que bien que les enveloppes de propagation des corniches cartographiées dans cette étude sur le territoire communal de la ville de Belfort peuvent être en dehors des limites communales, aucun bâtiment en dehors de la ville de Belfort n'est impacté par un aléa chute de blocs.

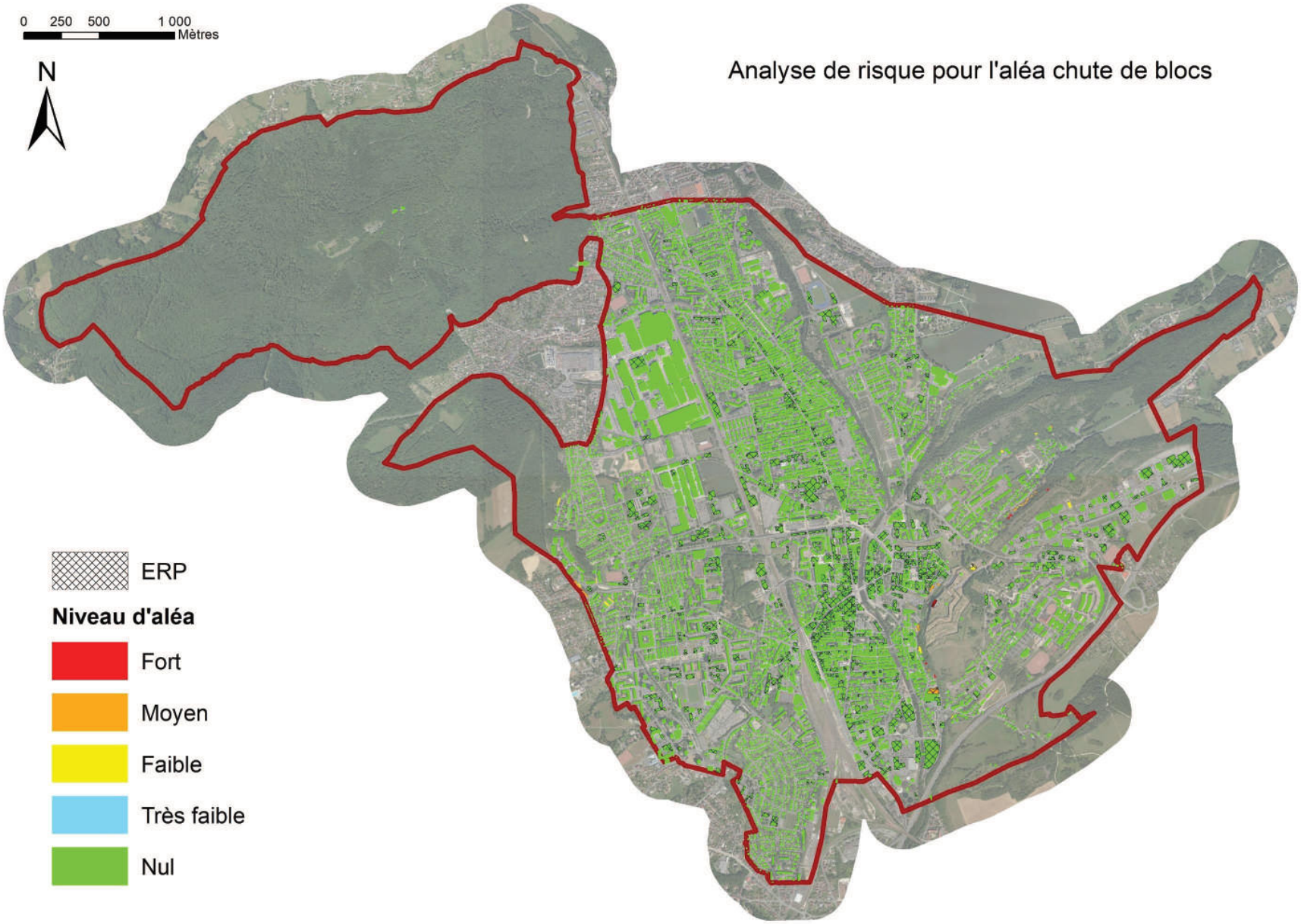


Illustration 63 : Cartographie des bâtiments en fonction des niveaux d'aléa chute de blocs.

7.5. MULTI-ALÉA

Pour chaque bâtiment affecté par un aléa, le niveau d'aléa le plus élevé lui est attribué (par exemple un bâtiment touché par un aléa modéré et élevé se verra attribué un aléa élevé) tous les aléas confondus parmi les 3 phénomènes de mouvement de terrain : effondrement/affaissement karstique, glissement de terrain et chute de blocs.

Aléa	Nombre de bâtiment	Pourcentage par rapport au nombre de bâtiment sur la commune	Nombre de bâtiment ERP	Pourcentage par rapport au nombre de bâtiment ERP sur la commune
Fort	26	0,3 %	2	0,3 %
Moyen	2 162	22,2%	247	36,9 %
Faible	5 513	56,7 %	361	54,0 %
Très Faible	1 295	13,3 %	49	7,3 %
Total	8 996	92,5 %	659	98,5 %

Illustration 64 : Nombre et pourcentage de bâtiment en fonction du niveau d'aléa, tous types d'aléa confondus.

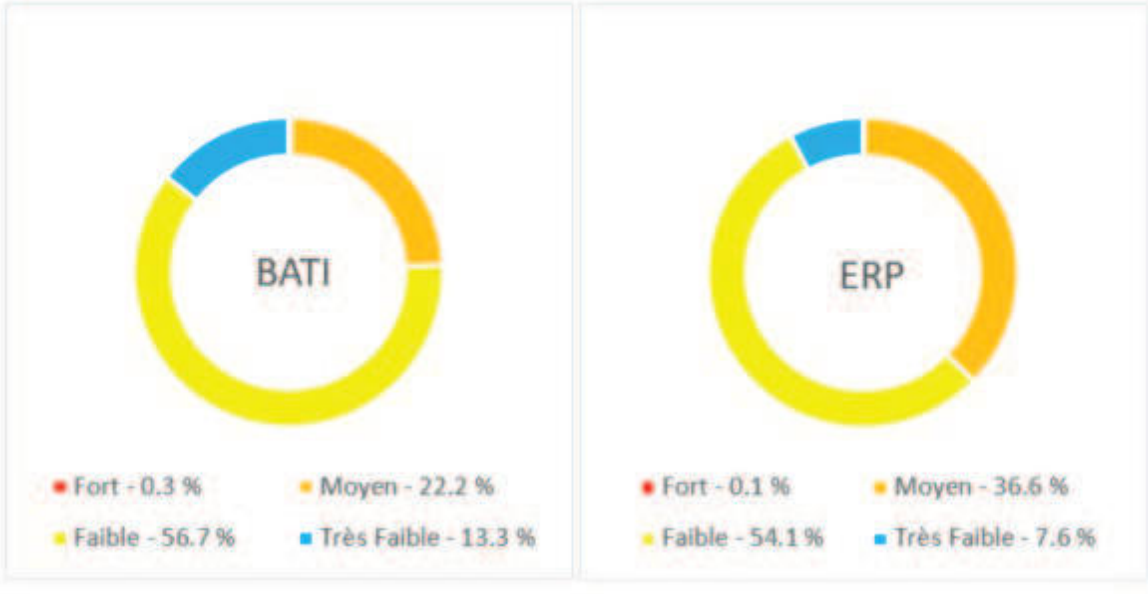


Illustration 65 : Présentation graphique des pourcentages de bâtiment en fonction du niveau d'aléa, tous types d'aléa confondus.

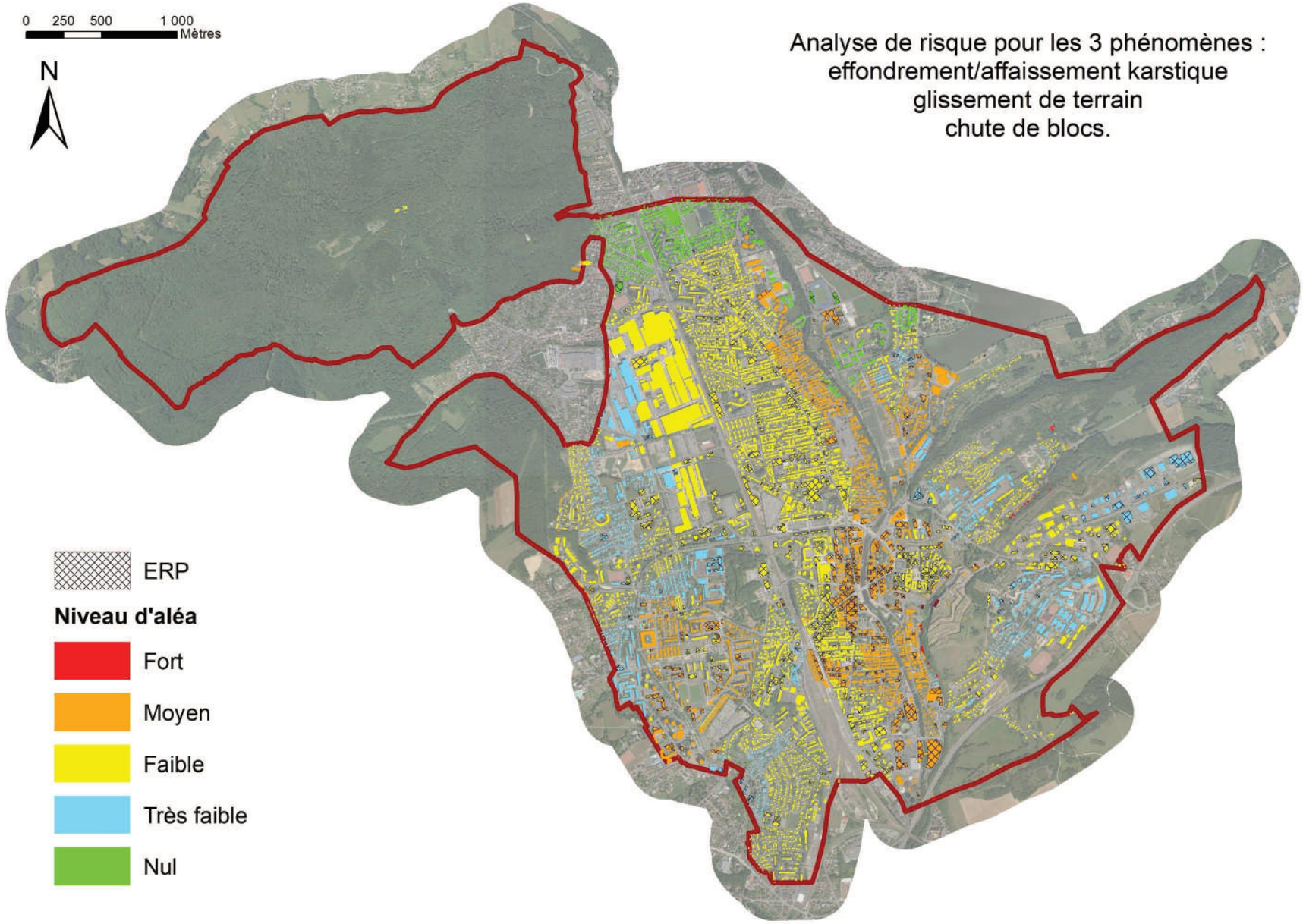


Illustration 66 : Cartographie des bâtiments en fonction des niveaux d'aléa tous aléas confondus.

8. Conclusions

8.1. ALÉA « EFFONDREMENT/AFFAISSEMENT LIÉ À DES CAVITÉS KARSTIQUES »

Malgré des incertitudes assez fortes sur deux secteurs, la méthode multicritères mise en œuvre (méthode en cours de finalisation par le BRGM et le CEREMA) a permis de cartographier l'aléa sur l'ensemble de la commune. Celle-ci se révèle essentiellement soumise à un **aléa de soutirage des matériaux recouvrant le karst calcaire** et pouvant générer des effondrements/affaissements en surface, comme en témoigne quelques évènements observés ces dernières années. Le niveau de cet aléa va de nul à moyen. En termes de surface il est majoritairement très faible à faible. L'aléa moyen concerne essentiellement les berges de la Savoureuse, les bords du vallon descendant de l'étang des Forges et un secteur situé au sud du quartier Hatry et au nord de la Pépinière (secteur où se concentre la plupart des désordres récemment observés). La rupture mécanique du toit rocheux de cavités est considérée comme très peu probable, à l'exception éventuelle de la zone de la grotte de Cravanche, grotte ayant fait l'objet d'un diagnostic spécifique distinct de la présente étude (SOCOTEC, 2019).

Si besoin, l'évaluation et la cartographie de l'aléa pourront être améliorées via des études complémentaires approfondies. Pour cela, il conviendrait de :

1) continuer la collecte de documents anciens concernant des effondrements de terrain ;
2) affiner la connaissance géotechnique du sous-sol, par exemple en cherchant à obtenir les rapports des bureaux d'études ;
3) procéder à des reconnaissances complémentaires (topographiques : via un MNT LIDAR étendu, géophysiques, géotechniques), en particulier dans les zones à aléa moyen ;
4) fort de ses informations complémentaires, préciser le niveau d'aléa.

Dans tous les cas, le travail réalisé ici restera d'autant plus pertinent qu'il sera mis à jour à mesure de l'apport de nouvelles informations.

8.2. ALÉA « GLISSEMENT DE TERRAIN »

L'aléa a été classé en quatre classes allant de « Nul » à « Fort ». Les zones d'aléa sont principalement concentrées sur les reliefs (massif du Salbert, massif du Mont, citadelle de Belfort, fort et bois de la Miotte, fort de la Justice et bois des fourches, fort et massif des Perches). Les zones fortifiées constituent également des zones d'aléas (la Citadelle, le fort de la Justice et le fort de la Miotte, le fort enterré Hatry, le fort des Basses Perches). Les berges de la Savoureuse ont également été caractérisées en aléa faible au titre des glissements de terrain pouvant être induits par le phénomène d'érosion de berge. La majeure partie de la zone urbanisée se situe sur des terrains potentiellement sensibles aux glissements de terrain mais dans un contexte morphologique ne favorisant pas l'occurrence de tels phénomènes (pentes inférieures à 5 %). À cet égard sur ces secteurs, l'aléa a donc été caractérisé comme « Nul ».

Malgré les investigations de terrain engagées, au vu des incertitudes existantes dans les MNT LIDAR fournis par la commune et la faible résolution du MNT 25m de l'IGN, certains talus localisés ont pu échapper à l'expertise et ne pas être pris en compte dans la caractérisation de l'aléa. L'acquisition d'un levé topographique LIDAR de qualité ou la réalisation d'expertises localisées pourraient être nécessaire pour une meilleure prise en charge des risques dans ces secteurs.

8.3. ALÉA « CHUTE DE BLOCS »

L'analyse des données numériques et les investigations de terrain ont permis de cartographier des zones de départ (corniches rocheuses) et d'évaluer pour chacune d'elles l'aléa chute de blocs. L'ensemble du territoire communal de 17 Km^2 n'a pas pu être couvert de façon exhaustive lors des investigations terrain. En concertation avec la mairie de Belfort, il a notamment été décidé de ne couvrir que les routes secondaires ou forestières accessibles par un véhicule sur le massif du Salbert et de ne pas investiguer les corniches potentielles du fort du Salbert, du fort des Perches ainsi que les potentielles corniches situées à l'est de la citadelle de Belfort. En effet ces secteurs sont en zone non urbanisée dans le futur PLU. L'aléa a été classé en quatre classes allant de « Nul » à « Fort ».

Le zonage d'aléa chute de blocs est discontinu et ponctuel à l'échelle du territoire communale de Belfort et est principalement localisé sur les versants des reliefs (massif du Salbert, massif du Mont, citadelle de Belfort, fort et bois de la Miotte, fort de la Justice et bois des fourches).

Malgré le travail de terrain réalisé pour l'inventaire des zones de départ, il est important de souligner que notamment en raison de la qualité médiocre du MNT finalement disponible l'inventaire des zones de départ ne peut totalement être considéré comme exhaustif (en particulier pour des ressauts de moins de 10 m et 5 m de haut respectivement en milieu boisé et urbanisé). De plus, pour cette étude, l'évaluation de la probabilité d'atteinte présente une incertitude significative et a été évaluée en intégrant une zone tampon sécuritaire afin de palier la faible représentativité du MNT.

Afin d'améliorer la cartographie de l'aléa chute de blocs, le BRGM recommande de mettre à jour dans les secteurs considérés comme à enjeu, la cartographie réalisée dans cette étude sur la base soit d'un nouveau traitement du levé LIDAR existant si les résultats s'avèrent pertinents soit sur la réalisation d'un nouveau levé LIDAR. Il est également recommandé de mettre en œuvre des investigations complémentaires pour les corniches potentielles non vues notamment pour le secteur touristique de la citadelle de Belfort.

Compte tenu du risque pour les personnes induit par l'aléa rocheux, la mise en œuvre de protections contre l'aléa est recommandée, a minima dans les secteurs concernés par l'aléa où des enjeux touristiques et/ou de bâtiments sont identifiés. Ces ouvrages de protection sont à dimensionner à partir d'études géotechniques spécifiques.

8.4. PRÉ-ANALYSE DE RISQUE

Une pré-analyse de risque a été mise en œuvre en croisant les bâtiments de plus de $10m^2$ recensés dans la BDTop de l'IGN et les zonages d'aléa. Sur les 9724 bâtiments inventoriés sur le territoire de la commune de Belfort, tous types d'aléa confondus :

- 26 bâtiments sont touchés par un aléa fort ;
- 2 162 bâtiments sont touchés par un aléa moyen ;
- 5 513 par un aléa faible ;
- 1 295 par un aléa très faible.

Concernant les 26 bâtiments en aléa fort :

- 6 sont touchées par un aléa fort glissement de terrain et chutes de blocs :
  - 1 bâtiment guichet pour visite du Lion de Belfort,
  - 2 Bâtiments d'habitation,
  - a priori 2 bâtiments type abris de jardin/garage/annexe non habités,
  - 1 bâtiment abandonné ;
- 15 sont touchés par un aléa fort glissement de terrain :
  - le bâtiment « La poudrière »,
  - 7 bâtiments d'habitation,
  - 4 bâtiments composant la SPA de Belfort,
  - a priori 2 bâtiments type abris de jardin/garage/annexe non habités,
  - 1 bâtiment qui n'existe plus ;
- 5 sont touchés par un aléa fort chute de blocs :
  - le bâtiment de la citadelle de Belfort,
  - a priori 3 bâtiments type abris de jardin/garage/annexe non habités,
  - 1 bâtiment abandonné.

9. Livrable électronique

Les fichiers géoréférencés suivants ont été livrés en parallèle de ce rapport :

- **Aléa effondrements/affaissements lié au karst :**
  - Fichier shape SIG type polygone en Lambert 93 et format COVADIS de la cartographie d'aléa ;
- **Aléa glissement de terrain**
  - Fichier shape SIG type polygone en Lambert 93 et format COVADIS de la cartographie d'aléa ;
- **Aléa chute de blocs**
  - Fichier shape SIG type polygone en Lambert 93 et format COVADIS de la cartographie d'aléa ;
  - Fichier shape SIG type polygone en Lambert 93 des corniches rocheuses cartographiées ;
  - Fichier shape SIG type point en Lambert 93 de la cartographie d'aléa des blocs éboulés ou instables observés sur le terrain ;
- **Pré-analyse de risque**
  - Fichier shape SIG type polygone en Lambert 93 des bâtiments de la BD Topo de l'IGN avec les niveaux d'aléa pour les 3 phénomènes de mouvement de terrain : effondrement/affaissement karstique, glissement de terrain et chute de blocs.

10. Bibliographie

Althéa Ingénierie (2018). Aménagement de la promenade des berges de la Savoureuse – Belfort (90). Rapport n° YL17 0354. Investigations géotechniques (Étude géotechnique complémentaire).

Becker A. (2000) - The Jura Mountains — an active foreland fold-and-thrust belt? Tectonophysics. 321(4), 381-406.

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 ».

Besson L., Graszk E., Toulemont M., Garry G., Durville J ., Hubert T (1999) – Plans de prévention des risques naturels (PPR). Risques de mouvements de terrain. Guide méthodologique – édition la documentation française, Paris, ISBN 2110043547, 78 pages.

Bini A., Tognini p., Zuccoli L. (1998) - Rapport entre karst et glaciers durant les glaciations dans les vallées préalpines du Sud des Alpes. Karstologia, 32(1), 7-26.

Buoncristiani C. Campy M. (2004) - The palaeogeography of the last two glacial episodes in France: The Alps and Jura. *In* Developments in Quaternary Sciences, édité par J. Ehlers and P.L. Gibbard, Volume 2, Part 1:101-10. Quaternary Glaciations Extent and Chronology Part I: Europe. Elsevier.

Campy M. (1992) - Palaeogeographical relationships between Alpine and Jura glaciers during the two last Pleistocene glaciations. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 93(1–2), 1-12.

Cartannaz C. (2015) – Méthodologie de la cartographie « aléa glissements de terrain » Côte du Dogger, Meurthe et Moselle – Rapport d'expertise, Rapport BRGM RP-63803-FR, 31 p., 18 illustrations.

CEREMA (2012). Réalisation de l'Atlas Mouvements de Terrains - Territoire de Belfort. 33 p., 15 Ill., 1 carte

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

Contini D, Boullier A., Morin, D. (2000) - Notice de la carte géologique de la France à 1/50 000. Feuille de Lure, Éditions du BRGM, Orléans, 68pp.

Dèzes P., Schmid S.M., Ziegler P.A. (2004) - Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Alpine and Pyrenean orogens with their foreland lithosphere. Tectonophysics, 389(1–2), 1-33.

Ehlers J., & Gibbard P. L. (2004) - Quaternary Glaciations - Extent and Chronology: Part I: Europe. Elsevier.

FLODIM (2018). Descente d'explorer. Rapport pour Hydrogéotechnique reference 18/4122

Giamboni M., Ustaszewski K., Schmid S. M., Schumacher M. E., Wetzel A. (2004(a)) - Plio-Pleistocene transpressional reactivation of Paleozoic and Paleogene structures in the Rhine-

Bresse transform zone (northern Switzerland and eastern France). International Journal of Earth Sciences 93(2), 207-23.

Giamboni M., Wetzel A., Nivière B., Schumacher M. (2004(b)) - Plio-Pleistocene Folding in the Southern Rhinegraben Recorded by the Evolution of the Drainage Network (Sundgau Area; Northwestern Switzerland and France). Eclogae Geologicae Helvetiae, 97 (1): 17-31. https://doi.org/10.1007/s00015-004-1112-4

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

Heim A. (1932) – Bergsturz und Menschlenleben, Fretz und Wasmuth, Zurich, 218 pp

Hinsken S., Ustaszewski K., Wetzel A. (2007) - Graben Width Controlling Syn-Rift Sedimentation: The Palaeogene Southern Upper Rhine Graben as an Example ». International Journal of Earth Sciences, 96(6), 979-1002

Hydrogéotechnique (2016). Ville de Belfort – Aménagement de la promenade des berges de la Savoureuse. Rapport d'étude géotechnique – missions G1 (ES + PGC) référence C.16.20105

Jaboyedoff M., Labiouse V. (2011) - Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. NHESS.

Jauffret D. (1996) - Identification des ressources en eaux souterraines profondes du Sud-Est du Territoire de Belfort ». BRGM – RR-38976, 33p., 5fig., 2tabl., 7ann.

Lauritzen S-E. (1996) - Climate Change: The Karst Record. Karst Waters Institute. Extended abstracts of a conference held at the Department of Geology, University of Bergen, Norway, August 1 through 4, 1996, 203p.

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

Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie (2012) - Guide méthodologique Plan de prévention des risques naturels : Cavités souterraines abandonnées : 81 p.

Noury G., Husson E., Azémard P., Clément F., Mathon D., Dore L., Haussard S., Respaud C., Vedie E. (2018) - Élaboration d'une trame méthodologique pour la cartographie de l'aléa mouvements de terrain d'origine karstique. Rapport BRGM/RP-68269-FR, 122 pages.

Perrin J., Noury G., Cartannaz C., Van Laere A. (2013) - ALEA-Karst : vers une approche multicritère de l'aléa lié à la présence de cavités karstiques. Année 1 : bibliographie et étude de sites - Rapport BRGM/RP-62595-FR

Perrin J., Noury G., Cartannaz C. (2014a) - ALEA-Karst : vers une approche multicritère de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire. Volume 1 : Trame méthodologique – Rapport BRGM/RP-63771-FR.

Perrin J., Noury G., Cartannaz C., Gutierrez T., Van Laere A. (2014b) - ALEA-Karst : vers une approche multicritère de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire. Volume 2 : étude de sites - Rapport BRGM/RP-63771-FR, 119 p.

Perrin J., Noury G., Azémard P., Clément F., Mathon D., Haussard S., Respaud C., Vedie E., Zergaoui N. (2016) - Réflexions méthodologiques pour une meilleure évaluation de l'aléa mouvements de terrain d'origine karstique. Rapport BRGM/RP-66508-FR.

Philipponat G., Hubert B. (2008) – Fondations et ouvrages en terre, 548 p. Éditions Eyrolles.

Rabin M. (2016) - Caractérisation de la déformation récente dans une chaine orogénique lente : l'arc du Jura. Approches combinées morphotectonique, géodésique et géophysique ».

Rabin M., Sue C., Valla P.G., Champagnac J.D., Carry N., Bichet V., Eichenberger U., Mudry J. (2015) - Deciphering Neotectonics from River Profile Analysis in the Karst Jura Mountains (Northern Alpine Foreland). Swiss Journal of Geosciences, octobre, 1-24.

Rabin M., Sue C., Walpersdorf A., Sakic P., Albaric J., Fores B. (2018) - Present-Day Deformations of the Jura Arc Inferred by GPS Surveying and Earthquake Focal Mechanisms. Tectonics, 37(10), 3782–3804.

Rey A. (2016) – PPR multi-aléas des communes de la Réunion. Propositions d'évolutions méthodologiques. Rapport final. BRGM/RP-66346-FR, 167p., 57 ill., 38 tabl., 5 ann.

Seret G., Dricot E., Wansard G. (1990) - Evidence for an early glacial maximum in the French Vosges during the last glacial cycle ». Nature, 346 (6283): 453.

SOCOTEC (2019) - Inspection et diagnostic – grotte de Cravanche. Rapport SOCOTEC référence 1811_C1_002_A_Grotte_de_Cravanche

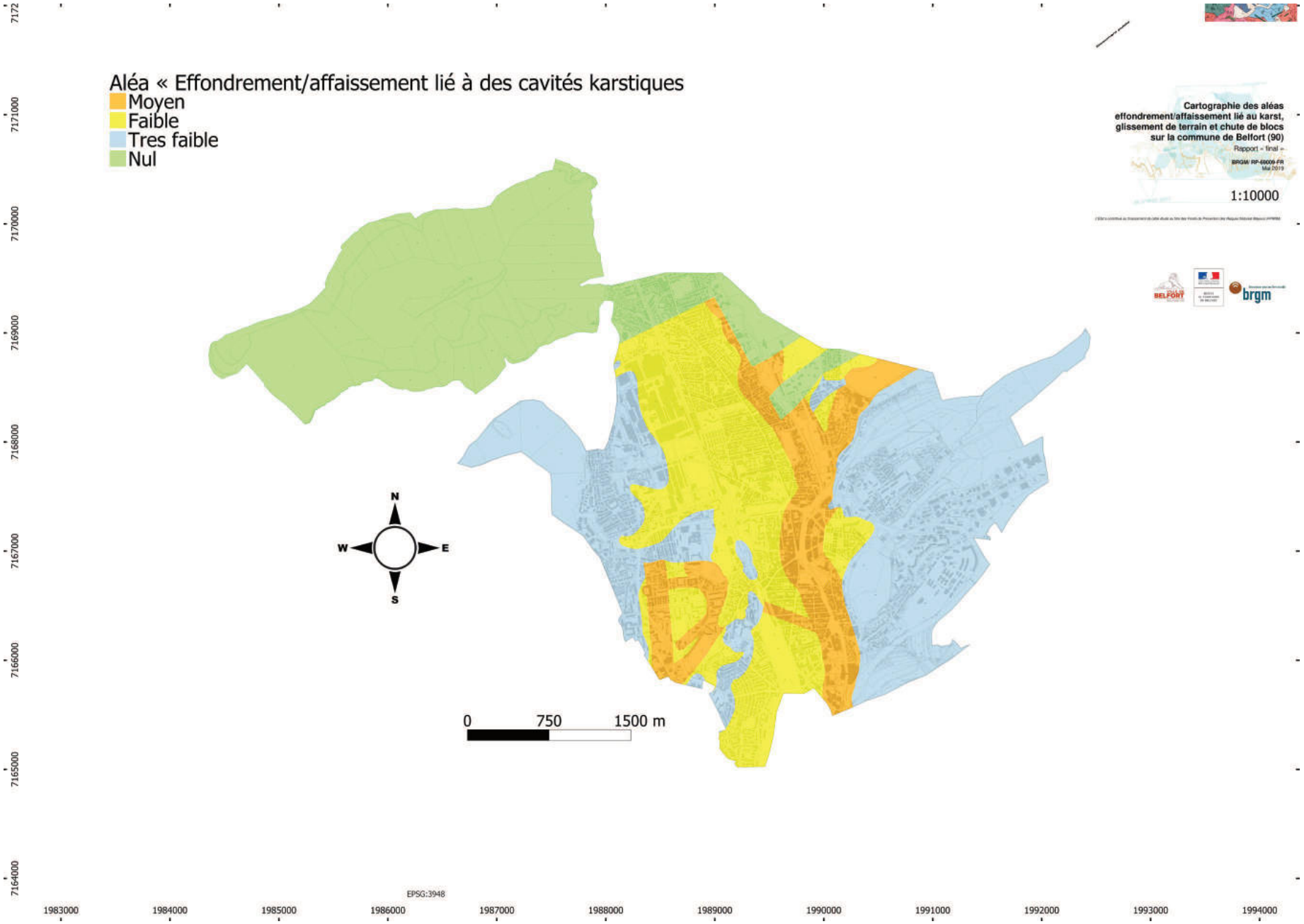
Statham, I., and Finlayson, B. (1980) - Hillslope Analysis: London; Boston, Butterworth-Heinemann, 232 p.

Théobald N., & Devantoy J. (1963) - N Notice de la carte géologique de la France à 1/50 000. Feuille de Belfort, Éditions du BRGM, Orléans, 6pp.

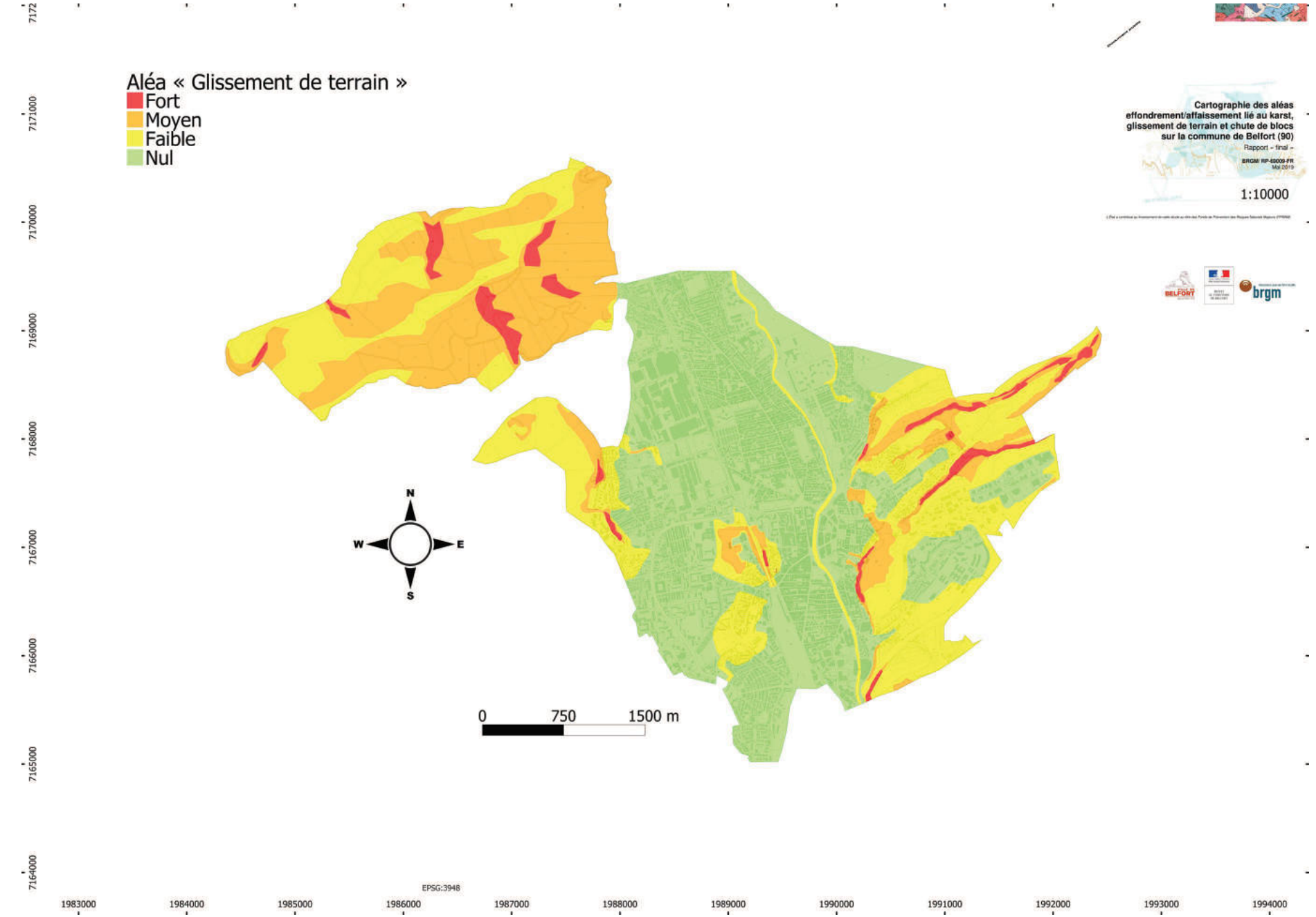
Ustaszewski K, & Schmid S.M. (2007) - Latest Pliocene to Recent Thick-Skinned Tectonics at the Upper Rhine Graben - Jura Mountains Junction. Swiss Journal of Geosciences, 100(2): 293-312.

Ziegler P.A., Fraefel M. (2009) - Response of drainage systems to Neogene evolution of the Jura fold-thrust belt and Upper Rhine Graben. Swiss Journal of Geosciences, 102(1): 57-75.

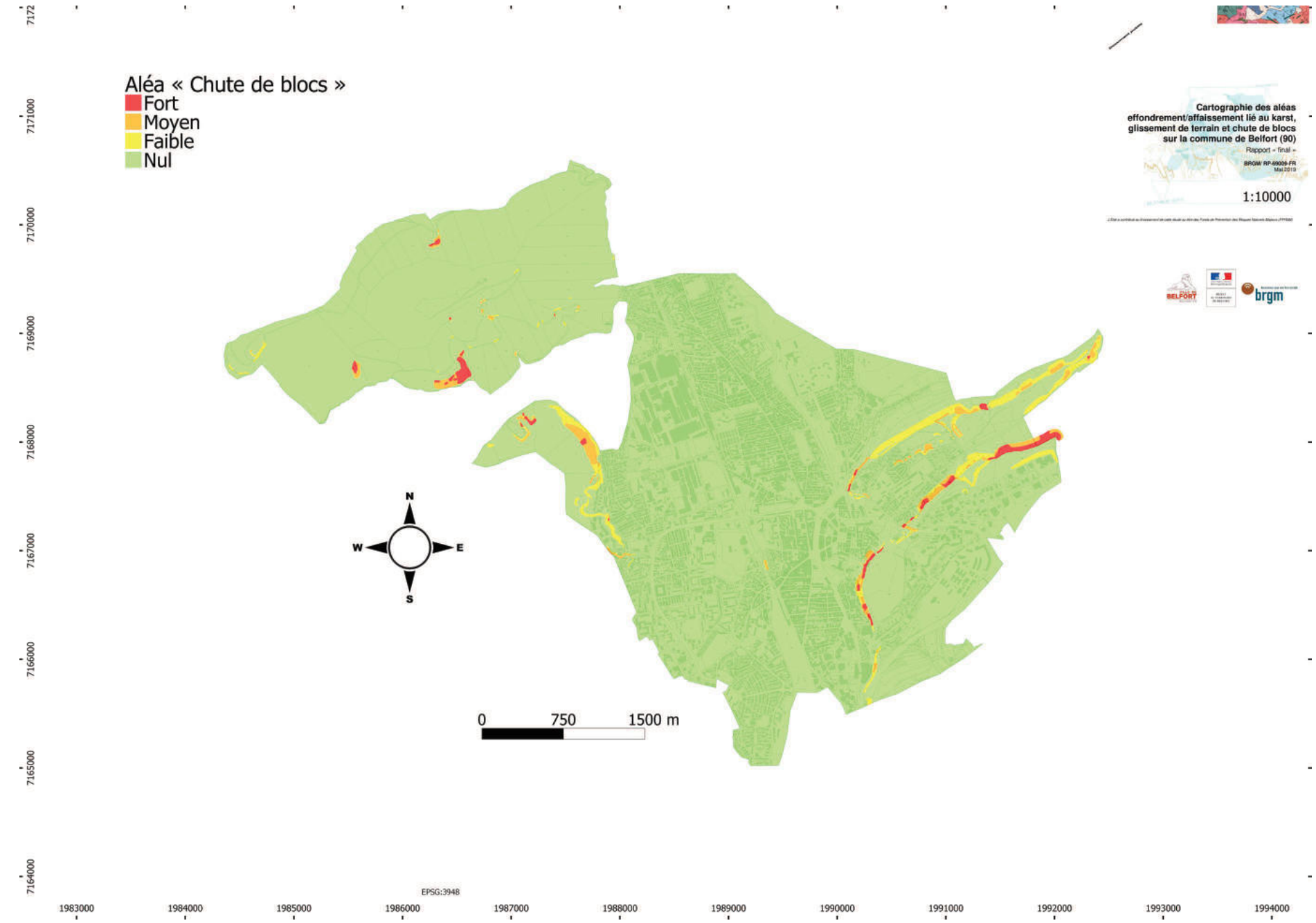
Annexe 1
Cartographie de l'aléa « effondrement / affaissement »


Aléa « Effondrement/affaissement lié à des cavités karstiques
Moyen
Faible
Tres faible
Nul
Cartographie des aléas effondrement/affaissement lié au karst, glissement de terrain et chute de blocs sur la commune de Belfort (90)
Rapport « final »
BRGM/ RP-66009-FR
Mai 2019
1:10000
brgm
N
W
E
S
0
750
1500 m
EPSG:3948
7172
7171000
7170000
7169000
7168000
7167000
7166000
7165000
7164000
1983000
1984000
1985000
1986000
1987000
1988000
1989000
1990000
1991000
1992000
1993000
1994000

Annexe 2
Cartographie de l’aléa « glissement de terrain »


Aléa « Glissement de terrain »
Fort
Moyen
Faible
Nul
Cartographie des aléas effondrement/affaissement lié au karst, glissement de terrain et chute de blocs sur la commune de Belfort (90)
Rapport – final –
BRGM/ RP-69009-FR
Mai 2019
1:10000
brgm
N
W
E
S
0
750
1500 m
EPSG:3948
7172
7171000
7170000
7169000
7168000
7167000
7166000
7165000
7164000
1983000
1984000
1985000
1986000
1987000
1988000
1989000
1990000
1991000
1992000
1993000
1994000

Annexe 3
Cartographie de l’aléa « chute de blocs »


Aléa « Chute de blocs »
Fort
Moyen
Faible
Nul
Cartographie des aléas effondrement/affaissement lié au karst, glissement de terrain et chute de blocs sur la commune de Belfort (90)
Rapport « final »
BRGM/ RP-69009-FR
Mai 2019
1:10000
N
W
E
S
0
750
1500 m
EPSG:3948
7172
7171000
7170000
7169000
7168000
7167000
7166000
7165000
7164000
1983000
1984000
1985000
1986000
1987000
1988000
1989000
1990000
1991000
1992000
1993000
1994000

Annexe 4
Les glissements de terrain – généralités

TYPOLOGIE DES MOUVEMENTS

Les mouvements sans plans de rupture

Ces types de mouvements ne sont pas considérés comme des glissements à proprement parler puisque la mise en mouvement n'est pas caractérisée par un plan de cisaillement identifiable. Généralement dans la région traitée, seule la frange superficielle des terrains est affectée par ce type de mouvements.

- Le Fluage

Le fluage est un phénomène physique provoquant des glissements gravitaires irréversibles sous des sollicitations constantes atteignant le domaine plastique (Philipponnat G.et *al.,* 2008) (Figure 1). C'est un mouvement lent d'une masse de terrain (à matrice fine argileuse ou silteuse) non limitée par une surface de rupture clairement définie se manifestant sur des faibles ou fortes pentes. Il peut se développer sur des épaisseurs parfois importantes (plusieurs dizaines de mètres).

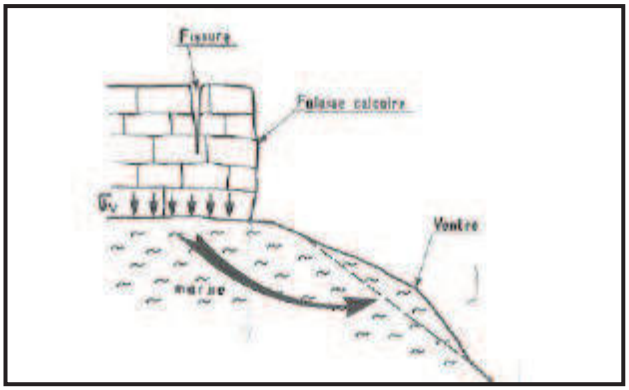


Figure 1 : Exemple de fluage sous l'effet d'une surcharge (Philipponat et al*., 2008).*

- La solifluxion

C'est un cas particulier du fluage. C'est un phénomène d'écoulement lent des sols. Elle concerne les sols à matrice fine (argileuse ou silteuse) et à teneur en eau marquée, sur une épaisseur de l'ordre d'un mètre, sans surface de rupture nette. Ce phénomène est provoqué par des variations de volume du sol au cours des saisons. En effet, le gel-dégel en montagne ou l'alternance des saisons sèches et pluvieuses causent la déstructuration et la perte de cohésion de ces sols gonflants et rétractables (Philipponnat G. et *al.,* 2008 ; Mathon. et *al.,* 2005).

La solifluxion s'opère sur des terrains de pente faible à modérée et se repère par un état boueux des sols, une ondulation des terrains (Philipponnat G.et *al.,* 2008) (Figure 2) et des rochers « laboureurs ».

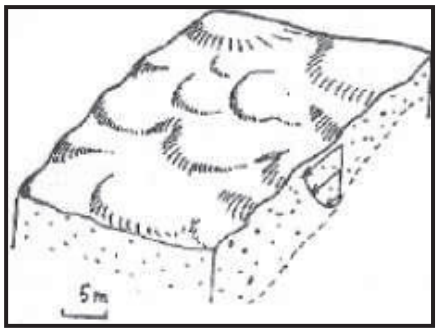


Figure 2 : Aspect ondulé des terrains du à la solifluxion (Philiponnat et al*., 2008).*

- La reptation

C'est le glissement lent, vers l'aval, des sols ou des formations superficielles sur un versant à pente modérée à forte (Dictionnaire de géologie, 6ème édition). Ce phénomène ne nécessite pas un état boueux du sol. Il peut se repérer par un moutonnement de faible amplitude et relativement serré. Généralement, les arbres sont inclinés ou présentent une forme dite « pipée ». Le moteur du mouvement est le propre poids du terrain associé au gonflement des argiles. Ce phénomène peut provoquer un fauchage (également appelé « basculement ») des couches géologiques sous-jacentes (Figure 3) ; ce qui entraîne une évaluation erronée de leur pendage en profondeur.

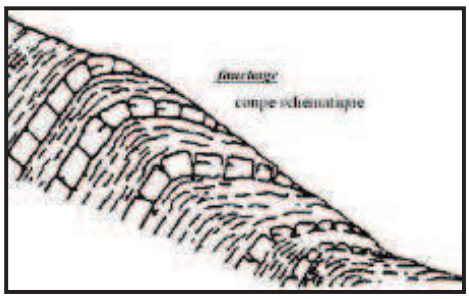


Figure 3 : Coupe montrant le phènoméne de fauchage (d'après le dictionnaire de géologie Raoult et Foucault)).

<u>Les mouvements avec plans de rupture</u>

- Les glissements pelliculaires

Le glissement pelliculaire est un décrochement superficiel gravitaire affectant une mince frange de terrain à matrice fine et limitée par une surface de rupture identifiable (< 10 m de profondeur), recouvrant les versants à pente raide (> 20 %). Cette frange est fortement altérée avec des caractéristiques mécaniques faibles. Par suite d'une saturation en eau du matériel, la cohésion ou/et l'angle de frottement interne sont diminués par l'augmentation de la teneur en eau et rend le sol instable. Le terrain se détache du haut du versant et glisse par petits paquets vers le bas (Mathon C.et *al.,* 2005). Ce type de glissement fait généralement suite au phénomène de reptation.
La morphologie de ce glissement est caractérisée par une surface moutonnée ou par des petites terrasses dans les versants, et de courtes fissures arquées ou rectilignes soulignent la tête des instabilités. Sur le terrain, il peut être délimité grâce à des entonnoirs d'effondrement créés en bordure du glissement par des infiltrations et des circulations d'eau en sub-surface.

- Les glissements plans

Il s'agit de mouvements gravitaires se traduisant par la translation d'un volume de sol ou de roche d'un versant, sur une surface de rupture approximativement plane, généralement selon la ligne de plus grande pente (Figure 4)

La particularité de ce glissement tient dans la géométrie de sa surface de rupture qui est plus ou moins rectiligne. Généralement, elle est héritée d'une discontinuité naturelle préexistante dans le terrain : joints ou limites stratigraphiques, plans de faille ou diaclases, plans de schistosité. Elle peut également correspondre soit à une couche mince de mauvaises caractéristiques mécaniques (on parlera de « couche-savon ») sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau.

Les glissements plans sont le plus souvent associés à des fissures en tête et des bourrelets en pied. Ils peuvent se développer sur des épaisseurs de plusieurs dizaines de mètres et peuvent affecter des versants de faible pente (< 20 %) pour autant que les facteurs de prédisposition soient réunis.

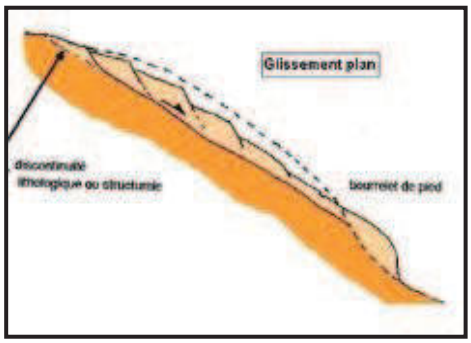


Figure 4 : Schèma d'un glissement plan.

- Les glissements rotationnels ou circulaires

Ils correspondent à des mouvements gravitaires et peuvent présenter une brusque rupture de pente ainsi que des fissures en tête et des bourrelets en pied (Figure 5). Leur surface de rupture de forme circulaire et concave les différencie des glissements plans. On peut noter la présence de contre-pentes au sein de la masse glissée. De plus, ils se développent généralement au sein d'un milieu homogène et meuble (sables, silts, voire argiles) en l'absence de discontinuité marquée. Par ailleurs, plusieurs glissements rotationnels peuvent s'emboiter et former un glissement circulaire complexe, voire plan. L'apparition d'un premier glissement en bas de pente entraîne une perte de butée pour les terres situées au-dessus et provoque des glissements successifs remontant vers l'amont : on parle d'évolution régressive (Philipponat G. et *al.,* 2008).

Les glissements circulaires peuvent avoir des profondeurs et des volumes en mouvement très variables.

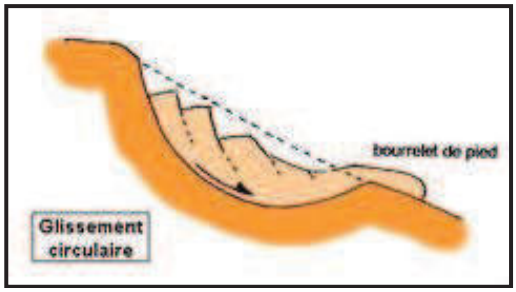


Figure 5 : Schèma d'un glissement circulaire.

Annexe 5
Chute de blocs et éboulement rocheux– généralités

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 généralement décrits au regard des volumes mobilisés. Une classification admise (*LCPC, 2004*) est la suivante :

Ecroulement en grande masse	Ecroulement en masse	Chute de bloc	Chutes de pierres
10^4 m^3	10^4 à 10^2 m^3	10^2 à 0.1 m^3	< 0.1m^3

Figure 1 : Terminologie de l'aléa rocheux en fonction des volumes mobilisés (LCPC, 2004)

Il faudrait également distinguer volume unitaire et volume total mobilisé pour définir une nomenclature complète. Ce travail est en cours dans le cadre du groupe de travail MEZAP piloté par le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire.

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

Les chutes de blocs correspondent à un mécanisme gravitaire se manifestant de manière rapide et brutale, et qui affecte des matériaux rigides et fracturés. Il concerne principalement les affleurements rocheux, souvent redressés, voire subverticaux. Les éléments éboulés sont des blocs rocheux de volume variable pouvant se propager en pied de falaise. Le volume de l'éboulement ne dépasse généralement pas quelques dizaines de m^3. (*Vincent et al., 2001*).

Les écroulements en masse (aussi nommés éboulements en masse) et les écroulements en grande masse, concernent des volumes totaux importants pouvant représenter jusqu'à plusieurs millions de mètres-cubes de matériel. La distinction entre ces deux phénomènes se base globalement sur le volume mobilisé (éboulement en masse ou éboulement en masse, quand le volume éboulé est compris entre 100 m^3 et 10 000 m^3, écroulement en grande masse au-delà de 10 000 m^3) mais également sur les modes de propagation (forte interaction entre blocs pour les écroulements en grand masse).

CHUTE DE BLOCS : UNE INSTABILITE GRAVITAIRE

L'évolution progressive d'un versant jusqu'au déclenchement de mouvements de terrain peut être exprimée par le rapport entre deux contraintes opposées matérialisées par deux forces en présence. La première, dite force motrice constitue l'ensemble des forces favorisant le mouvement du versant, s'oppose à la seconde dite force résistante qui maintient l'équilibre du versant. Selon les conditions intrinsèques du matériel concerné (caractères géotechniques, pente, surcharge ou allégement local…) et les évènements influents (précipitations, gel, vibrations…), le rapport entre les forces en présence peut évoluer. La stabilité du versant perdure tant que la force résistante est supérieure à la force motrice. Dès qu'elle devient plus faible, passant en-dessous du seuil de stabilité, la masse concernée décroche de son support et se met en mouvement.

La force motrice est directement dépendante de la gravité par l'intermédiaire du poids du bloc qui pourrait être mis en mouvement. La force de résistance est liée aux propriétés mécaniques et rhéologiques de la roche.

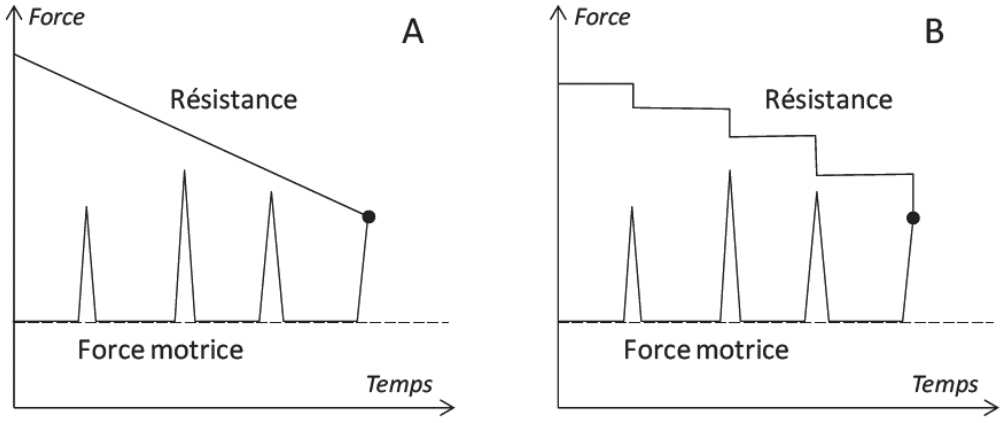


Figure 2 : Evolution temporelle de la résistance et de la force motrice (Hantz, 2012) ; (Cas A. augmentation de la force motrice = facteur déclenchant NON dégradant. Cas B : augmentation de force motrice = facteur déclenchant ET dégradant).

FACTEURS INTERVENANT DANS LE PHENOMENE DE CHUTE DE BLOCS

Le déclenchement du mouvement de terrain est toujours lié à une situation de déséquilibre gravitaire entraînant un réajustement. Les facteurs du déséquilibre sont de différentes natures : on distingue les **facteurs de prédisposition, les facteurs préparatoires (ou aggravants) et les facteurs déclencheurs (Statham and Finlayson, 1980)**.

Les facteurs de prédisposition

Les facteurs de prédisposition correspondent aux conditions intrinsèques du mouvement et sont déterminés par l'héritage géologique (lithologique, structural, processus glaciaires et fluviatiles…) sur le très long terme (plusieurs milliers d'années).

La géologie :

La lithologie : les différents types de roches sont plus ou moins sensibles à l'érosion et à la dissolution entrainant une susceptibilité plus ou moins marquée à la genèse de chute de blocs. En particulier, l'alternance de roches meubles/compactes favorise l'érosion différentielle responsable de la formation de sous-cavage et de blocs en surplomb.

La structure (la fracturation, le pendage, la présence de joints de stratification, de plis, de schistosité) : les discontinuités géologiques induisent des zones de faiblesse qui sont plus ou moins marquées selon la densité et la géométrie du réseau de discontinuités. Le volume des blocs qui peut être généré pour un site donnée dépend fortement de ce facteur.

Histoire géologique : érosion hydro-glaciaire, pergélisol, contraintes tectoniques….

Les facteurs préparatoires/aggravant

Les facteurs préparatoires correspondent aux processus géomorphologiques à court ou plus long terme (de la dizaine à quelques milliers d'années) induits par le climat (érosion, altération,

gélifraction, conditions hydrologiques, pergélisol) et l'utilisation des sols (anthropisation des cours d'eau, déforestation…).

Le climat influence la stabilité des versants par ses composantes hydriques et thermiques et leurs conséquences sur les propriétés mécaniques des sols.

Les causes thermiques : la cryoclastie (alternance de phases de gel/dégel) entraine ainsi l'éclatement de la roche et crée de nouvelles fissures.

Les causes hydriques : 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 entraine 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.

Les évènements saisonniers : l'alternance de périodes pluvieuses et sèches constitue un agent climatique déterminant sur les déséquilibres des versants.

La végétation : la croissance des racines contribue à augmenter la taille des fissures dans lesquelles elles se développent

Les facteurs déclenchant

Les facteurs déclencheurs correspondent aux sollicitations extrêmes ponctuelles ou à court terme (dizaine d'année) qui initient ou amplifient la déstabilisation d'un versant. Ces sollicitations peuvent prendre la forme de vibrations naturelles (séismes) ou anthropiques (tirs de mine), d'événements pluvieux extrêmes, de dessouchages naturelles (tempête) ou anthropiques, de crues de rivière exceptionnelles ainsi que d'actions anthropiques affectant la stabilité d'un versant (déblais ou remblais, fondations de maisons, réduction de l'emprise forestière, modification des écoulements de surface et sub-surface…).

TYPOLOGIE DES RUPTURES

La combinaison des facteurs de prédisposition, préparatoires et déclenchant auxquels sont soumis un site donné conditionnent les différents mécanismes de rupture qui peuvent générer des chutes de blocs. La typologie générale des évènements « chute de blocs » est décrite de façon assez exhaustive sur la figure 3.

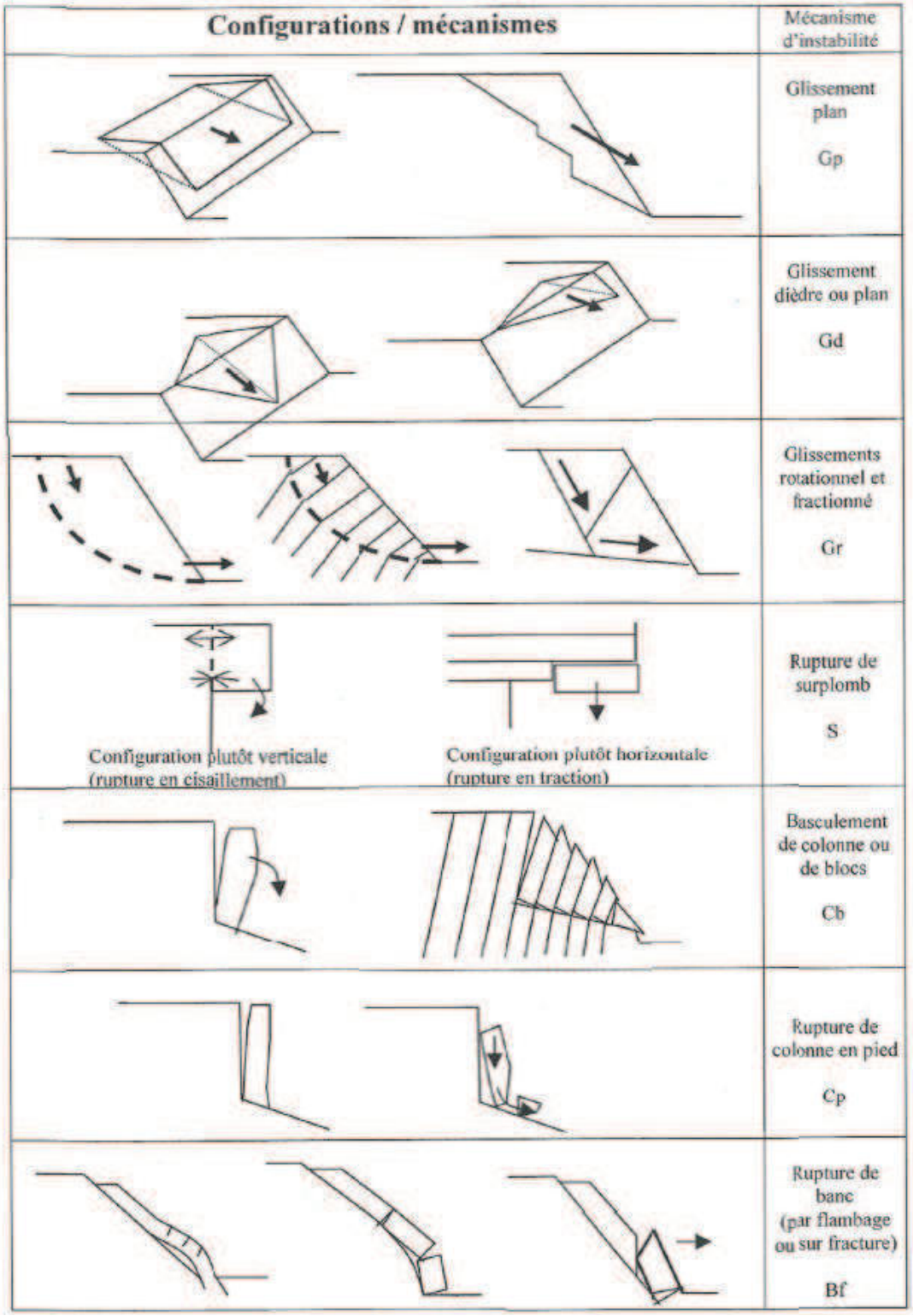


Figure 3 : Schéma des principaux mécanismes de rupture (Dussauge-Peisser, 2002)

Annexe 6
Histoire sédimentaire, géodynamique et structurale du secteur de Belfort et des environs

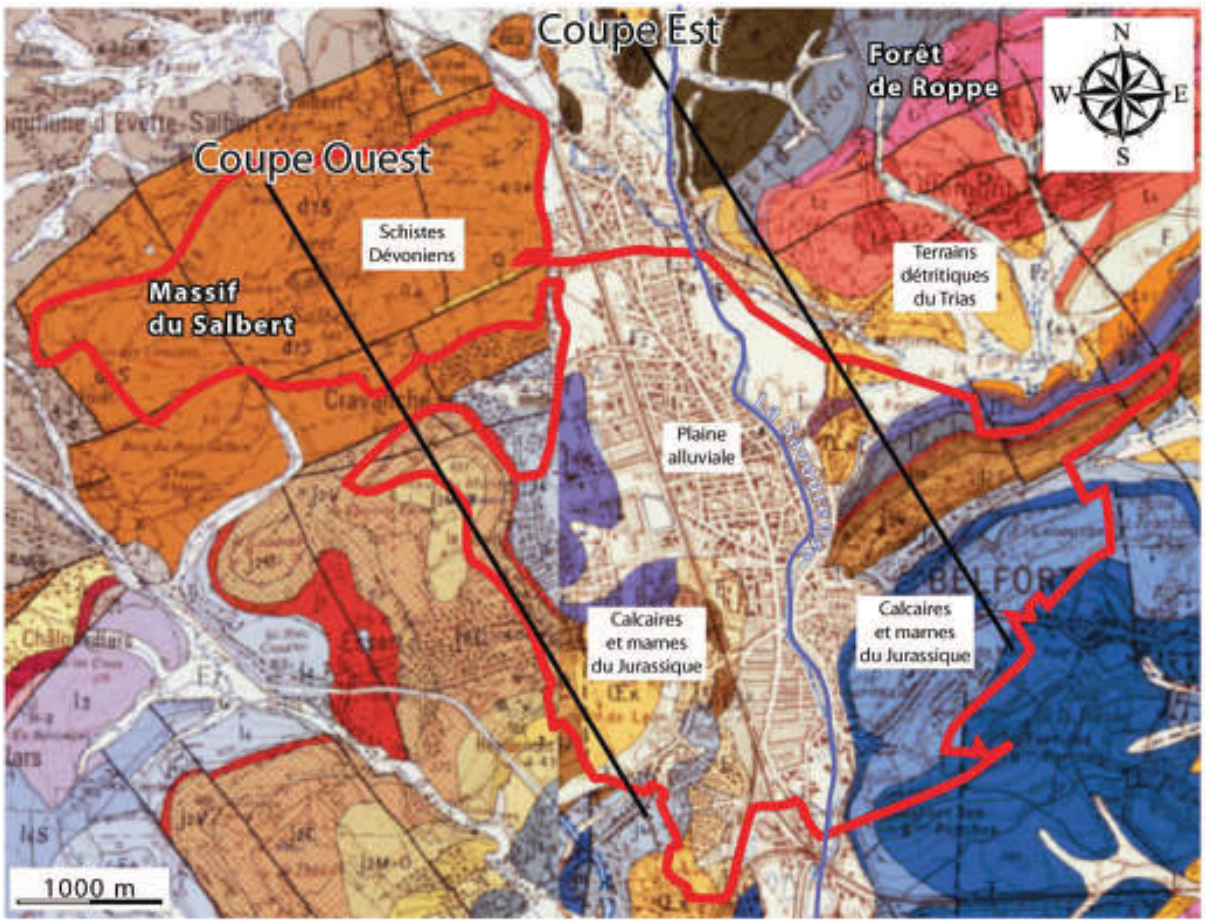


Figure 1 : Extrait des cartes géologiques de la commune de Belfort et localisation des traits de coupes présentées en figure 6.

Ce paragraphe retrace les grands évènements tectoniques du secteur de l'avant pays alpin, correspondant à l'actuel massif Jurassien ainsi que les fossés Bressan et Rhénan, ainsi que l'évolution des milieux de dépôts sédimentaires depuis la formation de la Pangée (345 Ma) jusqu'à nos jours. Les dates des différents évènements et périodes sont données à titre indicatif et peuvent varier légèrement d'une référence bibliographique à l'autre.

Pour une lecture rapide plus ciblée, **les passages traitant du secteur proche de Belfort sont retranscrits en gras** *et les passages traitant de la géodynamique globale sont en italique.*

1.1 OROGENESE HERCYNIENNE (FORMATION DE LA PANGEE) :

1.1.1 Faménien (372 – 359 Ma)

Les plus anciens terrains de la commune de Belfort datent du Dévonien supérieur (Faménien) et forment le massif actuel de Salbert, au NO de Belfort. Ils correspondent à des formations détritiques (grès et argiles) déposées dans un bassin subsident (s'approfondissant sous le poids du remplissage sédimentaire) (Théobald N. et Devantoy J. 1963; Contini 2000). La mer est présente au sud-ouest, à l'emplacement de l'actuel massif de Chagey.

À la fin du Dévonien (360 Ma), la région est affectée par une phase de compression liée à l'orogenèse Hercynienne (phase bretonne) aboutissant à une schistosité présente actuellement dans les terrains Dévoniens (Contini 2000).

1.1.2 Dinantien (359 – 325 Ma)

Les terrains du Carbonifère inférieur (Viséen 345 – 325 Ma) sont d'origine marine associée à du volcanisme sous-marin. Les granites des ballons et des crêtes se mettent en place à cette période dans les Vosges, conduisant localement à du thermométamorphisme de contact (modifications minéralogiques dues à l'insertion de corps chauds (granites)) (Thiébaut et al. 1974).

A la fin du Viséen 325 Ma, la mise en place de la chaîne Hercynienne conduit à une phase compressive (appelée phase Sudète) qui fait émerger les terrains antérieurs (Dévono-Dinantien) et les déforme. Cette phase orogénique dure tout au long du Namurien et du Westphalien. **Dans la région de Belfort, les terrains Dévono-Dinantien actuels consistent en des schistes fortement plissés (Théobald N. et Devantoy J. 1963; Thiébaut et al. 1974; Ménillet et al. 1989).**

1.1.3 Namurien – Westphalien (325 – 305 Ma)

Le secteur est émergé au Namurien et Westphalien (325 – 305 Ma), aucun terrain de cette époque n'est retrouvé (non dépôts ou érosion).

1.1.4 Stéphanien (305 – 295 Ma)

La sédimentation reprend localement dans des bassins sédimentaires au Stéphanien (fin Carbonifère 305 Ma) en milieu fluvio-lacustre anoxique. Ces dépôts houillers (roches carbonatées très riches en carbone) sont discordants sur les terrains du Viséen (Thiébaut et al. 1974; Contini 2000). **Ces terrains se retrouvent au Nord de Belfort (Nord de la forêt de Roppe) sous forme d'une lentille de grès et de schistes comportant de minces lentilles de houille (roches riches en charbon).**

1.1.5 Permien (295 – 250 Ma)

Une nouvelle phase compressive de l'orogenèse Hercynienne (phase Saalienne), au Permien inférieur (295 Ma), affecte tous les terrains antérieurs (plissement). La mise en place des massifs Hercyniens se termine au Permien supérieur (275 – 260 Ma), terminant ainsi la formation de la Pangée (Matte 1991, 2001; Rogers et Santosh 2003). Il se dépose des sédiments détritiques (grès, conglomérats) issus de l'érosion de la chaîne Hercynienne en milieu continental et sous un climat subtropical, parfois aride (Ménillet et al. 1989). Sur l'ensemble de la Franche-Comté, le Permien est réparti dans des fosses ou des cuvettes sédimentaires déconnectées les unes des autres (Feys R. et Greber CH. 1970). **Dans la région de Belfort, ces terrains consistent en des grès et conglomérats comportant des fragments de roches cristallines formant le substrat de la forêt de Roppe (Nord de Belfort). Le milieu de cette série est entrecoupée de quelques bancs calcaires sur 2 à 3 m d'épaisseur probablement lacustres (Théobald N. et Devantoy J. 1963).** Les terrains du Permien supérieur ne sont pas présents dans la région qui est émergée à cette époque (260 – 252 Ma).

1.2 DÉMANTÈLEMENT DE LA PANGÉE (OUVERTURE DES OCÉANS ALPINS ET ATLANTIQUE) :

1.2.1 Trias (252 – 201 Ma)

La région reste émergée jusqu'au début du Trias (252 Ma). Le Trias est marqué par le retour épisodique de la mer dans la région, la sédimentation varie des marnes et grès (vasières et milieu détritique) à des précipitations évaporitiques (sels, gypse) et à des calcaires marins (Entroques et Cératites). La région est située en bordure méridionale d'une vaste plaine alluviale.

Le Trias inférieur débute par série gréseuse représentée par des grès, d'abord grossiers à nodules de manganèse, puis par des grès fins à Voltzia traduisant un milieu de dépôts deltaïque (mangrove).

Le Trias moyen (Muschelkalk, 247 – 242 Ma), est marquée par une série globalement régressive, les marnes et grès du Muschelkalk inférieur font place à des dépôts de gypse et de sel caractéristiques de milieux sursalés ensuite recouvert par une puissante série marneuse. Le climat est chaud, voire aride. Le Muschelkalk supérieur est représenté par des calcaires à Entroques (segments d'animaux marins vivants dans la zone photique, à faible profondeur) puis à Cératites (mollusques céphalopodes, ancêtres des ammonites) témoignant d'une transgression marine dans le secteur (Théobald N. et Devantoy J. 1963; Ménillet et al. 1989).

Au Trias supérieur, la région correspond à une vaste plaine ennoyée, peu profonde, marquée par des précipitations évaporitiques (Keuper moyen, 237 – 208 Ma). **Dans la région de Belfort, il se dépose plus de 100 m de marnes à intercalations de gypse et de sel gemme. Cette série se termine au Keuper supérieur (Réthien, 208 – 201 Ma) par des silts noirs et des grès micacés, traduisant un milieu de dépôt marin confiné, surmontés par des marnes rouges (dites « de Levallois ») (Théobald N. et Devantoy J. 1963)**.

1.2.2 Jurassique (201 – 145 Ma)

La transgression se généralise et perdure tout au long du Jurassique (201 – 145 Ma). La série débute, au Lias (201 – 174 Ma), par des dépôts silteux épicontinentaux (présence de la mer sur une plateforme continentale). **Dans la région de Belfort, le Lias est représenté par des alternances de marnes et de calcaires à prédominante marneuse. Au Lias inférieur (Hettangien – Sinémurien, 201 – 191 Ma), les marnes et calcaires à Gryphées (ancêtres des huîtres) témoignent d'un milieu de dépôt marin calme. La puissance des bancs calcaires reste inframétrique jusqu'à l'Aalénien (174 – 170 Ma). Les calcaires oolithiques ferrugineux de l'Aalénien se déposent en milieu réducteur (sulfure de fer (vert/noir)) de plus en plus oxydant (oxyde de fer, rouge) (Théobald N. et Devantoy J. 1963; Thiébaut et al. 1974; Ménillet et al., 1989).**

C'est à cette époque (Lias - Dogger) que s'ouvre la mer téthysienne alpine en place des actuelles Alpes (Champagnac 2005; Dèzes et al. 2004).

Une très forte épaisseur de calcaires (plus de 250m), parfois entrecoupée de niveaux marneux, se dépose ensuite du Bajocien (170 Ma) jusqu'au début du Kiméridgien (Ptérocérien, 154 Ma). Cette série débute par plus de 110 m de calcaires plus ou moins récifaux, à oolithes, parfois à polypiers (squelette calcaires de coraux) et Entroques. Au Bathonien supérieur (166 – 164 Ma), les dépôts deviennent plus marneux, entrecoupés de niveaux calcaires en plaquettes (« dalle nacrée » du Callovien supérieur, 161 – 159 Ma). À

l'Oxfordien (159 – 154 Ma), la sédimentation débute par des marnes sur 35 à 40 m d'épaisseur. L'Argovien et le Rauracien (Oxfordien Moyen et supérieur, 158 – 154 Ma) sont représentés par plus de 40 m de calcaires à polypiers, partiellement oolithiques. La série calcaire se termine au Kiméridgien inférieur (154 – 152 Ma) avec environ 60 m de calcaires micritiques témoignant d'un milieu de dépôt très calme avant de repasser à une sédimentation plus détritique et agitée avec des marnes et des calcaires oolithiques sur plus de 70 m (Théobald N. et Devantoy J. 1963; Thiébaut et al. 1974; Ménillet et al., 1989).

La mer se retire de la région à la fin du Jurassique ou au début du Crétacé, aucun terrain d'âge Tithonien (151 – 145 Ma) n'est retrouvé dans le secteur.

1.3 OUVERTURE ATLANTIQUE NORD, FERMETURE DES OCÉANS ALPINS (TEÉTHYS ET VALAISAN) :

1.3.1 Crétacé (145 – 66 Ma)

La région est émergée la plus grande partie du crétacé (145 – 65 Ma), les éventuels dépôts (s'il y en a eu) sont érodés pendant cette période. Seuls quelques dépôts crétacés sont préservés de l'érosion dans les synclinaux de la haute chaine Jurassienne (plus au sud) attestant de la présence de la mer au moins dans ce secteur (Notice de la carte géologique de Pontarlier). Les terrains émergés pendant cette période ont été fortement altérés (kaolinisation, formations sidérolithiques (riches en oxydes de fer)). Les terrains calcaires du Jurassiques subissent alors une érosion karstique importante, d'abord limitée à de la dénudation en surface et au développement de réseaux karstiques à faible profondeur (Ménillet et al. 1989; Lauritzen 1996; Sissingh 1998).

Au crétacé, s'ouvre l'océan Valaisan au niveau des Alpes occidentales actuelles ainsi que l'Atlantique Nord (Dèzes et al. 2004; Champagnac 2005; Carry 2007). La dynamique d'ouverture de l'océan Atlantique Nord va forcer les océans alpins à la fermeture (Téthys et Valaisan), se traduisant par une subduction à vergence sud de la plaque Européenne sous l'Apulie (Lemoine et al. 1986).

1.4 OUVERTURE DU FOSSE RHÉNAN (RIFT OUEST EUROPÉEN) ET FORMATION DES ALPES :

1.4.1 Éocène (56 – 34 Ma)

À l'Éocène (56 – 34 Ma), l'implication de la lithosphère océanique (océan Valaisan) dans la subduction engendre une augmentation de la convergence Europe – Afrique (environ 35mm/an (Dèzes et al. 2004)) et des contraintes extensives dans la plaque Européenne entraînant l'ouverture de bassins sédimentaires (Bressan, Rhénan). Cette phase extensive s'accompagne également d'un hydrothermalisme important, principalement dans les terrains Viséens, avec la mise en place de filons minéralisés (galène, blende, pyrite, chalcopyrite, cuivre) et de quartz (Thiébaut et al. 1974, feuille de Gyromagny).

Le contexte érosif, continental, initié au début du Crétacé perdure jusqu'à l'Éocène (56 Ma), date des premiers dépôts d'âge Paléogène présents dans la région de Belfort (Théobald N. et Devantoy J. 1963). Les premiers dépôts du fossé Rhénan sont lacustres et datent du Lutétien (48- 41 Ma) (Théobald N. et Devantoy J. 1963; Ménillet et al. 1989; Sissingh 1998). Des argiles rouges Éocènes sont retrouvées en remplissages de poches karstiques et étalées en nappes sur les surfaces calcaires du Jurassique supérieur, notamment au sud de Belfort. Ces argiles contiennent des minerais de fer sidérolithiques

issues de la remobilisation des produits d'altération des terrains Jurassiques (Contini 2000).

1.4.2 Oligocène (34 – 23.5 Ma)

À l'Oligocène (34 – 23 Ma), la lithosphère subduite en profondeur se sépare de celle en début de subduction (slab breack-off) dans la partie orientale et centrale des Alpes (Dèzes et al. 2004). Dans les Alpes occidentales, cependant, la lithosphère océanique subduite reste attachée à la plaque Européenne et continue d'induire une extension dans l'axe NO-SE. La mise en place de rétrochevauchements (chevauchements à vergence sud) dans les Alpes méridionales et l'élargissement des bassins du rift Ouest Européen (tels que les fossés Bressan et Rhénan) témoignent de cette Extension NO-SE (Dèzes et al. 2004; Briais et al. 2017). Les bassins Bressan (Ouest du Jura) et Rhénan (NE du Jura), orientés environ N10°E sont reliés par une zone de relais (appelée Rhine Bresse Transfert Zone, RBTZ) orientée environ N60°E. Cette structure est héritée des failles mises en place au cours de l'orogenèse Hercynienne, d'abord réactivée en transtension sénestre (mouvement décrochant avec déplacement du compartiment Nord vers l'Ouest associé à mouvement en faille normale) (Madritsch et al. 2009).

L'entrée en collision des lithosphères continentales Européenne (au Nord) et Apulienne (au Sud) se traduit par la surrection des Alpes ainsi que de la partie sud du Fossé Rhénan. Ce dernier se sépare en deux parties : le bassin potassique, au nord de Mulhouse, qui reste fortement subsident avec un remplissage sédimentaire marin et lagunaire ; et le fossé de Dannemarie (région de Belfort), au sud (Thiébaut et al. 1974; Ménillet et al. 1989; Sissingh 1998; Hinsken et al. 2007).

Une série de schémas structuraux résumant l'évolution géodynamique lors de la mise en place des Alpes sont présentés en figure 2.

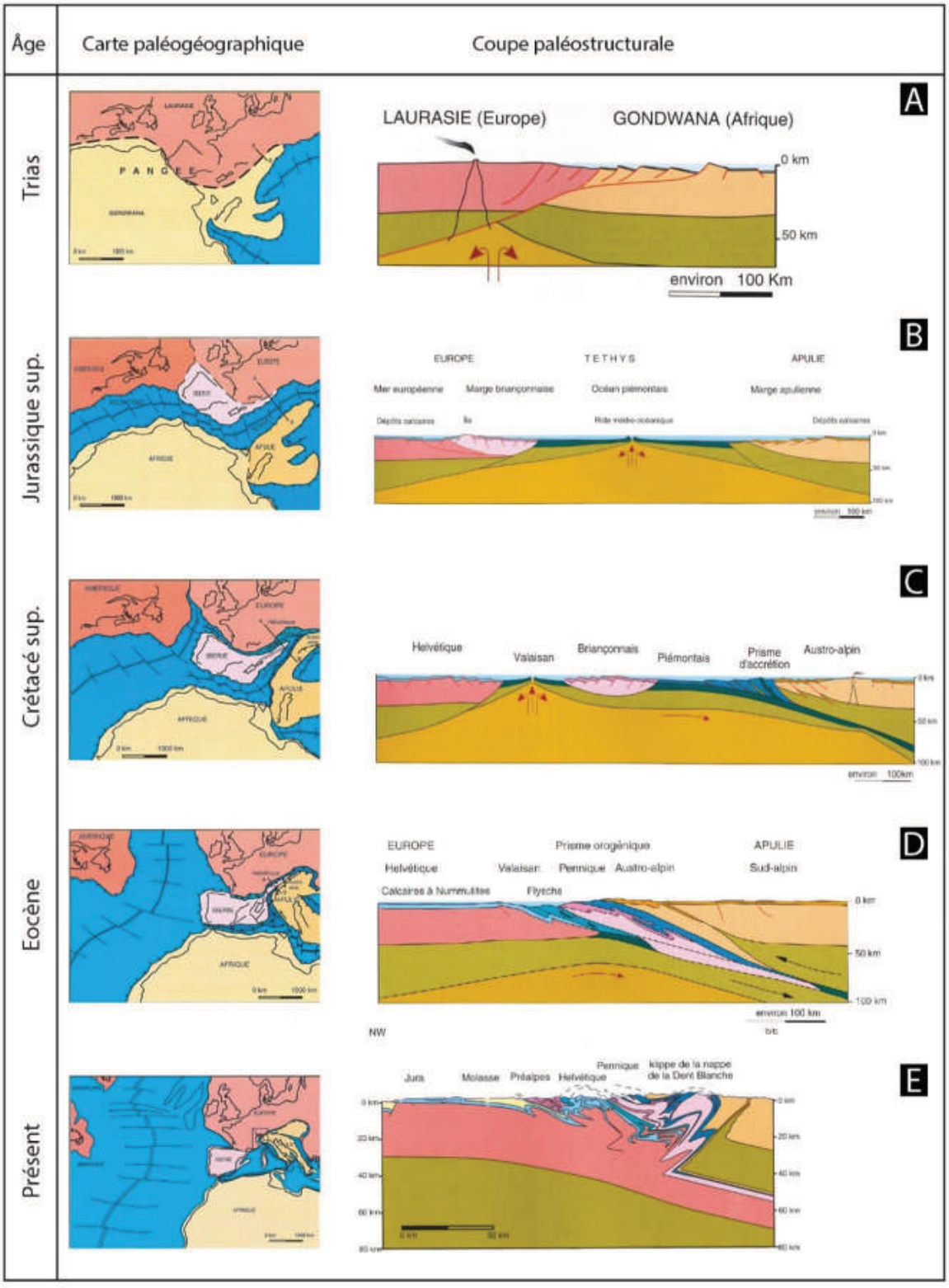


Figure 2 : Évolution tectonique et paléogéographique de la chaîne alpine, du Trias à l'actuel (Marthaler et al. *2001).*

La transgression marine, venant du Nord, atteint tout de même le sud du fossé Rhénan (Sissingh 1998 ; Hinsken *et al.* 2007) mais reste peu profonde et régulièrement confinée. Les dépôts débutent par un ensemble conglomératique côtier appelé « système de Bourogne » (ville au sud-est de Belfort) évoluant de conglomérats et sables calcaires en base à des calcaires à Helix (petit escargot marin). Le milieu de dépôt devient plus organique et réducteur à l'Oligocène supérieur (28 – 23.5 Ma), voire anoxique (formation de sapropel) comme en témoignent les schistes bitumineux riches en soufre appelés les Schistes à poissons présents à Froidefontaine (sud-est de Belfort) (Théobald N. et Devantoy J. 1963).

1.5 PROPAGATION DE LA COMPRESSION ALPINE (FORMATION DU JURA) :

1.5.1 Miocène (23.5 – 5.3 Ma)

Au Miocène (23.5 – 5.3 Ma), le sud du fossé Rhénan est émergé et le restera jusqu'à nos jours. *La compression alpine se propage vers le NO, la haute chaine du jura se met alors en place (9 Ma (Becker 2000; Rabin 2016)), puis la chaine externe. La zone de transfert Bresse-Rhin (RBTZ, figure 5) est alors réactivée en transpression dextre (mouvement décrochant, avec déplacement du compartiment Nord vers l'est, associé à une réactivation en chevauchement et au plissement des terrains alentours ((Giamboni, Ustaszewski, et al. 2004; Madritsch et al. 2009; Rabin 2016).*

La karstification des terrains calcaires Jurassiques initiée au Crétacé s'intensifie et s'approfondie sous l'effet de la surrection et de l'inclinaison des terrains (Lauritzen 1996). Cette dissolution des calcaires a également pour effet d'adoucir le relief jurassien (Mudry et Rosenthal 1977). Dans la haute chaine du Jura, le réseau karstique suit en partie les axes de plis et profite des failles décrochantes transversales pour recouper les structures. **Sur les plateaux et dans les bassins sédimentaires, tel que le secteur de Belfort, l'évolution karstique, principalement guidée par les failles Hercyniennes et Alpines, a probablement été plus intense dans les zones recouverte de sol, qui augmente l'agressivité des eaux (production de CO2 bactérienne et racinaire (Aubert 1969; Zambo et Ford 1997; Calmels *et al.* 2014)).**

1.5.2 Pliocène (5.3 – 2.6 Ma)

Au Pliocène (5.3 Ma), la lithosphère subduite sous les Alpes occidentales se détache (slab breack-off) (Dèzes *et al.* 2004 et références inclues)*. Les principales structures du Jura finissent de se mettre en place il y a environ 3.3 Ma (Becker 2000; Rabin 2016).*

1.6 ÉVOLUTION KARSTIQUE ET HYDROLOGIQUE QUATERNAIRE

La propagation de la déformation au Nord du Jura perdure jusqu'à très récemment, affectant le cours des rivières et les terrains quaternaires (Becker 2000; Ustaszewski et Schmid 2007; Madritsch et al. 2010; Rabin 2016)*.* **Dans le secteur de Belfort, les dépôts alluviaux tardi Pliocènes à Quaternaires ont enregistré un raccourcissement horizontal orienté NO-SE (compression) marqué par des plis et par la déviation des cours d'eau** (Ustaszewski et Schmid 2007; Madritsch et al. 2012)**.**

Le réseau hydrique dans l'avant pays alpin est perturbé dès le début du plissement de la haute chaine du Jura ((Giamboni, Wetzel, *et al.* 2004; Ziegler et Fraefel 2009) (*figure*) 3. **Le fossé de Dannemarie (secteur de Belfort) est rainé vers le SO jusqu'au début du Quaternaire (2.6 Ma).** La partie Nord et Est de ce fossé sera ensuite capturé par le réseau présent plus au nord, et s'écoulant vers le nord, sous l'effet de la forte subsidence de la partie nord du fossé Rhénan (Giamboni, Wetzel, *et al.* 2004; Ziegler et Fraefel 2009) pour former le Rhin actuel. **La ligne de partage des eaux se situe au NE et à l'est de Belfort de sorte que seule la partie la plus méridionales de Vosges est drainée par la Savoureuse qui traverse Belfort.**

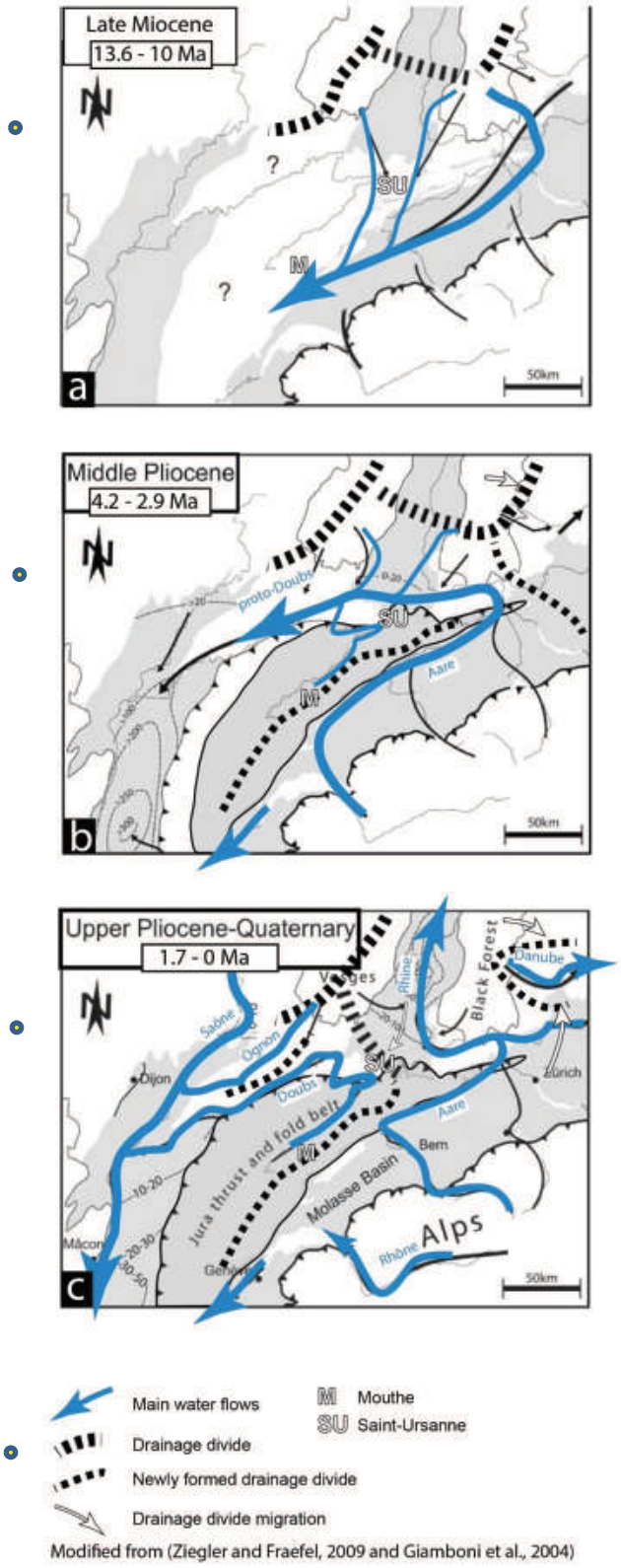


Figure 3 : Cartes schématiques de la partie nord des Alpes occidentales représentant l'évolution du réseau hydrique entre le Miocène (13.6 - 10 Ma) et aujourd'hui, (Rabin, 2016) ; a : tout l'avant pays alpin est drainé vers le sud-ouest au Miocène; b : déviation du réseau hydrique du Bassin Molassique vers le nord-est en réponse au soulèvement de la partie interne du Jura; c : capture d'une partie du Doubs, du Danube et du Rhin en réponse à la subsidence du fossé rhénan et aux interactions karstiques.

Les réseaux karstiques dans les terrains calcaires ont probablement continué d'évoluer suite aux derniers épisodes glaciaires (Riss (130 ka) et Würm (25 – 17 ka) (Campy 1992; Buoncristiani et Campy 2004)). **En effet la région de Belfort reste hors glace durant ces épisodes glaciaires (Seret et al. 1990; Ehlers et Gibbard 2004) (*figure* 4), le sol reste donc probablement recouvert de végétation et l'alimentation en eaux froides (fort potentiel de dissolution) associée à l'abaissement des rivières à probablement entrainé un approfondissement des réseaux (Bini et al. 1998; Ziegler et Fraefel 2009).**

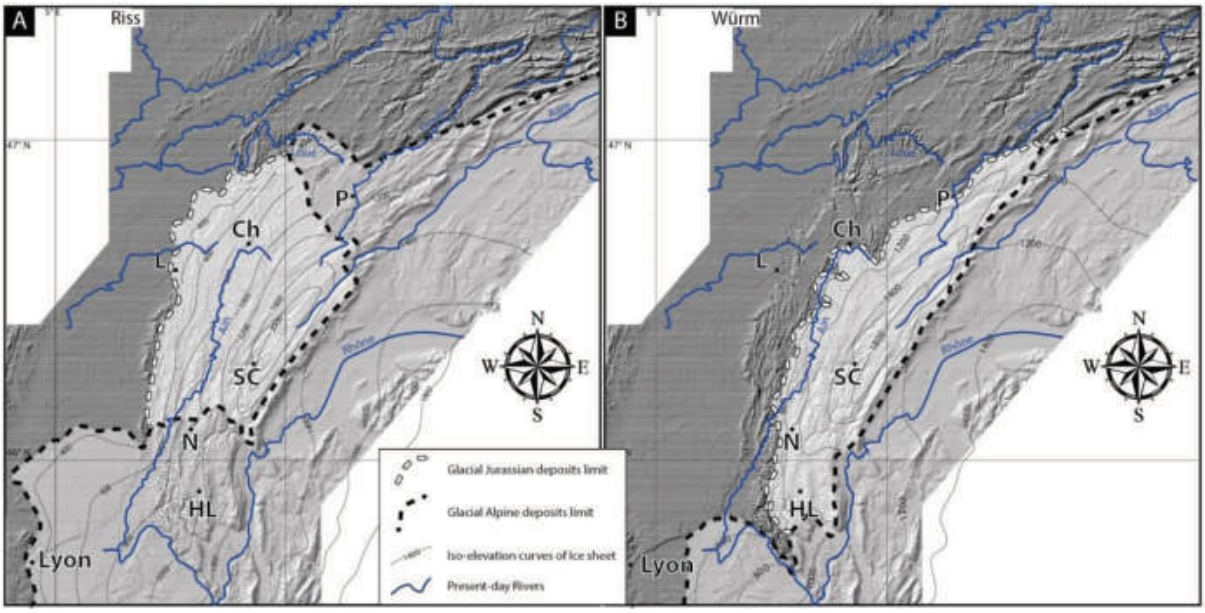


Figure 4 : Extension glaciaire dans le massif du Jura lors des deux derniers maximum glaciaires (Riss (130 ka) et Würm (25 à 17 ka), modifié d'après Campy, 1992; Buoncristiani et Campy, 2004a). La calotte glaciaire jurassienne est représentée en blanc transparent tandis que les glaciers alpins sont représentés en gris transparent. Les limites frontales des glaciers alpins et jurassiens sont représentées en lignes discontinues noires et blanches, respectivement. A : étendue glaciaire au cours du Riss (~ 130 ka). Le Jura était alors recouvert d'une calotte glaciaire indépendante de la dynamique alpine. Il s'agit du plus grand des derniers évènements glaciaires recouvrant la majeure partie de l'arc. B : étendue glaciaire au cours du Würm (25 à 17 ka) montrant une extension glaciaire moins importante que durant le Riss.

L'étendue et l'intensité de la karstification dans la région de Belfort est mal connue, elle semble limitée aux calcaires du Jurassiques mais pourrait également affecter les calcaires du Trias moyen. Les réseaux karstiques des calcaires Triasiques seraient alors plus récents. Au vu des références bibliographiques actuelles les grès du secteur ne sont pas karstifiés.

1.7 NEOTECTONIQUE :

Actuellement, le Jura est encore le siège de déformations associées à un contexte global transpressif (compression NE-SO associée à du décrochement) induit par la rotation antihoraire de la plaque adriatique (microplaque tectonique au sud des Alpes) et un éventuel couplage entre les réajustements gravitaires des Alpes et les contraintes induites par la dynamique de la lithosphère sous-jacente (slab breack-off) (Champagnac 2005; Rabin 2016 et références inclues) (figure 5). **Dans la région de Belfort, les dépôts alluviaux quaternaires présents au sud de Belfort sont plissés et les failles orientées NNE présentes plus à l'est dans le bassin de Dannemarie sont réactivée en failles décrochantes sénestres (compartiment Ouest se**

déplaçant vers le sud par rapport au compartiment Est) (Giamboni, Wetzel, et al. 2004; Ustaszewski et Schmid 2007 et références inclues). D'après ces auteurs, la région (partie Sud du fossé Rhénan) est sujette à une surrection (mouvement vertical positif sous l'effet de la compression) qui pourrait avoir participé à la capture du réseau de drainage par la partie Nord du fossé Rhénan.

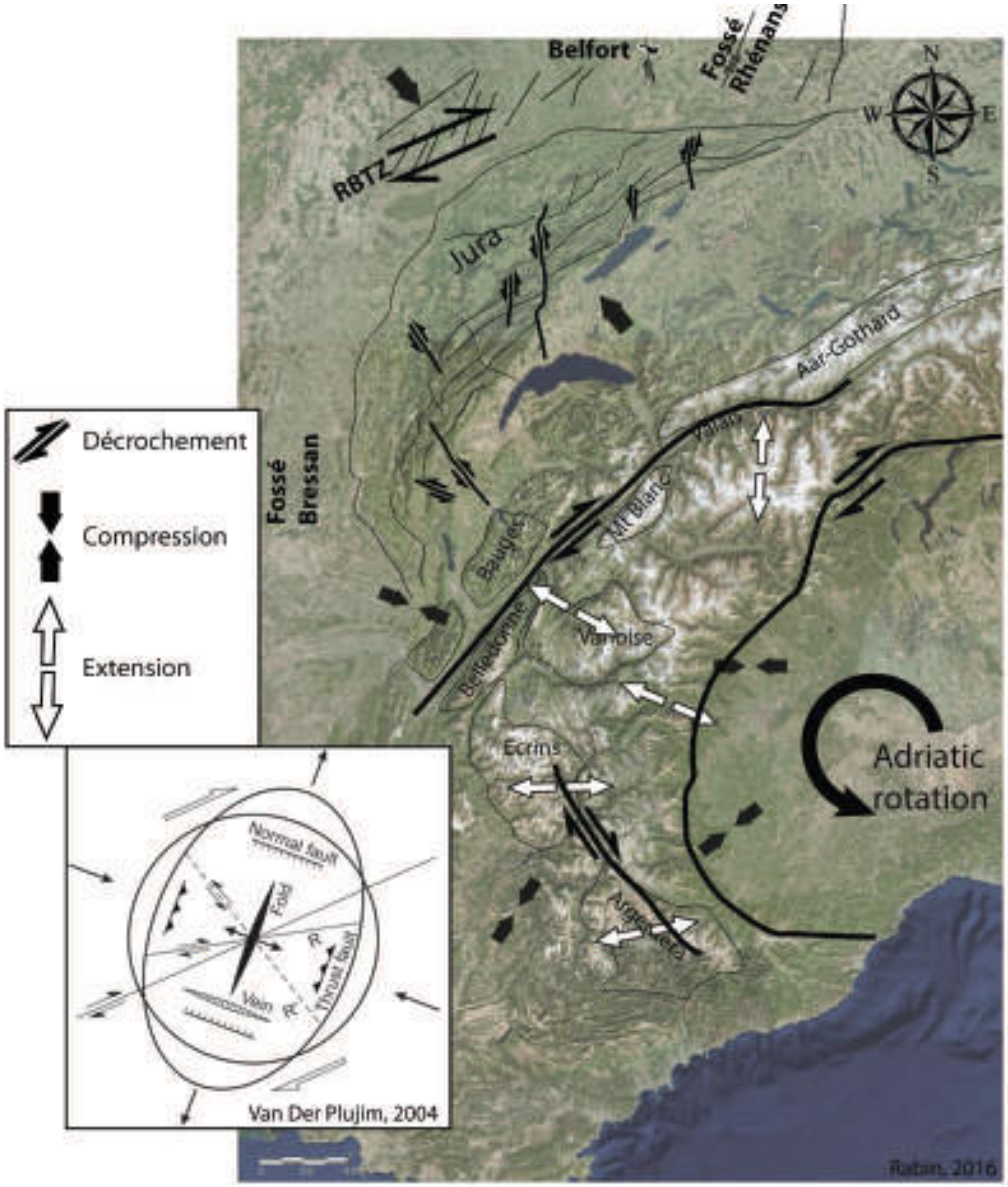


Figure 5 : Modèle de répartition de la déformation actuelle dans les alpes occidentales et l'arc Jurassien issu de (Rabin, 2016 et références inclues).

1.8 SITUATION GEOLOGIQUE ACTUELLE DE BELFORT :

Belfort est localisé à la limite entre deux région structurales, mises en place de manière quasi synchrones.

Au sud de Belfort se trouve le massif du Jura, résultant de la propagation septentrionale de la compression Alpine (9 à 3.3 Ma, voire actuelle (Becker 2000; Rabin et al. 2015, 2018)).

Au nord se trouve le bassin Rhénans correspondant à un bassin sédimentaire mis en place syn convergence alpine (Crétacé à Eocène, 145 – 34 Ma) lors du Rift Ouest Européen (Dèzes et al. 2004; Hinsken et al. 2007). Sa symétrie est guidée par les failles N10°E et N60°E héritées de l'orogenèse Hercynienne (Viséen, 340-300 Ma) (Madritsch 2008 et références incluses).

La partie urbanisée s'étend de part et d'autre de la Savoureuse, rivière drainant la partie sud des Vosges qui rejoint le Doubs plus loin au sud. Son cours suit la direction d'une faille décrochante dextre (déplacement relatif du compartiment Ouest vers le nord par rapport au compartiment Est) orientée N-S. Cette faille, probablement héritée de l'orogenèse Hercynienne, a d'abord été réactivée en faille normale (extensive) lors de l'ouverture du fossé Rhénan (Rift Ouest Européen, Éocène-Oligocène (55-23 Ma)) avant d'être réactivée en faille décrochante dextre post Pliocène (2.6 Ma) (Giamboni, Wetzel, et al. 2004; Giamboni, Ustaszewski, et al. 2004; Ustaszewski et Schmid 2007).

Cette faille fait partie d'un ensemble de failles décrochantes affectant le massif Jurassien et la partie sud du fossé Rhénan. Elles sont toutes perpendiculaires aux axes de plissement et sont héritées de l'orogenèse Hercynienne. Elles délimitent des compartiments dès le début de la mise en place du massif du Jura, ces compartiments ont donc été déformés de façon indépendante et on ne retrouve pas les mêmes structures dans chaque compartiment (Homberg et al. 1997; Affolter et Gratier 2004). A Belfort, les terrains à l'est de la Savoureuse (*i.e.* de la faille) sont continus du Jurassique supérieur au Trias inférieur, qui est discordant sur le socle Dévono-Dinantien (figure 6, coupe du haut). Tandis qu'à l'ouest de cette faille les calcaires du Jurassique moyen (Bajocien, noté J1a) sont en contact par faille avec le socle Dévono-Dinantien (figure 6, coupe du bas). La faille mettant en contact ces terrains fait partie d'une famille de failles orientées N60°E, héritées de l'orogenèse Hercynienne également et ayant connu plusieurs réactivations possibles. Ces failles sont plus nombreuses au NE de la commune où elles montrent un fonctionnement en faille décrochante dextre et/ou en faille normale (Théobald N. et Devantoy J. 1963; Contini 2000).

1.8.1 Faciès lithologiques de la commune de Belfort :

La commune de Belfort se retrouve à la limite de deux cartes géologiques différentes, le feuille de Belfort, à l'est, levée en 1963 (Théobald N. et Devantoy J. 1963) et la feuille de Lure, à l'ouest, levée en 1967 et révisée en 2000 (Contini 2000). Les notations des terrains diffèrent donc d'une carte à l'autre, afin de rendre ce rapport plus clair, l'ensemble des terrains géologiques sera noté selon les notations utilisées sur la carte de Belfort, dans certains cas, des subdivisions (inférieur / supérieur) seront utilisées pour correspondre aux descriptions de la carte de Lure.

L'âge des terrains présents sur la commune de Belfort s'étend du Dévonien (372 Ma) au Séquanien (Jurassique supérieur, 152 Ma, noté J7). Les terrains les plus anciens sont situés au nord de la commune et se rajeunissent en allant vers le sud. Les terrains le long de la Savoureuse sont recouvert par des dépôts éoliens (Loess) et alluviaux.

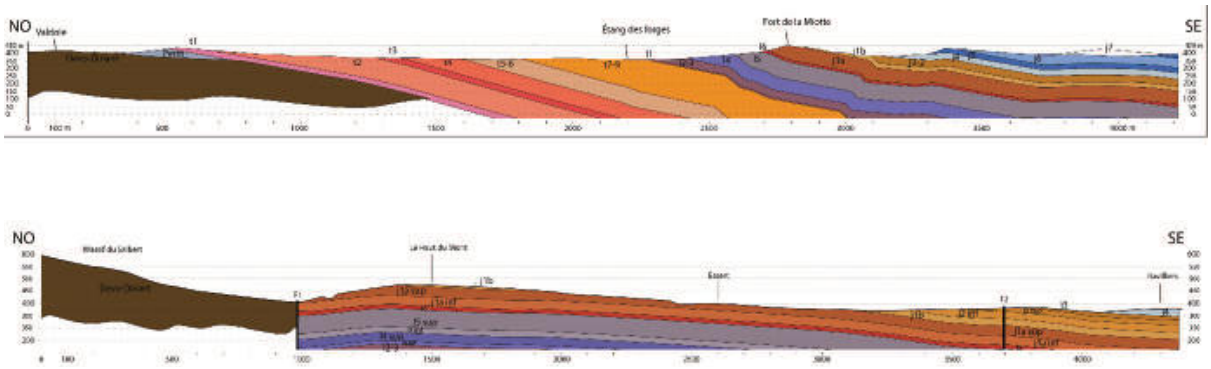


Figure 6 : Coupes géologiques schématiques de la partie Est (coupe du haut) et Ouest (coupe du bas) de la commune de Belfort. Réalisées à partir des cartes géologiques au 1/50000ème.

Socle Dévono-Dinantien, d7s (372-325 Ma) :

Ce sont les terrains les plus anciens de la commune, ils forment le massif de Salbert au NE et correspondent à des dépôts détritiques fortement déformés. Ils se présentent sous forme de schistes gréseux avec des passées pélitiques (roches à grains très fins) dont l'épaisseur totale est inconnue.

Aucun terrain Stéphanien ou Permien n'affleure sur le ban communal.

Le Trias (252 – 201 Ma) :

Aucun terrain de cette période n'est observable à l'affleurement dans la commune. Cependant, le fait que la série affleure de façon continue immédiatement à l'est de la commune indique que leur présence sous les dépôts quaternaires (éoliens et alluviaux) est plus que probable. Les descriptions lithologiques issues des forages ainsi que la grande diversité de terrains Triasiques du secteur (comprenant des marnes, des argiles, des calcaires, des grès et des dolomies ainsi que des niveaux évaporitiques) ne permettent pas de confirmer ou d'infirmer leur présence.

Le Trias inférieur : série gréseuse (Buntsandstein, t1 et t2)

Cette série débute par des grès grossiers contenant des galets reposant sur un lit de galets discontinu. Il est surmonté par des grès fins et un niveau de marnes argileuses et de grès irréguliers. L'épaisseur des grès fins et des marnes de la partie sommitale est d'environ 16 m d'après la notice de la carte de Belfort alors qu'elle serait de 50 à 60 m plus à l'ouest d'après la carte de Lure. L'épaisseur du premier niveau de grès n'est pas connue mais, d'après les coupes réalisées dans cette étude, l'ensemble du Trias inférieur pourrait avoir une épaisseur de l'ordre de la centaine de mètre.

Le Trias moyen :

Muschelkalk inférieur, t3 :

Représenté sur la feuille de Belfort par des marnes et des grès fins sur une épaisseur de 25m environ. Ce niveau est souvent dolomitisé. Les grès au faciès coquiller est très développé et fut exploité en carrière.

Les couches grises, t4 :

Il s'agit de marnes grises et bariolées contenant des niveaux de gypse et d'anhydrite surmontées par un niveau dolomitique appelée couches blanches. L'ensemble forme une série de 70 m d'épaisseur.

Les calcaires Triasiques, t5-6 :

Il s'agit d'une puissante série calcaire de 75 m d'épaisseur représentée par 50 m de calcaires coquillers surmontés par 25 m de calcaires dolomitiques (Lettenkohle).

Le Trias supérieur : Série des marnes irisées (t7-9) :

L'ensemble mesure plus de 150 m d'épaisseur constitué de 100 m de marnes à sel gemme et à gypse en base surmontées d'une cinquantaine de mètre de marnes dolomitique à argileuse et de dolomies.

Séries du Jurassique (201 – 145 Ma) :

Les terrains Jurassiques sont présents cartographiquement sous forme de bandes orientées N50°E passant sous le centre-ville de Belfort. À l'est, le Lias affleure en rive sud de l'étang de la Forge et la série est continue jusqu'au Séquanien (Jurassique supérieur). À l'ouest de la Savoureuse, quelques terrains Jurassiques apparaissent en bordure de la plaine alluviale mais sont régulièrement recouvert de Loess, d'éboulis et d'alluvions anciennes.

Lias (l1 à l6) :

Ces terrains sont peu présents à l'affleurement sur la commune. Le Lias inférieur (l1-l2) n'affleure que très localement à l'ouest de l'étang de la Forge tandis que le Lias moyen et supérieur sont présents en bandes de 100 à 150 m de large, orientés SO-NE au sud de cet étang.

Réthien (l1) :

La série débute par des marnes rouges (dites de « Levallois ») d'environ 5 m d'épaisseur. Il s'agit d'un niveau de grès micacé et de marnes rouges à noirâtres, schistoïdes (l1).

Sinémurien –Hettangien (l2-3) :

L'Hettangien est représenté par des calcaires gréseux en base. Il s'est déposé ensuite des bancs calcaires infra métriques intercalés dans des marnes à Gryphées (sorte d'huîtres) surmontés par un niveau de calcaires à Entroques (**s**egments d'animaux marins vivants dans la zone photique, à faible profondeur). La série se termine par un niveau de 25 m de marnes schistoïdes contenant des nodules calcaires et recouvertes d'un fin niveau calcaire d'un mètre d'épaisseur.

Pliensbachien (l4) :

Niveau de calcaires marneux et de marnes schistoïdes. Ils sont décrits comme correspondant à des marnes contenant des nodules calcaires sur une vingtaine de mètre surmonté par un niveau plus calcaire de 10 m environ. Les épaisseurs issues de cartes géologiques varient de 30 à 44 m, mais, d'après la notice de la carte de Lure (Contini, 2000), l'épaisseur de ce niveau est difficile à estimer car sa partie inférieure peut subir des réductions tectoniques. D'après les coupes géologiques réalisées (figure 6), l'épaisseur de ce niveau pourrait atteindre 60 m.

Toarcien (l5) :

Il s'agit du faciès appelé « schistes cartons ». Cela correspond à un ensemble de marnes argileuses schistoïdes régulièrement riche en matière organique leur donnant une teinte gris foncé. Son épaisseur varie de 20 m à l'est à 60 m à l'ouest.

Aalénien (l6) :

Ce niveau calcaire se présente en bancs décimétriques à centimétriques souvent très fracturé. Il contient des niveaux ferrugineux et oolithiques caractéristiques de cet étage. Le niveau ferrugineux proprement dit fait environ 15 m d'épaisseur. Dans la notice de la carte de Belfort, il est indiqué que ce niveau se rattache à une série calcaire de plus de 50 m de puissance mais les coupes géologiques n'ont pas permis de retrouver une telle épaisseur sur la commune de Belfort.

Le Dogger (J1 à J3) :

Le Bajocien (J1a et b) :

Le Bajocien est représenté par des calcaires massifs à Entroques puis à polypiers (squelettes calcaires de coraux), localement oolithique en milieu de série, il se termine par un calcaire très riche en oolithes, appelé « Grande Oolithe » (J1b). Le tout mesure environ 80 m d'épaisseur (40 à 50 m pour le Bajocien inférieur et moyen (J1a) et 20 à 30 m de Grande Oolithe (J1b)).

Bathonien (J2) :

Ces terrains présentent des variations latérales d'épaisseurs importantes. À l'ouest de la Savoureuse, sur la feuille de Lure, le Bathonien est décrit comme une puissante série de plus de 50 m dont l'épaisseur diminue vers l'est à partir d'Arcey (30 km au SO de Belfort). Près de Belfort, cette série débute par les marnes « de Bavilliers » atteignant 5 m d'épaisseur localement (au SO de Belfort), surmontées par un niveau de calcaires oolithiques de 15 m à Bavilliers (Contini 2000). La série se termine par 20 m de marnes à Rhynchonelles (sortes de mollusques marins possédant une coquille à relief). À l'est de la Savoureuse, le Bathonien est réduit à 16 m de marnes à Rhynchonelles surmontant un niveau calcaire oolithique peu épais (Théobald N. et Devantoy J. 1963).

Callovien (J3) :

Le Callovien est représenté par 15 à 20 m de sédiments marneux et marno-calcaires. Il débute par 6 m de calcaires micacés se débitant en dalles (« Dalle Nacrée ») surmontée par 2 à 3 m de calcaires oolithiques ferrugineux et se terminant par des marnes à Peltoceras (ammonites caractéristiques du Callovien supérieur).

Le Malm (J4 à J7) :

Oxfordien inférieur (J4) :

Il s'agit essentiellement de terrains marneux de 30 à 40 m d'épaisseur comportant de chailles et des éléments silicifiés en partie supérieure.

Oxfordien moyen (Argovien, J5) :

L'Argovien consiste en des bancs calcaires marneux noirs ou gris séparés par des marnes terreuses noires renfermant des fossiles coralliens (polypiers, Crinoïdes, spicules d'Oursins…).

La notice de la carte géologique de Belfort indique une épaisseur de 20 m pour cet ensemble tandis qu'il semble dépasser les 50 m sur la carte de Lure. D'après les coupes géologiques réalisées, l'Argovien aurait une épaisseur d'environ 50 m sur la commune de Belfort.

Oxfordien supérieur (Rauracien, J6) :

Cette série de 45 à 50 m de puissance est composée de calcaires oolithiques blancs à Nérinnées (gastéropodes marins présents dans les mers chaudes) et polypiers surmontés par 20 à 25 m de calcaires compact blanc à Diceras (mollusque bivalve vivant au fond des mers entre le Jurassique supérieur et le Crétacé inférieur).

Kimméridgien inférieur (Séquanien, J7) :

Il s'agit d'une puissante série calcaire d'une centaine de mètres d'épaisseur. Elle débute par 30 à 35 m de calcaires micritiques blanc à gris, à cassure conchoïdale (aspect de silex taillé à la cassure). En milieu de série se sont déposés environ 30 m de marnes et de calcaires en plaquettes riches en Astartes (petits bivalves fouisseurs) surmontés par 35 m de calcaires blancs à gris, friables et présentant des passées oolithiques ou marneuses.

1.8.2 Les nappes d'eaux souterraines :

D'après la notice de la carte géologique de Lure, les formations géologiques faisant office d'aquifère sont :

Les terrains du socle Dévono-Dinantien : constitués de roches peu perméables mais très fracturé donnant des sources de faibles débits et souvent temporaires.

Les terrains du Permien : ils sont peu perméables (même dans les grès et conglomérats) mais présentent de nombreuses petites sources (au moins sur la feuille de Lure).

Les terrains du Trias constituent la plus importante réserve d'eau, connue sous le nom de la nappe des Grès du Trias Inférieur (GTI). Les principaux niveaux de sources se trouvent :

- dans les Grès de l'Arsot (base du Trias) : ces grès ont une forte perméabilité car ils sont peu cimentés et très friables. Ils représentent la base du Buntsandstein (t1).

- une ligne de source est également présente à la base des grès intermédiaires (t2).

- des grès coquillers ou argileux du Muschelkalk (t3) proviennent des sources de moindre importance.

Les eaux fournies par les grès du buntsandstein sont faiblement minéralisées à pH acide (5 à 6) contenant du chlore et du magnésium.

Les calcaires coquilliers du Muschelkalk supérieur et de la Lettenkokle (t5-6) renferment une nappe karstique dont les résurgences se trouvent au niveau des dolomies correspondantes aux couches blanches. Ces eaux sont dures, se troublant par temps de pluie et chargées en calcium, magnésium, sulfates, bicarbonates et chlorures.

Le Jurassique :

Lias :

La base des grès du Réthien (l1) donne de nombreuses petites sources à faibles débits.

Une nappe karstique est également présente les calcaires à Gryphée (l2-3) mais avec de débits faibles et qui se troublent par temps de pluie.

Quelques aquifères à débit très faible sont présents dans les terrains du Lias moyen et supérieur, il existe quelques sources à la base du Domérien supérieur (l4) et des « Schistes cartons » du Toarcien (l5).

Le Dogger et le Malm :

Les calcaires du Jurassiques moyen sont fortement karstifiés. Le plus important niveau de résurgence de ces réseaux karstiques se situe à la base de l'Aalénien (l6), au contact des marnes du Lias, avec des débits parfois important compte tenu de l'étendue des bassins d'alimentation. Il s'agit d'eaux très dures riches en calcium et magnésium.

Les calcaires de Bonnevaux (Argovien, J5) présentent des réseaux karstiques de petites dimensions donnant des sources moyennement minéralisées à pH proche de 7.

Les calcaires du Jurassiques supérieur sont également fortement karstifiés. Les exsurgences de ces réseaux sont localisées plus au sud, en dehors de la commune de Belfort, où elle est captive et protégée sous la série essentiellement marneuse du Tertiaire (BRGM 1996).

La plaine alluviale de la Savoureuse forme l'aquifère le plus superficiel.

1.9 BIBLIOGRAPHIE :

Affolter, T., et J. P. Gratier. 2004. « Map View Retrodeformation of an Arcuate Fold-and-Thrust Belt: The Jura Case ». *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 109 (B3). https://doi.org/10.1029/2002JB002270.

Aubert, Daniel. 1969. *Phénomènes et formes du karst jurassien*. Birkhaüses.

Becker, Arnfried. 2000. « The Jura Mountains — an active foreland fold-and-thrust belt? » *Tectonophysics* 321 (4): 381-406. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00089-5.

Bini, Alfredo, Paola Tognini, et Luisa Zuccoli. 1998. « Rapport entre karst et glaciers durant les glaciations dans les vallées préalpines du Sud des Alpes ». *Karstologia* 32 (1): 7-26. https://doi.org/10.3406/karst.1998.2422.

BRGM. 1996. « Identification des ressources en eaux souterraines profondes du Sud-Est du Territoire de Belfort ». BRGM - R 38976, 33p., 5fig., 2tabl., 7ann.

Briais, Justine, Eric Lasseur, Catherine Homberg, Laurent Beccaletto, Renaud Couëffé, Nicolas Bellahsen, et Jean-Jacques Chateauneuf. 2017. « Sedimentary record and structural analysis of the opening of the European Cenozoic Rift System: The case of the Upper Rhine Graben ». In , 19:17227. http://adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..1917227B.

Buoncristiani, et Michel Campy. 2004. « The palaeogeography of the last two glacial episodes in France: The Alps and Jura ». In *Developments in Quaternary Sciences*, édité par J. Ehlers and P.L. Gibbard, Volume 2, Part 1:101-10. Quaternary Glaciations Extent and Chronology Part I: Europe. Elsevier. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1571086604800599.

Calmels, Damien, Jérôme Gaillardet, et Louis François. 2014. « Sensitivity of carbonate weathering to soil CO2 production by biological activity along a temperate climate transect ». *Chemical Geology* 390 (décembre): 74-86. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.10.010.

Campy, Michel. 1992. « Palaeogeographical relationships between Alpine and Jura glaciers during the two last Pleistocene glaciations ». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 93 (1–2): 1-12. https://doi.org/10.1016/0031-0182(92)90180-D.

Carry, Nicolas. 2007. « De la subduction continentale à l'exhumation dans les Alpes Penniques. Modélisations thermo-mécanique et paléogéographique. » Phdthesis, Université Rennes 1. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00166220/document.

Champagnac, Jean-Daniel. 2005. « Tectonique cassante de l'arc interne des Alpes occidentales; implications géodynamiques ». Université Joseph-Fourier - Grenoble I, Université de Neuchâtel. http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00008513.

Contini, D. 2000. « Notice explicative de la feuille Lure à 1/50'000e ». *Editions du BRGM, Service géologique national, Paris*.

Dèzes, P., S.M. Schmid, et P.A. Ziegler. 2004. « Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Alpine and Pyrenean orogens with their foreland lithosphere ». *Tectonophysics* 389 (1–2): 1-33. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.06.011.

Ehlers, J., et P. L. Gibbard. 2004. *Quaternary Glaciations - Extent and Chronology: Part I: Europe*. Elsevier.

Feys R., et Greber CH. 1970. « Pour une synthèse du Permien en France ». BRGM - Orléans - 70SGN038GEO.

Giamboni, M., K. Ustaszewski, S. M. Schmid, M. E. Schumacher, et A. Wetzel. 2004. « Plio-Pleistocene transpressional reactivation of Paleozoic and Paleogene structures in the Rhine-Bresse transform zone (northern Switzerland and eastern France) ». *International Journal of Earth Sciences* 93 (2): 207-23. https://doi.org/10.1007/s00531-003-0375-2.

Giamboni, M., Andreas Wetzel, Bertrand Nivière, et Markus Schumacher. 2004. « Plio-Pleistocene Folding in the Southern Rhinegraben Recorded by the Evolution of the Drainage Network (Sundgau Area; Northwestern Switzerland and France) ». *Eclogae Geologicae Helvetiae* 97 (1): 17-31. https://doi.org/10.1007/s00015-004-1112-4.

Hinsken, Sebastian, Kamil Ustaszewski, et Andreas Wetzel. 2007. « Graben Width Controlling Syn-Rift Sedimentation: The Palaeogene Southern Upper Rhine Graben as an Example ». *International Journal of Earth Sciences* 96 (6): 979-1002. https://doi.org/10.1007/s00531-006-0162-y.

Homberg, C., J. C. Hu, J. Angelier, F. Bergerat, et O. Lacombe. 1997. « Characterization of Stress Perturbations near Major Fault Zones: Insights from 2-D Distinct-Element Numerical Modelling and Field Studies (Jura Mountains) ». *Journal of Structural Geology* 19 (5): 703-18. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(96)00104-6.

Lauritzen, Stein-Erik. 1996. *Climate Change: The Karst Record*. Karst Waters Institute.

Lemoine, Marcel, Thierry Bas, Annie Arnaud-Vanneau, Hubert Arnaud, Thierry Dumont, Maurice Gidon, Maurice Bourbon, et al. 1986. « The continental margin of the Mesozoic Tethys in the

Western Alps ». *Marine and Petroleum Geology* 3 (3): 179-99. https://doi.org/10.1016/0264-8172(86)90044-9.

Madritsch, Herfried. 2008. « Structural Evolution and Neotectonics of the Rhine-Bresse Transfert Zone ». University of Basel. http://edoc.unibas.ch/diss/DissB_8470.

Madritsch, Herfried, Alexandre Kounov, Stefan M. Schmid, et Olivier Fabbri. 2009. « Multiple fault reactivations within the intra-continental Rhine–Bresse Transfer Zone (La Serre Horst, eastern France) ». *Tectonophysics* 471 (3–4): 297-318. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.044.

Madritsch, Herfried, Frank Preusser, et Olivier Fabbri. 2012. « Climatic and Tectonic Controls on the Development of the River Ognon Terrace System (Eastern France) ». *Geomorphology* 151 (mai): 126-38. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.01.023.

Madritsch, Herfried, Frank Preusser, Olivier Fabbri, Vincent Bichet, Fritz Schlunegger, et Stefan M. Schmid. 2010. « Late Quaternary Folding in the Jura Mountains: Evidence from Syn-Erosional Deformation of Fluvial Meanders ». *TERRA NOVA* 22 (2): 147-54. https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2010.00928.x.

Marthaler, Michel, Claude Nicollier, et Arthur Escher. 2001. *Le Cervin est-il africain?: Une histoire géologique entre les Alpes et notre planète*. Lep.

Matte, P. 1991. « Accretionary History and Crustal Evolution of the Variscan Belt in Western-Europe ». *Tectonophysics* 196 (3-4): 309-37. https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90328-P.

———. 2001. « The Variscan Collage and Orogeny (480-290 Ma) and the Tectonic Definition of the Armorica Microplate: A Review ». *Terra Nova* 13 (2): 122-28. https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2001.00327.x.

Ménillet, F., M. Coulon, C. Fourquin, J. C. Paicheler, J. M. Lougnon, et M. Lettermann. 1989. « Carte géologique de la France à 1/50 000e, feuille Thann (412) ». *Ed. BRGM, Orléans. Carte+ notice*.

Mudry, Jacques, et Patrick Rosenthal. 1977. « La Haute-chaîne du Jura entre Morez, Saint-Claude et la Pesse. Étude géologique et hydrologique ». Université de Franche-Comté.

Rabin, Mickael. 2016. « Caractérisation de la déformation récente dans une chaine orogénique lente : l'arc du Jura. Approches combinées morphotectonique, géodésique et géophysique ». http://www.theses.fr/2016BESA2008/document.

Rabin, Mickael, Christian Sue, Pierre G. Valla, Jean-Daniel Champagnac, Nicolas Carry, Vincent Bichet, Urs Eichenberger, et Jacques Mudry. 2015. « Deciphering Neotectonics from River Profile Analysis in the Karst Jura Mountains (Northern Alpine Foreland) ». *Swiss Journal of Geosciences*, octobre, 1-24. https://doi.org/10.1007/s00015-015-0200-5.

Rabin, Mickael, Christian Sue, Andrea Walpersdorf, Pierre Sakic, Julie Albaric, et Benjamin Fores. 2018. « Present-Day Deformations of the Jura Arc Inferred by GPS Surveying and Earthquake Focal Mechanisms ». *Tectonics* 37 (10): 3782–3804.

Rogers, John J. W., et M. Santosh. 2003. « Supercontinents in Earth History ». *Gondwana Research* 6 (3): 357-68. https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70993-X.

Seret, Guy, Eli Dricot, et G. Wansard. 1990. « Evidence for an early glacial maximum in the French Vosges during the last glacial cycle ». *Nature* 346 (6283): 453.

Sissingh, W. 1998. « Comparative Tertiary stratigraphy of the Rhine Graben, Bresse Graben and Molasse Basin: correlation of Alpine foreland events ». *Tectonophysics* 300 (1): 249-84. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00243-1.

Théobald N., et Devantoy J. 1963. « Notice explicative de la feuille Belfort (444) au 1/50'000e ». *Editions du BRGM, Service géologique national, Paris*.

Thiébaut, J., N. Théobald, et H. Hudeley. 1974. « Carte géolog. France (1/50000), feuille Giromagny ». *BRGM, Orléans*.

Ustaszewski, Kamil, et Stefan M. Schmid. 2007. « Latest Pliocene to Recent Thick-Skinned Tectonics at the Upper Rhine Graben - Jura Mountains Junction ». *Swiss Journal of Geosciences* 100 (2): 293-312. https://doi.org/10.1007/s00015-007-1226-0.

Zambo, L., et D. C. Ford. 1997. « Limestone Dissolution Processes in Beke Doline Aggtelek National Park, Hungary ». *Earth Surface Processes and Landforms* 22 (6): 531-43. https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199706)22:6<531::AID-ESP711>3.0.CO;2-I.

Ziegler, Peter A., et Marielle Fraefel. 2009. « Response of drainage systems to Neogene evolution of the Jura fold-thrust belt and Upper Rhine Graben ». *Swiss Journal of Geosciences* 102 (1): 57-75. https://doi.org/10.1007/s00015-009-1306-4.

Annexe 7
Planche photographique des zones d'aléa glissement de terrain

Types de profil de sol à dominante rocheuse



Calcaire à débit centimétrique



Calcaire à débit décimétrique



Schistes plus ou moins altérés en débit centimétrique

Exemple de zones d'aléa faible



En bordure de la Savoureuse



Sur pente moyenne en terrain marneux



Sur pente faible en zone urbanisée



Sur calcaire à débit centimétrique en surface structurale

Exemple de zones d'aléa moyen





Sur zones fortifiées et remparts



Sur remblais sous la citadelle



Sur talus localisé en remblais (de moins de 10m de haut)

Exemple de zones d'aléa fort



Sur fortes pentes (>50%) et éboulis



Sur calcaire en aval pendage avec fort plongement (>30°) et forte pente (>50%)





Sur remblais et/ou fortes pentes (>50%) sous la Citadelle



Sur forte pente et/ou en zone de talweg dans les schistes du mont Salbert



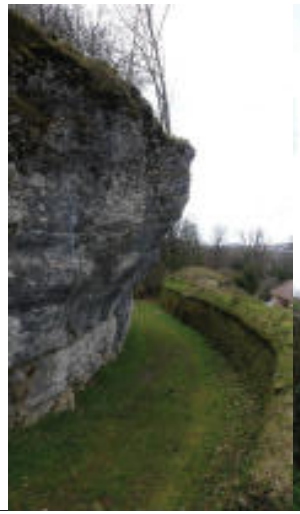
Annexe 8
Planche photographique des zones de départ de chute de blocs

Code	Photographie
A1	  

A2	 
A3	 

A4	 
A5	 

A6	
A7	

A8	 
A9	  

A10	
A11	

A12	
A13	

A14	 
A15	 

A16	 
A17	 

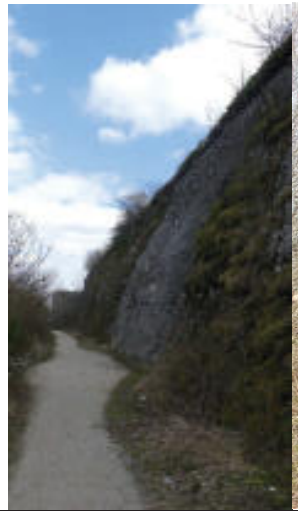
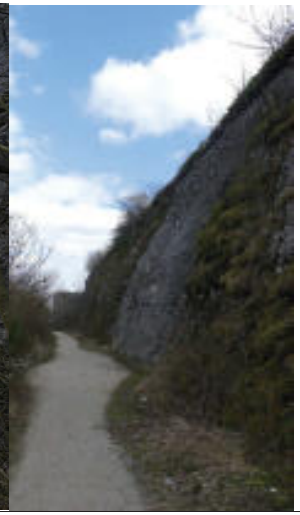




A18





A19	 
A20	  

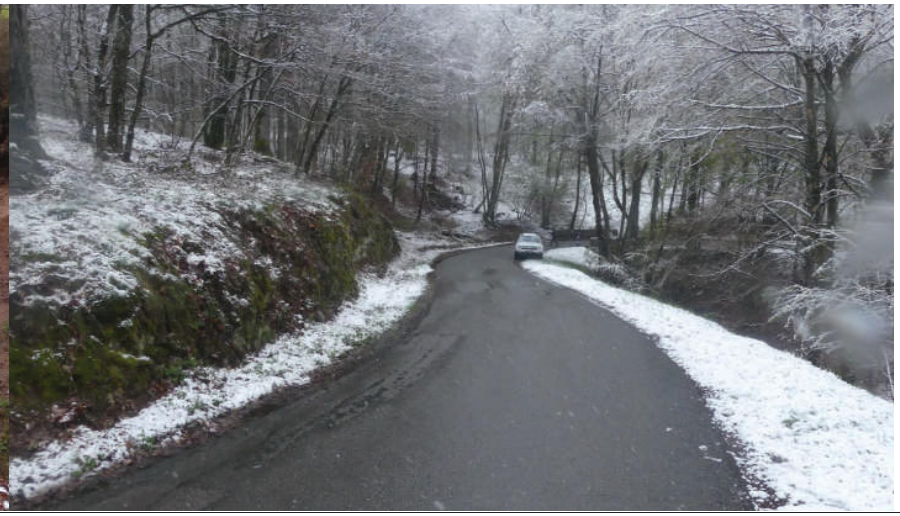
A21	
A22	

A23	
A24	

A25	 
A26	 

A27	
A28	

A29	 
A30	 

A31	
A32	 

A33	



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

Direction régionale Bourgogne-Franche-Comté
27 rue Louis de BroglieAdresse
21000 DIJON – France
Tél. : 03 80 72 90 40