

Document public

Scénario départemental de risque mouvements de terrain Méthodologie et processus de réalisation

Rapport final

BRGM/RP-59065-FR

Novembre 2011

Convention CV 05000195 MEDD/DPPR-BRGM
Convention de Recherche & Développement partagés Préfecture du Jura - BRGM



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

Scénario départemental de risque mouvements de terrain Méthodologie et processus de réalisation

Rapport final

BRGM/RP-59065-FR

Novembre 2011

O. Sedan, M. Terrier, A. Hohmann, H. Kobayashi, C. Mathon, J. Rohmer

Vérificateur :

Nom : G. Grandjean

Date : 21/11/11

Signature :



Approbateur :

Nom : H. Modaressi

Date : 23/11/2011

Signature :



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : carte, méthode, mouvement de terrain, aléa, vulnérabilité, risque, PPR

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

Sedan O., Terrier M., Hohmann A., Kobayashi H., Mathon C., Rohmer J. (2011) – Scénario de risque mouvements de terrain : Méthodologie et processus de réalisation, Rapport BRGM/RP-59065-FR, 291pp, 100 fig., 19 tab., 8 ann.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Afin d'optimiser la programmation des PPR et, plus largement, de disposer d'une vision homogène du risque mouvement de terrain au niveau national, le Ministère de l'Environnement a demandé au BRGM une méthode d'évaluation du risque à l'échelle départementale. Ce travail a fait l'objet d'une double convention : Convention CV 05000195 MEDD/DPPR et BRGM, Convention de Recherche & Développement partagés Préfecture du Jura et BRGM.

La méthodologie SDR-MVT a été construite avec le souci de :

- proposer un processus aux règles clairement définies,
- s'appuyer sur des données faciles d'accès, disponibles en tous lieux, cohérentes avec l'échelle 1/50 000 (échelle du bassin versant, voire d'un département).

Pour une comparaison et hiérarchisation du risque de mouvement de terrain sur l'ensemble du territoire, il est nécessaire au préalable de disposer d'informations quantifiées sur l'aléa, notamment au regard de la prise en compte de la composante probabilité d'occurrence du phénomène. L'effort méthodologique engagé a donc porté plus particulièrement sur cette évaluation quantitative de l'aléa, prenant en compte la propagation des phénomènes et la gestion des incertitudes.

Après avoir fixé les grandes lignes du processus de cartographie, leur mise en œuvre sur un territoire devait permettre de tester et valider la méthodologie. La zone pilote choisie correspond à 1/3 du département du Jura.

Ce présent rapport concerne : la méthode retenue, les résultats sur la zone pilote, des exemples de valorisation des cartes de risque pour une comparaison et hiérarchisation du risque au niveau des communes étudiées.

- La méthode tient compte des types de mouvements de terrain suivant :
 - Chutes de blocs ou éboulements rocheux,
 - Glissements de terrain,
 - Coulées boueuses.

Les données de base minimales nécessaires sont :

- La carte géologique à 1/50 000 (format vecteur),
- Le MNT au pas de 50 m,
- La carte de l'occupation des sols (Corine land Cover),
- Les photographies aériennes (mission IGN, à défaut Géoportail)

- La Base de données BDMVT,
- La BD Carto (contour des communes, zones bâties, limites de falaises, voies de communication routières).
-

■ La méthode SDR-MVT proposée concerne l'évaluation **quantitative** de l'aléa et du risque aux mouvements de terrain. Cette méthode permet une cartographie la plus objective possible de l'aléa, à une échelle de l'ordre du 1/50 000, suivant des règles d'évaluation **empirico-déterministe** clairement définies, et un affichage des niveaux d'aléa suivant une **échelle d'intensité homogènes quantifié, probabiliste**.

Les phénomènes pris en compte seront : les glissements, les chutes de pierres et éboulements, et enfin les coulées de boue.

■. Pour les SDR-MVT, les enjeux retenus sont les zones bâties (ou urbanisées) et les voies de communication routière. La vulnérabilité des enjeux est représentée par une fonction binaire (indemne/détruit) selon qu'ils sont touchés (ou pas) par l'instabilité.

Le risque calculé correspond au produit de la probabilité de survenance du phénomène par la valeur (exprimée en longueur, surface, nombre, ...) de l'enjeu.

Au niveau des communes, le risque est calculé 1) indépendamment des zones bâties et 2) sur les zones bâties des communes suivant une échelle de valeurs absolues (nombre d'hectares affectés) ou relatives (pourcentage affecté). Pour le réseau routier, il s'agit de : 1) cartes d'exposition au risque, celles-ci indiquent la valeur de l'aléa aux mouvements de terrain le long du réseau, 2) cartes de risque par commune, avec indication de la longueur du réseau routier exposée,

Concernant la zone pilote du Jura, à partir de cette analyse globale du risque, il ressort que les communes suivantes sont celles où le niveau de risque (relatif ou absolu) est le plus élevé : Salins-les-Bains, Nevy-sur-Seille, Vaux-sur-Poligny, Blois-sur-Seille, Ladoye-sur-Seille, Saint-Tiebaud, Poligny et Bellefontaine.

■ Les processus d'évaluation proposées pour les SDR-MVT autorisent une comparaison inter-départementale tant au niveau des cartes d'aléa que des cartes de risque. En outre, les cartes d'aléas obtenues à l'échelle 1/50 000 constituent des données utiles pour la réalisation de cartes à plus grande échelle, pour l'homogénéisation des classifications des niveaux d'aléa des cartes existantes (référentiel de l'échelle d'aléa).

In fine, une démarche de hiérarchisation globale du risque de mouvements de terrain est proposée, par pondération des résultats de calculs du risque absolu ou relatif suivant le type de phénomène considéré. Cependant, le mode de structuration sous SIG des cartes d'aléa et de risque sous SIG peuvent permettre aux futurs utilisateurs d'établir d'autres critères de hiérarchisation selon la problématique visée.

Sommaire

1. Introduction	21
1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE	21
1.2 CHOIX DU SITE PILOTE	23
1.3 DEROULEMENT DU PROJET	26
2. Glossaire, notion de cartographie des mouvements de terrain, principaux types de mouvements de terrain.....	29
2.1 GLOSSAIRE	29
2.2 LES PRINCIPAUX TYPES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN.....	34
2.2.1 Les chutes de blocs ou de masse rocheuse	34
2.2.2 Les glissements de terrain.....	37
2.2.3 Les coulées boueuses.....	37
2.2.4 Quelques autres types de mouvements de terrain	40
2.3 PRINCIPES GENERAUX SUR LES DIFFERENTS TYPES DE CARTOGRAPHIE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN.....	41
3. Bilan sur les méthodes de cartographie d'aléa mouvement de terrain selon une approche quantitative.....	49
3.1 LES 3 GRANDS TYPES DE METHODES : HEURISTIQUE, STATISTIQUE ET DETERMINISTE.....	49
3.1.1 Méthodes heuristiques ou basées sur l'expertise	50
3.1.2 Méthodes statistiques ou de traitement de données.....	51
3.1.3 Méthodes « déterministes » ou basées sur l'analyse physique	53
3.2 EVALUATION DE L'ALEA AUX CHUTES DE BLOCS	54
3.2.1 Aléa de rupture.....	54
3.2.2 Aléa de propagation de chutes de blocs.....	55
a. La méthode des cônes.....	55
b. Trajectographie.....	56
3.3 EVALUATION DE L'ALEA AUX GLISSEMENTS ET COULEES DE BOUE	57
3.3.1 Evaluation des instabilités	57

3.3.2 Propagation des glissements et coulées.....	58
a. Les méthodes empiriques	58
b. Méthodes analytiques	58
c. Méthodes numériques.....	59
4. Etat de l'art sur les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrain.....	61
4.1 LES PREMIERS CONCEPTS : INTENSITE DE MOUVEMENT DE TERRAIN, TYPOLOGIE DES ENJEUX ET MATRICES D'ENDOMMAGEMENT (LEONE, 1996)61	
4.2 SCENARIO DE RISQUE MOUVEMENTS DE TERRAIN A L'ECHELLE D'UNE AGGLOMERATION	65
4.2.1 Principe des « Scénarios risques mouvements de terrain en zone urbaine »	65
4.2.1.1 Evaluation de l'aléa	65
4.2.1.2 Evaluation des enjeux et de leur vulnérabilité	67
4.2.1.3 Evaluation des dommages et cartographie du risque	68
5. Choix et structuration des données de base.....	71
5.1 CHOIX DES DONNEES DE BASE	71
5.1.1 Données génériques	71
5.1.2 Limites concernant le choix et la collecte des données de base dans le cadre des SDR-MVT	71
5.2 DONNEES DE BASE RETENUS POUR LA REALISATION DES SDR-MVT ..	73
5.2.1 Base nationale BDMVT	73
5.2.2 Cartes géologiques à 1 :50 000 vectorisées	75
5.2.3 Photographies aériennes.....	75
5.2.4 Banque de Données du Sous-Sol.....	77
5.2.5 MNT : BD ALTI - IGN.....	77
5.2.6 BD Carto	79
5.2.7 Contours...IRIS®.....	79
5.2.8 Corine land Cover	80
6. Description du contexte environnemental de la zone pilote	83
6.1 CONTEXTE GEOLOGIQUE ET GEOGRAPHIQUE	83

6.2 INVENTAIRE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN DU JURA.....	88
7. Méthodologie SDR-MVT, application à la zone pilote.....	93
7.1 INTRODUCTION.....	93
7.1.1 Les contraintes liées aux SDR-MVT	93
7.1.2 Choix de la démarche quantitative pour une cartographie départementale.....	95
7.1.2.1 Test d'une approche cartographique statistique basée sur le catalogue des évènements BDMVT.....	95
7.1.2.2 Principe général de l'approche empirico-mécanique développée dans le cadre des SDR-MVT	95
7.1.3 Les logiciels utilisés.....	99
7.1.3.1 PIERRE.....	99
7.1.3.2 BORA.....	101
7.1.3.3 ALICE	104
7.2 EVALUATION DE L'ALEA AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN	109
7.2.1 Démarche	109
7.2.2 Outils et données de base utilisés.....	110
7.2.3 Étape 1 : Identification & localisation des unités de terrain morpho-géologiques, TMU	111
7.2.3.1 Structuration des informations morphologiques et lithologiques sous SIG,.....	111
Caractérisation morphologique	111
Caractérisation géologique	116
Caractérisation hydrologique	119
7.2.3.2 Classification et cartes des TMU	124
7.2.4 Etape 2 : Validation de la typologie TMU, Identification des TMU sensibles, affectation des caractéristiques moyennes	125
7.2.4.1 Validation de la typologie TMU	125
7.2.4.2 Identification des TMU sensibles	128
7.2.4.3 Carte des TMU sensibles	130
7.2.5 Etape 3 : Calcul de la carte de Fs sous ALICE	132

7.2.5.1	Calcul des profils topographiques.....	132
7.2.5.2	Définition d'un modèle géologique/géotechnique 3D cohérent/adapté :.....	133
	Estimation par l'expert des paramètres géotechniques pour les TMU 1a, 2a, 3a	133
	Constitution du modèle géotechnique ALICE®	136
7.2.5.3	Calcul de la carte des FS sur l'ensemble des profils couvrant les TMU sensibles.....	137
7.2.6	Etape 4 : Calcul de la carte d'aléa	138
7.2.7	Calcul de la carte d'aléa – variante pour réduire les temps de calcul....	139
7.3	EVALUATION DE L'ALEA AUX CHUTES DE BLOCS.....	143
7.3.1	Etape 1 : Digitalisation des falaises et classement en une typologie préliminaire.....	144
7.3.2	Etape 2 : Investigation sur le terrain	146
7.3.3	Etape 3 : Evaluation de l'aléa de rupture	146
7.3.4	Etape 4 : Analyse des caractéristiques de propagation	148
7.3.5	Etape 5 : Calcul des probabilités d'atteinte et de l'aléa résultant.....	149
7.4	EVALUATION DE L'ALEA AUX COULEES BOUEUSES GENERES PAR LES GLISSEMENTS DE TERRAIN.....	151
7.4.1	Etape 1 : Cartographie de l'aléa aux glissements de terrain :	153
7.4.2	Etape 2 : Calcul des probabilités d'atteinte	154
7.4.3	Etape 3 : Calcul d'un modèle de drainage (ARCGIS)	156
7.4.4	Etape 4 : Croisement carte de propagation – carte des drains	157
7.5	ZONE PILOTE DU JURA - CARTES D'ALEAS AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN.....	158
8.	Analyse du risque	163
8.1	CHOIX DES ENJEUX POUR L'ANALYSE DE RISQUE	163
8.2	PRINCIPES DE CALCUL DE L'EXPOSITION	163
8.2.1.1	Eléments surfaciques	164
8.2.1.2	Eléments linéaires.	164
8.3	CARTES DE RISQUE	166
8.3.1	Cartes de risque communal.....	167
8.3.2	Cartes de risque du bâti, représenté au niveau communal	170

8.3.3 Cartes de risque du réseau routier	172
8.3.3.1 Carte d'exposition du réseau routier dans son ensemble et sur le réseau principal	172
8.3.3.2 Carte des niveaux de risque du réseau routier par commune.....	172
8.4 HIERARCHISATION DU RISQUE A L'ECHELLE DEPARTEMENTALE	177
9. Conclusion	187
10. Références bibliographiques	189

Liste des illustrations

Figure 1 – Localisation sur la carte géologique du site pilote (182 communes, en fond zébrée) pour la réalisation du SDR-MVT Jura.....	25
Figure 2 – Schéma et exemples de chutes de blocs	36
Figure 3 – Schémas et exemples de glissement de terrain.....	38
Figure 4 – Exemples de coulées de boue	39
Figure 5 - Représentation schématique de la procédure d'évaluation du risque mouvements de terrain : A) données de base nécessaires, B) estimation de la susceptibilité ou de l'aléa, C) estimation de la vulnérabilité, D) estimation des pertes pour une période donnée, E) probabilité de pertes pour une période donnée estimée sous la forme de courbe de dommages. (d'après Van Westen et al., 2008)	42
Figure 6 - Evaluation de l'intensité des phénomènes de mouvements de terrain en fonction de la nature des sollicitations mécaniques (Léone, 1996)	62
Figure 7 – Pour chaque type d'éléments exposés : Typologie des modes d'endommagement selon une échelle d'intensité de dommages et estimation du taux de pertes correspondant ; Exemple du bâti (Leone, 1996).....	63
Figure 8 – Exemple de matrice d'endommagement relatif au bâti (Léone, 1996).....	64
Figure 9 - En exemple, dommages économiques cumulés totaux par hectare induits par le phénomène chute de blocs de type CB50 sur l'ensemble des enjeux pour la période de référence 100 ans (Thierry et al., 2008)	69
Figure 10 - Page d'accueil de la BDmvt	74
Figure 11 - Orthopho IGN visible sur Geoportail, exemple de la vue 3D de la commune de Poligny (39)	76
Figure 12 - Exemple de fiche signalétique BSS sur InfoTerre™ d'un forage avec les documents fournis par le foreur disponibles en image numérique.	78
Figure 13 - CORINE LAND COVER visible sur Geoportail, en exemple, extrait au niveau de la commune de Poligny (39)	81
Figure 14 - Le département du Jura : villes, principaux axes routiers, départements limitrophes (extrait du site web wikipedia)	83
Figure 15 - Coupe géologique très schématisée entre la Bresse et le Haut Jura (d'après F. Michel, 2008)	84
Figure 16 – Les grandes unités morphologiques qui caractérisent le Jura : 1) la plaine de la Saône, 2) les versants et falaises, 3) le plateau du Jura, 4) les contreforts alpins.....	85
Figure 17 – Schéma structural simplifié des différents éléments du relief jurassien (d'après F. Michel, 2008)	86
Figure 18 - Localisation du Jura et du site pilote sur fond de carte géologique à 1/50 000	87
Figure 19 - Carte des mouvements de terrain référencés par BDMVT dans le Jura (millésime, septembre 2010).....	89

Figure 20 - Répartition en % des mouvements de terrain dans le Jura, événements référencés dans BDMVT (millésime 2010).....	90
Figure 21 : Représentation cartographique schématique du calcul du risque	94
Figure 22 – Organigramme général sur la méthode par approche mécanique développée et mise en œuvre dans le cadre des SDR-MVT	98
Figure 23 : Fenêtre principale de Pierre.	100
Figure 24 : a) Fenêtre de saisie des caractéristiques des blocs dans Pierre. b) Fenêtre de saisie des paramètres matériaux dans Pierre.	100
Figure 25 – Fenêtre de sélection des fichiers de données	102
Figure 26 - Probabilité d'occurrence à partir d'une zone de départ d'un pixel et avec $P_{disp} = 0,4$	102
Figure 27 – Présentation de l'interface principale du logiciel « Bora » et carte d'aléa résultante	103
Figure 28 – Graphique du gain en "pseudo énergie" suivant la valeur de la pente	103
Figure 29 – logiciel BORA : Exemple de calcul de l'énergie	104
Figure 30 : Schéma des modèles constituant ALICE et leurs entrées / sorties	106
Figure 31 : (a) masse de sol étudiée décomposée en tranches, (b) analyse des forces s'exerçant sur une tranche	107
Figure 32 - Probabilité que le facteur de sécurité soit inférieur à 1	108
Figure 33 - Interface de l'outil de classification morphologique	113
Figure 34 - Calcul des principales classes morphologiques retenues pour la zone d'étude	114
Figure 35 - Zone pilote du Jura : Résultat de la classification en 5 classes morphologiques principales.....	115
Figure 36 - Correspondance entre les classes de faciès et les numéros de formations concernées par le regroupement.....	116
Figure 37 - Zone pilote du Jura : Carte lithostratigraphique initiale, d'après la carte géologique à 1/50 000 harmonisée (base de données du BRGM)	117
Figure 38 - Zone pilote du Jura : Regroupement des faciès en 9 classes	118
Figure 39 – Principe du calcul de l'IDPR.....	120
Figure 40 – Zone pilote du Jura : Carte de l'indice de ruissellement R_{global}	121
Figure 41 – Zone pilote du Jura : Carte de l'occupation des sols discrétisée de 6 classes.....	122
Figure 42 - Zone pilote du Jura : Carte des valeurs du coefficient de ruissellement local, R_{local}	123
Figure 43 – Zone pilote du Jura : Classification Morpho géologique en 44 classes de TMU	124
Figure 44 – Zone pilote du Jura : Nouvelle classification des pentes	126
Figure 45 - Photos terrain de la formation Charmouthien	127

Figure 46 – Zone pilote du Jura : exemple de la superposition des TMU avec les glissements référencés	129
Figure 47 – Zone pilote du Jura : Carte des faciès sensibles aux glissements de terrain	130
Figure 48 - Zone pilote du Jura : localisation des TMU sensibles aux glissements de terrain et table de correspondance nom du TMU/type faciès/classe de pente	131
Figure 49 – Zone pilote du Jura : carte des profils croisant les TMU sensibles	132
Figure 50 - Exemple de rétro calage pour ajuster les caractéristiques mécaniques	134
Figure 51 - Génération sous ALICE de profils clefs pour une vérification locale des caractéristiques mécaniques des TMU.....	135
Figure 52 - Exemple de calcul ALICE® le long d'un profil clef	136
Figure 53 – Zone pilote du Jura : Calcul du FS pour toutes les TMU « sensibles »	137
Figure 54 – Zone pilote du Jura : Calcul de la carte d'aléa aux glissements de terrain	138
Figure 55 - Sélection et calcul d'aléa pour un certain nombre de profils interceptant la TMU n° 2.	139
Figure 56 - Report sur un graphique des couples (Fs, Alea) et corrélation avec une courbe spline. Exemple de la TMU 1	140
Figure 57 - Relation avec une très faible corrélation entre pente et aléa. (en rouge ajustement d'une droite avec $C = 0,7$, en vert, ajustement d'une fonction puissance $Y = X^a + b$ avec $C = 0,64$)	142
Figure 58 : Démarche pour la cartographie de l'aléa chutes de blocs	143
Figure 59 – Identification des falaises	144
Figure 60 - Zone pilote de Jura : les falaises dans le Jurassique moyen.....	145
Figure 61 - Zone pilote de Jura : Classement des falaises selon leur formation géologique.....	145
Figure 62 - Simulation trajectographique avec le logiciel Pierre.....	148
Figure 63 – Zone pilote du Jura : calcul de probabilité d'atteinte des blocs avec le logiciel Bora@ selon les susceptibilité de rupture et le comportement de propagation	150
Figure 64 : Démarche pour la cartographie de l'aléa coulées de boue	152
Figure 65 – Zone pilote du Jura (extrait) : Carte des zones de départ des coulées.....	153
Figure 66 – Zone pilote du Jura : fenêtre de paramétrage sous BORA, avec indication des paramètres retenus au niveau du pilote	154
Figure 67 – Zone pilote du Jura (extrait) : Carte des probabilités d'atteinte par des coulées de boue.....	155
Figure 68 - Zone pilote du Jura (extrait) : Carte des drains	156
Figure 69 – Zone pilote du Jura (extrait) : Carte d'aléa aux coulées de boue issus des glissements de terrain	157
Figure 70 – Zone pilote du Jura : Carte de la limite des communes accompagnée de leur numéro INSEE (cf. Tableau 13).....	159
Figure 71 – Zone pilote du Jura : carte de l'aléa aux glissements de terrain	159

Figure 72 - Zone pilote du Jura : carte de l'aléa aux chutes de « petits » blocs	160
Figure 73 - Zone pilote du Jura : carte de l'aléa aux chutes de « gros » blocs.....	161
Figure 74 – Zone pilote du Jura : carte de l'aléa aux coulées de boue	162
Figure 75 - exemple de calcul de l'exposition des éléments surfaciques	164
Figure 76 - Illustration de l'algorithme de calcul de l'intersection de polygones avec un fichier grille.....	165
Figure 77 – Cartes de risque absolu par commune	168
Figure 78 – Cartes de risque relatif par commune.....	169
Figure 79 – Cartes de risque absolu des zones bâties par commune	170
Figure 80 – Cartes de risque relatif des zones bâties par commune.....	171
Figure 81 – Cartes d'exposition du réseau routier dans son ensemble	173
Figure 82 – Cartes d'exposition du réseau routier principal.....	174
Figure 83 – Cartes de risque du réseau routier dans son ensemble	175
Figure 84 – Cartes de risque du réseau routier principal	176
Figure 85 - Extrait de la feuille Excel de notation globale	178
Figure 86 - Carte du risque absolu sur la totalité de la commune.....	179
Figure 87 - Carte du risque absolu sur les zones bâties de la commune	180
Figure 88 - Carte du risque relatif sur la totalité de la commune	181
Figure 89 - Carte du risque relatif sur les zones bâties de la commune	182
Figure 90 - Répartition des glissements de terrain et éboulements avant et après application des critères de sélection	219
Figure 91 : Distribution en surfaces des classes de pente pour chacune des résolutions de MNT	220
Figure 92: Classification automatique en 10 classes	224
Figure 93: Premier exercice de combinaison Morpho-géol.....	226
figure 94 : formulaire de saisie des données générales du modèle.....	235
Figure 95 - Exemple de carte de la trace des profils topographiques (traits noirs sur la figure) générés par ALICE® pour le calcul de Fs.....	239
figure 96 : choix d'un profil pour des calculs de stabilité	241
figure 97 : fenêtre Profil ALICE® - calcul en un point.....	242
figure 98 : fenêtre Profil ALICE® - calcul le long du profil	243
figure 99 : Carte ALICE® des facteurs de sécurité	244
figure 100 : Carte ALICE® de l'aléa (probabilité $FS < 1$)	245

Tableau 1 – Approches qualitatives et quantitatives de la cartographie de la suceptibilité aux mouvements de terrain, d'après Fell et al. (2008)	43
Tableau 2 - Les différents types de cartes mouvements de terrain et leur(s) usage(s), d'après Fell & al. (2008), modifié	44
Tableau 3 - Représentation schématique des données de base nécessaires à la cartographie de la susceptibilité, de l'aléa et du risque aux mouvements de terrain (D'après Van Westen et al., 2008).....	47
Tableau 4 - Description des phénomènes en fonction de différents paramètres cinématiques et géométriques (d'après Thierry et al., 2008)	65
Tableau 5 - Valeurs numériques des classes d'intensité des sollicitations Accumulation (Ha) et Impact (Ec) retenues par Thierry et al. (2008)	66
Tableau 6 - Echelle d'endommagement établie pour la voirie (Thierry et al., 2008)	67
Tableau 7 - Fonction de vulnérabilité établie pour deux types de voirie (Thierry et al., 2008)	68
Tableau 8 - Place des SDR-MVT dans la synthèse de Van Westen et al. (2008) sur les données de base à rechercher pour la cartographie des mouvements de terrain	72
Tableau 9 - Répartition des mouvements de terrain extraits de BDMVT en fonction des faciès des terrains	91
Tableau 10 - Répartition des Chutes de blocs et glissements de terrain depuis 1900, réfencés dans le département du Jura par BDMVT	92
Tableau 11 - Zone pilote du Jura : Les 4 types de faciès retenus comme sensibles d'après la localisation des mouvements de terrain observés	129
Tableau 12 - Paramètres géotechniques moyens pour chacune des 9 TMU sensibles	135
Tableau 13 - Niveaux d'aléa de rupture estimés par formation géologique	147
Tableau 14 – Zone pilote du Jura : nom et numéro INSEE des communes (cf. Figure 70)	158
Tableau 15 - Classement des communes pour le risque absolu sur la totalité de la commune	184
Tableau 16 - Classement des communes pour le risque absolu sur les zones bâties de la commune.....	184
Tableau 17 - Classement des communes pour le risque relatif sur la totalité de la commune	185
Tableau 18 - Classement des communes pour le risque relatif sur les zones bâties de la commune.....	185
Tableau 19 - Nombre d'évènements recensés dans BDMVT et sélectionnés pour une approche cartographique statistico-historique en France.....	214

Annexe 1 - Indications sur les actions nécessaires pour atteindre les niveaux de précisions requis pour les zonages	199
Annexe 2 - Listes des mouvements de terrain répertoriés dans BDMVT à fin 2010	207
Annexe 3 - Approche statistico-historique, basée sur l'inventaire mouvements de terrain (méthode statistique).....	213
Annexe 4 - Tests méthodologiques non retenus pour l'évaluation de l'aléa aux glissements de terrain	220
Annexe 5 – Correspondance code lithostratigraphique - âge - faciès des terrains pour le secteur de la zone pilote, d'après la carte géologique à 1/50 000 (BRGM).....	227
Annexe 6 – Description des fonctionnalités du logiciel ALICE® utilisés dans le cadre de la méthode SDR-MVT	235
Annexe 7 – Zone pilote du Jura : Etalonnage des caractéristiques géotechniques des sols à l'aide du logiciel TALREN.....	247
Annexe 8 – Zone pilote du Jura – Cartes de risque	257
 1 Carte de risque absolu, nombre d'hectares par commune exposés aux glissements de terrain	259
2 Carte de risque absolu, nombre d'hectares par commune exposés aux chutes de « petits » blocs.....	260
3 Carte de risque absolu, nombre d'hectares par commune exposés aux chutes de « gros » blocs	261
4 Carte de risque absolu, nombre d'hectares par commune exposés aux coulées de boue.....	262
5 Carte de risque relatif, pourcentage du territoire communal exposé aux glissements de terrain	262
6 Carte de risque relatif, pourcentage du territoire communal exposé aux chutes de « petits » blocs.....	264
7 Carte de risque relatif, pourcentage du territoire communal exposé aux chutes de «gros » blocs	265
8 Carte de risque relatif, pourcentage du territoire communal exposé aux coulées de boue.....	266
9 Carte de risque absolu, nombre d'hectares de terrain bâti par commune exposés aux glissements de terrain.....	267
10 Carte de risque absolu, nombre d'hectares de terrain bâti par commune exposés aux chutes de « petits » blocs	268
11 Carte de risque absolu, nombre d'hectares de terrain bâti par commune exposés aux chutes de « gros » blocs.....	269
12 Carte de risque absolu, nombre d'hectares de terrain bâti par commune exposés aux coulées de boue	270

13 Carte de risque relatif, pourcentage de terrain bâti par commune exposés aux glissements de terrain	271
14 Carte de risque relatif, pourcentage de terrain bâti par commune exposés aux chutes de « petits » blocs	272
15 Carte de risque relatif, pourcentage de terrain bâti par commune exposés aux chutes de « gros » blocs	273
16 Carte de risque relatif, pourcentage de terrain bâti par commune exposés aux coulées de boue.....	274
17 Carte de risque pour l'ensemble du réseau routier : longueur de kilomètres par commune susceptibles d'être affectée par des glissements de terrain	275
18 Carte de risque pour l'ensemble du réseau routier : réseau routier susceptible d'être affecté par des glissements de terrain et niveau d'aléa correspondant	276
19 Carte de risque pour les principales voies routières : longueur en kilomètre, par commune, susceptible d'être affectée par des glissements de terrain	277
20 Carte de risque pour les principales voies routières : réseau routier susceptible d'être affecté par des glissements de terrain et niveau d'aléa correspondant	278
21 Carte de risque pour l'ensemble du réseau routier : longueur en kilomètre, par commune, susceptible d'être affectée par des chutes de « petits » blocs	279
22 Carte de risque pour l'ensemble du réseau routier : réseau routier susceptible d'être affecté par des chutes de « petits » blocs et niveau d'aléa correspondant.....	280
23 Carte de risque pour les principales voies de routières : longueur en kilomètre, par commune, susceptibles d'être affectée par des chutes de « petits » blocs	281
24 Carte de risque pour les principales voies routières : réseau routier susceptible d'être affecté par des chutes de « petits » blocs et niveau d'aléa correspondant.....	282
25 Carte de risque pour l'ensemble du réseau routier, longueur en kilomètre, par commune, susceptibles d'être affectée par des chutes de « gros » blocs	283
26 Carte de risque pour l'ensemble du réseau routier : réseau routier susceptible d'être affecté par des chutes de « gros » blocs et niveau d'aléa correspondant	284
27 Carte de risque pour les principales voies routières : longueur en kilomètre, par commune, susceptible d'être affectée par des chutes de « gros » blocs	285
28 Carte de risque pour les principales voies routières : réseau routier susceptible d'être affecté par des chutes de « gros » blocs et niveau d'aléa correspondant	286
29 Carte de risque pour l'ensemble du réseau : longueur en kilomètre, par commune, susceptible d'être affectée par des coulées de boue.....	287
30 Carte de risque pour l'ensemble du réseau routier : réseau routier susceptible d'être affecté par des coulées de boue et niveau d'aléa correspondant	288
31 Carte de risque pour les principales voies routières : longueur en kilomètre, par commune, susceptible d'être affectée par des coulées de boue.....	289
32 Carte de risque pour les principales voies routières : réseau routier susceptible d'être affecté par des coulées de boue et niveau d'aléa correspondant	290

1. Introduction

1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

La méthode de réalisation des scénarios départementaux des risques de Mouvements de terrain (SDR-MVT), objet de ce présent rapport, a été développée dans le cadre d'une double convention : 1) la première signée entre le MEEDDM et le BRGM (convention CV 05000195 MEDD/DPPR-BRGM, pour le développement théorique de la méthode, 2) la seconde passée entre la Préfecture du Jura et le BRGM, signée du 22 janvier 2010, pour son application au tiers nord du département du Jura, choisi en tant que zone pilote pour tester la démarche.

- Les mouvements de terrain correspondent au déplacement gravitaire de masses déstabilisées sous l'effet de sollicitations naturelles (pluie, séismes,...) ou anthropiques. Les phénomènes d'instabilités recouvrent des formes très diverses qui résultent de la multiplicité des mécanismes de rupture, eux-mêmes liés à la complexité des comportements des matériaux sollicités. Différents critères permettent de classer les mouvements de terrain : mécanisme de rupture et la cinématique du déplacement des terrains, nature des matériaux concernés, le volume des matériaux déplacés. Chaque type de mouvements de terrains requiert donc une approche spécifique, tant au niveau de l'analyse de son mécanisme, de l'évaluation et de la spatialisation de l'aléa (intensité et fréquence d'un phénomène), que du risque qu'il génère. Celui-ci sera également fonction de la nature de l'enjeu : humain, économique et social (perte financière, arrêt d'activité économique), stratégique en cas de crise (coupure de voies de communication).

L'aléa est classiquement défini comme le produit entre une intensité de phénomène donné et sa probabilité d'occurrence. La vulnérabilité concerne les enjeux et leur susceptibilité à être endommagés en fonction d'une intensité de phénomène donné. Le risque est le produit entre l'aléa, la vulnérabilité et la valeur attribuée aux enjeux. Actuellement, en ce qui concerne la cartographie de l'aléa et, par suite, du risque mouvements de terrain :

- La méthode de cartographie dépend du type de phénomène considéré, sachant que sous le terme générique de mouvement de terrain, différents types de phénomènes (caractérisés par des origines, une dynamique de mouvement et des effets différents) sont réunis.
- La cartographie de l'aléa mouvements de terrain à l'échelle d'un bassin versant, voire d'un département ou d'une région, relève très généralement d'analyses fondées sur des approches empiriques, c'est-à-dire établies à « dire d'expert », donnant lieu à une carte qualitative de la susceptibilité des terrains aux mouvements gravitaires.

- Or, il n'y a pas de méthodologie empirique de référence : la cartographie de l'aléa aux mouvements de terrain d'un bassin versant ou d'un territoire plus grand encore repose aujourd'hui sur des analyses empiriques hétérogènes, faisant appel à des critères (données thématiques factuelles, pondération, combinaison) dont le choix varie selon les auteurs, et n'est pas toujours clairement explicité.
 - Il n'y a pas de définition claire sur les niveaux d'aléa : la classification des niveaux d'aléa utilisée est étroitement liée à la perception du cartographe face à la dangerosité du phénomène, elle n'est donc pas constante, mais dépend de l'expert et de la zone géographique analysée.
 - L'usage du terme « aléa » est abusif dans la mesure où la probabilité de survenance n'est pas quantifiée, mais repose sur la perception de l'expert, au regard des facteurs retenus pour son analyse, étayée par son étude de la morphologie.
 - Les cartes d'aléa réalisées sont difficilement comparables entre-elles dans la mesure où les définitions données à l'aléa et à l'échelle d'intensité peuvent être très hétérogènes, dépendantes de l'expert et du contexte géographique.
 - Les résultats sur l'aléa sont qualitatifs or, pour une analyse comparative du risque entre différents territoires, il est nécessaire de disposer d'une évaluation quantitative du risque et donc d'une évaluation quantitative de l'aléa.
- La prise en compte dans les documents d'urbanisme du risque induit par les phénomènes de mouvements de terrain se fait par le biais des Plans de Prévention aux Risques mouvements de terrain (PPR-MVT) (ou à défaut de Plans Locaux d'Urbanisme, PLU)), réalisés à l'échelle de la commune. Afin d'optimiser la programmation de ces PPR et, plus largement, de disposer d'une vision homogène du risque mouvement de terrain au niveau national, le MEEDDM a demandé au BRGM de mettre au point une méthode d'évaluation à l'échelle départementale.

La méthodologie présentée dans ce rapport n'a pas pour objectif de se substituer aux démarches utilisées aujourd'hui pour la cartographie de l'aléa dans le cadre des PPR-MVT. L'échelle concernée est en effet plus petite (de l'ordre de 1/50 000) alors que, pour les PPR, il s'agit plutôt du 1/25 000 à 1/10 000. Par contre, elle doit permettre une cartographie cohérente de l'aléa et du risque mouvements de terrain sur l'ensemble du territoire national, indépendante du contexte géographique, et à travers la mise en œuvre d'une démarche accessible à des ingénieurs géologues, géotechniciens et/ou géomorphologues, en limitant au mieux les informations et interprétations dites à « dire d'expert ».

A cette fin, cette méthodologie a été construite avec le souci de :

- proposer un processus aux règles clairement définies,
- s'appuyer sur des données faciles d'accès, disponibles en tous lieux, cohérentes avec l'échelle 1/50 000 (échelle du bassin versant, voire d'un département).

En outre, pour une comparaison et hiérarchisation du risque de mouvement de terrain sur l'ensemble du territoire, il est nécessaire au préalable de disposer d'informations quantifiées sur l'aléa (prise en compte de la composante probabilité). La méthode proposée devait donc pouvoir aussi intégrer cette composante. L'effort méthodologique engagé a donc porté plus particulièrement sur une évaluation quantitative de l'aléa, la prise en compte de la propagation des phénomènes et la gestion des incertitudes.

1.2 CHOIX DU SITE PILOTE

Après avoir fixé les grandes lignes du processus de cartographie, leur mise en œuvre sur un territoire devait permettre de tester et valider la méthode.

Pour cela, la zone choisie devait donc être suffisamment étendue pour présenter des lithologies (sédimentaires marnes, calcaires, alluvions, cristallin) et morphologies (vallée, plaine, versants escarpés) variées d'une part et être exposée aux principaux types de mouvements de terrain d'autre part. Ce territoire devait cependant rester dans une taille raisonnable, car la phase méthodologique étant au stade de développement, des réajustements de la démarche étaient probables, et il était donc préférable de ne pas investir l'essentiel du temps de réalisation de l'étude au recueil et à la mise en forme des données de base (poste généralement le plus coûteux en terme de temps d'investissement dans les études de cartographie, lorsque la méthode est posée). Dans ce cadre, une taille moyenne de 1/3 de département français semblait être la plus appropriée.

Par ailleurs, le choix de ce territoire, dit « zone pilote » devait aussi être guidé par la volonté des services déconcentrés ou collectivités territoriales à s'impliquer dans l'étude. De cette implication dépendait en effet la pertinence du contenu et format des livrables in fine retenus pour une appropriation et usage optimum des résultats du scénario départemental par les acteurs locaux.

Plusieurs départements ont été successivement pressentis, dont :

- les Alpes maritimes, mais du fait du nombre et de la diversité des événements historiques mouvements de terrain, ce département a été jugé trop complexe dans son contexte géologique et typologique dans cette phase méthodologique. Il a néanmoins servi à tester les premières étapes des procédures d'analyse sous le logiciel ALICE.
- le Lot-et-Garonne, qui disposait d'une volonté d'implication forte des acteurs locaux, mais qui n'a pas été retenu car la typologie et les événements référencés n'étaient pas assez représentatifs. Ce qui a été confirmé par une visite sur le terrain d'une équipe de géologues et géotechniciens.
- le Jura, celui-ci est exposé à la fois aux phénomènes de chutes de blocs, de glissements de terrain, et d'effondrements de cavités souterraines. Il présente une diversité assez large de faciès géologiques (gypses et cargneules, marnes, calcaires, alluvions, colluvions), et d'ensembles morphologiques (plateaux, vallées en U, versants). Par ailleurs, les acteurs locaux étaient d'autant plus

sensibilisés à ce présent travail que celui-ci pouvait constituer un outil pour l'homogénéisation départementale de l'appréciation du risque et la mise en cohérence de tous les PPR mouvements de terrain (éboulements et glissements de terrain déjà réalisés sur le Jura (environ une cinquantaine à ce jour).

Le choix concerté de la zone d'emprise du pilote a été arrêté lors de la réunion du 15 juillet 2008 (CR08-268) entre, la DIREN, la DDE, la Préfecture du Jura et le BRGM. Ce choix a été établi en fonction de la répartition des PPR existants et des résultats de l'inventaire des mouvements de terrain révélés lors de l'enquête du BRGM (Rapport BRGM/RP-55976-FR).

La délimitation de la zone pilote a été choisie perpendiculairement aux structures géologiques et géomorphologiques, afin de disposer d'un spectre le plus large possible des faciès géologiques et des contextes morphologiques, mais aussi de façon à ce que dans une phase ultérieure, la procédure de cartographie puisse être plus facilement mise en œuvre sur le reste du département (Figure 1).

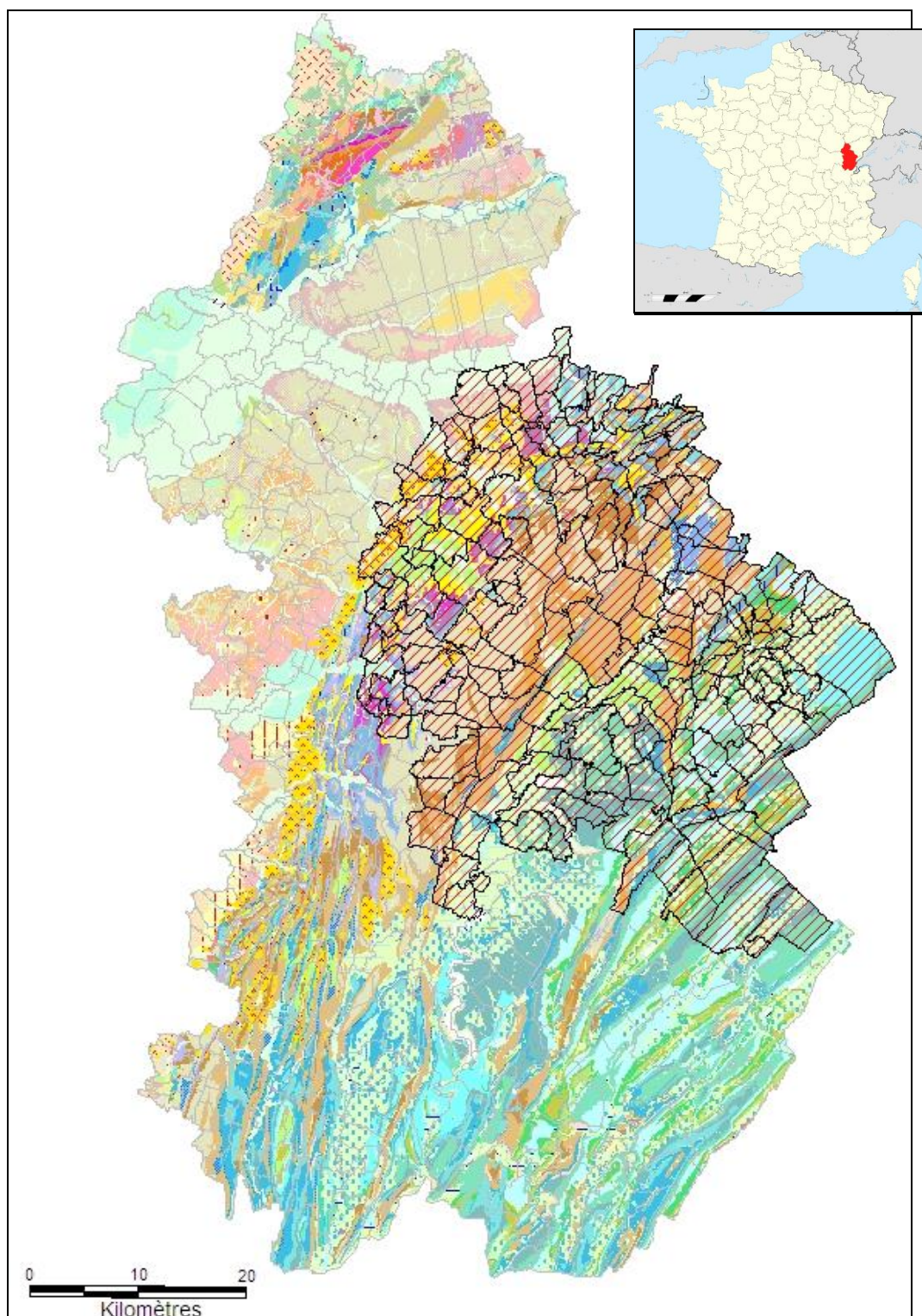


Figure 1 – Localisation sur la carte géologique du site pilote (182 communes, en fond zébrée) pour la réalisation du SDR-MVT Jura

1.3 DEROULEMENT DU PROJET

Après la signature de la convention passée entre le BRGM et le MEEDDM mi-décembre 2005, le projet a pu démarrer en 2006-2007 par un bilan des méthodes de cartographies actuellement mises en œuvre et ayant fait l'objet de publication.

Très rapidement cette analyse a confirmé la nécessité et en même temps l'absence de méthode pour la cartographie et la quantification de l'aléa et du risque aux mouvements de terrain. Aussi, vus la complexité et l'investissement demandé, le BRGM a décidé de mutualiser ses efforts en faisant bénéficier réciproquement ses travaux :

- réalisés dans le cadre de la convention MEEDDM – BRGM,
- menés dans le cadre de projets de Recherche et développement sur la prévention aux mouvements de terrain.

Ainsi, les procédures pour le développement d'une méthode d'évaluation quantitative de l'aléa discutées et développées dans le cadre de la convention BRGM-MEEDDM ont été mises en œuvre grâce à l'adaptation du logiciel ALICE, développé dans le cadre d'actions de R&D et enrichi par la réflexion menée sur les procédures de cartographies.

Le souci d'une zone pilote a été posé dès les premiers mois du démarrage de la convention BRGM-MEEDDM.

Les premières procédures sous ALICE ont pu être programmées et testées en 2007 et 2008, grâce à une application menée sur la vallée de la Roya dans les Alpes maritimes, pour laquelle on disposait déjà d'une quantité et qualité d'informations de base suffisantes (Terrier 2004, 2005) pour ces premiers tests.

En juillet 2008, une première réunion a été tenue entre le BRGM, la Préfecture du Jura et les services déconcentrés afin de présenter les objectifs des SDR-MVT, le projet et discuter des principes méthodologiques retenus. Le choix du Jura en tant que pilote a été entériné à l'issue de la réunion.

En septembre 2008, le BRGM présente au MEEDDM les principes méthodologiques retenus, ainsi que les premières données acquises pour la zone pilote du Jura.

Été et automne 2009, anticipation (avant signature de la convention BRGM et Préfecture du Jura) de la mise en œuvre de la méthode SDR-MVT sur la zone pilote du Jura.

Décembre 2009, présentation des premiers résultats cartographiques sur le Jura aux représentants du MEEDDM et de la Préfecture. A cette même date, un comité de pilotage du projet est créé. Il est composé d'au moins un représentant du MEEDDM, de la Préfecture du Jura, de la DIREN, de la DDE ainsi que du BRGM.

Janvier 2010, signature de la convention entre le BRGM et la Préfecture du Jura.

2010, début 2011, finalisation des cartes d'aléa et de risque sur la zone pilote, rédaction du rapport méthodologique.

Parallèlement au travail développé sur les SDR-MVT, en 2008, à la demande du MEEDDM, le BRGM a développé des procédures d'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrain au niveau d'agglomération urbaine, avec application à 3 arrondissements de la ville de Marseille (Thierry et al., 2008).

Concernant les départements agricoles comme le Jura, une démarche complexe d'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrain comme celle mise en œuvre sur l'agglomération urbaine de Marseille n'a pas paru nécessaire. Il a donc été décidé d'un commun accord entre le BRGM et le MEEDDM d'une part (Réunion de septembre 2008) puis avis validé par le comité de pilotage de décembre 2009 de mettre plus particulièrement l'effort sur les procédures d'évaluation de l'aléa.

2. Glossaire, notion de cartographie des mouvements de terrain, principaux types de mouvements de terrain

2.1 GLOSSAIRE

En préalable à la description des résultats de l'étude, nous rappelons les définitions de plusieurs termes courants utilisés pour décrire la problématique de prévention des mouvements de terrain.

Un **mouvement de terrain** désigne un déplacement de masse de terrain sous l'action de la pesanteur. Généralement le mouvement est initié sous l'effet de sollicitations naturelles (fonte des neiges, pluviométrie anormalement forte, séisme, etc.) ou anthropiques (terrassement, vibration, déboisement, exploitation de matériaux ou de nappes aquifères, etc.). Le terme « mouvements de terrain » regroupe en fait une **grande variété de phénomènes**. Ceux-ci, comme les termes « mouvements de terrain » l'indiquent, ont en commun le fait qu'ils correspondent tous à la **mise en mouvement d'une certaine masse de terrain sous l'action gravitaire**. Mais, l'origine de ces terrains (sol, sous-sol, ...), leur nature (meuble, rocheuse, ...), leur comportement mécanique avant et pendant le déplacement (solide, plastique, visqueux, fluide, ...), les volumes impliqués, la vitesse du mouvement (lent - cm/an, rapide – m/s), la forme de la trajectoire, conduisent à distinguer différents types de mouvements.

La **typologie** des mouvements de terrain correspond à la classification des différents phénomènes d'instabilité en fonction du mécanisme mis en jeu et des déformations observées. Schématiquement on distingue 4 mécanismes fondamentaux : chute de blocs et écoulement rocheux, glissement de terrain, coulée, affaissement. Auxquels on peut rajouter 2 types moins fréquents : le fauchage et le tassement de versant.

Parmi les publications relatives à la classification des mouvements de terrain, on cite en particulier ceux de Varnes (1978), Hutchison (1988), Cruden & Varnes (1996), et la terminologie de l'IAEG (1990).

Facteurs déterminants : L'exposition du terrain à une instabilité est régie par un certain nombre de conditions qui dépendent de l'environnement naturel et anthropique de la zone géographique considérée. Ces conditions sont décrites sous la forme de paramètres environnementaux ou facteurs déterminants par rapport à la stabilité des terrains, eux-mêmes classés en facteurs permanents (nature du sous-sol, discontinuité structurale ou sédimentaire, pente, état d'altération des matériaux, couvert végétal, etc.) et en facteurs déclenchant (ruissellement, niveau d'eau dans les nappes, vibrations, actions anthropiques, etc.).

Facteurs permanents (ou de prédisposition) : Il s'agit des conditions environnementales de lente évolution à l'échelle du phénomène mouvement de terrain, qui décrivent le contexte étudié en fonction notamment de la nature géologique du sol et sous-sol, des conditions géotechniques des terrains, de la morphologie et de la topographie, des conditions hydrauliques en surface, du couvert végétal, etc. Certaines de ces conditions (prises isolément ou par combinaison avec d'autres) peuvent être propices à générer un déséquilibre du versant. On parle alors de facteurs de prédisposition. L'évaluation du niveau d'aléa pour un type de mouvement de terrain et en un point donné du territoire passe par une identification de ces facteurs et des lois qui régissent leur interaction.

On souligne néanmoins que concernant le rôle de l'eau dans l'instabilité des versants, il s'agit toujours d'un axe de recherche important pour la compréhension des mécanismes qui régissent le déclenchement des instabilités. La pluie, la fonte des neiges, l'augmentation des infiltrations, la modification des circulations souterraines (liée ou non à des travaux), le degré de saturation en eau des sols sont à l'origine de nombreux mouvements de terrain. L'eau diminue la résistance au frottement et modifie les caractéristiques de certains matériaux. L'eau a donc un rôle primordial 1) sur la stabilité des versants, 2) dans le déclenchement des mouvements de terrain. Néanmoins, vue sa variabilité importante tant dans l'espace géographique que dans le temps, il s'agit d'un paramètre très difficile à mesurer et intégrer dans la chaîne d'analyse sur la stabilité des versants.

De même qu'il est difficile d'obtenir des renseignements précis sur les caractéristiques géotechniques du sol et sous-sol en tout point du territoire. Dans ce cas, les renseignements peuvent être déduits de résultats de reconnaissances in situ réalisées en d'autres point du territoire mais a priori dans des conditions environnementales très proches, ou bien tirées de règles empiriques générales (dans ce cas il s'agira de valeurs moyennes parfois avec des incertitudes élevées).

Facteurs déclenchant, il s'agit de conditions environnementales transitoires ou à évolution très rapide qui modifient l'équilibre du versant suffisamment pour déclencher le mouvement de terrain sur un versant déjà proche de la limite d'équilibre. Ces facteurs peuvent être de nature anthropique (terrassement, excavation, retenue hydraulique, vibration des terrains après une explosion, etc.) ou naturelle (principalement liés à une pluviométrie exceptionnelle ou une secousse sismique).

La bonne connaissance de ces facteurs (occurrence, intensité ou magnitude, valeur critique par rapport aux déclenchements de mouvement de terrain) peut conduire à une estimation de la probabilité temporelle de survenance des mouvements de terrain.

Inventaire des mouvements de terrain : dans l'idéal, un inventaire des mouvements de terrain concerne le recensement et la description des événements historiques ou contemporains. La description doit indiquer, à minima :

- la position géographique du mouvement (zone de départ, centroïde, zone de dépôt, avec indication dans un système de coordonnées géographiques universel),
- le type de mouvement,
- le volume concerné,

- la date de déclenchement.

Magnitude : Elle correspond au volume concerné par le mouvement de terrain. Elle est indépendante de la vitesse ou de l'énergie cinétique du déplacement.

Intensité : Un mouvement de terrain est caractérisé par plusieurs paramètres influant sur la capacité du mouvement à générer des dommages. Ces paramètres concernent la vitesse ou l'énergie cinétique du mouvement, le volume déplacé, le poids des matériaux, la profondeur de rupture, la largeur de la zone de propagation et de réception, etc.

Cependant, aujourd'hui, il n'existe pas de définition et de classification officielle décrivant les degrés d'intensité de mouvements de terrain. Par contre, il est considéré que le volume et la vitesse du mouvement sont les paramètres principaux influant directement sur le niveau de dommages (à répartition des enjeux équivalents). En pratique, les niveaux d'intensité sont généralement fixés par jugement d'expert, qui considérera le volume de matériau mis en mouvement et/ou sa vitesse ou son énergie cinétique.

Susceptibilité : il s'agit d'une appréciation qualitative ou quantitative de l'exposition d'un territoire géographique aux mouvements de terrain actifs ou potentiels. Les mouvements de terrain sont caractérisés par le type de mécanisme (chutes de blocs, glissement, coulée, etc.) et le volume potentiellement instable. A la différence de l'aléa, la susceptibilité ne tient pas compte de la périodicité des mouvements de terrain.

Approche qualitative : Il s'agit de l'approche la plus classique. Elle est entièrement basée sur le jugement d'expert (méthode heuristique). Elle peut par exemple se référer à l'inventaire des mouvements de terrain et à la classification et pondération des paramètres environnementaux retenus par l'expert pour apprécier l'instabilité potentielle des terrains.

Approche quantitative : Elle peut-être relative ou déterministe. Dans le premier cas, les différents paramètres permanents retenus sont classés et pondérés. Le niveau de susceptibilité est évalué en fonction du score total obtenu tenant compte de chacun de ces paramètres et de leur combinaison. Dans le second cas, l'approche quantitative déterministe s'appuie sur des calculs mécaniques de stabilité (calcul du facteur de sécurité, F_s). Les méthodes quantitatives d'évaluation de la susceptibilité permettent de réaliser des cartes plus facilement comparables entre différentes régions, dans la mesure, bien sûr, où les niveaux de susceptibilité sont clairement définis.

Probabilité d'occurrence : Il s'agit d'une mesure du degré de certitude concernant la survenance du phénomène. Cette mesure a une valeur comprise entre 0 (événement impossible) et 1 (occurrence certaine). Elle est estimée de façon soit objective, par analyse statistique de données, soit subjective, avec une appréciation du degré de confiance établie en fonction de la qualité, et de la quantité des données de base, ainsi que de l'expérience de l'expert.

L'estimation de la probabilité d'occurrence repose :

- sur une analyse fréquentielle des événements historiques et contemporains ou des événements déclencheurs (probabilité temporelle) et/ou,
- sur une analyse de la distribution des différents paramètres ou facteurs permanents décrivant l'environnement physique de la zone géographique considérée (probabilité spatiale).

Probabilité temporelle : Elle est évaluée en tenant compte soit de la fréquence des mouvements de terrain, soit de l'occurrence d'événement déclencheur. Ce calcul ne peut se faire que si l'on dispose d'un catalogue suffisant en nombre d'événements recensés et en qualité des informations (volume, type de mouvement, période de survenance).

Les deux principales façons d'apprécier cette probabilité sont :

De façon directe, pour chaque zone géographique, le calcul d'une loi de probabilité magnitude de mouvement de terrain par période de retour. Mais cela suppose de disposer d'un inventaire mouvements de terrain suffisamment représentatif en termes de magnitude d'une part et de période de temps couverte par la données historiques (nécessité dans cas de connaître la date de survenance des événements) d'autre part.

De façon indirecte, en se basant sur l'occurrence des événements déclencheurs, tels que les séismes ou encore les événements pluviométriques exceptionnels. Mais dans ce cas, il est nécessaire :

- 1) de connaître la périodicité de ces événements déclencheurs en fonction de leur magnitude,
- 2) d'estimer les valeurs de magnitude critique par rapport au déclenchement des mouvements de terrain,
- 3) de calculer la relation entre la magnitude de l'événement déclencheur et la densité des mouvements déclenchés (nombre d'événements/km²).

Ces relations pourront être établies grâce à l'analyse en retour de plusieurs événements déclencheurs et à un inventaire suffisant de mouvements de terrain datés. L'acquisition de telles données de base est très exceptionnelle.

En outre, contrairement à d'autres phénomènes naturels comme les séismes ou les inondations, sur une période de quelques dizaines à centaines d'années, la récurrence d'un phénomène de type mouvement de terrain ne peut pas être analysée en considérant une même régularité de survenance. En exemple, un mouvement de terrain peut correspondre à une « purge » du versant redent, ce dernier devenant alors stable pour une longue période de temps ; ce qui complique d'avantage dans ce cas la notion de période de retour du phénomène. De plus, par comparaison avec les séismes, les éruptions volcaniques, les cyclones, les mouvements de terrain sont particulièrement sensibles aux modifications apportées dans l'occupation du sol. Ainsi, une moindre action anthropique peut constituer un déséquilibre grave par rapport à la

stabilité du versant. Ce facteur déclenchant est difficile à prendre en considération en termes de périodicité.

Concernant la probabilité d'occurrence temporelle, aujourd'hui encore plusieurs travaux de recherche sont menés pour établir des relations entre les périodes de retour et les magnitudes des mouvements de terrain. Quelques pistes sont données, mais restent encore très éloignées du domaine opérationnel (manque aigu d'analyse en retour des phénomènes, problème de fond entre déclencheur et occurrence de mouvement de terrain).

Aléa : en théorie, il s'agit de la probabilité d'occurrence d'un phénomène d'intensité donnée. L'évaluation de l'aléa complète celle relative à la susceptibilité, par l'indication d'une probabilité de survenance d'un mouvement de terrain, de type et de magnitude (ou d'intensité) donnés dans la zone géographique considérée.

Vulnérabilité (Vulnérabilité de l'Homme) : Il s'agit de l'ensemble des conditions ou des processus résultant de facteurs matériels, sociaux, économiques, et environnementaux qui déterminent les moyens de subsistance et le niveau des dégâts causés par les effets adverses d'un aléa donné.

Pour chaque type d'enjeu, l'évaluation de la vulnérabilité doit tenir compte du type de mouvements de terrain, de l'intensité du phénomène et de la position de l'enjeu par rapport aux zones de départ, de propagation ou de dépôt des terrains. Pour cela, il est possible de recourir à des modèles mécaniques pour calculer la fragilité des structures, et/ou à des analyses en retour de dommages générés par les mouvements de terrain.

Les évaluations de vulnérabilité basées sur les modèles mécaniques sont mises en œuvre dans le cadre de projet à grande échelle, pour des structures données. Ces calculs doivent aussi tenir compte des caractéristiques géotechniques du site. Concernant les évaluations de la vulnérabilité pour des études d'échelle intermédiaire (bassin de risque, département), les méthodologies actuellement développées s'orientent vers des approches qualitatives. Les matrices d'endommagement (niveau de perte en fonction d'une intensité donnée) sont construites par jugement d'expert.

Risque : Il s'agit de la probabilité d'occurrence d'événements nuisibles ou de pertes prévisibles (morts, blessés, biens, moyens de subsistance, rupture de l'activité économique, dommage causés à l'environnement) suite à des interactions entre des aléas naturels ou anthropiques et des conditions de vulnérabilité

Le risque est avant tout une notion probabiliste qui traduit l'espérance mathématique des pertes ou des dommages ou encore la conjugaison d'une potentialité d'événement et de l'existence d'éléments susceptibles d'être endommagés.

Selon Varnes (1984) : $Risk = \sum_i (H_i \sum_k (V_{ik} A_k))$,

avec H_i , aléa d'un type de mouvement de terrain d'intensité i ; V_{ik} , vulnérabilité d'un type d'enjeu k à une intensité i ; A_k , quantité ou (valeur x quantité) du type d'enjeu k

Toujours, selon Varnes (1984), le risque peut être formalisé théoriquement selon 2 niveaux d'échelle :

- **Rg**, le risque global, touchant un ensemble d'éléments exposés et
- **Rs**, le risque spécifique caractérisant l'élément exposé.

$$R_g = \sum R_s \text{ avec } R_s = H \times D$$

avec H : aléa ; D : niveau d'endommagement potentiel (vulnérabilité).

Cette approche analytique du risque « segmente » le concept en 2 sous-ensembles, étudiés indépendamment l'un de l'autre pour être finalement rassemblés et produire un risque quantifié.

Concernant les mouvements de terrain, dans la pratique, le degré de « risque », résulte d'une appréciation par l'auteur tenant compte à la fois, des volumes mis en jeu, de la dynamique du mouvement, du domaine spatial concerné (versant, couloir, zone d'épandage), mais aussi des conséquences que peut avoir le phénomène sur les facteurs humains et aménagement.

2.2 LES PRINCIPAUX TYPES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN

2.2.1 Les chutes de blocs ou de masse rocheuse

Les chutes de masse rocheuse¹ (plus communément appelées chutes de blocs) sont des mouvements rapides, discontinus et brutaux résultant de l'action de la pesanteur et affectant des matériaux rigides et fracturés tels que des calcaires, grès, roches cristallines, etc. Ces chutes se produisent par basculement, rupture de pied, glissement banc sur banc, à partir de falaises, escarpements rocheux, formations meubles à blocs (moraines par exemple), ou de blocs provisoirement immobilisés sur une pente.

Les principaux facteurs permanents ou de prédisposition concernent : la densité, l'orientation des discontinuités, la structure du massif rocheux, la présence de cavités, la morphologie du versant (falaise, pente). Les discontinuités (structurales ou sédimentaires) découpent le massif en blocs élémentaires et selon leur orientation par rapport à la surface topographique, elles conditionnent le départ des blocs. Ce sont-elles qui régissent aussi la taille des blocs.

Les principaux facteurs déclenchant sont les pressions hydrostatiques dues à la pluviométrie et à la fonte des neiges, l'alternance gel/dégel, la croissance de la

¹ D'après : *Guide de réalisation des PPR mouvements de terrain (1999, la documentation française)*, *Guide technique « Surveillance des pentes instables » (1994, LCPC)*, *Guide technique « Stabilisation des glissements de terrain » (1998, LCPC)*

végétation, les secousses sismiques ou anthropiques, l'affouillement ou le sapement de la falaise par action naturelle ou humaine.

Les zones de propagation : Les blocs peuvent rouler et rebondir, puis se stabiliser dans une zone dite d'épandage. La trajectoire la plus fréquente suit en général la ligne de plus grande pente, mais on peut observer des trajectoires très obliques résultant notamment de la forme géométrique de certains blocs et de petites irrégularités du versant. Les distances parcourues sont fonction de la taille, de la forme, et du volume des blocs éboulés, de la pente du versant, de la nature du sol, de la densité et de la nature de la végétation. Plus les blocs auront une forme plane, plus ils auront une tendance à s'arrêter rapidement selon une de leur face en raison des frottements assez importants. Un couvert végétal dense va réduire significativement la surface des zones de propagation et de réception. Après un éboulement, lorsque les blocs se trouvent sur des pentes fortes, leur remobilisation est parfois possible.

Les volumes mis en jeu sont très variables. En ce qui concerne les matériaux éboulés, on distingue :

- Les **pierres**, d'un volume inférieur à 1 dm^3 ,
- Les **blocs**, d'un volume compris entre 1 dm^3 et 1 m^3 ,
- Les **gros blocs**, d'un volume supérieur à 1 m^3 .

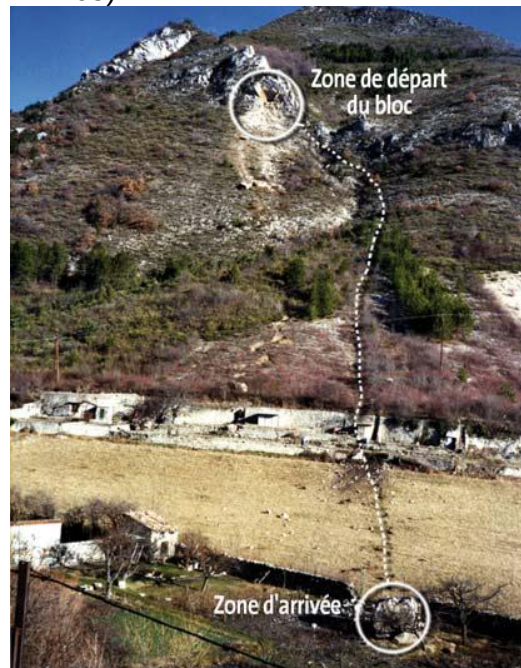
Suivant le volume total éboulé, on distingue :

- Les **chutes de pierres ou de blocs**, volume total inférieur à la centaine de m^3 ,
- Les **éboulements en masse**, volume allant de quelques centaines de m^3 à quelques centaines de milliers de m^3 ,
- Les éboulements, ou écroulements, en grande masse, volume supérieur au million de m^3 .

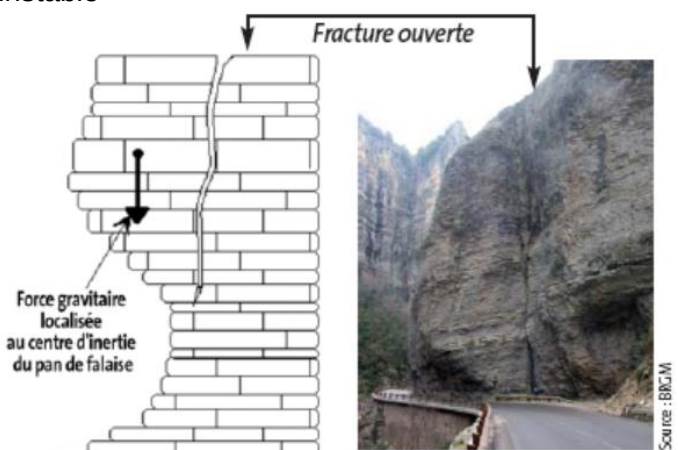
Vallée de la Roya (Alpes maritimes) (source BRGM)
Chutes de blocs ou écoulement générés par « Glissement » banc sur banc de matériaux rocheux sur une surface très pentue. Le pendage stratigraphique est conforme à la pente topographique.



Chute d'un gros bloc à Veynes (Hautes-Alpes, 05) – 1996.
Le bloc a atteint le champ en contrebas (Source : ONF – Service RTM05)



Gorges du Cians (Alpes-Maritimes 06) – 2008
Fracture ouverte délimitant une masse rocheuse instable



Éboulement le long de la RN 91 à La Grave (Hautes-Alpes, 05) – 1995
(Source : ONF – Service RTM05)



Figure 2 – Schéma et exemples de chutes de blocs

2.2.2 Les glissements de terrain

Les glissements (Figure 3) sont des déplacements généralement lents (quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) sur une pente, le long d'une surface de rupture plane, courbe ou complexe, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variables. La profondeur de la surface de rupture (ou de glissement) est variable, de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, voire centaines de mètres pour certains glissements de versant.

Les principaux facteurs de prédisposition sont :

- la nature et la structure des terrains,
- dans le cas des glissements superficiels : l'épaisseur de la couverture colluviale ou de la frange altérée,
- la morphologie du site,
- la pente topographique.

Les matériaux mobilisés dans le cas de glissement peuvent concerner soit le substratum rocheux (roche marneuse ou schisteuse, roche extrêmement fracturée, lentille d'argile dans les formations molassiques...), soit les formations superficielles (colluvions fines, moraines argileuses, couverture d'altération, produits résiduels argileux, des marnes et des calcaires marneux...).

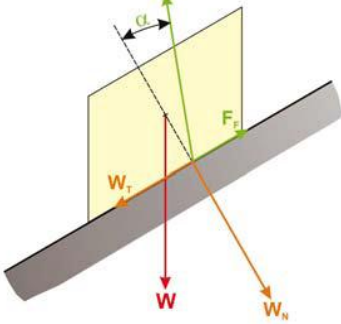
Les principaux facteurs déclenchant concernent généralement :

- les modifications du régime hydraulique (saturation du matériau, augmentation des pressions interstitielles, etc.),
- les travaux de terrassements (en déblais ou remblais),
- l'érosion naturelle (ruissellements, érosion des berges),
- pour les glissements de berges, la variation de la côte d'un plan d'eau,
- la vibration des terrains (secousse sismique par exemple).

Les volumes mis en jeu varient de quelques mètres cubes (glissements pelliculaires de talus de déblais, par exemple) à plusieurs millions de mètres cubes.

2.2.3 Les coulées boueuses

Les **coulées boueuses** (Figure 4) concernent le mouvement rapide d'une masse de matériaux remaniés, à forte teneur en eau et de consistance plus ou moins visqueuse. Elle prend fréquemment naissance dans la partie aval d'un glissement de terrain. Les coulées se produisent généralement à la suite de conditions climatiques exceptionnelles (très forte pluviosité favorisant l'érosion et le glissement des berges). Les coulées boueuses peuvent évoluer en **laves torrentielles**, celles-ci sont généralement concentrées dans le lit de torrents de montagne. Vues la teneur en eau concernée et la fluidité de la masse en mouvement, les laves torrentielles sont rapportées aux phénomènes d'inondation.



Principe de base (schématique)

Un objet posé sur un plan est soumis :

- à une force motrice W_T (composante parallèle au plan de son poids W) ;
- à une force résistance F_f (composante parallèle au plan du frottement entre l'objet et le plan).

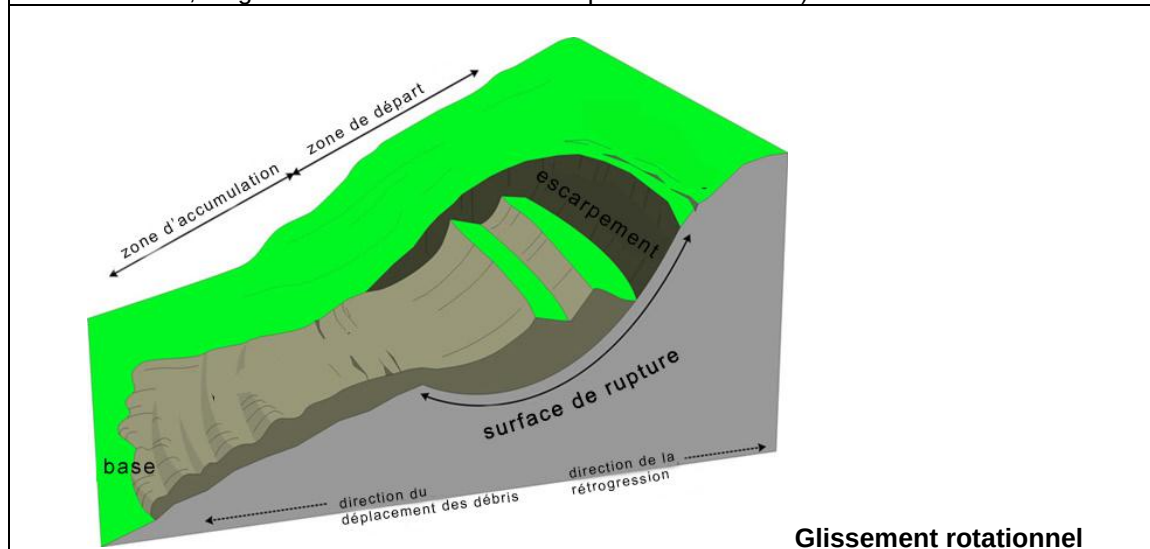
F_f est proportionnelle au produit :

- de la composante perpendiculaire au plan W_N du poids de l'objet ;
- et de la tangente de l'angle de frottement α entre l'objet et le plan.

Lorsque $W_T > F_f$ l'objet glisse sur le plan
 Lorsque $W_T < F_f$ l'objet est fixe
 Lorsque $W_T = F_f$ l'objet est en équilibre limite

Dans la nature les glissements de terrain peuvent se produire sur des surfaces de rupture : planes, circulaires, complexes.

(Extrait du classeur « le risque mouvements de terrain en Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2011, coédit. BRGM, Région et DREAL Provence – Alpes – Côte d'Azur)



Glissement rotationnel



Glissement du Villard-des-Dourbes (Alpes de Haute-Provence - 2003) – Source BRGM

Figure 3 – Schémas et exemples de glissement de terrain

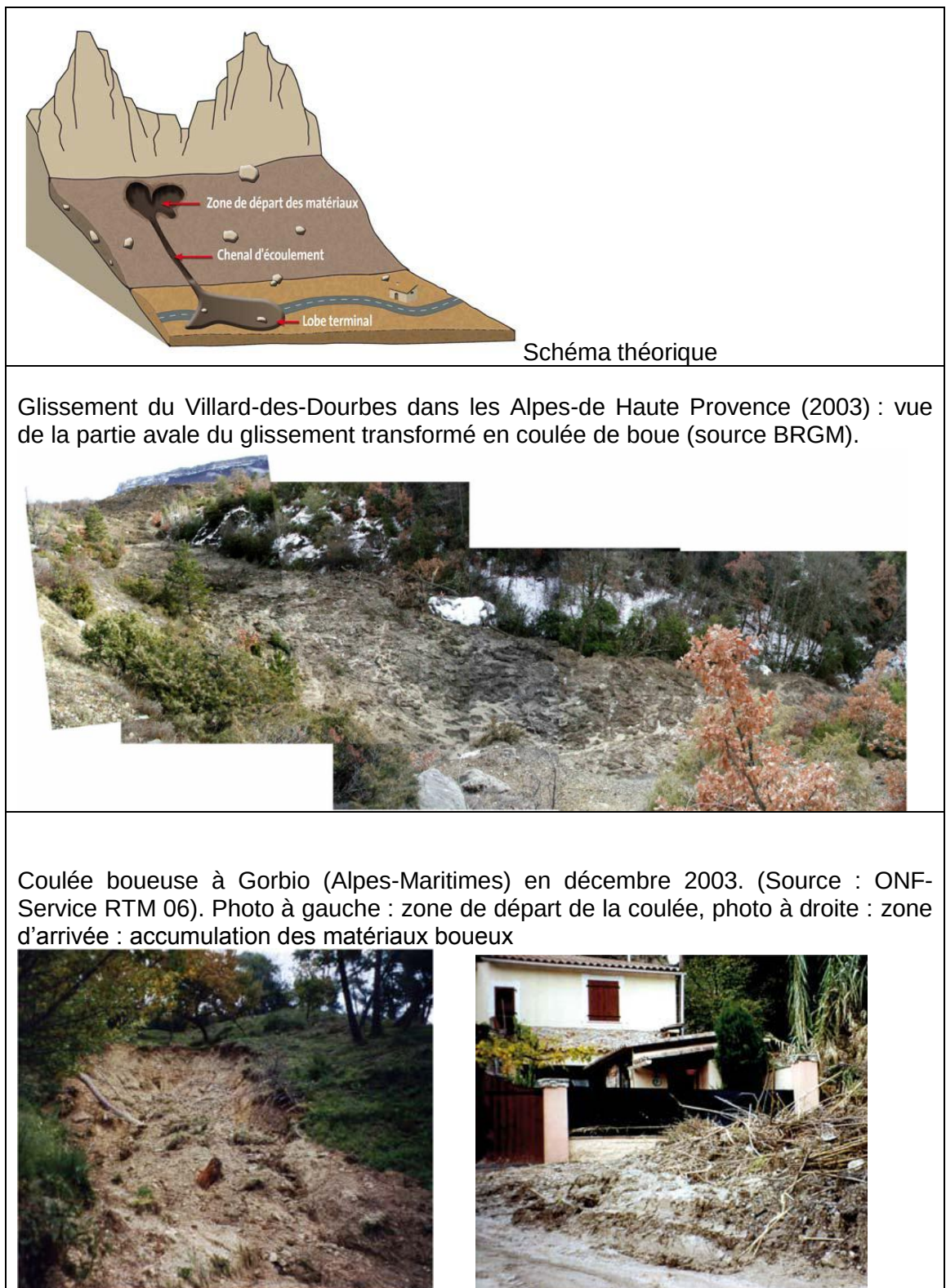


Figure 4 – Exemples de coulées de boue

2.2.4 Quelques autres types de mouvements de terrain

Les phénomènes de **fluages** sont parfois regroupés dans la catégorie des glissements de terrain. Ils concernent la mobilisation de matériaux plastiques sur faible pente selon un mouvement lent. Mais contrairement aux glissements de terrain s.s., la déformation gravitaire continue d'une masse de terrain n'est pas limitée par une surface de rupture clairement identifiables, mais par une zone de transition avec le massif stable.

Le tassement de versant se traduit par des déformations lentes, mais qui peuvent être de grande ampleur, essentiellement verticales en partie haute, plus horizontales en partie basse, dans des formations rocheuses dont le degré de fracturation peut évoluer de façon spectaculaire et que l'on peut considérer comme une phase préalable de mouvements de plus grande ampleur, écroulements de versants, avalanches rocheuses. La forme générale du versant est relativement peu modifiée. Un escarpement sommital existe généralement comme pour tout mouvement mais il correspond toutefois à des plans de fractures géologiques (failles). La masse en mouvement est affectée d'un grand nombre de crevasses, la plupart du temps anciennes (formes estompées, végétation). La présence de zones subsidentes (effondrement de coin) est très fréquente. On observe généralement un raidissement de la pente topographique à la partie basse de la masse en mouvement où aucune surface de rupture n'est décelable.

Le fauchage est une déformation lente des terrains. Il se manifeste par l'inclinaison des extrémités supérieures (têtes) de couches ou de feuillets rocheux en direction de la vallée, produisant ainsi une torsion puis un basculement de blocs. Le fauchage est particulièrement sensible dans les séries feuilletées ou stratifiées ou, présentant plus généralement une famille de discontinuités à pendage très redressé et de direction parallèle à la vallée. Son ampleur est très variable, de quelques décimètres à quelques dizaines de mètres. Le fauchage peut néanmoins faire sentir ses effets en profondeur sur plusieurs centaines de mètres, dans les parties hautes et moyennes des versants.

2.3 PRINCIPES GENERAUX SUR LES DIFFERENTS TYPES DE CARTOGRAPHIE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN

Les derniers travaux de la recherche sur la cartographie des mouvements de terrain ont fait l'objet d'un guide publié dans un numéro spécial du journal Engineering Geology (vol 102, année 2008). Ces travaux font l'objet de développements complémentaires dans le cadre d'un projet international Safeland.

Le risque est le produit entre l'aléa, la vulnérabilité et la quantité et valeur des enjeux (

Figure 5). Parmi les données de base, on distingue : les données d'inventaire des mouvements de terrain contemporains et historiques, les facteurs environnementaux, les facteurs déclenchant, et les éléments à risque. L'inventaire des mouvements de terrain peut donner une première information sur la localisation des phénomènes, les types de mécanisme, leur fréquence et dimension, les facteurs déclenchant, les dommages causés.

Les facteurs environnementaux décrivent le contexte environnemental en différentes couches d'informations. Comparés à l'inventaire de mouvements de terrain, ils permettent d'apprécier les zones susceptibles de devenir instables. La nature, la quantité et la précision des données de base nécessaires varient en fonction de l'échelle de cartographie souhaitée.

Avec l'essor des systèmes numériques de terrain d'une part et l'évolution de la puissance de calcul des ordinateurs d'autre part, la cartographie de l'aléa mouvements de terrain a évolué en intégrant le traitement numérique des informations. Aujourd'hui, on distingue de façon simplifiée des cartographies réalisées selon des approches qualitatives ou quantitatives (tableau 1).

Fell et al. (2008) proposent ainsi une synthèse des différents niveaux de cartographie et des usages possibles (Tableau 2). Les précisions concernant les actions à mener pour atteindre les niveaux requis (préliminaire, intermédiaire ou avancé à chaque étape de zonage (inventaire, susceptibilité, aléa, risque) font l'objet de l'Annexe 1.

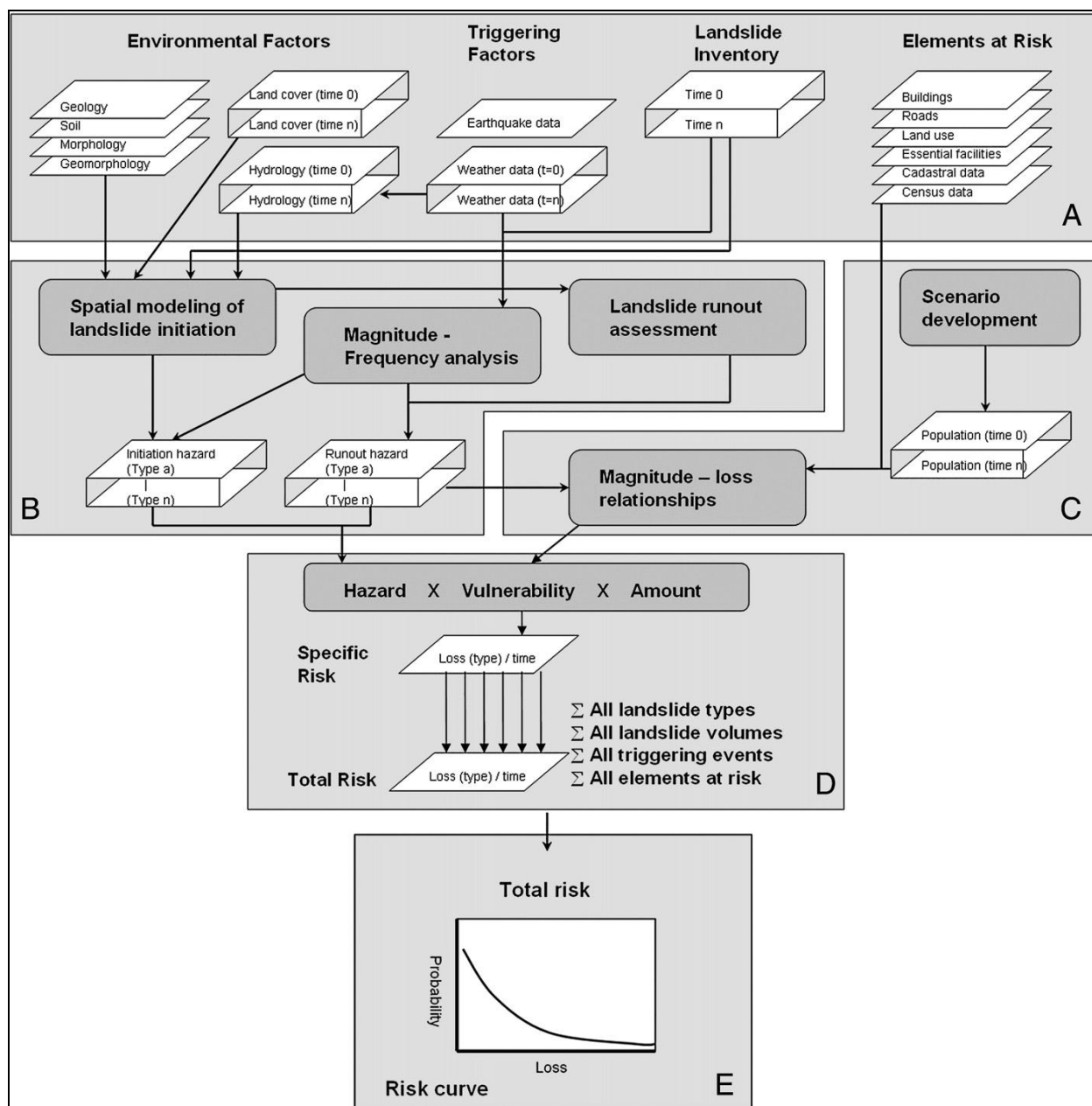


Figure 5 - Représentation schématique de la procédure d'évaluation du risque mouvements de terrain : A) données de base nécessaires, B) estimation de la susceptibilité ou de l'aléa, C) estimation de la vulnérabilité, D) estimation des pertes pour une période donnée, E) probabilité de pertes pour une période donnée estimée sous la forme de courbe de dommages. (d'après Van Westen et al., 2008)

Susceptibility descriptors	Rock falls	Small landslides on natural slopes	Large landslides on natural slopes
<i>(a) Quantitative susceptibility descriptors</i>			
Relative	Geomechanical ratings (SMR, RMS)	Scores of contributing factors obtained from data treatment techniques	
Absolute	Factor of safety values from stability models	Factor of safety values from stability models	Factor of safety values from stability models
<i>(b) Qualitative susceptibility descriptors</i>			
Field geomorphological analyses	Presence or absence of potential instability factors (cracks, dipping joints) Density of scars on a rock slope	# of landslides per square kilometre % of area covered by landslide deposits	Presence or absence of landslides and their degree of preservation Presence or absence of activity indicators
Index map or parameter map	Overlapping of index maps with or without weighting	Overlapping of index maps with or without weighting	

Tableau 1 – Approches qualitatives et quantitatives de la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain, d'après Fell et al. (2008)

utilisation	Type de zonage				niveau de précision			échelle du zonage
	<i>inventaire</i>	<i>Suscep- tibilité</i>	<i>aléa</i>	<i>risque</i>	<i>Prélimi- naire</i>	<i>Intermé- diaire</i>	<i>avanc é</i>	
Zonage national (national scale)								1:250,000 à 1:1,000,000
Information	X	X			X			
zonage régional (medium scale)								1:25,000 à 1:250,000
Information	X	X			X			
consultatif	X	X	(X)		X	(X)		
règlementaire	pas recommandé							
zonage local (large scale)								1:5,000 à 1:25,000
Information	X	X	X	(X)	X	(X)		
consultatif	(X)	X	X	X	X	X	X	
règlementaire		(X)	X	(X)		X	X	
Site (detailed scale)								1:5,000 à 1:1,000
Information	pas recommandé							
consultatif	rarement utilisé							
règlementaire		(X)	X	X		X	X	
Dimensionnement		(X)	(X)	X		(X)	X	

Tableau 2 - Les différents types de cartes mouvements de terrain et leur(s) usage(s), d'après Fell & al. (2008), modifié

L'échelle de cartographie dépend à la fois de l'usage attendu du zonage et de l'étendue du territoire analysé :

- **Echelle nationale (ou très petite échelle) : généralement 1/250 000 à 1/500 000**

Carte événementielle, basée sur un inventaire des mouvements de terrain historiques ou contemporains, ou carte de susceptibilité, il s'agit d'un document d'information et de sensibilisation qui permet de visualiser rapidement les principaux secteurs géographiques régionaux exposés aux mouvements de terrain.

- **Echelle régionale (ou petite échelle) : généralement 1/50 000 à 1/100 000**

Les cartes réalisées restent du domaine de l'information. Elles apportent une vision globale et cohérente sur l'exposition d'un département (voire d'une région) aux phénomènes mouvements de terrain. A cette échelle, la typologie des mouvements de terrain reste relativement simple.

Selon les informations disponibles concernant les paramètres environnementaux et les événements historiques, et selon la démarche d'analyse utilisée, une gradation au niveau de la magnitude (plutôt rarement l'intensité) des phénomènes potentiels et de leur probabilité d'occurrence spatiale peut être apportée ; les documents de synthèse obtenus peuvent alors être considérés comme des cartes d'aléa aux mouvements de terrain.

A l'échelle régionale, l'évaluation de la vulnérabilité des éléments exposés n'est pas réalisée. Néanmoins, la superposition des principaux groupes d'enjeux avec les cartes de susceptibilité ou d'aléa peut apporter une première indication sur le risque potentiel (localisation des zones les plus exposées au risque).

- **Echelle locale (ou moyenne échelle) : généralement 1/25 000 à 1/10 000**

Le territoire analysé correspond généralement à un bassin versant ou un bassin de risque (homogénéité géographique – physique et socio-économique). Il concerne une commune ou quelques communes. Selon la qualité et la densité des informations de base et selon le type de traitement des données, il pourra être tenu compte de la magnitude des mouvements de terrain ou, mieux, de leur intensité.

A cette échelle, une analyse de la probabilité d'occurrence temporelle de survenance des mouvements de terrain peut-être conduite, néanmoins cela suppose : 1) d'avoir une bonne connaissance de la période de retour des facteurs déclenchant (pluies, séismes), et des conditions limites par rapport à la stabilité des terrains ; 2) de disposer d'un échantillon de mouvements de terrain

actuels ou historiques suffisant pour réaliser une analyse probabiliste temporelle.

Les évaluations de la vulnérabilité aux mouvements de terrain sont réalisées sur la base : 1) d'un inventaire, d'une typologie et de la cartographie des principaux enjeux ; puis, 2) pour chaque type d'enjeux, de matrices ou courbes d'endommagement construites par analyse en retour de mouvements de terrain. Les cartes de risque sont établies en tenant compte à la fois de la carte d'aléa aux mouvements de terrain, de la carte des enjeux et des fonctions de vulnérabilité (niveaux de dommages/intensité ou magnitude).

A cette échelle, il est par ailleurs possible de réaliser des scénarios évènementiels caractérisés soit par l'occurrence d'un facteur déclenchant de nombreux mouvements de terrain du bassin, soit l'occurrence d'un évènement mouvement de terrain donné.

Il s'agit de documents d'information qui pourront aussi être utilisés comme document technique dans le cadre de zonage réglementaire, par exemple PPR. Mais dans ce cas, les zones présentant un risque élevé (fort enjeux et/ou aléa élevé) devront faire l'objet d'un zonage plus détaillé (en particulier si l'échelle de cartographie est plus petite que 1/10 000).

- **Echelle du site (ou grande échelle) :** il s'agit d'une analyse menée à l'échelle d'un projet d'aménagement ou de construction, de résolution cartographique au moins égale à 1/5 000. La surface couverte est de l'ordre de quelques hectares à quelques kilomètres carré, elle concerne tout ou partie d'un territoire communal.

L'aléa mouvements de terrain est considéré de façon déterministe. Chaque zone de départ et de propagation de mouvements de terrain susceptibles d'atteindre la (ou les) parcelles analysée(s) doit être considérée individuellement, leur intensité précisée (volume déplacé, vitesse de propagation), et leur probabilité de déclenchement estimée. L'analyse des mouvements de terrain nécessite très généralement des reconnaissances in situ (géologiques et géotechniques) afin 1) de préciser les caractéristiques géotechniques du sol et sous-sol, les conditions hydrogéologiques, 2) les limites d'extension du mouvement, 3) la géométrie de la surface de rupture dans le cas d'un glissement, ou l'état de fracturation des roches dans le cas de chutes de blocs ou effondrement de falaise. Par ailleurs, sur la base de données topographiques détaillées et des caractéristiques géotechniques, des modèles mécaniques de propagation permettront aussi de préciser l'extension du mouvement et sa cinématique.

L'évaluation de la vulnérabilité des enjeux est réalisée au cas par cas, grâce à des simulations de l'impact des terrains en mouvement sur l'élément exposé. En théorie, il est nécessaire de tenir compte à la fois du volume, de la géométrie et de la vitesse de la masse en mouvement, des conditions de sol, et d'établir pour chaque type d'enjeu une courbe de fragilité. En pratique, ces

analyses en sont au stade intermédiaire entre la recherche et la mise en œuvre opérationnelle. Elles permettent au cas par cas d'apporter des informations sur le niveau de risque du projet et le dimensionnement des ouvrages de protection nécessaires à la stabilisation du site.

Cette progression de la précision (contenu et échelle) d'évaluation du risque permet ainsi d'orienter les études plus détaillées sur des secteurs d'extension plus limitée.

Ainsi, Van Westen et al. (2008) listent et classifient les principales données de base nécessaires en fonction de l'approche retenue, de l'échelle cartographique et des objectifs attendus (Tableau 3).

Data		Update frequency (years)	RS	Scale					Hazard models				Risk methods	
Main Type	Data layer			Remote Sensing useful?	Small	Medium	Large	Detailed	Heuristic	Statistical	Deterministic	Probabilistic	(Semi) Quantitative	Qualitative
		10..... 1 ... 0.002 (day)												
Landslide Inventory	Landslide inventory	↔	H	C	H	H	H	H	C	H	H	H		
	Landslide activity	↔	H	M	C	C	C	C	H	C	C	C		
	Landslide monitoring	↔	M	M	M	M	C	-	-	H	H			
	DEM	↔	H	H	C	C	C	C	H	C	C	C		
	Slope angle/aspects etc	↔	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H		
	Internal relief	→	H	H	M	L	L	L	L	-	-			
	Flow accumulation	→	H	L	M	H	H	H	H	M	H	H		
	Lithology	→	M	H	H	H	H	H	H	H	H	H		
	Structure	→	M	H	H	H	H	H	H	H	H	H		
	Faults	→	M	H	H	H	H	H	H	H	-	-		
	Soil types	→	M	M	H	C	C	C	H	H	C	H		
	Soil depth	→	-	-	L	C	C	C	-	-	C	H		
Environmental factors	Slope hydrology	↔	-	-	-	C	C	C	-	-	C	H		
	Main geomorphology units	→	H	C	H	M	L	C	M	L	L			
	Detailed geomorph. units	→	H	H	H	H	L	H	H	M	L			
	Land use types	→	H	H	H	H	H	H	H	H	H			
	Land use changes	↔	H	M	H	H	C	C	H	H	H			
	Rainfall	↔	L	M	M	C	C	C	H	H	C	C		
	Temp / evapotranspiration	↔	M	-	-	M	H	C	-	-	H	L		
	Earthquake catalogs	↔	-	M	M	H	C	-	-	-	C			
	Ground acceleration	↔	L	L	M	H	H	H	H	H	L			
	Buildings	↔	H	L	M	C	C	C	-	-	-	-	C	C
	Transportation networks	↔	H	M	M	M	H	M	M	M	M		H	H
Triggering factors	Lifelines	↔	-	-	L	L	M	-	-	-	-	-	L	L
	Essential facilities	↔	L	L	M	H	H	-	-	-	-	-	H	H
	Population data	↔	L	H	H	C	C	-	-	-	-	-	C	C
	Agriculture data	↔	H	-	M	H	M	-	-	-	-	-	L	M
	Economic data	↔	-	L	M	H	H	-	-	-	-	-	L	M
	Ecological data	↔	H	L	L	L	L	-	-	-	-	-	L	M
Elements at risk														

Left: indication of the main types of data, Middle: indication of the ideal update frequency, RS: column indicating the usefulness of Remote Sensing for the acquisition of the data, Scale: indication of the importance of the data layer at small, medium, large and detailed scales, related with the feasibility of obtaining the data at that particular scale, Hazard models: indication of the importance of the data set for heuristic models, statistical models, deterministic models, and probabilistic models, Risk models: indication of the importance of the data layer for qualitative and quantitative vulnerability and risk analysis. (C=Critical data set, H=highly important, M=moderately important, and L=Less important, --=Not relevant).

Tableau 3 - Représentation schématique des données de base nécessaires à la cartographie de la susceptibilité, de l'aléa et du risque aux mouvements de terrain (D'après Van Westen et al., 2008)

3. Bilan sur les méthodes de cartographie d'aléa mouvement de terrain selon une approche quantitative

Après avoir précisé plusieurs concepts et définition sur l'évaluation et la cartographie de l'aléa et du risque mouvements de terrain, ce chapitre fait la description de plusieurs travaux consacrés à la méthodologie de cartographie des mouvements de terrain.

Dans cet état de l'art des méthodes de cartographie d'aléa mouvement de terrain, nous nous intéresserons notamment aux questions suivantes :

- Quelles sont les méthodes *quantitatives* existantes d'évaluation d'aléa mouvement de terrain ?
- Quelles sont, parmi ces méthodes, les plus adaptées pour une cartographie à l'échelle 1/25 000 à 1/50 000 (applicables sur un département français) ?
- Quelles méthodes permettent-elles une évaluation tendant à être la plus objective possible ?

Les types de mouvements de terrain considérés seront:

- les glissements de terrain;
- les chutes de blocs ;
- les coulées de boue.

Une synthèse des méthodes pour les mouvements de terrain de manière générale est d'abord présentée. Puis nous examinons plus spécifiquement les méthodes d'évaluation d'aléa par grand type de mouvement de terrain, en se focalisant sur les méthodes quantitatives applicables aux échelles 1/25 000~1/50 000 et tendant à être les plus objectives possibles.

3.1 LES 3 GRANDS TYPES DE METHODES : HEURISTIQUE, STATISTIQUE ET DETERMINISTE

Si les classifications des méthodes de zonage peuvent varier suivant les auteurs, ceux-ci s'accordent en général sur 3 grands types de démarches : heuristiques, statistiques et déterministes. Chacune présente des avantages et des inconvénients, mais de manière générale, tous s'accordent pour dire que quelle que soit l'approche utilisée, l'avis de l'expert reste indispensable, dans une plus ou moins grande mesure, et ce d'autant plus quand les données sont incomplètes ou de qualité insuffisante (Van Westen et al., 2006).

3.1.1 Méthodes heuristiques ou basées sur l'expertise

La plupart des études d'aléa réalisées depuis les années 70 dans de nombreux pays (France, Californie, Nouvelle-Zélande, Australie, Suisse...) sont des études heuristiques, basées sur le jugement d'expert. Il s'agit d'approches qualitatives, menant à une subdivision du site d'étude du type : zones d'aléa « très fort », « fort », « modéré », « faible », « très faible ». Basée sur une analyse géomorphologique de susceptibilité aux mouvements de terrain à partir de visites de terrain et d'interprétation de photos aériennes, l'évaluation peut être « directe » ou bien « indirecte ».

Le territoire couvert concerne généralement un bassin versant ou un département. Les règles empiriques mises en œuvre pour établir la carte sont le résultat d'un compromis entre, d'une part, les données disponibles à l'échelle du bassin versant, et d'autre part, la classification de facteurs déterminants qui ont pu être dégagés des observations de terrain et de l'interprétation de l'inventaire des phénomènes.

L'évaluation de l'aléa commence par l'identification du type de phénomène pressenti par référence à des événements vécus sur le territoire à cartographier ou sur des sites au contexte environnemental analogue. A noter qu'il est préférable de pouvoir se référer à un inventaire de phénomènes régional, c'est-à-dire relatif à un territoire plus grand que celui pressenti pour la cartographie, dans la mesure où le contexte environnemental reste comparable, et afin que la typologie soit la plus complète possible.

Les conditions environnementales pouvant a priori jouer un rôle déterminant dans la stabilité du versant, ces facteurs permanents déterminants, doivent ensuite être identifiés et décrits. Dans les facteurs permanents, on distingue deux catégories principales de données spatiales :

- celles parfaitement déterminées, et ce en n'importe quel point du territoire, par exemple : la pente, le couvert végétal, la morphologie, l'hydraulique superficielle. On peut dans ce cas, les ordonner en classes, et délimiter les zones correspondantes.
- Celles connues de façon approximative, soit par référence à des catalogues existants, soit car des mesures ont été réalisées en quelques points seulement du territoire. Il s'agit plus particulièrement d'indication sur la nature, l'épaisseur et sur les caractéristiques géotechniques moyennes des matériaux constituant le sol ou sous-sol. A ce stade, l'expert met en œuvre ses connaissances et son expérience. Dans la mesure du possible leur degré de vraisemblance ou d'incertitude doit être indiqué. On peut considérer qu'à cette échelle de cartographie, toutes les informations disponibles sur le territoire analysé et indispensables pour l'évaluation de l'aléa aux mouvements de terrain ont été réunies.

En combinant les données et suivant des règles plus ou moins complexes qui auront été préalablement définies, la carte d'aléa aux mouvements de terrain à l'échelle du bassin versant ou d'un territoire plus grand, va pouvoir être réalisée. Toutefois, il ne

s'agit pas à ce stade d'une évaluation d'aléa, car la composante probabilité tant spatiale que temporelle n'est pas calculée, mais plutôt de carte de susceptibilité ou de prédisposition aux instabilités. Dans la pratique, il est parfois indiqué si le phénomène est susceptible de se produire à court terme (1 à quelques années à venir), moyen terme (1 à quelques décennies) ou long terme. Néanmoins, ces coupures n'ont rien de formel et sont laissées à l'appréciation de l'auteur.

Une évaluation « directe » consiste en une analyse « a priori » de l'aléa, par dire d'expert. Les critères retenus pour cette évaluation sont subjectifs et généralement peu ou pas explicités. Un exemple de ce type d'approche est le projet français ZERMOS (Zones Exposées à des Risques liés aux MOuvements du Sol et du sous-sol) des années 70 (Antoine, 1977, 1978 ; Bouquier et Dubasque, 1975 ; Humbert, 1977). L'évaluation y a été faite en deux étapes : dans la première, les facteurs d'instabilité permanents et déclencheurs sont examinés, et des zones de caractéristiques différentes analysées ; dans la seconde étape, l'analyse est extrapolée à l'ensemble de la zone d'étude en se basant sur la similarité des caractéristiques physiques.

Lors d'une évaluation « indirecte », l'expert sélectionne les facteurs de susceptibilité aux mouvements et attribue à chacun un poids représentant la contribution de ce facteur à une potentielle instabilité. Chaque facteur comprend plusieurs niveaux traduits par des valeurs d'indices, et pour chaque facteur, la zone d'étude est subdivisée en zones d'indices différents selon leur niveau. Ces cartes de facteurs sont ensuite superposées et les indices sommés en respectant les poids des différents facteurs. Des niveaux d'aléa sont définis selon les valeurs finales d'indices. L'avantage de cette approche par rapport à une évaluation « directe » est que la méthodologie peut être explicitée et automatisée (Amadesi et Vianello, 1978 ; Anbalagan, 1992 ; Visintainer et Turrini, 1995). Ce type de méthode a également été utilisé par le BRGM pour réaliser des cartes d'aléa mouvement de terrain au 1/25 000 et au 1/50 000 (Sedan et al., 2002 ; Terrier et al., 2002 & Terrier et al., 2003 ; Zornette et al., 2002 ; Marçot et al., 2007).

L'intérêt de ces méthodes basées sur l'expertise est qu'elles sont adaptables à différentes échelles d'étude (régionale à locale). La principale limite de ces méthodes est qu'elles sont subjectives, que ce soit dans l'analyse directe ou dans l'attribution des poids et des indices dans l'évaluation indirecte, ce qui rend leurs résultats difficilement reproductibles et comparables. Par exemple, un exercice de zonage d'aléa de la région du bassin de l'Alpago en Italie, effectué par trois équipes différentes, a donné des résultats forts différents : seulement 35% de la surface cartographiée s'est révélée commune entre les trois cartes (Cascini et al., 2005).

3.1.2 Méthodes statistiques ou de traitement de données

Le principe des méthodes statistiques consiste à confronter la répartition spatiale de mouvements de terrain d'une zone donnée avec les conditions environnementales, dans le but 1) de dégager les facteurs environnementaux de prédisposition aux instabilités puis, 2) d'en tirer les règles de combinaison qui puissent expliquer la répartition des mouvements. Cette fonction peut ensuite être utilisée pour évaluer une

zone sur laquelle on ne dispose pas d'évènements mais qui dispose de conditions environnementales comparables.

Pour estimer une probabilité temporelle d'occurrence, il est nécessaire de disposer d'informations sur les facteurs déclenchant (lieu, date, intensité) mais aussi d'un inventaire de mouvements de terrain datés. Dans ce cas, des évaluations statistiques peuvent être réalisées (Zêzere et al., 2004 ; Dai et Lee, 2003), mais ce type d'étude reste néanmoins très rare.

Les analyses statistiques peuvent être bivariées ou multivariées. Dans une analyse bivariée, chaque classe de facteurs est comparée avec la carte d'inventaire des mouvements de terrain puis pondérée suivant la densité des événements. Les méthodes les plus couramment employées sont les suivantes (Thiery et al., 2004) : la théorie de l'évidence (Bonham-Carter, 1994 ; Van Westen et al., 2003), la logique floue (Chung et Fabbri, 1993), la technique des fonctions favorables (Chung et Fabbri, 1993). Les analyses bivariées sont largement utilisées en raison de leur souplesse : de nombreux facteurs peuvent être testés, le modélisateur peut déterminer les paramètres et les combinaisons de paramètres qu'il utilise. Toutefois, un inconvénient de cette méthode est qu'elle suppose une hypothèse d'indépendance entre les facteurs.

Lors d'une analyse multivariée, chaque classe de facteur est combinée à une unité de versant. La présence ou l'absence de mouvements de terrain est déterminée dans chaque unité. La matrice résultante est analysée par des méthodes de régressions multiples ou logistiques (Bernknopf et al., 1988; Jade and Sarkar 1993; Wieczorek et al., 1996) ou des analyses discriminantes (Baeza et Corominas, 1996; Carrara, 1983; Carrara et al., 1990). L'analyse multivariée peut nécessiter un grand nombre de paramètres pour obtenir de bons résultats (parfois plus de 50), ce qui implique une collecte de données considérable (Soeters et Van Westen, 1996 ; Van Westen, 2000).

Classée souvent à part des précédentes, la méthode des réseaux de neurones artificiels met en œuvre le principe de l'induction, c'est à dire l'apprentissage par l'expérience, pour la classification de données et la généralisation (Basma et Kallas, 2004 ; Lee et al., 2004 ; Ermini et al., 2005). Le principal avantage de cette méthode est qu'il n'y a pas à introduire de variables statistiques dans l'analyse (Chacón et al., 2006). En revanche, le processus reste une « boîte noire » donnant une réponse dont la justification peut être difficile à interpréter.

Les méthodes statistiques sont considérées en général les plus appropriées pour une cartographie à l'échelle 1/10 000 à 1/50 000 (Dai et al., 2002), mais à condition de disposer d'une base de données de mouvements de terrain contenant des données suffisamment renseignées, en quantité suffisante pour être statistiquement représentatives et fiables. Une autre limite de ces méthodes est qu'elles supposent que les mouvements de terrain potentiels se déclencheront selon les mêmes conditions que par le passé. Or, les conditions environnementales du site peuvent évoluer, l'analyse basée sur les événements passés peut alors devenir inapte à prévoir les instabilités liées à de nouvelles conditions.

3.1.3 Méthodes « déterministes » ou basées sur l'analyse physique

On désigne par méthodes déterministes les méthodes basées sur l'analyse des processus mécaniques et hydrologiques des mouvements gravitaires. On distingue deux grands types d'analyses : 1) les analyses de stabilité à l'équilibre limite (méthodes des tranches) et 2) les simulations numériques qui modélisent le comportement en déformations-contraintes en tout point du sol (analyses par éléments finis, différences finies, etc.).

Ces méthodes nécessitent des données géotechniques détaillées de la zone d'étude, notamment pour le deuxième type d'analyses. C'est pourquoi celles-ci ne sont en général appliquées que sur des zones relativement petites, comme par exemple sur un versant. En effet, dans une analyse de stabilité par équilibre limite, on cherche à calculer un facteur de sécurité d'une masse de sol potentiellement instable, c'est-à-dire le ratio entre les forces de résistance au glissement et les forces entraînant le glissement. Cette analyse doit être effectuée sur chaque versant élémentaire de la zone d'étude.

Une approche probabiliste peut être intégrée en introduisant la variabilité des paramètres d'entrée, liée aux incertitudes ou à leur variabilité intrinsèque. On cherche alors à calculer une probabilité p_f de rupture, probabilité que le facteur de sécurité F soit inférieur à 1 : $p_f = P[F < 1]$ (Capolongo et al., 2002 ; Xie et al., 2004 ; Wang, 2008). Les méthodes de calcul probabiliste les plus courantes sont la méthode FOSM (First Order Second Moment), l'estimation ponctuelle et la simulation Monte-Carlo (Van Westen, 2006).

En allant plus loin dans la dimension probabiliste, des évaluations de la fiabilité des systèmes géotechniques considèrent différents modes de rupture. Par exemple, une analyse de stabilité d'un talus peut être réalisée en considérant plusieurs surfaces de glissement (Chowdhury et Xu 1994, 1995). Une approche bayésienne permet d'inclure des données nouvelles ou des jugements d'expert.

Sans l'analyse de la fréquence d'occurrence des conditions déclenchant le mouvement, le calcul d'une probabilité de rupture n'est pas suffisant pour estimer la fréquence temporelle. Pour cela, les modèles déterministes visent à déterminer une relation entre les conditions d'instabilité, l'intensité et la périodicité des facteurs déclenchant (précipitations, sollicitations sismiques). Par exemple, par des modèles mécanique et hydrologique combinés, la relation entre précipitation et distribution des pressions interstitielles est analysée (Aleotti et Chowdhury, 1999).

Les méthodes déterministes sont les plus objectives quant à la nature des facteurs d'instabilité pris en compte et leur contribution. Cependant, si l'incertitude sur les paramètres d'entrée est importante, les résultats ne seront pas plus précis qu'avec une autre méthode. D'autre part, le choix du modèle et les hypothèses de modélisation sont cruciaux : si le modèle est trop simple ou inadapté au phénomène étudié, il ne permettra pas d'évaluer correctement l'aléa.

3.2 EVALUATION DE L'ALEA AUX CHUTES DE BLOCS

Par l'expression « chute de blocs », on désigne les éboulements rocheux, qui, selon le volume des éléments unitaires, sont regroupés en :

- chute de pierres : éléments jusqu'à quelques dm^3 ;
- chute de blocs : éléments de quelques dm^3 à quelques m^3 ;
- écoulement en masse : éléments de volume de plusieurs m^3 .

L'aléa chute de blocs en un point donné peut être décomposé en deux termes:

$$H = P_r \times P_p$$

où H est l'aléa, P_r et P_p respectivement l'aléa de rupture et l'aléa de propagation.

Aujourd'hui, rares sont les méthodes qui permettent d'évaluer explicitement et précisément la probabilité de rupture (Dorren et al., 2007). En revanche, les probabilités d'atteinte peuvent être estimées de manière relativement précise par simulation de trajectoires.

3.2.1 Aléa de rupture

Dans les méthodes d'évaluation de l'aléa de rupture peuvent être citées :

- des méthodes heuristiques, basées sur l'analyse des différents facteurs d'instabilité (Pierson et al., 1990 ; Cancelli and Crosta, 1993 ; méthodes RES et Materrock : Jaboyedoff et al., 2002 ; méthode LCPC : Effendiantz et al., 2004) ;
- des analyses d'événements historiques, dans le but d'évaluer la fréquence d'occurrence, en utilisant des lois reliant volume et fréquence (Hungry et al., 1999 ; Dussauge et al., 2002 ; méthode HGP : Hantz et al., 2003) ;
- des méthodes déterministes, dans lesquelles un facteur de sécurité est calculé (Hoek and Bray, 1981 ; Jaboyedoff et al., 2004 ; Gunther et al., 2004) ;
- des analyses statistiques des facteurs d'instabilité (Marquinez et al., 2003 ; Chau et al., 2004 ; Frattini et al., 2007).

En pratique, les méthodes heuristiques restent les plus utilisées. Elles font appel au jugement d'expert mais utilisent une méthodologie explicite, consistant en une analyse et une pondération des facteurs d'instabilité, à partir d'investigations sur le terrain et de documents tels que MNT très détaillés et photos aériennes. Les facteurs d'instabilités rocheuses peuvent être regroupés en facteurs intrinsèques et externes (Dorren et al., 2007):

- facteurs intrinsèques : morphologie (type de versant, exposition,...), contexte géologique (type de roche et état de fraîcheur, stratification, plissement, structure), fracturation (famille de discontinuités, persistance, espacement, degré de fracturation), caractéristiques hydrogéologiques (perméabilité, conductibilité des fractures), propriétés mécaniques des roches, activité (mouvement) ;
- facteurs externes : facteurs liés à l'eau (précipitations, taux d'infiltration, eaux souterraines), altération, sismicité, tectonique active, microclimat (gel-dégel, exposition au soleil, permafrost), instabilités avoisinantes, facteurs anthropiques.

Le rôle de ces facteurs peut être analysé selon les étapes suivantes :

- 1) étude historique
- 2) étude géologique
- 3) analyse structurale (identification des ensembles structuraux et des systèmes de discontinuités)
- 4) analyse morphologique
- 5) étude hydrogéologique
- 6) étude du couvert végétal
- 7) analyse des mécanismes d'évolution des versants rocheux (glissement plan ou dièdre, rupture de surplomb ou d'écaille...).

Selon la méthode, celle-ci peut-être plus tournée vers : une analyse géomécanique (Gokceoglu et al., 2000), une analyse de la densité de fracturation (Jaboyedoff et al., 2003 et 2004).

3.2.2 Aléa de propagation de chutes de blocs

L'évaluation de l'aléa de propagation consiste à étudier le comportement dynamique du bloc, une fois détaché de la source. Les méthodes couramment utilisées sont des méthodes empiriques (la plus utilisée étant la méthode des cônes) et des modèles mathématiques de simulation de trajectoire.

a. La méthode des cônes

Cette méthode part de l'observation que l'extension maximale d'un dépôt rocheux peut être approximée à l'aide d'un cône dont le sommet est situé à la source des blocs (Baillifard, 2004).

Cette méthode a d'abord été appliquée aux grands écroulements rocheux pour lesquels la pente du cône peut atteindre 10° si les volumes éboulés atteignent le km^3 . Dès 1932, Heim postule que la distance maximale de propagation d'un éboulement peut être déterminée à l'aide d'un angle de frottement moyen φ_p . Par la suite, de nombreuses valeurs de φ_p ou des relations empiriques entre φ_p et le volume de l'écroulement ont été proposées. Ainsi, sur la base d'observations, plusieurs auteurs

(Evans et Hungr, 1993; Hungr et Evans, 1988; Lied, 1977; Onofri et Candian, 1979; Wieczorek et al., 1998) proposent des valeurs de ϕ_p qui se situent entre 22° et 41° selon les points de départ considérés (sommet ou base de la niche d'arrachement).

b. Trajectographie

La plupart des modèles trajectographiques supposent l'absence d'interaction entre les différents blocs et ne simulent pas de fracturation au cours de leur trajectoire. En revanche, certains modèles prennent en compte tous les modes de déplacement du bloc sur le sol : glissement, roulement, rebond, mais la plupart ne simulent que le déplacement par rebonds successifs (Bourrier, 2008).

Ce déplacement par rebonds peut être modélisé comme une succession de vols libres et d'impacts sur le sol. Si, en négligeant le frottement de l'air, la phase de vol libre est simple à modéliser, cela n'est pas le cas du rebond du bloc sur le sol, vu la variabilité des caractéristiques du sol et du bloc. Cela conduit à plusieurs types de modèles :

- les modèles prenant en compte la forme et la rotation des blocs ;
- les modèles assimilant le bloc à un point matériel ;
- les modèles « hybrides », dans lesquels des simplifications sont faites pour la phase de vol libre.

Les logiciels de trajectographie ont d'abord été développés en deux dimensions, puis, pour éviter une définition a priori de profils préférentiels de propagation, des modèles tridimensionnels ont été développés ; en général le rebond est néanmoins modélisé sur le même principe que le modèle d'impact 2D.

Théoriquement, la trajectoire d'un bloc peut être calculée de manière déterministe si les conditions initiales, les propriétés du bloc et du sol sont connues de manière précise. Or, ces paramètres sont entachés de variabilité ou d'incertitudes, c'est pourquoi les études trajectographiques se basent souvent sur une analyse statistique. Dans les modèles prenant en compte la variabilité des paramètres, les données d'entrée sont considérées comme des variables aléatoires, suivant des lois statistiques classiques (Labieuse et al., 2002).

Des cartes d'aléa chutes de bloc de quelques km² jusqu'à un millier de km² ont pu être réalisées en utilisant des simulations trajectographiques (Guzetti et al., 2002).

L'utilisation de cette méthode requiert des données d'entrée, notamment un MNT, de grande précision pour reproduire la morphologie des versants, ainsi qu'un calage des paramètres des sols relatifs à leur influence sur le déplacement du bloc.

3.3 EVALUATION DE L'ALEA AUX GLISSEMENTS ET COULEES DE BOUE

Les glissements de terrain regroupent des phénomènes variés, selon le type de mécanisme de déformation, de rupture et de déplacement, le type et le volume de matériaux déplacés, la vitesse des mouvements (fluages, glissements plans, glissements rotationnels, glissements composites, etc.). Les coulées boueuses traitées ici sont les coulées issues de glissements de matériaux saturés et peu cohérents.

3.3.1 Evaluation des instabilités

La probabilité d'apparition des glissements peut être évaluée par des méthodes heuristiques, statistiques ou déterministes. Comme nous nous intéressons ici aux méthodes quantitatives à l'échelle 1/25 000~1/50 000, nous ne traiterons pas ici les méthodes heuristiques. Nous ne détaillerons pas non plus les analyses statistiques, dont les principes ne sont pas spécifiques aux glissements.

Parmi les méthodes déterministes existantes, celles adaptées à des évaluations à l'échelle 1/25 000~1/50 000 sont les analyses de stabilité de pente à l'équilibre limite. Pour cela, des modèles de stabilité sont intégrés dans un environnement SIG et couplés à des modèles hydrologiques, ce qui permet d'évaluer des pressions interstitielles critiques (Dietrich et al., 2001 ; Terlien et al., 1995 ; Gritzner et al., 2001 ; Chen et Lee, 2003 ; Van Beek et Van Asch, 2003 ; US Forest Survey). Les premiers modèles hydrologiques supposaient un flux statique, mais l'écoulement ne pouvant être en équilibre avec l'infiltration que sous certaines conditions (Iverson, 2000), d'autres modèles simulant un flux transitoire ont été développés (Xie et al., 2004 ; Godt et al., 2008 ; Salciarini et al., 2008). L'objectif est de déterminer une relation entre l'intensité des précipitations et l'instabilité des pentes et d'évaluer alors une probabilité d'occurrence temporelle des glissements.

Les modèles de stabilité supposent soit une surface de rupture plane, soit circulaire, soit quelconque (Mompelat, 1994). Le modèle le plus utilisé est celui de la pente infinie, qui est néanmoins valable seulement pour des glissements plans superficiels.

Pour les mouvements induits par séisme, les méthodes de base consistent en une analyse de stabilité pseudo-statique en prenant en compte l'effet du séisme comme une force d'inertie horizontale pour calculer un facteur de sécurité ou un déplacement induit (Newmark, 1965; Makdisi et Seed, 1978; Sarma, 1979; Moriwaki et al., 1982; Kramer, 1996; Stamatopoulos, 1996 ; Miles et Ho, 1999 ; Luzi et al., 2000 ; Randall et al., 2000 ; Jibson et al., 2000).

Des modèles de bloc rigide sont couramment utilisés, mais pour prendre en compte le comportement du sol (densification et dilatance, dégradation de la résistance), des modèles intermédiaires utilisent des modèles plus représentatifs (viscoplastiques ou élastoplastiques) pour simuler le comportement du sol à l'interface (Tika-Vassilikos et al., 1993; Modaressi et al., 1995; Kramer, 1996; Sarma and Chlimintzas, 1998; Lopez-Caballero and Modaressi, 2001; Lopez-Caballero, 2003).

Certains auteurs ont développé des modèles de stabilité 2D élaborés, couplés avec des modèles hydrologiques, appliqués par exemple à une série de profils le long d'une route afin d'en réaliser un zonage d'aléa (Anderson et Howes, 1985 ; Van Asch et al., 1993 ; Moon et Blackstock, 2003).

Afin de calculer une probabilité de rupture en prenant en compte la variabilité ou l'incertitude des paramètres, des simulations Monte-Carlo ont été introduites dans des modèles de stabilité (Hammond et al., 1992 ; Davis et Keller, 1997 ; Zhou et al., 2003 ; Refice et Capolongo, 2002). Les méthodes des séries de Taylor et de FOSM (First Order Second Moment) permettent quant à elles de calculer la moyenne et l'écart-type du facteur de sécurité (Luzi et al., 2000).

3.3.2 Propagation des glissements et coulées

Dans un zonage d'aléa glissements de terrain, il est en général nécessaire de séparer l'évaluation de l'aléa lié à l'instabilité et celle de l'aléa lié à la propagation. Pour évaluer l'aléa de propagation des glissements/coulées, les paramètres d'intensité peuvent être la distance de propagation depuis la source, la largeur du couloir de propagation, la vitesse du mouvement, la hauteur de la masse glissante ou du dépôt. Les principaux facteurs considérés pour évaluer l'intensité de la propagation sont : les caractéristiques du versant de départ (géométrie, lithologie) et les mécanismes de rupture, les matériaux composant la coulée et leur mode de mouvement, la morphologie et l'état de surface de la zone de propagation (Dai et al., 2002).

Parmi les méthodes de zonage de l'aléa de propagation, on distingue :

a. Les méthodes empiriques

- La méthode de changement de masse est basée sur l'hypothèse qu'une coulée voit sa masse initiale modifiée par perte ou dépôt au cours de sa trajectoire. La coulée s'arrête quand la masse des matériaux qu'elle déplace devient négligeable (Cannon and Savage, 1988). L'influence de la pente, la végétation, la morphologie sur le taux moyen de changement de masse peut être étudiée par une analyse multivariée. Cette méthode ne détermine pas explicitement le chemin de propagation.
- La méthode de l'angle d'atteinte vise à déterminer l'angle formé par la ligne reliant la source à la position finale atteinte par la coulée. D'après Scheidegger (1973) et Corominas (1996), cet angle décroît avec le volume de matériaux mis en jeu. Cette méthode, simple à mettre en œuvre, ne donne néanmoins qu'une indication préliminaire de la distance de propagation.

b. Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques utilisent un modèle qui considère la masse déplacée comme un point matériel.

Le *sled model* de Sassa (1988) suppose que le mouvement de la masse est contrôlé par la gravité et une force résistante de frottement. Dans la modèle actuel, la force résistante est exprimée comme fonction de l'angle de friction interne et un coefficient représentant la pression interstitielle.

Hutchinson (1986) a développé un modèle pour les coulées de matériaux peu cohérents, en supposant que le volume de matériaux s'étale en une couche uniforme. Dans ce modèle, la résistance au mouvement est purement due à la friction et la pression de fluide en excès se dissipe selon la théorie de la consolidation 1D.

Les modèles de point matériel ne prennent pas en compte le confinement ou la dispersion latéral(e) de la coulée, ni la modification de la hauteur de la coulée qui en résulte. Les méthodes analytiques sont à utiliser seulement pour comparer des coulées avec des matériaux et des chemins de propagation similaires.

c. Méthodes numériques

Les méthodes numériques simulent le comportement dynamique et/ou rhéologique de la coulée. Elles consistent donc principalement en modèles de mécanique des fluides ou en méthodes par éléments distincts.

Les modèles de mécanique des fluides se basent d'une part sur la conservation de la masse, des moments et de l'énergie pour le mouvement dynamique de la coulée, et d'autre part sur un modèle rhéologique pour le comportement des matériaux qui la composent.

Les modèles 1D sont applicables seulement si le profil de propagation est connu. Parmi les simulations 2D, le modèle Herschel–Bulkley (Laigle et Coussot, 1997) est un modèle général de fluide viscoplastique. On ne trouve pas dans la littérature de modèle de flux qui puisse simuler une coulée de boue en trois dimensions en tenant compte du changement du lit par érosion et dépôt. Les seuls modèles simulant approximativement une coulée en trois dimensions sont les modèles 2D calculant une profondeur moyenne de coulée (Savage and Hutter, 1991; Takahashi et al., 1992; O'Brien et al., 1993; Denlinger and Iverson, 2001; Ghilardi et al., 2001). Ces méthodes nécessitent un choix approprié du modèle rhéologique, ainsi que la détermination des paramètres rhéologiques, soit par des tests en laboratoire, soit par des calages avec des cas réels. Elles permettent d'estimer l'ensemble de paramètres d'intensité caractérisant l'aléa de propagation (distance de propagation, vitesse, hauteur de la coulée). Ce type de modèles a été utilisé pour réaliser des cartes d'aléa mais essentiellement sur des zones de quelques km² à quelques dizaines de km² (Hürlimann et al., 2008 ; Chau et Lo, 2004).

La méthode par éléments distincts permet de modéliser de grandes déformations. Elle peut être utilisée pour calculer la distance et la vitesse de propagation. Cependant, cette méthode est complexe et très coûteuse en temps de calcul, donc utilisable seulement à une échelle locale.

4. Etat de l'art sur les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrain

4.1 LES PREMIERS CONCEPTS : INTENSITE DE MOUVEMENT DE TERRAIN, TYPOLOGIE DES ENJEUX ET MATRICES D'ENDOMMAGEMENT (LEONE, 1996)

Les premiers travaux pour l'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrain datent du début des années 90. En France, il s'agit notamment du travail de recherche de Leone (1996) sur une première approche d'appréciation du risque mouvements de terrain, avec la proposition d'un « cadre cohérent de structuration et de quantification du concept de vulnérabilité ».

Contrairement à d'autres phénomènes naturels, tels que les séismes ou les inondations, les mouvements de terrain se singularisent par différents processus d'endommagement :

- déplacement/déformation des terrains,
- pression (poussée lors de l'impact),
- surcharge/accumulation lors de la propagation ou au contraire érosion/suppression.

La capacité d'endommagement d'un type de mouvement de terrain dépend étroitement de la nature et de l'intensité des sollicitations mécaniques (dynamique ou statique) qu'il est capable de produire. Leone propose ainsi 8 types de sollicitations mécaniques, d'intensité variable selon le type de mouvements de terrain (

Figure 6). Le niveau d'intensité d'un phénomène sera estimé en fonction de différents paramètres choisis en raison de leur pouvoir destructeur. Ces paramètres sont d'ordre :

- dimensionnels ou géométriques (surface, volume, forme, profondeur, amplitude, distance, hauteur, épaisseur),
- cinématiques (vitesse, débit, accélération, rythme et champ de déformation),
- autres (viscosité, masse, charge solide, densité).

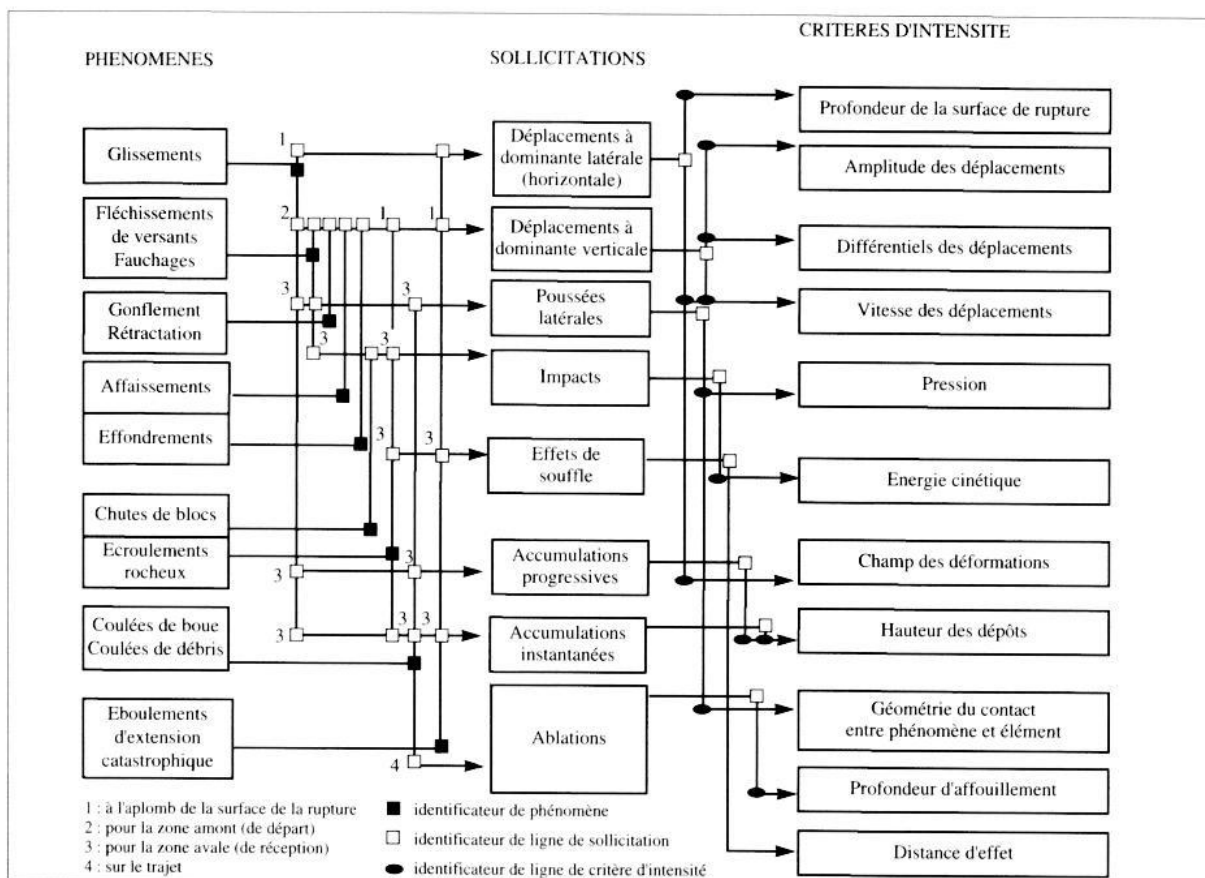


Figure 6 - Evaluation de l'intensité des phénomènes de mouvements de terrain en fonction de la nature des sollicitations mécaniques (Léone, 1996)

En parallèle, pour chaque grande catégorie d'éléments exposés, correspond une table avec description du mode d'endommagement et appréciation du taux de perte par classe d'intensité des dommages (Figure 7). L'estimation des taux de pertes (compris entre 0 et 1) repose sur une analyse en retour des dommages causés par des événements historiques ou contemporains.

ELEMENTS EXPOSES	ID	MODES D'ENDOMMAGEMENT	D
BATI			
RESEAUX			
SURFACES NATURELLES			
SOUS-ELEMENTS			
PERSONNES			
FONCTIONS			

ID : échelle d'intensité des dommages
D : taux de pertes (structurelles, corporelles et fonctionnelles)

I	Domages légers non-structurels (gros oeuvre non-touché). Stabilité non-affectée. Mobilier endommageable	0,01-0,1
II	Fissuration des murs, mais stabilité non-affectée. Réparations non-urgentes.	0,2-0,3
III	Déformations importantes, lézardes largement ouvertes, fissuration des structures. Stabilité affectée. Portes et fenêtres inutilisables. Evacuation nécessaire.	0,4-0,6
	Fracturation des structures. Désolidarisation des parties. Effondrement partiel du plancher et brèches dans les murs. L'évacuation s'impose. La réhabilitation semble compromise.	0,7-0,8
	Effondrement partiel à total qui nécessite une évacuation du site et compromet toute réhabilitation.	0,9-1

Figure 7 – Pour chaque type d'éléments exposés : Typologie des modes d'endommagement selon une échelle d'intensité de dommages et estimation du taux de pertes correspondant ; Exemple du bâti (Leone, 1996)

Pour chaque catégorie d'éléments exposés, Leone (1996) propose de construire des matrices d'endommagement avec estimation du taux de pertes selon la nature et intensité de la sollicitation (Figure 8).

		ELEMENTS EXPOSES				
		B	R	SN	SE	P
SOLICITATIONS	DL	D				
	DV					
	IM					
	PL					
	ES					
	AC					
	AB					

B : bâti
 R : réseaux
 SN : surfaces naturelles
 SE : sous-éléments
 P : personnes hors bâti
 D : taux de perte

		Types de bâti			
		B1	B2	B3	B4
Echelles d'intensité de DL	V1	0,3	0,2	0,1	
	V2	0,4	0,3	0,2	
	V3	0,6	0,5	0,4	0,3
	V4	1	0,9	0,8	0,7
	V5	1			

DL : déplacements à composante latérale
 DV : déplacements à composante verticale
 IM : effet d'impact
 PL : poussée latérale
 ES : effet de souffle
 AC : accumulations
 AB : ablations
 V : vitesses latérales

Figure 8 – Exemple de matrice d'endommagement relatif au bâti (Léone, 1996)

In fine, les pertes calculées en termes de préjudice humain, fonctionnels, et financiers devaient permettre l'estimation de la gravité globale des pertes selon le territoire considéré.

Sachant néanmoins que le renseignement des matrices n'en était alors qu'à son tout début, Leone (1996) misait sur un futur retour d'expérience pour leur enrichissement. En dépit d'une description relativement précise du processus d'analyse, cette méthode n'a cependant pas été suivie. Probablement en raison du nombre de matrices d'endommagement qu'il restait à renseigner et valider, mais aussi du nombre et de la variabilité des paramètres à considérer concernant la composante « intensité » de l'aléa mouvements de terrain.

4.2 SCENARIO DE RISQUE MOUVEMENTS DE TERRAIN A L'ECHELLE D'UNE AGGLOMERATION

Une méthodologie d'évaluation et de cartographie du coût des dommages provoqués par les mouvements de terrain à l'échelle d'une agglomération a été élaborée et testée sur trois arrondissements de Marseille (Thierry et al., 2008). Cette étude de faisabilité méthodologique a été réalisée sous le contrôle d'un comité de pilotage composé de représentants du MEEDM, de la Mairie et des services déconcentrés de l'État en charge de l'aménagement (DDE, DRIRE, DIREN).

L'objectif de l'étude était la proposition d'une méthode permettant d'évaluer le coût des dommages provoqués, à l'échelle d'une ville, par le cumul des phénomènes instables sur une période de référence de 100 ans. Cette étude visait à compléter les démarches développées dans le cadre des scénarios départementaux de risques mouvements de terrain (SDR-MVT) et cavités souterraines (SDR-CAV) sur les zones à forts enjeux, afin de disposer d'une approche cohérente pour hiérarchiser les quartiers d'une ville puis les villes. La méthode développée a été testée à 3 arrondissements de la ville de Marseille.

4.2.1 Principe des « Scénarios risques mouvements de terrain en zone urbaine »

4.2.1.1 Evaluation de l'aléa

Les phénomènes pris en compte sont :

- les glissements,
- les coulées boueuses,
- les chutes de blocs et écroulements rocheux,
- les affaissements et effondrements.

Phénomène	Sollicitation (Effets physiques)	(V) Vitesse du mouvement, (A) Amplitude du mouvement / distance de déplacement, (Cd) Importance du champ de déformation, (Hp) Hauteur des matériaux en poussée, (Ec) Energie cinétique, (Ha) Hauteur des matériaux accumulés, (Pa) Profondeur de l'ablation, (1) zone de départ du phénomène, (2) zone de réception.
Glissement	Déplacement horizontal (V, A, Cd)	
	Déplacement vertical (V, A, Cd)	
	Poussée latérale et frontale (Hp)	
	Accumulation / enfouissement (Ha)	
Coulées de boue	Ablation (Pa) ¹	
	Accumulation / enfouissement (Ha) ²	
	Impact (Ec)	
	Poussée latérale et frontale (Hp)	
Chute de blocs / écroulement rocheux	Déplacement vertical (V, A, Cd) ¹	
	Impact (Ec)	
	Accumulation (Ha) ²	
Affaissement / Effondrement	Déplacement vertical (V, A, Cd)	

Tableau 4 - Description des phénomènes en fonction de différents paramètres cinématiques et géométriques (d'après Thierry et al., 2008)

Chaque type de phénomène est décrit en fonction des effets physiques qu'il génère, traduit sous la forme de divers paramètres cinématiques et géométriques : vitesse, amplitude de déplacement, champ de déformation, énergie cinétique d'impact, hauteur de dépôt, profondeur d'ablation, profondeur de la surface de rupture (Tableau 4).

Une échelle d'intensité physique comprenant 4 niveaux (faible, moyen, fort, très fort) est établie pour chaque effet physique. Chacun des niveaux correspond à un intervalle de valeurs numériques établi à partir de données disponibles dans la littérature (Léone 1996, OFAT et al. 1997, GSC et al. 2002) et adaptées d'après l'expérience des auteurs. En exemple (Tableau 5), la classification d'intensité retenue en fonction des valeurs des paramètres hauteur de matériaux accumulée (Ha) et Energie cinétique libérée lors de l'impact (Ec).

Sollicitation / Effet physique		Accumulation / Hauteur accumulée	Impact / Energie cinétique
Intensité	Faible	< 5 cm	< 0,1 kJ
	Moyenne	5 à 50 cm	0,1 à 1 kJ
	Forte	0,5 à 2 m	1 à 50 kJ
	Très forte	> 2 m	> 50 kJ

Tableau 5 - Valeurs numériques des classes d'intensité des sollicitations Accumulation (Ha) et Impact (Ec) retenues par Thierry et al. (2008)

A chaque grand type de phénomène mouvements de terrain correspond une classification en sous-types événementiels (dits « phénomène de référence »), caractérisés par des gammes de valeurs cinématiques et géométriques spécifiques qui permettent, d'une part, de définir une surface moyenne impactée et, d'autre part, de déterminer l'intensité physique correspondant à chacune des différentes sollicitations. Sur la zone de pilote de Marseille, Thierry et al. (2008) distinguent ainsi 11 phénomènes de référence.

La cartographie de l'aléa a été établie à partir : 1) de la réalisation de cartes de susceptibilité par sous-type de phénomène, 2) puis, complétées par une analyse de la fréquence de ces différents types en fonction des archives historiques, d'une enquête auprès de la population, d'une analyse du terrain.

Pour chaque sous-type de phénomène et pour chaque contexte géologique identifié, l'estimation de l'aléa suit la règle générale suivante :

(nombre d'évènements attendus x surface impactée) / surface totale de la zone.

Cette démarche nécessite un inventaire des mouvements historiques et actuels le plus complet possible. Pour les mouvements de faible récurrence, cette démarche est de mise en œuvre délicate.

4.2.1.2 Evaluation des enjeux et de leur vulnérabilité

Cinq catégories, subdivisées au total en 15 types d'enjeux sont considérées :

- la population (2 types : à l'air libre, dans les bâtiments)
- les bâtiments, (6 types différents : pavillons anciens et modernes, habitat collectif, etc.)
- la voirie, (2 types : viabilité médiocre, bonne viabilité)
- les espaces naturels, (4 types : agricoles, naturels, constructibles, eau libre)
- les véhicules (à l'arrêt).

Pour permettre les comparaisons entre secteurs géographiques, la valeur des éléments exposés a été exprimée en termes de valeur économique. Ont ainsi été déterminé au niveau de la zone d'étude le prix au m² à la vente du bâtiment, la valeur du mètre linéaire de voirie...

Une échelle d'endommagement en 5 degrés croissants (très faible, faible, moyen, fort, très fort), tenant compte de l'impact humain, fonctionnel et financier, a été définie pour chacune des 5 catégories d'enjeux. A chaque degré de dommage correspond un taux d'endommagement (en terme de perte de la valeur économique). A titre d'exemple, le Tableau 6 présente l'échelle d'endommagement relative à la voirie.

Classe	Endommagement	
	Valeur fonctionnelle	Valeur économique
Très faible	Légères altérations n'impliquant pas d'interventions.	Pas d'impact financier
Faible	Quelques fissures ou dégradations dans les revêtements. Pas d'interruption de trafic, éventuellement fonctionnement en mode dégradé (ralentissement, circulation alternée).	Pas d'impact financier ou impact financier peu significatif
Moyen	Revêtement affecté de manière significative. Obstruction de la chaussée de faible volume (dizaine de m ³). Coupure momentanée (journée ou semaine), fonctionnement en mode dégradé.	Coût des travaux limités à 30% du coût de la reconstruction
Fort	Rupture avec déplacements significatifs de la structure à plusieurs endroits. Obstruction de volume élevé (centaine de m ³). Coupure prolongée (semaines).	Coût des travaux limités à 70% du coût de la reconstruction
Très fort	Déformations très importantes en plusieurs endroits, structure détruite totalement. Rupture de la plate-forme. Immersion définitive. Coupure prolongée (mois) voire définitive.	Reconstruction de la route nécessaire

Tableau 6 - Echelle d'endommagement établie pour la voirie (Thierry et al., 2008)

Pour chacun des 15 types d'enjeux définis, les niveaux d'endommagement correspondant aux 4 valeurs d'intensité ont été établis de manière empirique pour

chacune des sollicitations en s'appuyant sur les données issues de la littérature (Léone 1996, LESSLOSS committee 1997, UNIGE 2003, Zihri 2004).

Ces fonctions de vulnérabilité sont représentées sous la forme de tableaux. Au total, il s'agit de 90 tableaux qui expriment la vulnérabilité des 15 types d'enjeux par rapport aux 6 sollicitations. Le Tableau 7 présente à titre d'exemple, la fonction de vulnérabilité établie pour les deux types de voirie présentés ci-dessus et relatives aux sollicitations liées aux chutes de blocs.

Sollicitation = Accumulation Intensité	R1	R2
Faible	faible	faible
Moyenne	moyen	moyen
Forte	fort	fort
Très forte	très fort	très fort

Sollicitation = Impact Intensité	R1	R2
Faible	très faible	très faible
Moyenne	faible	faible
Forte	moyen	moyen
Très forte	fort	fort

Tableau 7 - Fonction de vulnérabilité établie pour deux types de voirie (Thierry et al., 2008)

4.2.1.3 Evaluation des dommages et cartographie du risque

L'évaluation des dommages et du risque a tenu compte :

- pour chacun des phénomènes de référence : d'une carte de zonage de l'aléa exprimé en pourcentage de surface potentiellement affectée dans chaque zone sur la période de référence considérée,
- pour chacune des catégories d'enjeux : d'une carte d'enjeu, exprimée en termes de nombre d'éléments exposés de chaque type, de leur valeur et de fonctions de vulnérabilité spécifiques à chaque type d'enjeux.

Le croisement systématique de ces différentes données permet ensuite d'évaluer le niveau de dommages, par catégorie d'enjeu et par phénomène de référence (Figure 9). Pour chacune des cartes, le niveau de dommages est déterminé en choisissant le niveau maximal d'endommagement obtenu à partir des différentes fonctions de vulnérabilité associées à chacune des sollicitations du phénomène de référence pris en compte.

In fine, l'ensemble des cartes de dommages ont été compilées pour obtenir une carte unique présentant, par secteur, le cumul des dommages attendus.

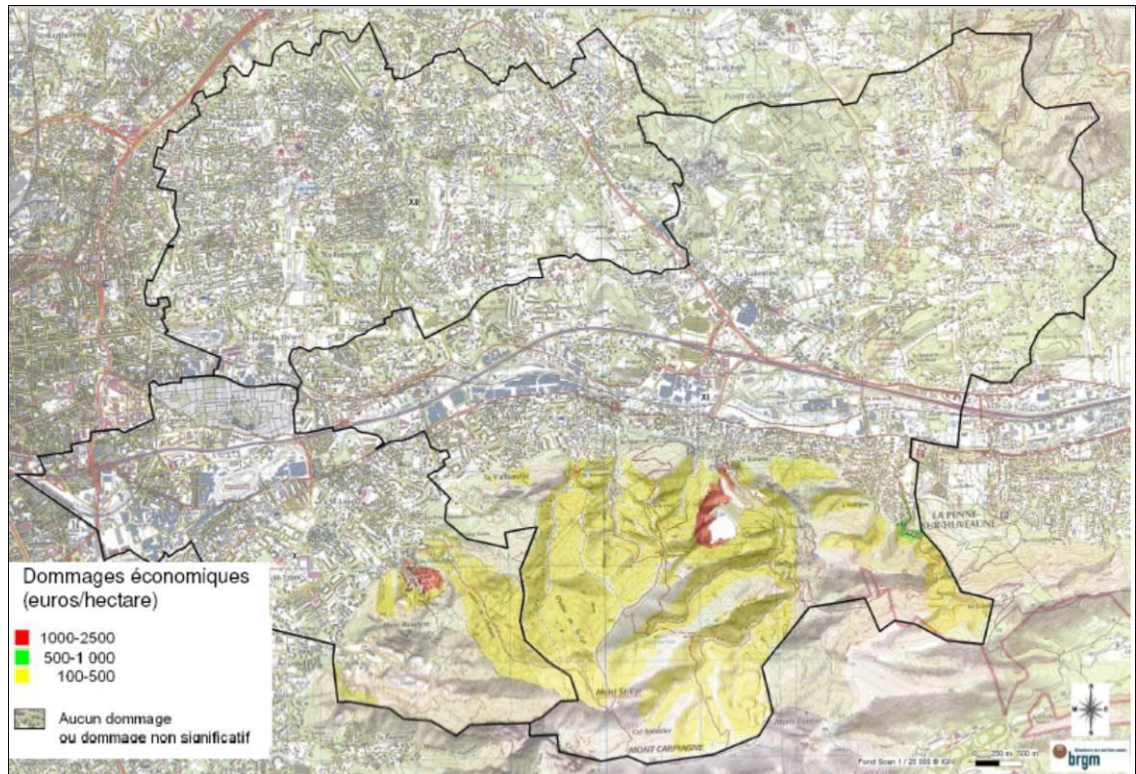


Figure 9 - En exemple, dommages économiques cumulés totaux par hectare induits par le phénomène chute de blocs de type CB50 sur l'ensemble des enjeux pour la période de référence 100 ans (Thierry et al., 2008)

Cette démarche relativement complexe est destinée à être mise en œuvre dans les zones urbanisées à forts enjeux et à une échelle 1/25 000 ou plus grande. Elle nécessite par ailleurs une analyse la plus complète possible des événements historiques et contemporains, via la compilation et étude des archives, une enquête menée auprès de la population, une étude sur le terrain.

5. Choix et structuration des données de base

5.1 CHOIX DES DONNEES DE BASE

5.1.1 Données génériques

Le choix des données de base dépend du type de carte (susceptibilité – aléa – risque) et de l'échelle de cartographie souhaités (Tableau 3). La précision des SDR-MVT est de l'ordre du 1 :50 000 (soit medium scale, cf. Tableau 2 et Tableau 3). Il s'agit de réaliser une carte régionale de l'aléa et du risque. Ce document à vocation informative et consultative constituera néanmoins un de premier support technique pour la réalisation des PPR.

Ainsi, en référence à la synthèse de Van Westen et al. (2008), Tableau 4, les données indispensables à la réalisation des SDR-MVT sont (Tableau 8) :

- l'inventaire des mouvements de terrain actifs ou historiques,
- le MNT et ses dérivés, la pente et l'exposition des versants,
- la nature lithologique du sol et sous-sol,
- le contexte structural,
- des principales unités géomorphologiques,
- de l'occupation passée et actuelle des sols.

L'évaluation du risque intégrera aussi les données sur la répartition de la population et de zones urbaines, des réseaux de transport.

5.1.2 Limites concernant le choix et la collecte des données de base dans le cadre des SDR-MVT

Le choix des informations est conditionné par les points suivants :

1) **des données disponibles quel que soit le département carté** : Une méthode de synthèse cartographique, telle que les SDR-MVT, ne peut être exportable que si les informations de base nécessaires à sa mise en œuvre sont accessibles facilement, et ce, non seulement sur la zone test mais aussi sur les autres territoires au niveau desquels la cartographie pourrait être développée.

2) **une superficie importante** à carter, avec un **minimum de moyens** (temps de réalisation et coût les plus réduits possibles), pour des **résultats objectifs**, le moins dépendants possibles de règles établies par « dire d'expert », selon un **processus d'évaluation homogène**, c'est-à-dire cohérent quel que soit le territoire carté.

3) **des données diversifiées décrivant l'environnement physique et socio-économique** : il est indiqué plus haut, l'importance à accorder à la typologie des mouvements de terrain, à la description du contexte géologique (nature des terrains du

sol et sous-sol, caractéristiques géotechniques, structure, épaisseur des formations superficielles, contours des formations), morphologique et topographique ainsi qu'hydraulique.

Autant que possible les informations décrivant le territoire devront donc être récupérées au format numérique, géoréférencées, avec une connaissance la plus homogène possible sur l'ensemble du territoire analysé, et possibilité de classer les informations selon leur thématique et leur valeur.

Niveau carto SDR-MVT		Données utilisées pour les SDR-MVT									
Data		Update frequency (years)	RS	Scale				Hazard models			Risk methods
Main Type	Data layer	10 1 ... 0.002 (day)	Remote Sensing useful?	Small	Medium	Large	Detailed	Heuristic	Statistical	Deterministic	Probabilistic
Landslide Inventory	Landslide inventory	↔	H	C	H	H	H	C	H	H	H
	Landslide activity	↔	H	M	C	C	C	C	C	C	C
	Landslide monitoring	↔	M	M	M	M	C	-	-	H	H
Environmental factors	DEM	↔	H	H	C	C	C	C	C	C	C
	Slope angle/aspects etc	↔	H	L	H	H	H	H	H	H	H
	Internal relief	→	H	H	M	L	L	H	L	-	-
	Flow accumulation	→	H	L	M	H	H	L	M	H	H
	Lithology	→	M	H	H	H	H	H	H	H	H
	Structure	→	M	H	H	H	H	H	H	H	H
	Faults	→	M	H	H	H	H	H	H	-	-
	Soil types	→	M	M	H	C	C	C	H	C	H
	Soil depth	→	-	-	L	C	C	-	-	C	H
	Slope hydrology	↔	-	-	-	C	C	-	-	C	H
Triggering factors	Main geomorphology units	→	H	C	H	M	L	C	M	L	L
	Detailed geomorph. units	→	H	H	H	H	L	H	H	M	L
	Land use types	↔	H	H	H	H	H	H	H	H	H
	Land use changes	↔	H	M	H	H	C	H	H	H	C
	Rainfall	↔	L	M	M	C	C	H	H	C	C
Elements at risk	Temp / evapotranspiration	↔	M	-	-	M	H	-	-	H	L
	Earthquake catalogs	↔	-	M	M	H	C	-	-	-	C
	Ground acceleration	↔	L	L	M	H	H	H	H	H	L
	Buildings	↔	H	L	M	C	C	-	-	-	C
	Transportation networks	↔	H	M	M	M	H	M	M	M	M
	Lifelines	↔	-	-	L	L	M	-	-	-	L
	Essential facilities	↔	L	L	M	H	H	-	-	-	H
	Population data	↔	L	H	H	C	C	-	-	-	C
	Agriculture data	↔	H	L	M	H	M	-	-	-	L
	Economic data	↔	-	L	M	H	H	-	-	-	L
	Ecological data	↔	H	L	L	L	L	-	-	-	M

Left: indication of the main types of data, Middle: indication of the ideal update frequency, RS: column indicating the usefulness of Remote Sensing for the acquisition of the data, Scale: indication of the importance of the data layer at small, medium, large and detailed scales, related with the feasibility of obtaining the data at that particular scale, Hazard models: indication of the importance of the data set for heuristic models, statistical models, deterministic models, and probabilistic models, Risk models: indication of the importance of the data layer for qualitative and quantitative vulnerability and risk analysis. (C=Critical data set, H=highly important, M=moderately important, and L=Less important, -=Not relevant).

Tableau 8 - Place des SDR-MVT dans la synthèse de Van Westen et al. (2008) sur les données de base à rechercher pour la cartographie des mouvements de terrain

5.2 DONNEES DE BASE RETENUS POUR LA REALISATION DES SDR-MVT

Eu égard aux différents points sus mentionnés, le choix des données de base suivantes a paru comme une solution relativement satisfaisante pour la cartographie SDR-MVT :

Pour l'inventaire et la typologie des mouvements :

- la base nationale BDMVT
- photographies aériennes IGN

Pour la cartographie des aléas, facteurs permanents :

- cartes géologiques à 1/50 000 vectorisées,
- la BSS, Banque de Données du Sous-Sol
- MNT IGN au pas de 50 m
- la BD Carto IGN
- photographies aériennes IGN
- Corine land Cover

Pour la cartographie des enjeux humains et matériels :

- la BD Carto IGN
- les données d'urbanisme et de population INSEE

Des informations complémentaires sur la qualification des sols et les mouvements de terrain historiques ou actuels pourront en outre être recherchées dans les rapports géotechniques et cartes de risques disponibles pour le territoire étudié.

A noter que lors de la mise en œuvre des processus de cartographie SDR-MVT, ces informations seront complétées par des observations recueillies sur le terrain, et ce à certaines étapes du processus, notamment lors de la consolidation de la typologie régionale des mouvements de terrain et de la classification des facteurs de prédisposition.

Il s'agit d'informations facilement accessibles et à moindre coût.

5.2.1 Base nationale BDMVT

Développée depuis le début des années 90, la base nationale BDMVT, <http://www.bdmvt.net/>, est la base de référence sur les mouvements de terrain recensés au niveau du territoire français (métropole et Outre-Mer), Figure 10. Le BRGM est responsable de la gestion permanente de la base. Pour certains départements, cette gestion est aussi assurée par le service RTM et le LCPC. La base de données distingue 5 types principaux de mouvements : glissements de terrain,

chutes de blocs et éboulement, coulées de boues, effondrement érosion de berges. Concernant les effondrements, la base est en lien direct avec la base nationale des cavités souterraines (<http://www.cavites.fr/>, développée et gérée par le BRGM depuis 2001).

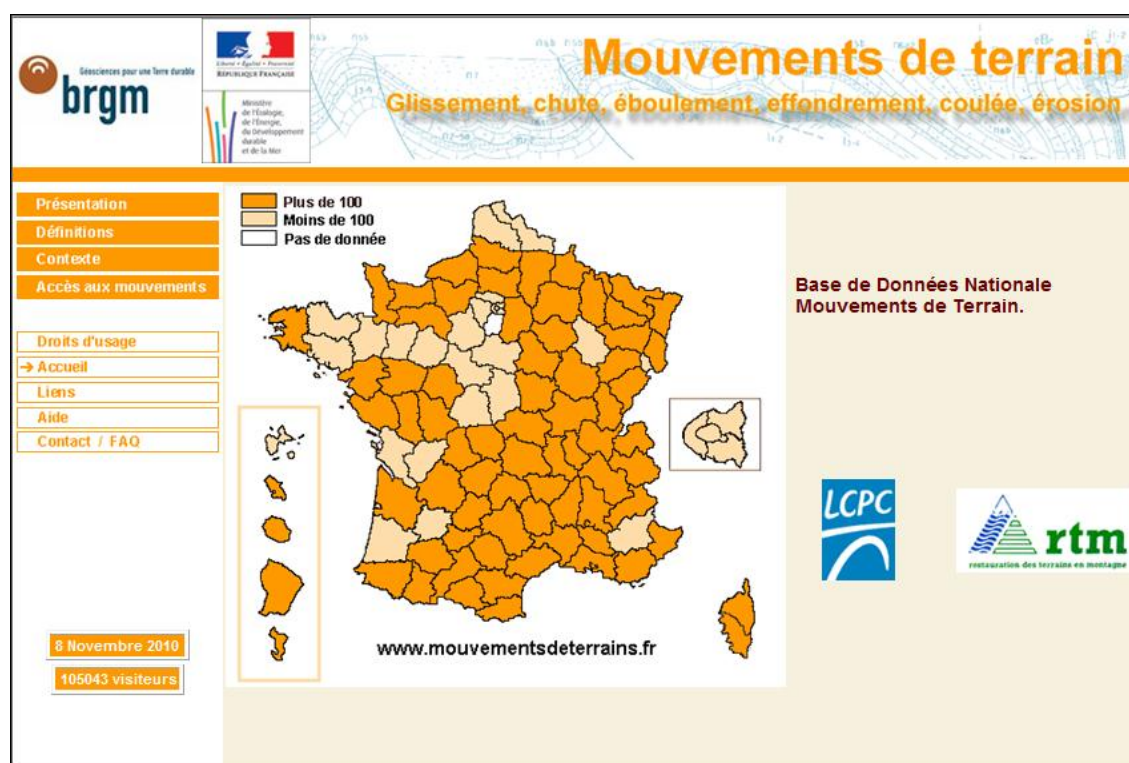


Figure 10 - Page d'accueil de la BDmvt

Les champs d'informations associés à chaque évènement sont : les coordonnées géographiques, la commune concernée, l'âge du début du mouvement, le type de phénomène, sa géométrie, le faciès des terrains déstabilisés, les dommages aux biens et aux personnes, la nature du phénomène déclencheur (s'il y a lieu), la qualité et l'origine des informations. Il existe aussi un champ d'information donnant accès à des illustrations.

Selon la connaissance disponible de l'évènement les différents champs thématiques sus cités seront plus ou moins (ou pas) renseignés.

Les données sont accessibles gratuitement de façon synthétique pour un département ou une commune, par tables ou par cartes, ou bien de façon détaillée, individuellement, par évènement recensé.

5.2.2 Cartes géologiques à 1 :50 000 vectorisées

Le territoire français fait l'objet depuis plusieurs décennies d'une cartographie de sa géologie à l'échelle du 1/50 000. Aujourd'hui tous les départements français possèdent une couverture géologique, mais la qualité des relevés dépend de la complexité lithologique et structurale de la zone ainsi que de la date d'élaboration et de mise à jour de cette cartographie.

Chaque feuille couvre une zone d'environ 30 km sur 20 km. Ces cartes sont disponibles sous forme de carte imprimée et sous forme numérique scannée ou vectorisée. Des cartes numériques départementales sont disponibles pour certains départements.

Le BRGM est chargé de l'édition et de la diffusion de ces cartes. Les cartes papiers sont au coût moyen de 35€.

La BD Charm-50 est la base de données géoréférencées des cartes géologiques à 1/50 000 vectorisées et harmonisées². Elle comprend 6 couches de données numériques vecteurs disponibles en format SIG standard du marché : formations géologiques, contours, éléments structuraux linéaires, éléments ponctuels (structuraux et divers), surcharges (mylonites...). La principale information géologique nécessaire pour réaliser les SDR-MVT est les contours des formations géologiques (façès, âge), et éventuellement, les éléments structuraux linéaires (failles).

La mise à disposition des données est de 1 € TTC/km² (pour 200 km² minimum, mais avec tarif dégressif selon la quantité et le type de licence). Adresse du contact : http://www.brgm.fr/brgm/GEO/prod_num.htm/

Un département correspond en moyenne à une dizaine de cartes géologiques à 1/50 000.

5.2.3 Photographies aériennes

La consultation de la couverture aérienne permettra de compléter les informations sur les événements historiques ou actuels relevés dans la BD-MVT, et sous réserve de vérification in situ.

Les photographies aériennes peuvent être analysées en vue stéréoscopique. Dans ce cas cela suppose d'avoir les missions IGN en support papier, et des lunettes spéciales

² La carte géologique harmonisée est le résultat de l'harmonisation des cartes géologiques à 1/50 000, réalisées à des dates et par des auteurs différents. L'harmonisation des cartes consiste à assurer la continuité entre deux coupures des limites des formations géologiques contiguës et concernant a priori un même ensemble lithostratigraphique, ainsi que la cohérence de dénomination et de description des faciès de ces formations.

pour obtenir cette vision en relief. L'analyse sera relativement laborieuse selon la complexité du département. Elle sera réalisée en priorité en des points particuliers, pour confirmer ou infirmer l'interprétation de mouvements de terrain.

Ces informations peuvent être acquises soit en achetant des couples de photographies aériennes auprès de l'IGN (représentant commercial régional), soit être consultées sur place dans l'agence IGN régionale soit éventuellement dans certains établissements, comme le BRGM.

Les systèmes de coordonnées géographiques des données sont dans les systèmes géodésiques légaux : En métropole, Lambert-93, et en outre-mer, Projections UTM.

La BD Ortho IGN permet l'accès à la couverture aérienne de n'importe quelle zone française, de façon ortho référencée dans un système de coordonnées international. L'image aérienne peut être lue dans tout SIG standard. Concernant le prix de la BD Ortho par département, voir avec l'IGN sur le coût d'acquisition dans le cadre d'une licence étendue.

Pour plus d'info voir aussi le site :

http://www.ign.fr/partage/Professionnel/catalogue_prix2010/master/index.htm

Sans disposer de la vue stéréoscopique, il est possible d'avoir une vue aérienne du département gratuitement via les sites Géoportail.fr, Figure 11, ou encore GoogleEarth.

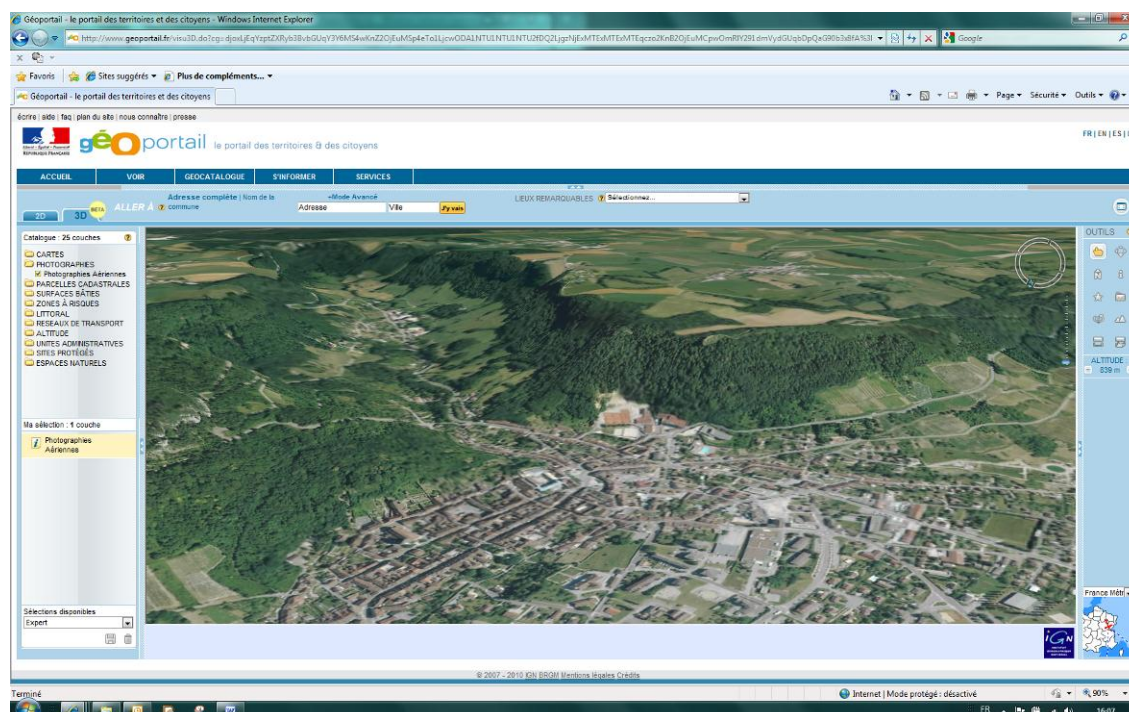


Figure 11 - Orthophoto IGN visible sur Geoportail, exemple de la vue 3D de la commune de Poligny (39)

5.2.4 Banque de Données du Sous-Sol

La Banque des données du Sous-Sol (BSS) est la **base de données nationale des ouvrages souterrains** déclarés sur le territoire français (code minier, code de l'environnement, loi sur l'eau). Elle regroupe les informations techniques et géologiques, acquises lors des forages et collectées auprès des foreurs et des maîtres d'ouvrages (Figure 12).

Chaque information est géo-référencée en longitude/latitude WGS84, en Lambert 2 étendu et dans tous les systèmes de projections du référentiel français 2006 sur le domaine de la couverture de la BSS, soit la zone métropolitaine, les DROM et les COM sauf Saint- Pierre-et-Miquelon. Les données sont téléchargeables gratuitement en format texte délimité et GML sur le site InfoTerre™ du BRGM (<http://infoterre.brgm.fr>). Selon la quantité d'informations contenues sur la zone géographique analysée. La consultation peut être relativement longue et laborieuse.

Dans ce cas, des préparations particulières sont possibles (extraction de données en grand nombre ; sélections multicritères) et se font sur devis à adresser à infoterregu@brgm.fr.

5.2.5 MNT : BD ALTI - IGN

Les MNT, Modèle Numérique de Terrain, renseigne sur la topographie du territoire. Les MNT sont calculés à partir d'éléments issus de la numérisation de cartes et de la restitution photogrammétrique de photographies aériennes.

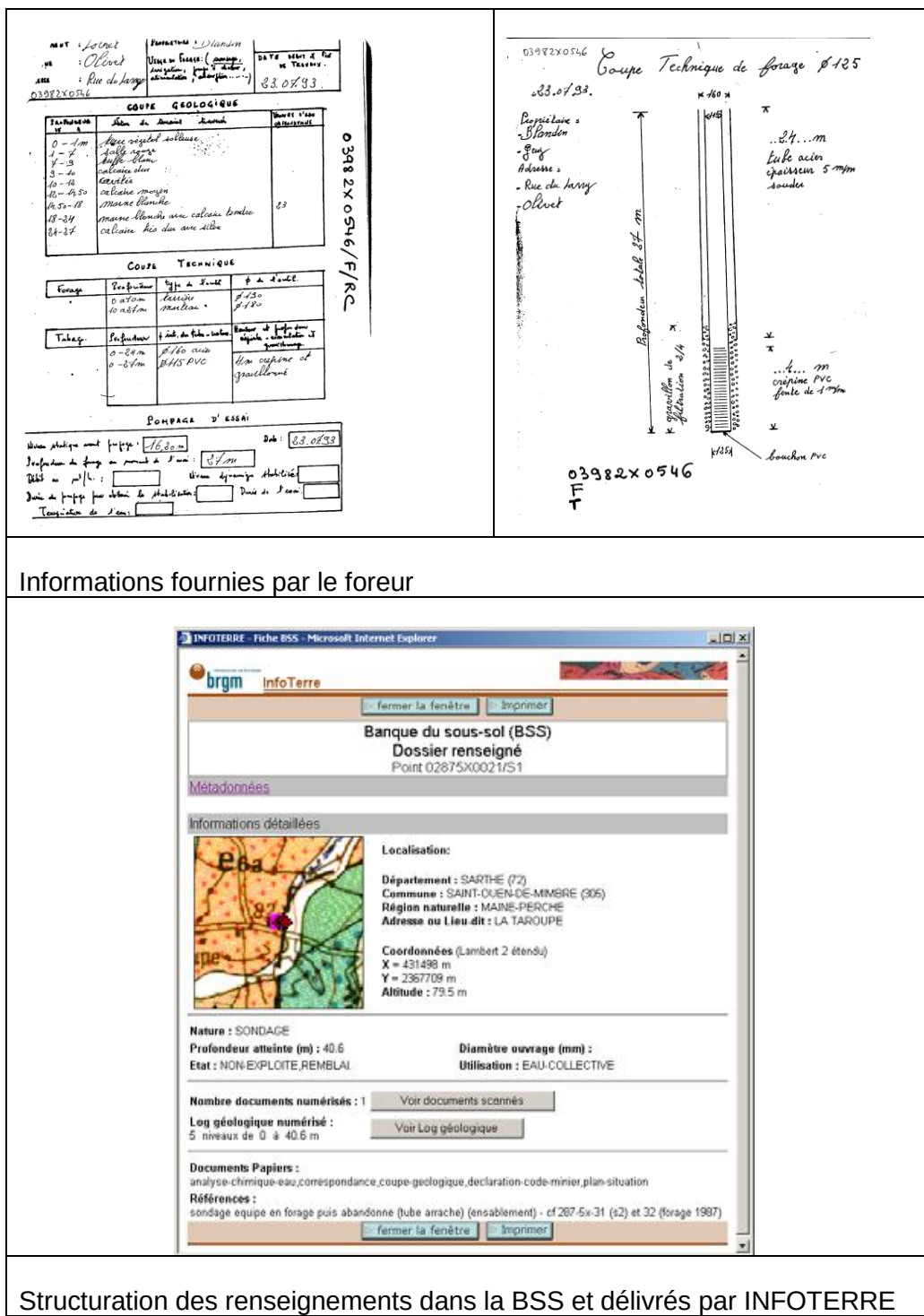
L'IGN délivre des MNT au pas de 50 m à 1000 m. Concernant les SDR-MVT, il est préférable d'utiliser un MNT au pas de 50 m.

Les formats des données fournies (.DIS, GRID d'Arc/Info, liste XYZ ASCII) sont compatibles avec les SIG courants (de type ArcView, MapInfo). Les systèmes de coordonnées géographiques des données sont en projections Lambert zone, Lambert II étendu ou Lambert 93, WGS 84.

Le prix 2010 de la BD Alti pour 1 département est de 1350 €. Les demandes peuvent être adressées auprès du contact commercial régional ou via le site <http://professionnels.ign.fr/>;

Pour plus d'info voir aussi le site :

http://www.ign.fr/partage/Professionnel/catalogue_prix2010/master/index.htm



5.2.6 BD Carto

Base de données cartographiques de référence, la BD CARTO® est utilisée de l'échelle départementale (1 : 50 000) à l'échelle régionale (1 : 250 000). La BD CARTO® est une base de données Vecteur qui décrit l'ensemble du territoire national (hors Mayotte). Elle contient les réseaux routiers et ferrés, les unités administratives, le réseau hydrographique, l'occupation du sol, la toponymie et les équipements divers comme le réseau électrique. Elle contient aussi des informations sommaires sur le thème Occupation du Sol (image : OCS RASTER).

Les formats des données fournies (Shapefile, MIF/MID, Geoconcept export) sont compatibles avec les SIG courants

Les systèmes de coordonnées géographiques des données sont dans les systèmes géodésiques légaux : En métropole, Lambert-93 ou RGF-93, et en outre-mer, Projections UTM. Les besoins de l'information géographique dans son exploitation actuelle requièrent l'utilisation de coordonnées planes issues d'une projection cartographique. Concernant la projection RGF-93, il s'agit d'un nouveau système géodésique mis en place par l'Institut Géographique National. L'expression des coordonnées dans ce système est tridimensionnelle sous forme de longitudes, latitudes et hauteurs ellipsoïdales. Ce nouveau système géodésique (RGF93) est spécialement dédié à la projection de la métropole française et de la Corse.

Pour le prix de la BD Carto par département, voir avec l'IGN sur le coût d'acquisition dans le cadre d'une licence étendue.

Pour plus d'info voir aussi le site :

http://www.ign.fr/partage/Professionnel/catalogue_prix2010/master/index.htm

5.2.7 Contours...IRIS®

Les informations sur la population pourront être extraites de la base de données géographiques Contours...Iris®. Cette base de données présente les contours des IRIS-2000® définis sur la plupart des communes de plus de 5.000 habitants et sur l'ensemble des communes de plus de 10.000 habitants.

Les IRIS constituent un découpage infra-communal ; 2000 fait allusion à la fois à leur année de constitution et à leur taille (2.000 habitants environ). Les IRIS ont été définis au moment du recensement de la population de mars 1999, en collaboration avec les mairies. Ils remplacent les quartiers 5000 (quartiers d'environ 5.000 habitants définis pour le recensement de la population de 1990), jugés trop grands.

En remarque : IRIS ou îlots regroupés pour l'information statistique. Les contours des Iris correspondent à un découpage spécifiquement INSEE pour cartographier les données du recensement de la population au niveau infra-communal. L'IRIS ne

correspond pas forcément à une définition de "quartier" telle qu'elle pourrait être donnée par les villes, néanmoins ce travail a été réalisé avec les mairies en s'efforçant de regrouper les îlots en fonction de facteurs socio-économiques communs.

A chaque Iris délimité correspond le nombre total d'habitants recensés. La projection cartographique est le lambert-93 ou RGF-93 pour la métropole, UTM pour l'Outre-Mer. Les données sont accessibles en formats SIG standards (Shapefile ou MIF/MID).

Il s'agit d'un produit commercialisé par l'Insee ou l'IGN. Le prix est fixé par département, il varie de 45 à 200 euros selon le nombre de communes découpées en IRIS-2000® dans le département.

5.2.8 Corine land Cover

La base de données géographiques CORINE Land Cover est un inventaire biophysique sur l'occupation des terres, dans le sens où cet inventaire a privilégié la nature des objets (forêts, cultures, surfaces en eau, roches affleurantes...) plutôt que leur fonction socio-économique (agriculture, habitat...), Figure 13. Elaborée dans le cadre d'un projet européen, elle est disponible pour 238 états d'Europe, plus une partie du Maroc et de la Tunisie. L'échelle de travail est le 1/100 000ème.

La base Corine Land Cover est produite par interprétation manuelle des images satellitaires en s'aidant de données exogènes (BDOrtho® IGN, Scan 25, Google-Earth, GeoPortail...) dans un logiciel SIG. Les séries d'images satellitaires sont disponibles à 3 dates : 1990, 2000 et 2006, avec 3 bases Corine Land Cover associées (CLC 1990, CLC 2000 et CLC 2006) ainsi que les bases des changements entre 1990 et 2000, et 2000 et 2006. L'unité spatiale au sens de CORINE Land Cover est une zone dont la couverture peut être considérée comme homogène, ou être perçue comme une combinaison de zones élémentaires qui représente une structure d'occupation. Elle doit présenter une surface significative sur le terrain et se distinguer nettement des unités qui l'entourent. De plus, sa structure doit être suffisamment stable pour servir d'unité de collecte pour des informations plus précises. La surface de la plus petite unité cartographiée (seuil de description) est de 25 hectares.

Les données sont accessibles gratuitement sur le site :

<http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/bases-de-donnees/occupation-des-sols-corine-land-cover/telechargement-des-donnees.html>

Il faut auparavant remplir un formulaire concernant les droits et conditions d'utilisation de la base.

Concernant les SDR-MVT, le fichier à télécharger est le CLC2006 : Base de données d'occupation du sol nationale datée 2006 suivant la nomenclature CORINE Land Cover en 44 postes, une unité minimale de 25 hectares, en coordonnées géographiques et en format vecteur ou raster. Réalisée par addition des bases CLC2000 révisée et Changements d'occupation du sol 2000-2006.

Les données sont disponibles au format : ArcInfo, Arcview, MapInfo ou Geotiff. Les coordonnées géographiques correspondent aux systèmes de projection Lambert II étendu ou RGF93.

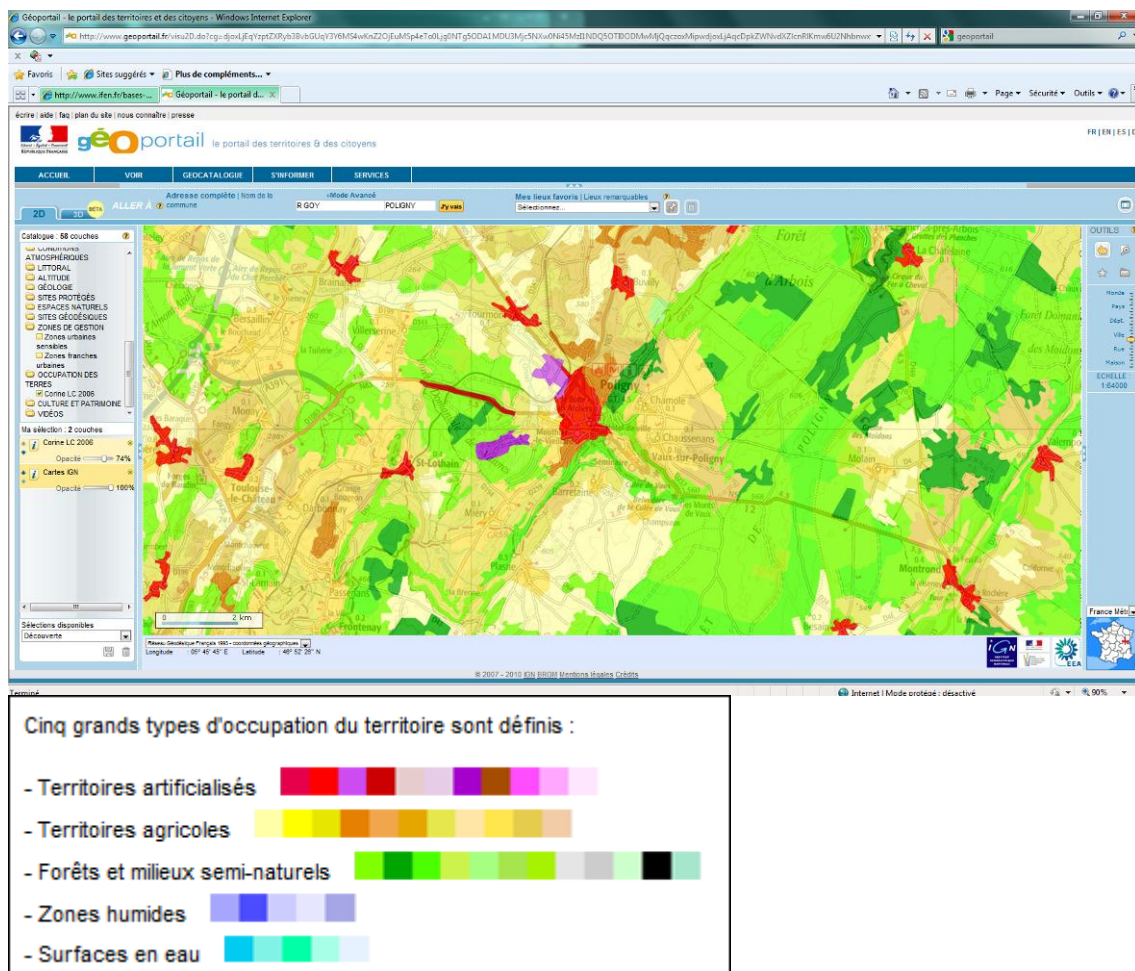


Figure 13 - CORINE LAND COVER visible sur Geoportail, en exemple, extrait au niveau de la commune de Poligny (39)

6. Description du contexte environnemental de la zone pilote

6.1 CONTEXTE GEOLOGIQUE ET GEOGRAPHIQUE

Le Jura est l'un des 100 départements français et l'un des quatre départements de la région Franche-Comté. Situé à l'est de la France, en frontière avec la Suisse, il constitue le département le plus au sud de la région de Franche-Comté. Sa préfecture est Lons-le-Saunier et ses deux sous-préfectures sont Dole et Saint-Claude. Sa superficie est de 5000 km² (Figure 14).



Figure 14 - Le département du Jura : villes, principaux axes routiers, départements limitrophes (extrait du site web [wikipedia](https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9partement_du_Jura))

Sa population a atteint 258 882 habitants en 2007, pour une densité de 51,8 hab./km² (la moyenne en France = 111 hab./km²). Le Jura est un département rural (plaine céréalière, coteaux du vignoble, élevage bovin et exploitation forestière) avec des sites de petite industrie et une importante activité touristique orientée vers une nature préservée (lacs, forêts, neige).

Le Jura est un département de moyenne montagne. Le relief augmente de l'ouest vers l'est, de 200 m d'altitude en moyenne jusqu'à près de 1500 m environ (point culminant le Crêt Pela, à 1495 mètres d'altitude). Les principaux cours d'eau du département du Jura sont le Doubs, affluent de la Saône, et l'Ain et la Bienne, affluent du Rhin.

Il correspond schématiquement à 3 grandes unités morphologiques : la plaine de la Saône, les versants et falaises du plateau du Jura, le plateau du Jura. En limite est du département, la montagne jurassienne signale la proximité des Alpes. (Figure 15 et Figure 16)

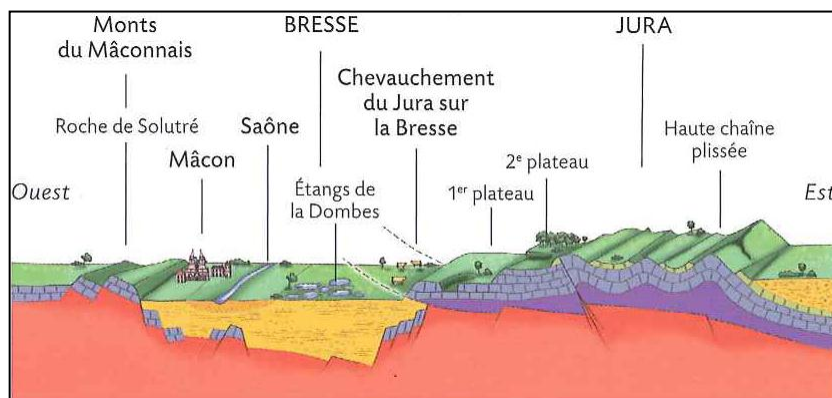


Figure 15 - Coupe géologique très schématisée entre la Bresse et le Haut Jura (d'après F. Michel, 2008)

Liées à son relief étagé, trois grandes divisions climatiques partagent le Jura :

- Les zones de plaines et le Revermont ne subissent pas l'influence de l'altitude qui est partout inférieure à 400m. Les étés sont chauds et humides, les hivers tempérés et peu enneigés. L'automne bénéficie souvent de conditions d'ensoleillement exceptionnelles permettant au vignoble jurassien d'atteindre une maturité remarquable.
- Sur le premier plateau et dans la petite montagne, l'hiver est plus vif et plus précoce qu'en plaine, et la neige plus fréquente.
- Lorsqu'on aborde les plateaux suivants, et plus encore la haute chaîne, le climat montagnard devient dominant : des étés plus humides, avec des orages fréquents et parfois violents, et des hivers souvent interminables. Les saisons intermédiaires sont très courtes puisqu'il n'est pas rare de voir la neige tomber dès la fin du mois d'octobre jusqu'au début du mois de mai. En janvier et février, dans certaines zones battues par la bise glaciale (village de Saint-Pierre, non loin de Saint-Laurent-en-Grandvaux, ou dans la région des

Rousses), les températures atteignent fréquemment des records de froid. Le massif du Jura possède le record de France de -41°C ¹, en 1985 à Mouthe (937m d'altitude) situé dans le Doubs, à la limite des deux départements. Les lacs sont alors gelés et la neige s'installe pour de longs mois.

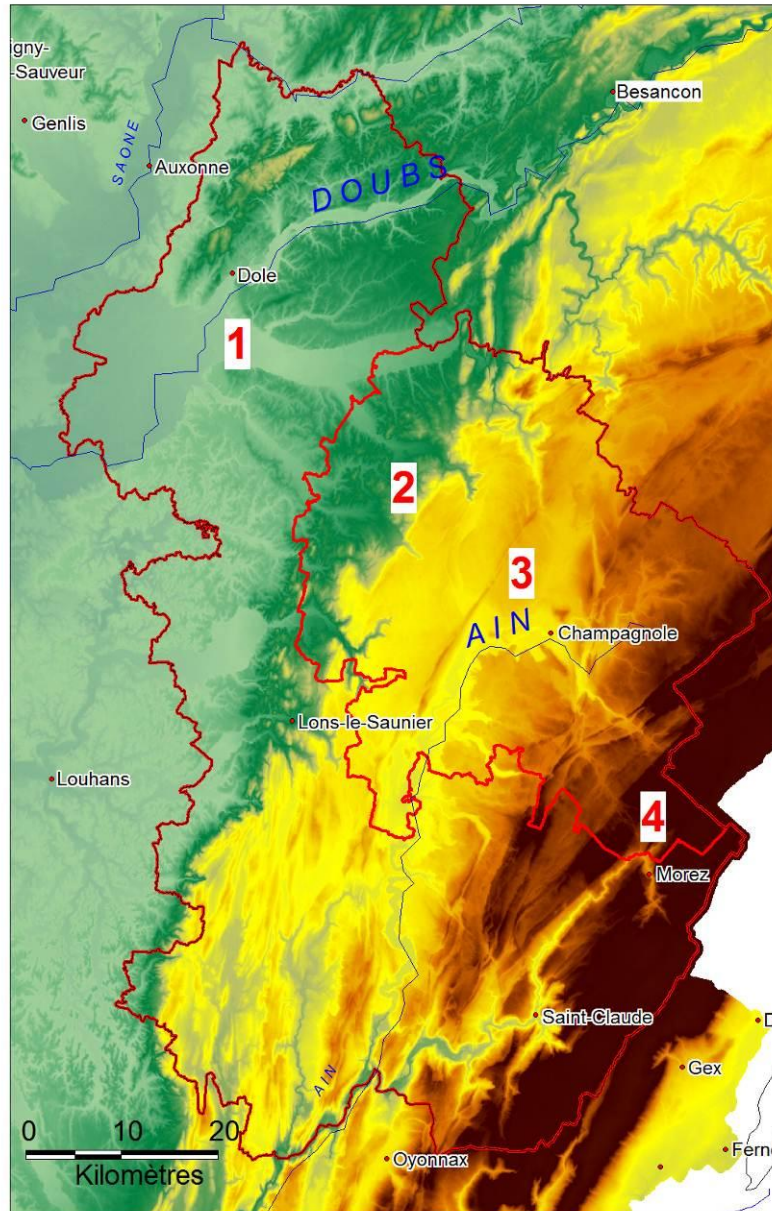


Figure 16 – Les grandes unités morphologiques qui caractérisent le Jura : 1) la plaine de la Saône, 2) les versants et falaises, 3) le plateau du Jura, 4) les contreforts alpins

Plis, crêts et crêtes, vaux et lacs, cluses, plateaux, combes et baumes, grottes, rivières souterraines et résurgences, le Jura est connu pour sa géomorphologie, architecture secrète ou visible qui lui vaut d'avoir donné son nom à un type de relief dit « jurassien », Figure 17. C'est aussi de « Jura » que vient le terme de « Jurassique », nom d'une période géologique qui a duré de -200 à -145 millions d'années.

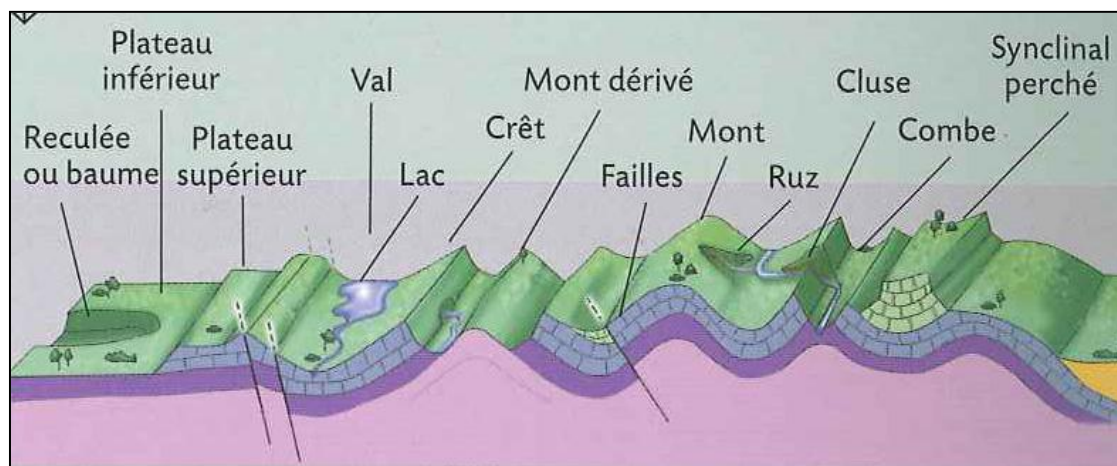


Figure 17 – Schéma structural simplifié des différents éléments du relief jurassien (d'après F. Michel, 2008)

La structuration morphologique (Figure 17) se superpose à la succession des unités lithologiques. Ainsi, du Nord-Ouest vers le Sud-Est, on distingue (Figure 18) :

- Les alluvions actuelles ou quaternaires de la Saône et de ses affluents. Ces alluvions recouvrent ou s'intercalent localement avec des formations périglaciaires. Sous les formations actuelles et quaternaires le substratum correspond aux formations marneuses à conglomératiques du Tertiaire.
- Avec les formations triasiques à jurassiques inférieures affleurantes au pied de la falaise du plateau du Jura puis vers l'est les formations jurassiques moyennes à supérieures et enfin crétacées, les versants et falaises du Jura marquent le chevauchement vers l'est sur le bassin tertiaire de la Bresse des formations plus anciennes (Figure 15).

Pays du sel depuis la plus haute Antiquité, le Jura recèle plusieurs mines, en particulier celles de Lons-le-Saulnier et de Salins-les-Bains. Le gisement de sel correspond aux couches formées au Trias, il y a un peu plus de 200 Ma, par évaporation d'eau-de-mer. La Saline Royale de Salins-les-Bains a été maintenue en activité jusqu'en 1962.

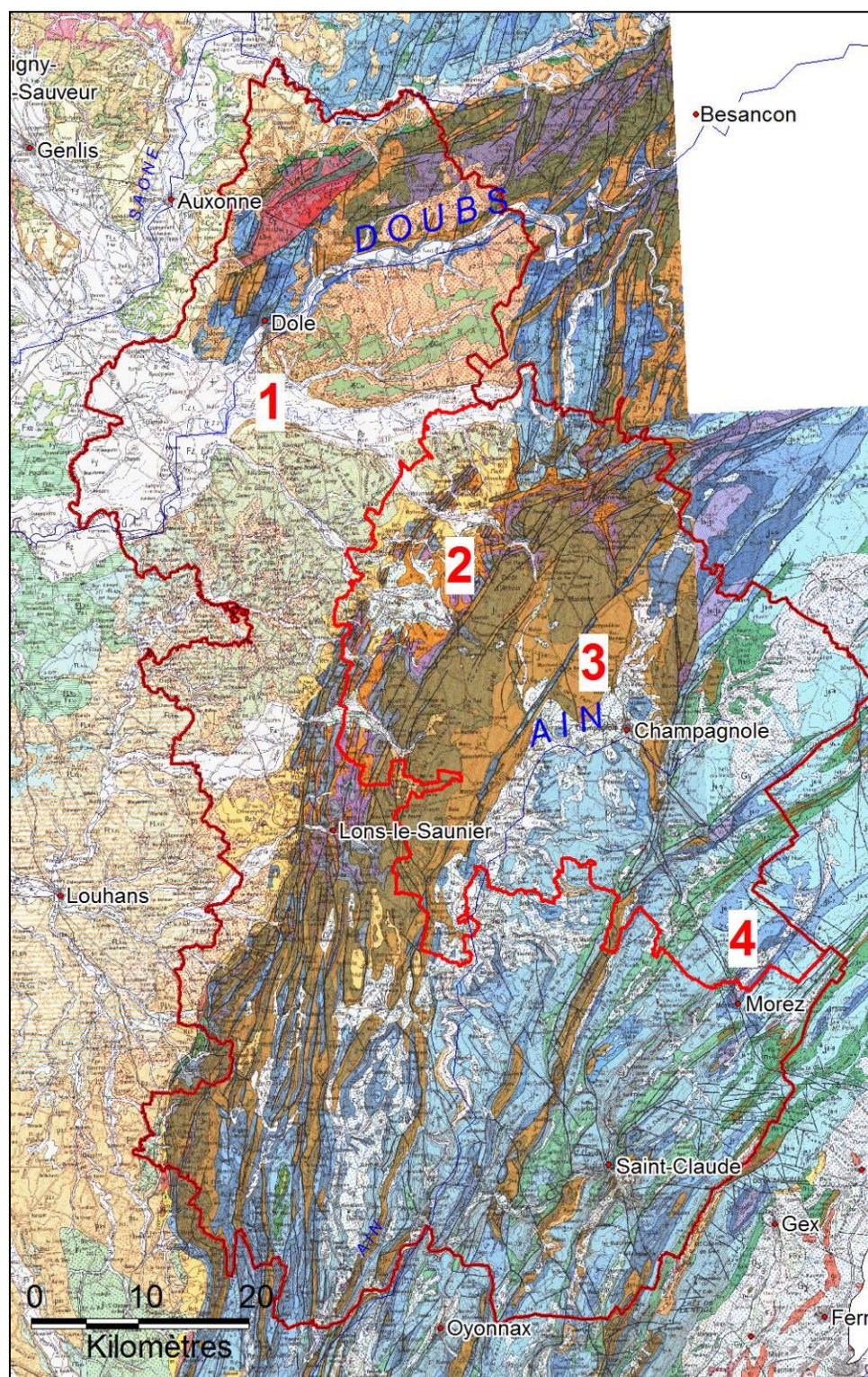


Figure 18 - Localisation du Jura et du site pilote sur fond de carte géologique à 1/50 000

Lons-le-Saulnier, Voiteur, Poligny, Arbois, Salins, de nombreuses villes du Jura se sont établies au pied du plateau, au débouché des vallées ou reculées. Ces structures morphologiques entaillent le plateau de leurs digitations spectaculaires qui viennent buter en cul-de-sac sur les hautes parois qui enferment les cirques. Caractéristique de la morphologie jurassienne, les reculées sont de courtes vallées aux parois abruptes, qui s'ouvrent dans un plateau à structure horizontale (Figure 17). Formées par érosion régressive depuis le bord du plateau, ce recul érosif correspond en général à la présence d'un réseau souterrain karstique à la base du plateau et venant déboucher au fond de la reculée. La paroi s'y effondre, pan par pan, et recule d'autant à chaque fois.

La superposition de bancs rocheux de duretés différentes conduit à des vitesses d'érosion différentes donnant naissances à des profils topographiques en escaliers, ou bien à des cavités formatant des abris sous-roches appelés balme ou baume.

- À l'est, le Haut-Jura est constitué de couches jurassiques et crétacées très plissées du fait de la proximité des Alpes. Les reliefs s'y présentent sous la forme d'une succession de crêtes et de combes disposés de façon relativement régulières et parallèle, dont le dernier chaînon domine la plaine suisse. C'est dans ce secteur que se situent les plus hauts sommets, les cols et les stations d'altitude comme Les Rousses ou Métabief-Mont d'Or. Les reliefs s'accroissent vers le sud où le massif forme une véritable barrière dominant le lac Léman et la vallée du Rhône qui lui fait suite.

6.2 INVENTAIRE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN DU JURA

A septembre 2010, 499 mouvements de terrain localisés dans le département du Jura sont référencés dans BDMVT, avec : 226 glissements de terrain, 80 chutes de blocs ou éboulements, 18 coulées de boue, 15 érosion de berges, 160 effondrements de cavités souterraines (Figure 19 et Figure 20).

Concernant les effondrements de cavités souterraines, la BDMVT indique ce type d'instabilités pour information, sachant que celui-ci fait l'objet d'une base de données spécifiques (BDCAV) mais aussi de méthodes de cartographies particulières. Ainsi, il est prévu dans le cadre d'une autre étude, et en parallèle du SDR-MVT du Jura, la réalisation d'un SDR-Cavités souterraines. Il n'en est donc pas tenu compte dans la présente étude.

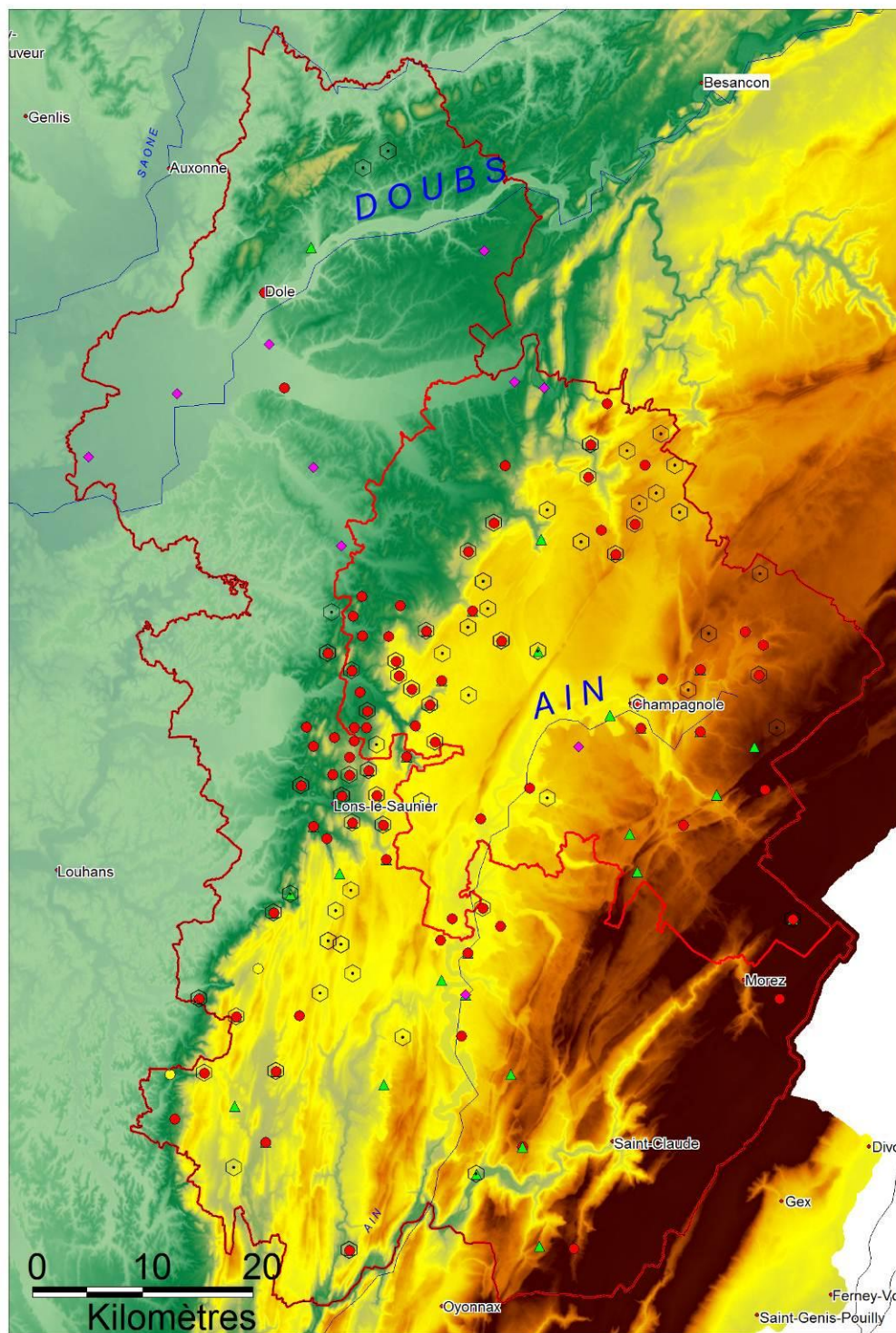


Figure 19 - Carte des mouvements de terrain référencés par BDMVT dans le Jura (millésime, septembre 2010)

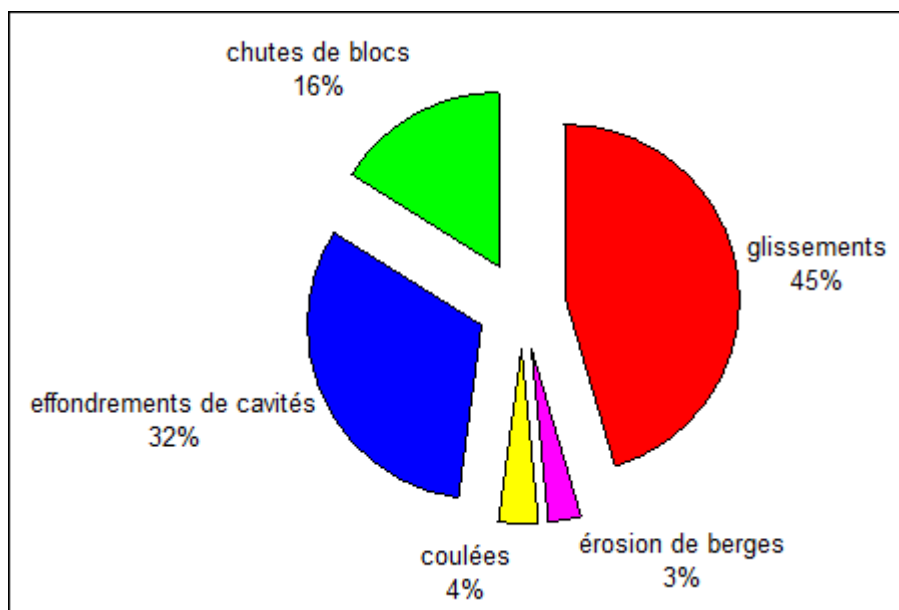


Figure 20 - Répartition en % des mouvements de terrain dans le Jura, évènements référencés dans BDMVT (millésime 2010)

Le Tableau 9 indique la répartition des différents types de mouvements de terrain référencés dans BDMVT en fonction des faciès indiqués sur la carte géologique à 1/50 000 du département du Jura.

En comparant ces données avec la carte géologique, on constate que l'essentiel des glissements de terrain sont localisés au niveau des terrains calcaires à marno calcaires du Jurassique inférieur (Lias) et des terrains salifères, bréchiques du Trias, affleurant sur les versants bordant à l'ouest le plateau du Jura.

La plupart correspondent à des glissements de la couverture colluviale pas toujours identifiée au niveau des cartes géologiques à 1/50 000 ou à la zone d'altération superficielle du substratum calcaire à marno calcaire. Les glissements de terrain affectent aussi très souvent les formations morainiques qui recouvrent le plateau du Jura et les premiers reliefs alpins situés à l'est du département.

La répartition des chutes de blocs-éboulements rocheux est assez uniforme sur le département. Elles affectent pour l'essentiel les formations calcaires, marno-calcaires et les formations alluviales ou morainiques.

	Glissements	Chute de blocs / Eboulement	coulées	Erosion de berges	TOTAL
tufs, limons, loess, argiles d'altérations	6	0	0	1	7
éboulis, colluvions, glissements, remblais	2	0	0	1	3
sables, argiles, cailloutis consolidés	0	0	0	4	4
alluvions, moraines	31	20	4	5	60
conglomérats	2	1	1	0	4
marnes, argilites	17	3	2	1	23
marnes, calcaires	57	10	4	1	72
calcaires	83	38	5	2	128
argiles, grès, dolomies, gypses, schistes, brèches tectoniques	27	8	2	0	37
hydro	1				1
TOTAL	226	80	18	15	339

Tableau 9 - Répartition des mouvements de terrain extraits de BDMVT en fonction des faciès des terrains

Dater un évènement mouvement de terrain est un exercice très difficile car :

- 1) il peut s'agir d'un évènement ancien, visible uniquement grâce aux traces morphologiques laissées, et qui n'a pas fait l'objet de description spécifique et accessibles grâce aux archives historiques ;
- 2) c'est non seulement indiquer la date de survenance de l'évènement, mais aussi la périodicité de réactivation de l'instabilité (par exemple une chute de blocs fréquente le long d'une falaise).

Pour le département du Jura (Tableau 10), concernant les glissements, sur les 226 évènements référencés dans le Jura : 167 sont supposés être survenus durant le XXème siècle ; dès le milieu des années 70, il semble survenir au moins 1 évènement tous les 2 ans, et près de 5 tous les 10 ans en moyenne.

Pour les chutes de blocs-Eboulement, sur les 80 évènements référencés : 60 sont supposés être survenus durant ce dernier siècle mais ne sont pas datés ; les 17 autres évènements datés sont survenus de façon assez régulière depuis le milieu des années 70, sans qu'il y est de fréquence notable.

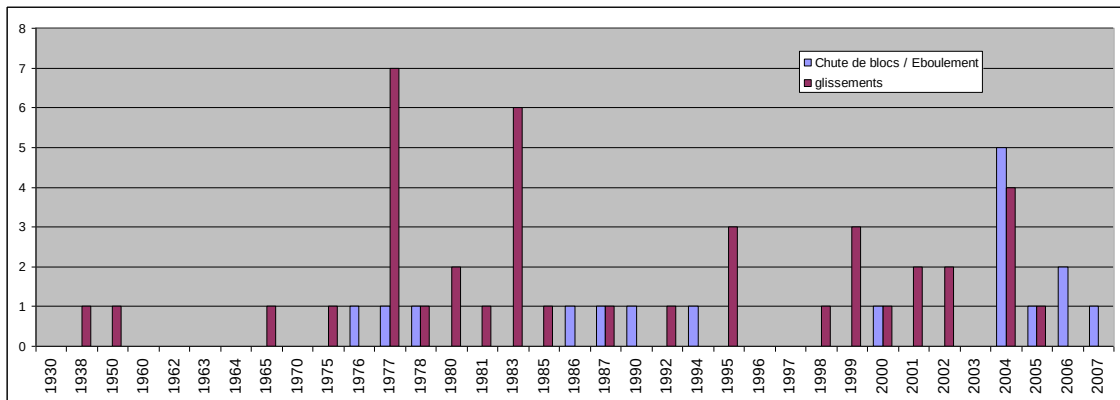


Tableau 10 - Répartition des Chutes de blocs et glissements de terrain depuis 1900, référencés dans le département du Jura par BDMVT

Il apparaît clairement que les informations sur la date des évènements référencés sont insuffisantes pour être utilisées dans des estimations de probabilité temporelle. Par ailleurs, outre le type d'évènement associé à une date de survenance, pour une analyse plus cohérente de la probabilité temporelle, il serait nécessaire d'indiquer la magnitude (voire intensité du phénomène). Ce qui constitue une information rarement disponible dans l'inventaire des mouvements de terrain.

La liste des évènements référencés aujourd'hui dans BDMVT au niveau de la zone pilote est donnée en **Annexe 2**.

7. Méthodologie SDR-MVT, application à la zone pilote

7.1 INTRODUCTION

7.1.1 Les contraintes liées aux SDR-MVT

Parmi les principaux éléments dont il faut tenir compte pour le choix d'une méthode de cartographie des mouvements de terrain, on cite : les attendus de la carte, la typologie a priori des mouvements de terrain, le délai de réalisation et le financement disponible, la quantité et qualité des informations nécessaires.

Concernant la cartographie SDR-MVT, celle-ci a plusieurs objectifs :

- ✓ optimiser la **programmation des PPR** par une hiérarchisation de zones prioritaires,
- ✓ disposer d'une **cartographie cohérente de l'aléa et du risque mouvement de terrain** sur un territoire étendu (à court terme : 1 département ; à moyen terme : plusieurs départements),
- ✓ développer une méthode d'évaluation de l'aléa et du risque à l'échelle départementale :
 - **exportable** (indépendante du contexte géographique),
 - dont les modalités de mise en œuvre sont **explicites**,
 - en limitant autant que possible les informations et les interprétations à « dire d'expert ».

Une évaluation qualitative de l'aléa présente de nombreux avantages, mais elle reste difficilement exploitable pour une hiérarchisation du risque (Figure 21). En effet, comment comparer, par exemple, ne serait-ce que pour un mouvement d'une intensité donnée, deux zones, où la première serait caractérisée par un « aléa fort » et peu d'enjeux, et la seconde par un « aléa faible » mais avec une quantité beaucoup plus importante d'enjeux ? Pour une appréciation la plus objective possible, il est nécessaire de mettre en œuvre une **évaluation quantitative** de l'aléa aux mouvements de terrain, des enjeux et de leur vulnérabilité et enfin du risque.

C'est dans cette optique qu'a été développée la méthode de cartographie SDR-MVT, sachant que dans un premier temps les SDR-MVT doivent servir de support à la hiérarchisation de l'aléa et du risque des communes d'un département donné, et à moyen terme, qu'il sera possible de comparer les cartes d'aléa et de risque entre plusieurs SDR-MVT.

Les phénomènes pris en compte dans le cadre de la méthode SDR-MVT sont les plus courants :

- glissements,
- chutes de pierres, de blocs et éboulements ;
- coulées de boue.

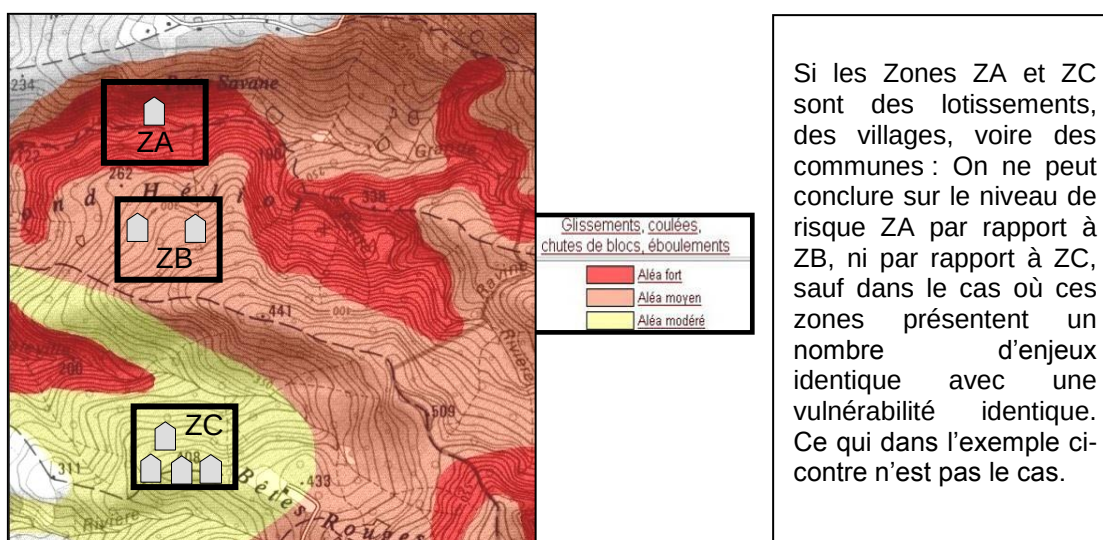


Figure 21 : Représentation cartographique schématique du calcul du risque

L'échelle de cartographie retenue est celle de **1/50 000**. Elle permet à la fois de traiter un territoire relativement étendu (plusieurs dizaines de communes) tout en donnant accès à des résultats cartographiques suffisamment précis pour constituer un outil d'aide à la décision sur les priorités d'action en termes de réalisation de PPR (zonages à l'échelle locale, 1/10 000 à 1/25 000), voire d'études de site (échelle d'investigation 1/5 000 à 1/10 000).

7.1.2 Choix de la démarche quantitative pour une cartographie départementale

Comme il a été vu dans les chapitres précédents, pour une évaluation quantitative de l'aléa et du risque, il existe deux grandes orientations méthodologiques, soit une évaluation statistique basée sur un inventaire des événements historiques et contemporains, soit une approche mécanique, basée sur la modélisation des phénomènes et le calcul d'un paramètre dimensionnant.

7.1.2.1 Test d'une approche cartographique statistique basée sur le catalogue des événements BDMVT

Dans le cadre d'une approche cartographique statistique basée sur le catalogue des événements historiques, pour une zone donnée, le niveau d'aléa sera proportionnel au nombre d'événements recensés. Une telle approche exige de disposer de données de qualité sur la localisation et l'occurrence des événements mouvements de terrain, mais aussi un catalogue le plus exhaustif possible.

Le territoire français dispose d'une base nationale qui centralise, depuis 1981, les mouvements de terrain actuellement référencés par le BRGM, le LCPC et le RTM, événements contemporains ou historiques. C'est pourquoi il nous a semblé pertinent d'étudier la possibilité de bâtir une méthode d'évaluation quantitative de l'aléa, basée sur une analyse statistique de la répartition des mouvements recensés au sein de la base de données nationale (www.BDMVT.net).

Les 17 500 mouvements recensés sont regroupés autour de cinq typologies différentes (glissements de terrain, éboulements/chute de blocs, coulée de boue, effondrement, érosion de berge). La localisation est très hétérogène allant du mètre à l'échelle de la commune (> 1km). La précision de la date est elle aussi très hétérogènes, allant du qualitatif « récurrent » à « supérieur au siècle ».

Les résultats de cette analyse sont présentés dans l'**Annexe 3**.

Il s'avère que si la base BDMVT peut constituer ponctuellement une aide précieuse pour distinguer les principales périodes d'instabilité régionale, par contre elle reste très insuffisante pour une cartographie systématique de l'aléa aux mouvements de terrain à l'échelle des départements français.

7.1.2.2 Principe général de l'approche empirico-mécanique développée dans le cadre des SDR-MVT

- Dans l'approche basée sur la mécanique du mouvement, l'aléa est fonction de la probabilité qu'une portion de territoire présente un état d'instabilité sous l'influence de facteurs déclenchant. Les approches purement mécaniques utilisent d'un part, des modèles mathématiques et d'autre part, des connaissances topographiques,

hydrogéologiques et géotechniques très précises du territoire étudié. C'est pourquoi, elles sont mises en œuvre sur des secteurs d'extension limitée, et pour des résultats cartographiques proche du 1/5 000. Pour ce qui concerne des évaluations sur plusieurs dizaines de communes, l'approche purement mécanique est donc inadaptée.

Dans le cadre des SDR-MVT, une méthode empirico-mécanique, mixant des données issues d'une analyse par « dire d'expert » et de résultats de calculs mécaniques, a été développée. L'aléa, évalué selon des règles empirico-quantitatives, tient compte :

- Des facteurs de prédisposition caractérisés de façon empirique,
 - Du calcul des paramètres limites par modèles mécaniques (Pierre, ALICE),
 - Du calcul de la probabilité d'apparition et de propagation par modèles mécaniques et statistiques (Bora, ALICE).
- Les données de base susceptibles d'être utilisées dans le cadre de SDR-MVT ont été présentées au chapitre 5. Il s'agit d'informations disponibles en n'importe quel point de la France (ou en cours de finalisation) et à un coût relativement peu élevé :
- Cartes géologiques à 1/50 000, vectorisées
 - MNT au pas de 50 m,
 - Orthophotos ou photographies aériennes à vision stéréoscopique,
 - Carte de l'occupation des sols Corine Land Cover,
 - Base de données BDMVT, BD Carto,
 - Données INSEE sur la population.

L'échelle des documents cartographiques concerne le 1/25 000 (photos aériennes) à 1/100 000 (Corine Land Cover).

La méthode tient compte des types de mouvements de terrain suivant :

- Chutes de blocs ou éboulements rocheux,
- Glissements de terrain
- Coulées boueuses.

In fine, à chaque type de phénomène correspond une carte d'aléa. Il n'y a pas de notion d'échelle d'intensité, mais plutôt de probabilité de présence (ou pas) du type de phénomène (ou mécanisme) considéré.

- Concernant les enjeux, il s'agit de la localisation des zones urbanisées et des principales voies de communication routière.

La vulnérabilité des enjeux correspond à une fonction binaire (indemne/détruit) selon qu'ils sont touchés (ou pas) par l'instabilité. Dans cette situation, l'agression est elle-même binaire : présence ou absence.

L'analyse de risque consiste donc à produire des cartes d'exposition, c'est-à-dire des cartes où seule la probabilité d'occurrence est variable, et où l'intensité du phénomène est considérée comme uniforme. Cette intensité est telle qu'elle détruit l'enjeu. Celui-ci ne pouvant présenter que deux états de dommages, indemne ou détruit.

A noter qu'au-delà de l'approche SDR-MVT, lorsque des évaluations de vulnérabilité plus précises sont nécessaires et envisageables, il sera utile de se référer à l'étude SDR-MVT Urbains (Thierry et al., 2008). En effet cette approche se justifie dans les zones à très forts enjeux et pour des cartographies à plus grande échelle (1/10 000 à 1/25 000). Dans cette situation (vulnérabilité et agression binaires), le risque calculé correspond au produit de la probabilité de survenance du phénomène par la valeur (exprimée en longueur, surface, nombre, ...) de l'enjeu.

• En résumé, concernant les principes majeurs qui ont servi de fondement au développement de la méthode SDR-MVT, on cite :

- Cette démarche doit utiliser des données de base décrivant le contexte géologique, morphologique et géotechnique, **données accessibles à moindre coût et disponibles en tout point du territoire**,
- La quantification de l'aléa, nécessaire au calcul du risque, dépend de **la probabilité de survenance du phénomène** : 1) dans l'idéal, pour une période de retour donnée, 2) dans la pratique, **pour des conditions de forçage données** (hydro pluviométriques, sismiques ou anthropiques).
- Pour les glissements de terrain, l'évaluation de la probabilité en un lieu donné d'avoir une rupture, pour un forçage donné tiendra compte : **1) d'un modèle de calcul de stabilité de pente, 2) de la variabilité des valeurs des paramètres caractérisant les « facteurs permanents »** et/ou de leur incertitude), avec des valeurs estimées à partir des connaissances factuelles disponibles et complétées à dire d'expert.
- Pour les coulées, d'une exploitation de la carte d'aléa glissement (apport en matériaux constitutifs de la coulée => aléa de rupture), et d'un calcul de propagation le long de drain (vallons) => aléa propagation.
- Pour les chutes de blocs, une évaluation semi quantitative de l'aléa de rupture, puis une évaluation probabiliste de l'aléa propagation.

En ce qui concerne ces derniers, les enjeux globaux retenus pour l'étude, à savoir la commune, le bâti communal, et le réseau routier sont des ensembles d'éléments exposés ayant malgré tout une vulnérabilité propre, différente les uns des autres. Un être humain a une capacité à résister à l'impact direct d'une chute de pierre bien plus faible que celle d'un véhicule automobile, alors que l'on peut considérer les deux comme détruits lorsqu'ils sont atteints par un bloc de plusieurs tonnes.

Une seule carte d'aléa, mêlant probabilité d'occurrence et intensité du phénomène, sans pouvoir démêler ce qui est dû à la taille du bloc de ce qui est induit par la fréquence des chutes, est inexploitable en terme d'analyse de risque lorsqu'on l'on souhaite interpréter l'exposition en fonction de la nature de l'enjeu.

Cet exemple illustre le fait qu'il est donc obligatoire de présenter une carte par type de phénomène, en l'occurrence les chute de gros blocs et les chutes de pierres.

- Le principe général de la méthode retenue pour les SDR-MVT est synthétisé en Figure 22.

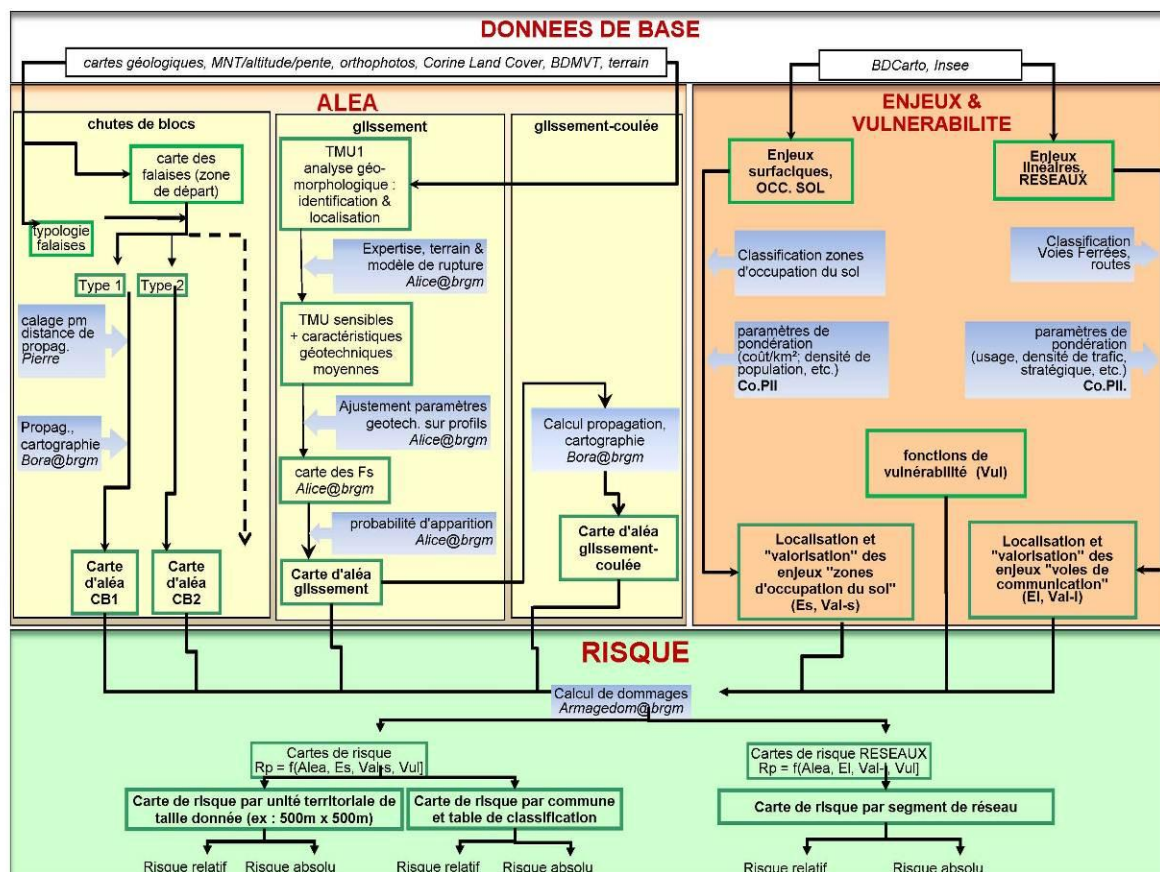


Figure 22 – Organigramme général sur la méthode par approche mécanique développée et mise en œuvre dans le cadre des SDR-MVT

7.1.3 Les logiciels utilisés

Avant de décrire plus en détail les différents processus pour évaluer l'aléa et le risque, il a paru important de donner une description synthétique des divers logiciels utilisés (données de base nécessaire, principaux algorithmes utilisés, format des résultats). Il s'agit de logiciels soit accessibles dans le commerce soit avec copyright, par contre connaissant les fonctionnalités nécessaires à la mise en œuvre de la méthode SDR-MVT, le futur opérateur pourra utiliser des logiciels équivalents.

7.1.3.1 PIERRE

Historique

Pierre est un logiciel de trajectographie développé par A. Mellal (1997). Face aux besoins actuels, le logiciel présente quelques limites, notamment, le calcul des trajectoires en 2D. En effet, pour une prise en compte objective des trajectoires possibles à partir d'un même point de départ des blocs (sans axe de propagation imposé), une modélisation 3D est nécessaire.

En 2005, indépendamment de Pierre, un prototype de trajectographie en 3D (rockfall) a été développé par O. Sedan, qui montre la possibilité d'un interfaçage 3D en prenant un MNT comme « profil » topographique.

En 2009, les algorithmes de Pierre ont été modifiés de manière à intégrer non plus une topographie en 2D mais un MNT. Les développements informatiques afférents ont été confiés à la société « Acatu Informatique ». Cette version 3D de Pierre est nommée OFAI (de « ofa'i », « pierre » en polynésien).

Caractéristiques du modèle Pierre

Pierre est une application de trajectographie de chutes de bloc en 2D, permettant de calculer la trajectoire d'un bloc depuis son point de détachement d'un massif rocheux, jusqu'à son arrêt, avec, en entrée, différents paramètres caractéristiques du bloc et du terrain. Il est utilisé dans les études de trajectographie pour :

- analyser l'influence du versant - topographie et nature des terrains le constituant - sur les caractéristiques des trajectoires (distances d'arrêt, hauteur et longueur de vol entre rebonds, vitesses longitudinales et de rotation, énergie du bloc, distribution des impacts) ;
- évaluer l'influence, en particulier sur les distances d'arrêts des blocs, d'un ou plusieurs obstacles artificiels érigés sur la trajectoire en des endroits déterminés à partir des résultats des simulations avec topographie naturelle ;
- déterminer la « classe d'énergie » d'obstacles artificiels de type « écrans déformables ».

Certains modèles trajectographiques prennent en compte tous les modes de déplacement du bloc sur le sol : glissement, roulement, rebond, mais la plupart ne simulent que le déplacement par rebonds successifs (Bourrier, 2008). Ce déplacement

par rebonds peut être modélisé comme une succession de vols libres et d'impacts sur le sol. Si, en négligeant le frottement de l'air, la phase de vol libre est simple à modéliser, cela n'est pas le cas du rebond du bloc sur le sol, en raison de la complexité du phénomène physique et de la variabilité des caractéristiques du sol et du bloc. Les modèles peuvent être classés en trois catégories : (i) les modèles prenant en compte la forme et la rotation des blocs ; (ii) les modèles assimilant le bloc à un point matériel ; (iii) les modèles « hybrides », dans lesquels des simplifications sont faites pour la phase de vol libre. Pierre appartient à cette dernière catégorie de modèles.

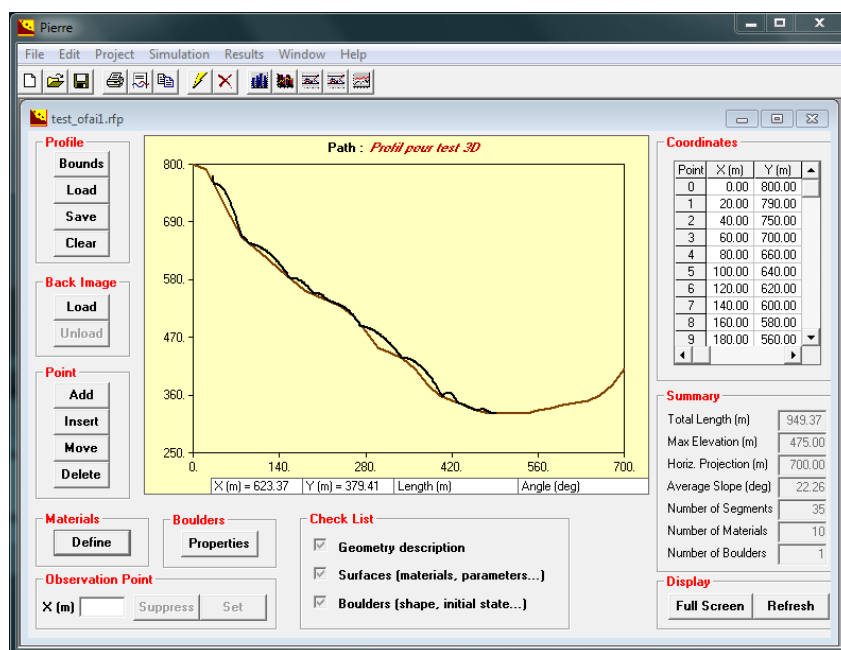


Figure 23 : Fenêtre principale de Pierre.

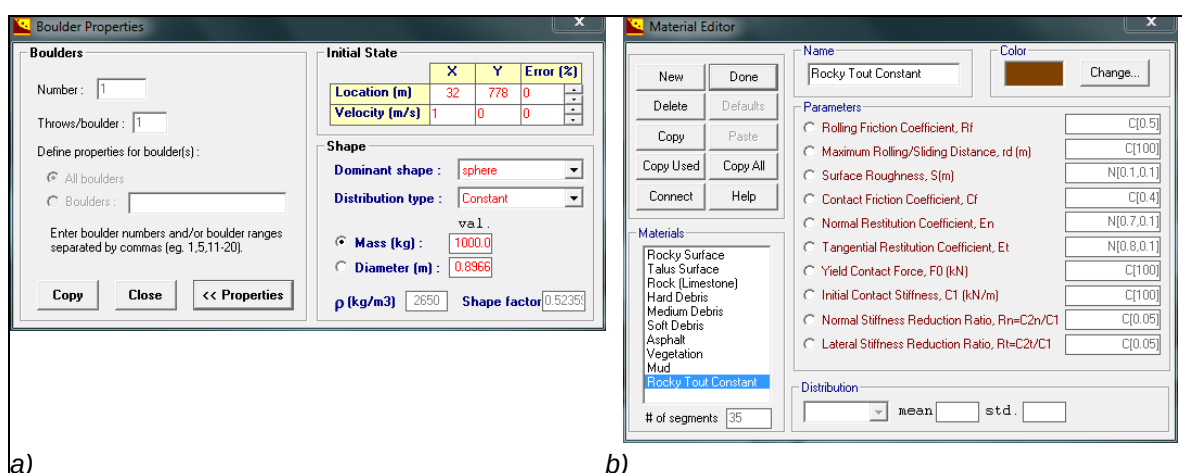


Figure 24 : a) Fenêtre de saisie des caractéristiques des blocs dans Pierre.
b) Fenêtre de saisie des paramètres matériaux dans Pierre.

Les caractéristiques principales du modèle de Pierre sont les suivantes :

- analyse en 2D (direction(s) de la trajectoire et topographie imposées) ;
- hypothèse de point matériel ;
- 2 modes de déplacement : vol libre, glissement/roulement ;
- prise en compte de la vitesse de rotation (moment d'inertie du bloc) ;
- paramètres du sol : coefficients de frottement (de roulement et de contact statique), rugosité, coefficients de restitution, distance maximale de roulement/glissement, paramètres de déformation plastique ;
- paramètres liés au bloc : masse, forme, position et vitesse initiales ;
- coefficients de restitution pour la perte d'énergie du bloc lors de l'impact, intégrant la perte par déformation plastique du sol (modèle de J.-L. Falcetta, 1985) ;
- variabilité des paramètres d'entrée relatifs aux sols et aux blocs, suivant des lois de distribution de probabilité (uniforme, normale, triangulaire, log-normale).

L'interface principale du logiciel Pierre (Figure 23 et Figure 24) présente les fenêtres de saisie des paramètres du sol et des paramètres liés aux blocs.

Comme la plupart des modèles trajectographiques, Pierre ne prend pas en compte l'interaction entre les différents blocs, ni l'éventuelle fragmentation des blocs au cours de leurs trajectoires.

7.1.3.2 BORA

BORA® est un logiciel développé par le BRGM dans le cadre de la cartographie des mouvements de terrain en Polynésie française (Sedan, 2000). Ce n'est pas un logiciel modélisant le phénomène de propagation. Il s'agit d'un outil cartographique, basé sur des lois empiriques "pseudo physiques", qui permet de représenter les zones d'arrivée les plus probables. La propagation d'un phénomène est fonction de paramètres de dispersion latérale vis-à-vis de la trajectoire de la masse en mouvement auxquels correspondent un gain ou une perte en « pseudo » énergie.

Il utilise un module calculateur et un module graphique séparés. Cette particularité permet de modifier les lois qui régissent le phénomène de propagation sans perturber le fonctionnement du logiciel. En attendant d'avoir de meilleures connaissances du phénomène, le calcul est basé sur des lois "pseudo physiques". Ainsi, en modifiant les paramètres de calage, l'expert en risques naturels mouvements de terrain valide le résultat cartographique du logiciel.

Les données d'entrée

Quatre fichiers sont nécessaires en entrée pour le calcul de l'aléa :

- le MNT,
- la pente,
- l'exposition (direction de la ligne de plus grande pente),
- la susceptibilité, c'est-à-dire les zones de départ potentiel.

Ces fichiers sont sélectionnés suivant une fenêtre de menu (Figure 25). Le fichier résultat est à placer dans un répertoire au choix.

L'ensemble des fichiers de données sont des grilles de la forme Binary Raster du logiciel ArcView (extensions *.flt* et *.hdr*). Dans le fichier de la susceptibilité, les zones de départ potentiel doivent avoir la valeur 1 et les zones extérieures 0. Le fichier résultat est exportable sous la forme Ascii Raster du logiciel ArcView (extension *.asc*).

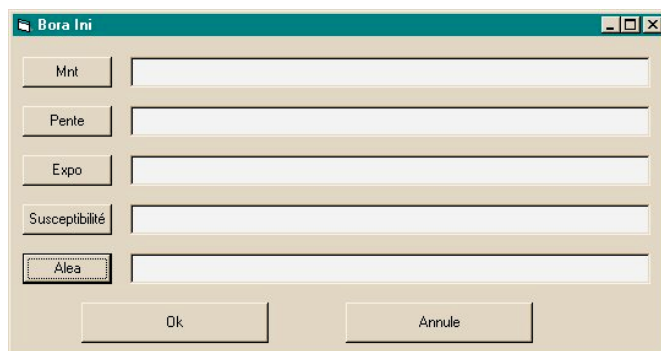


Figure 25 – Fenêtre de sélection des fichiers de données

Les paramètres de calculs intermédiaires

Le logiciel calcule, préalablement pour chacune des cases, la probabilité d'occurrence (notée P) et une "pseudo énergie" (notée E).

La probabilité d'occurrence est calculée à partir des paramètres P_{disp} et P_{min} qui sont respectivement la probabilité de dispersion latérale vis-à-vis de la trajectoire (valant par défaut 0,4) et la probabilité minimale de présence du phénomène (valant par défaut 0,05) en deçà de laquelle il n'y a plus de dispersion, Figure 26. Le logiciel calcule l'ensemble des trajectoires avec la probabilité d'occurrence correspondante.

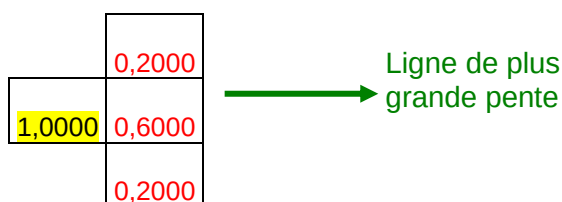


Figure 26 - Probabilité d'occurrence à partir d'une zone de départ d'un pixel et avec $P_{disp} = 0,4$

Les divers calculs utilisent différents paramètres tels que P1, P2, E1, E2... dont la valeur est fixée par défaut et que l'utilisateur peut modifier jusqu'à obtenir un résultat cartographique conforme aux observations de terrain utilisées pour le calage du modèle.

Les paramètres P1 et P2 sont des seuils de pente (en degré) auxquels correspondent un gain ou une perte en "pseudo énergie" fixés par les valeurs de E1, E2 et E3 (Figure 27).

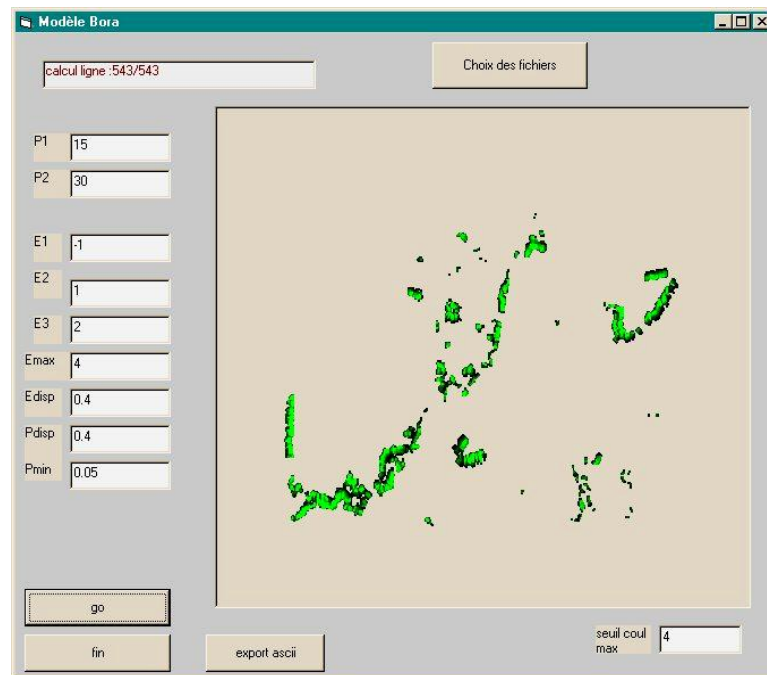


Figure 27 – Présentation de l'interface principale du logiciel « Bora » et carte d'aléa résultante

La propagation d'un phénomène est déterminée par le calcul d'une "pseudo énergie". Cette "pseudo énergie", notée E , permet au phénomène de se propager tant qu'elle est strictement positive. La variation de E dépend de la valeur de la pente et des valeurs des six paramètres $P1$, $P2$, $E1$, $E2$, $E3$ et E_{disp} . La "pseudo énergie" E est bornée par une valeur E_{max} (valant par défaut 4) qu'elle ne peut dépasser pour éviter que le phénomène ne possède une trop grande énergie et que la distance de propagation ne soit ainsi trop longue. Enfin, E_{disp} (valant par défaut 0,4) est une probabilité de dispersion latérale de l'énergie. En un point de zone de départ potentiel (où la probabilité d'occurrence P vaut 1), l'énergie initiale est égale au gain attribué selon la pente en ce pixel (Figure 28).

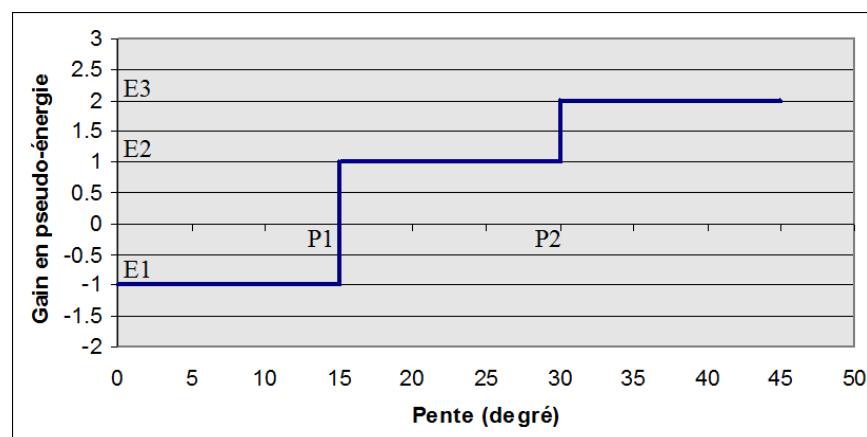


Figure 28 – Graphique du gain en "pseudo énergie" suivant la valeur de la pente

L'énergie des points en aval est ensuite fonction de l'énergie initiale, de la probabilité de dispersion et du gain en "pseudo énergie" acquis lors du passage au pixel suivant (Figure 29).

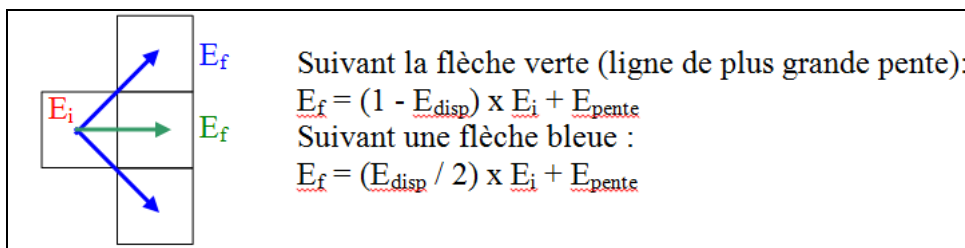


Figure 29 – logiciel BORA : Exemple de calcul de l'énergie

Le calcul de l'aléa

La carte finale de l'aléa est obtenue par multiplication Aléa = P x E en chacune des cases constituant la grille. Au cas (fréquent) où un pixel est à l'intersection de deux trajectoires d'une propagation, l'aléa total de ce pixel est égal à la somme des aléas calculés suivant les deux trajectoires.

7.1.3.3 ALICE

ALICE®, Assessment of Landslides Induced by Climatic Events, est un logiciel d'aide à la cartographie de l'aléa glissement de terrain, développé par le BRGM, sous une expression qui permet une approche quantifiée du risque.

Les fondements de ce logiciel ont été établis dans le cadre des travaux de recherche « AR47 » aux Antilles (méthode TROPICALE) (Sedan & Mompelat 1995 ; Mompelat 1994). Il appartient à la famille des modèles d'évaluation basés sur une approche mécanique (modèles géotechniques), pour lesquels les principales propriétés physiques du milieu sont quantifiées et utilisées par un modèle mathématique qui calcule un facteur de sécurité (Aleotti & Chowdhury, 1999). Ces modèles mettent en œuvre un Système d'Information Géographique (GIS), où l'information est spatialisée sous forme de grilles (raster), notamment la topographie (Modèles numérique de terrain). Ces modèles nécessitent de connaître la répartition spatiale (et parfois temporelle) des paramètres qui vont conditionner la stabilité des sols (caractéristiques mécaniques et géométriques des couches, état hydrique, sous une forme en général très sommaire compte tenu de la variabilité naturelle de ces paramètres au sein de zones d'étude importantes.

ALICE® se caractérise par :

- la mise en œuvre d'un modèle de stabilité de pente fini, avec géométrie de rupture quelconque (cercle, plan ou autres), utilisant la méthode de Morgenstern et Price (Morgenstern & Price 1965, 1967), appliquée à distance régulière le long de profils topographique 2D de versant, couvrant l'ensemble de la zone d'étude,

- l'utilisation d'un modèle hydrologique global pluie-débit, GARDÉNIA (Thiery 2003),
- la prise en compte possible d'une agression sismique régionalisée,
- par une gestion de la variabilité et des incertitudes des paramètres géotechniques au moyen de distributions probabilistes (choix entre distributions normales, uniformes, triangulaires ou trapézoïdales)
- par un résultat qui s'exprime non pas par une valeur de facteur de sécurité (FS), mais par une probabilité de FS inférieur à 1 (i.e. instabilité).

La Figure 30 constitue une synthèse des principes de calcul d'ALICE®. La fonction de calcul d'aléa constitue le cœur de l'application et permet de calculer une carte d'aléa glissement.

Les différentes fonctionnalités d'ALICE utilisées dans le cadre de la méthode SDR-MVT sont décrites en **Annexe 6**. Pour plus de renseignements sur le logiciel, il est possible de se reporter au rapport de Sedan (2011).

ALICE permet de calculer une probabilité d'apparition de glissement ou d'instabilité, basée sur une analyse de stabilité de pente. Cette approche est couramment utilisée en génie civil pour des études géotechniques locales.

Les données d'entrée sont les suivantes :

- une carte des profils topographiques de la zone d'étude ;
- une carte des formations géotechniques, où une formation est caractérisée par une colonne de sol, chaque couche de sol étant définie par une épaisseur, une cohésion, un angle de frottement et un poids volumique ;
- une carte des niveaux de nappe ;
- les caractéristiques des glissements typiques de la zone d'étude : forme de la surface de rupture, taille moyenne du glissement, interface ou intervalle de profondeur du glissement ;
- des paramètres numériques (nombre de tranches, précision du calcul,...).

La sortie de la fonction est une carte de probabilité de glissement ou une carte de facteurs de sécurité de la zone étudiée.

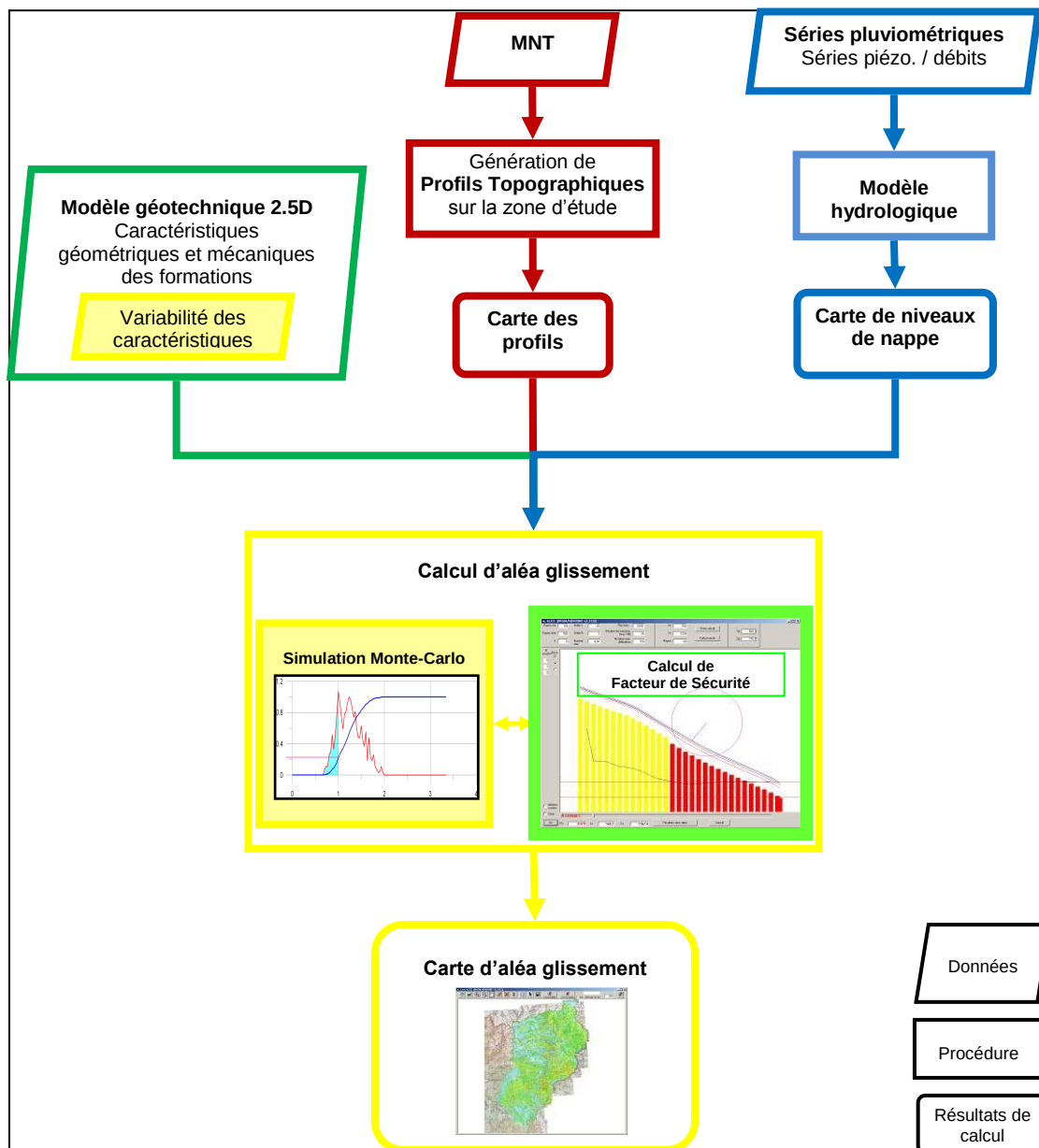


Figure 30 : Schéma des modèles constituant ALICE et leurs entrées / sorties

Principe de l'analyse de stabilité de pente

Cette analyse est effectuée dans un plan vertical contenant le profil topographique de la pente étudiée, par des méthodes d'équilibre-limite : Morgenstern-Price (Zhu et al., 2005).

Dans l'analyse de stabilité, une masse de sol, délimitée par une potentielle surface de glissement (plane ou circulaire), est découpée en un certain nombre de tranches verticales (Figure 31). L'analyse des forces s'exerçant sur chaque tranche (poids, force liée à la pression de l'eau, forces à la base de la tranche, forces inter-tranches, forces externes), moyennant une hypothèse sur les relations entre les forces inter-tranches, permet le calcul d'un facteur de sécurité. Le facteur de sécurité peut être décrit comme le ratio des forces tendant à résister au glissement par les forces entraînant le glissement. Ainsi, une valeur de facteur de sécurité inférieure à 1 équivaut théoriquement à une instabilité.

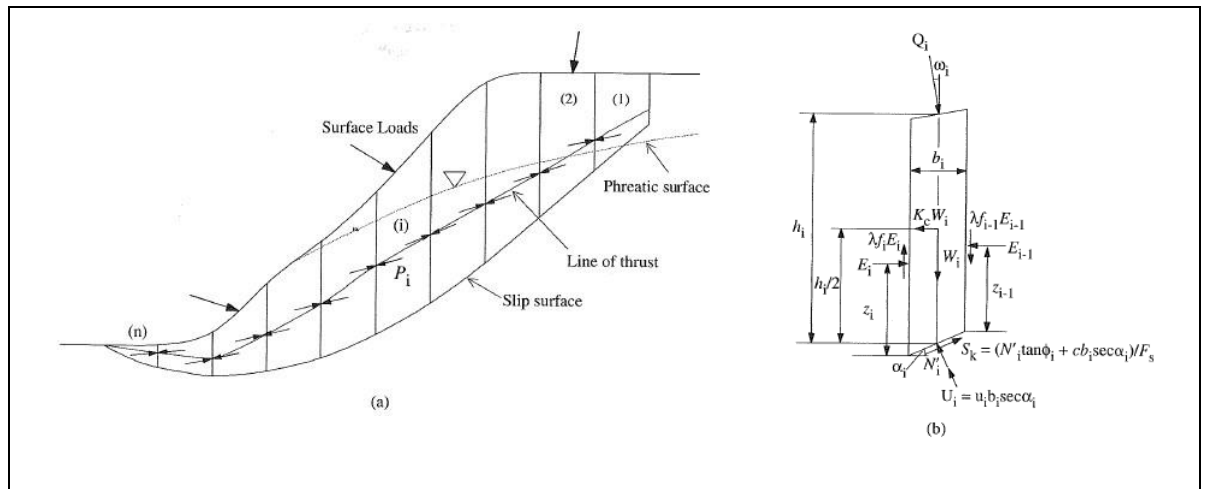


Figure 31 : (a) masse de sol étudiée décomposée en tranches, (b) analyse des forces s'exerçant sur une tranche

En pratique, une valeur précise de facteur sécurité ne peut pas être calculée, en raison de la variabilité des paramètres géotechniques en entrée (incertitudes ou variabilité intrinsèque).

Pour cette raison, une approche probabiliste a été introduite :

Les paramètres géotechniques peuvent être définis comme des variables aléatoires (suivant des lois de probabilité classiques : uniforme, normale, triangulaire, ...) et par une simulation Monte-Carlo, une probabilité que le facteur de sécurité soit inférieur à 1 peut alors être estimée (Figure 32).

Cette probabilité est l'aléa glissement de terrain.

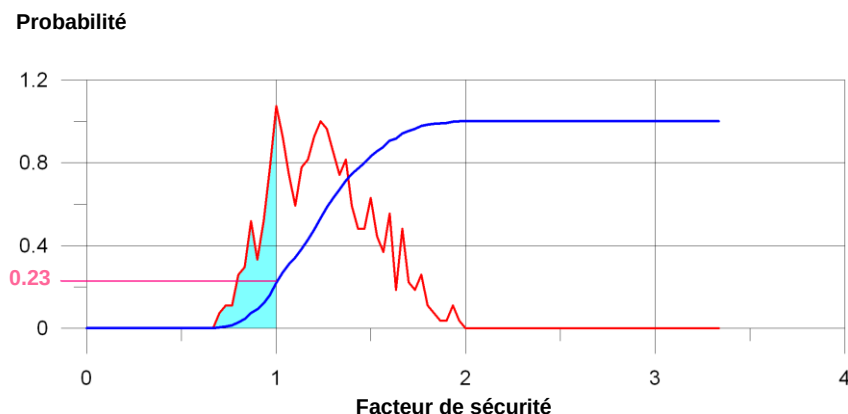


Figure 32 - Probabilité que le facteur de sécurité soit inférieur à 1

En un point donné, ce calcul d'aléa peut être effectué pour différentes surfaces de rupture, afin de retenir la surface de rupture la plus pénalisante.

Calcul de la carte d'aléa

Les calculs de stabilité le long d'un profil sont très utiles en phase de constitution du jeu de données nécessaires au calcul d'une carte ALICE®. Ils permettent également de rétro-analyser des glissements anciens, et ainsi d'ajuster les caractéristiques mécaniques des couches, au-delà des essais de laboratoire ou de l'expertise.

L'analyse de stabilité étant bidimensionnelle, les sections verticales de versants dans lesquelles les analyses seront effectuées doivent être calculées. Ces sections sont représentées sur une carte par des éléments « polygones », appelés profils topographiques.

Les profils topographiques sont calculés à partir du MNT, ainsi que des cartes des pentes, des directions et des accumulations, elles-mêmes calculées à partir du MNT. Le principe consiste essentiellement à tracer un profil à partir d'une crête, en suivant la direction de plus grande pente, le profil s'arrêtant dans un drain ou lorsqu'il rencontre un autre profil. Une carte vecteur des profils topographiques est ainsi calculée sur la zone d'étude, constituant une des données d'entrée du calcul de la carte d'aléa.

Une fois les paramètres du modèle calés, il est possible de calculer une carte. Pour cela ALICE® :

- calcule chaque profil comme décrit ci-dessus,
- calcule la valeur de F_s et d'aléa en tout point du profil,
- reporte les résultats sur une carte raster.

7.2 EVALUATION DE L'ALEA AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN

7.2.1 Démarche

L'aléa aux glissements de terrain est exprimé par la probabilité que le facteur de sécurité des pentes soit inférieur à 1. Pour cela :

- 1) l'évaluation doit utiliser un modèle de stabilité des pentes capable de calculer en tout point de la zone d'étude cette valeur ;
- 2) Quelque soit le modèle de calcul, il est nécessaire de connaître les caractéristiques géotechniques et géométriques du sol et du sous sol, soit un modèle 3D des terrains.

Concernant le point 1, le logiciel ALICE est capable de calculer la valeur du facteur de sécurité en tout point de la zone d'étude.

Pour le point 2, il s'agit de faire un modèle 3D de l'ensemble de la zone d'étude, et ce sous la forme de paramètres cohérents avec le fonctionnement d'ALICE, sachant que très généralement :

- > on dispose d'une connaissance objective très limitée de la zone étude (sondages, géométrie des couches, caractéristiques mécaniques, conditions hydriques, etc.)
- > Mais qu'à défaut, c'est une appréciation qui est pratiquée très régulièrement dans le cadre de cartographie des mouvements de terrain et ce même pour des échelles plus grandes (PPR, site).

C'est une démarche mixte d'expertise et par croisement des données numériques qui est développée pour **régionaliser** à l'échelle départementale la connaissance sous la forme d'un **modèle 3D**.

Pour cela, le travail est réalisé par étapes successives :

Étape 1 : Identification & localisation des unités de terrain morpho-géologiques, TMU

- Structuration des informations morphologiques et lithologiques sous SIG,
- Le découpage du territoire en TMU (unités paysagères homogènes, ou en anglais Terrain Mapping Unit) est réalisé sur la base des combinaisons de classes de valeurs morphologiques et lithologiques.
-

Étape 2 : Validation de la typologie TMU, identification des TMU sensibles, affectation des caractéristiques moyennes,

- Contrôle terrain, confrontation avec les données BD MVT & BSS, rétro analyse des MVT anciens
- Premières estimations des paramètres géotechniques, modèle de rupture ALICE
- Regroupement ou subdivision des TMU pour cartographier et caractériser les différentes classes de terrain sensibles

=> **constitution du modèle géotechnique 3D**

Etape 3 : Calcul de la carte des Fs, ALICE

Calcul de la carte de facteurs de sécurité (Fs), avec contrôle et éventuellement réajustement des paramètres géotechniques.

Etape 4 : Carte de l'aléa aux glissements de terrain

Calcul de la carte de probabilité d'apparition (probabilité que le Fs soit inférieur à 1) via ALICE®.

7.2.2 Outils et données de base utilisés

Les outils

Le Logiciel SIG ARCGIS développé par ESRI et ses extensions logicielles propriétaires Spatial Analyst et 3D Analyst, et importation d'une boîte à outils libre Topography Tools ont été utilisés pour :

- la gestion des informations cartographiques géoréférencées et des tables descriptives correspondantes ;
- l'acquisition d'informations dérivées du MNT,
- le croisement des données et l'identification des combinaisons déterminantes pour la caractérisation des TMU.

Les extensions logicielles sont nécessaires pour effectuer différents types de géotraitement sur des données raster, réaliser une analyse tridimensionnelle... Pour le calcul du facteur de sécurité et sa probabilité, c'est le logiciel ALICE@brgm qui a été utilisé. Parallèlement à ALICE, il est nécessaire de disposer d'une licence standard monoposte MapInfo pour pouvoir l'utiliser.

Les données de base, il s'agit :

- Du MNT (Modèle Numérique de Terrain) est extrait de la BD Alti de l'IGN. La taille de la maille est de 50 m de côté. Sa précision verticale est d'ordre métrique à décimétrique (selon le contexte orographique).
- De la carte géologique à 1/50 000 harmonisée, éditée par le BRGM,
- De la BD européenne d'occupation biophysique des sols. CORINE Land Cover 2006,
 - De la base nationale BDMVT.

7.2.3 Étape 1 : Identification & localisation des unités de terrain morpho-géologiques, TMU

A partir de données régionalisées sur l'ensemble de la zone pilote, l'objectif est de découper l'espace en un certain nombre d'unités homogènes par discrétisation des données de base.

Ces unités aux caractéristiques communes intègrent :

- ❖ La géologie → caractéristiques mécaniques, épaisseur des sols
- ❖ La morphologie → caractéristiques géométriques (pente, altitude, forme)
- ❖ L'hydrologie → coefficient de ruissellement

Ces unités homogènes sont nommées « Terrain Mapping Units » (TMU). La démarche de classification de la zone pilote en TMU se décompose ainsi en trois types d'analyses (morphologiques, géologiques, et hydrologique).

Ces analyses concernent à la fois le traitement des données numériques (carte géologique, MNT, occupation du sol), mais aussi une première reconnaissance du terrain avec : visite de mouvements de terrain notifiés dans la base, identification des faciès a priori instables, et des classes de pente a priori critiques pour la stabilité des versants.

7.2.3.1 Structuration des informations morphologiques et lithologiques sous SIG,

Caractérisation morphologique

Le MNT et ses dérivés, la pente et le TPI (Topographic Position Index) sont les données de base qui ont servi à la caractérisation morphologique des TMU. Il s'agit d'informations initialement sous la forme raster avec une échelle de valeurs continues. Pour être utilisables dans le cadre de l'identification des TMU sur la base de combinaison multicritères, il s'agissait donc en premier lieu de les classer en un nombre de classes limité mais suffisant pour représenter la diversité morphologique du paysage.

Concernant le MNT, il s'agit du fichier de l'IGN, avec une taille de pixel de 50m de la zone pilote montre une gradation générale du relief suivant une diagonale du Nord-Ouest vers le Sud-Est avec des valeurs d'élévation passant pour la plus basse à environ 220 m jusqu'à environ 1300 m. Trois classes d'altitude ont été retenues sur la base de l'analyse du terrain :

- 0 à 400 m,
- 400 à 600 m,
- Supérieure à 600m.

La carte des pentes a été classifiée à 3 classes de valeurs a priori déterminantes pour les conditions de stabilité de versants d'après l'analyse du terrain :

- 0 à 15%,
- 15 à 30%,
- Supérieure à 30 %.

Le TPI donne une indication générale sur la forme du relief. Cet index topographique peut être calculé à partir d'un des algorithmes de la boîte à outils « Topography Tools 9.2 » d'Esri. Le TPI est basé sur un algorithme basique qui compare l'élévation de chaque cellule du MNT à la moyenne des valeurs d'altitude des cellules voisines (voisinage compris dans un périmètre dont la forme et l'étendue sont déterminées par l'utilisateur). Un indice négatif signifie que la cellule est placée plus bas que ses voisines (dépression), un indice positif expose la situation inverse (sommet) et un indice proche de 0 implique soit que l'ensemble des cellules est à la même hauteur, soit que la cellule considérée est localisée sur un versant.

Une méthode de discrétisation traditionnelle basée sur les trois paramètres terrain (MNT, Pentes, TPI) a été appliquée, avec comme objectif d'obtenir une synthèse des formes du paysage en 5 classes maximum.

Dans un premier temps, chaque paramètre géomorphologiques a été discrétisé en trois classes par seuillage manuel basé sur une analyse de la distribution spatiale des grilles et de leur histogramme de valeurs respectif.

Cette démarche a ensuite été semi-automatisée sous l'environnement Model Builder d'ARCGIS. L'outil permet de dérouler la démarche de discrétisation présentée ci-dessus, à partir de deux paramètres terrain fournis en entrée : le Modèle Numérique de Terrain et le TPI.

Les bornes de classes finales retenues sont présentées en Figure 34.

La discrétisation des grilles d'élévation et de pentes n'est pas modulable depuis l'interface, par contre il est possible de modifier directement les seuils de classification du TPI avant le lancement de l'analyse morpho.

Les résultats obtenus sur la zone pilote font l'objet de la Figure 35. L'information calculée, initialement au format raster, a été lissée et transformée en format vecteur plus facilement utilisable dans la suite du traitement (analyse combinatoire).

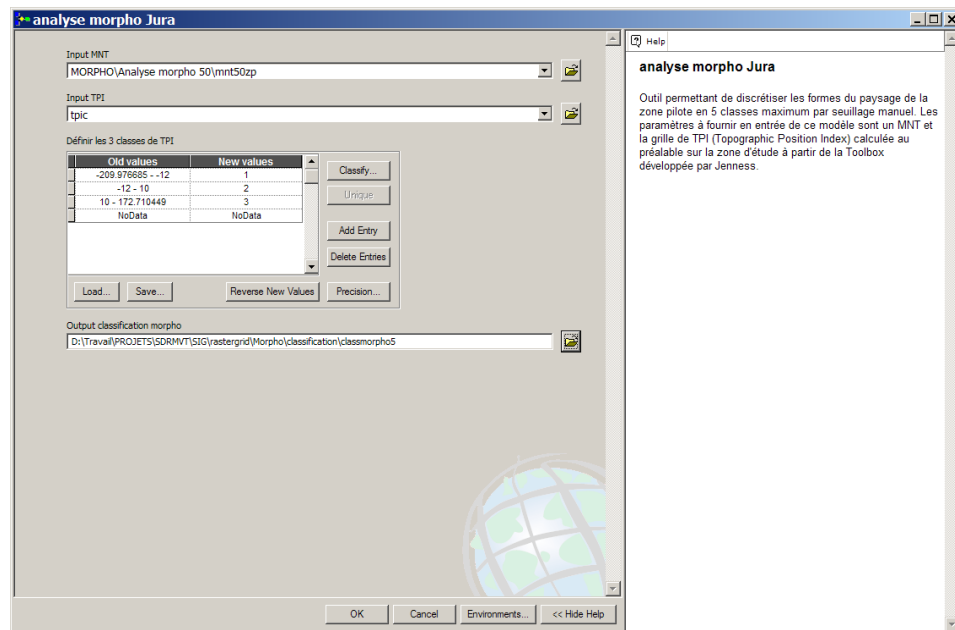


Figure 33 - Interface de l'outil de classification morphologique

Autres tests réalisés pour le calcul du TPI :

Le calcul du TPI est très dépendant des effets d'échelle. Par conséquent, plusieurs tests ont été réalisés afin de choisir le voisinage le mieux adapté à notre étude. En outre, la boîte à outils « Topography Tools » propose également deux algorithmes de classification du paysage basés entre-autre sur l'utilisation du TPI :

- 1) Outil « Slope Position Index »,
- 2) Outil « Landform Classification ». Ces outils ont aussi été testés sur la zone pilote. Les résultats de ces deux classifications du paysage n'ont pas apporté de résultats concluant sur la zone pilote.

Les tests d'échelle de calcul de TPI et de classification selon les 2 autres algorithmes sont présentés en **Annexe 4** de ce rapport.

Les travaux relatifs à l'intégration d'un paramètre terrain supplémentaire dans la classification morphologique permettant de délimiter la courbure des versants sont également présentés en annexe de ce rapport. La carte des formes du paysage passe ainsi de 5 à 7 classes. Toutefois, cette classification n'a pas été exploitée par la suite pour la constitution des TMU par soucis de respecter un nombre synthétique de classes.

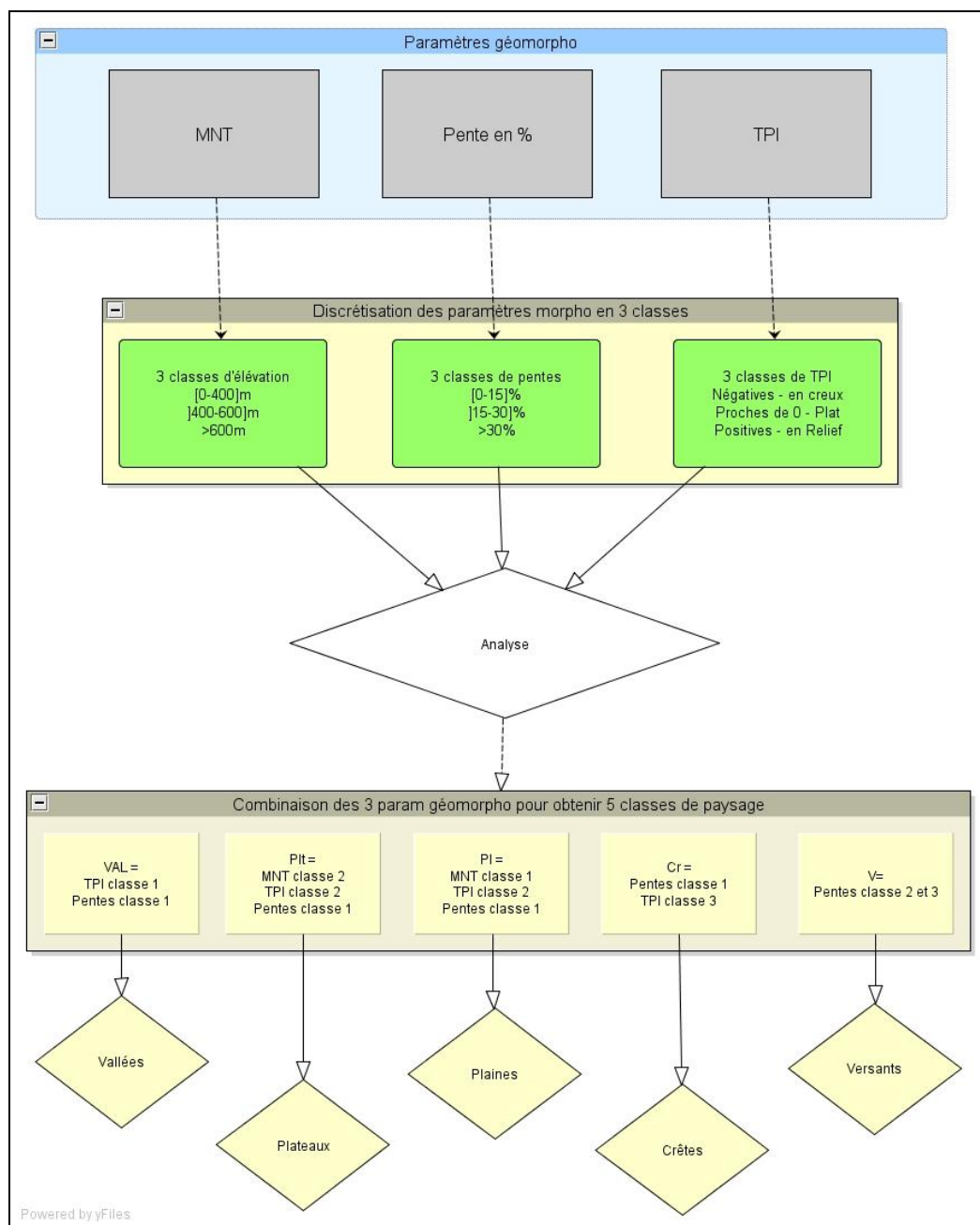


Figure 34 - Calcul des principales classes morphologiques retenues pour la zone d'étude

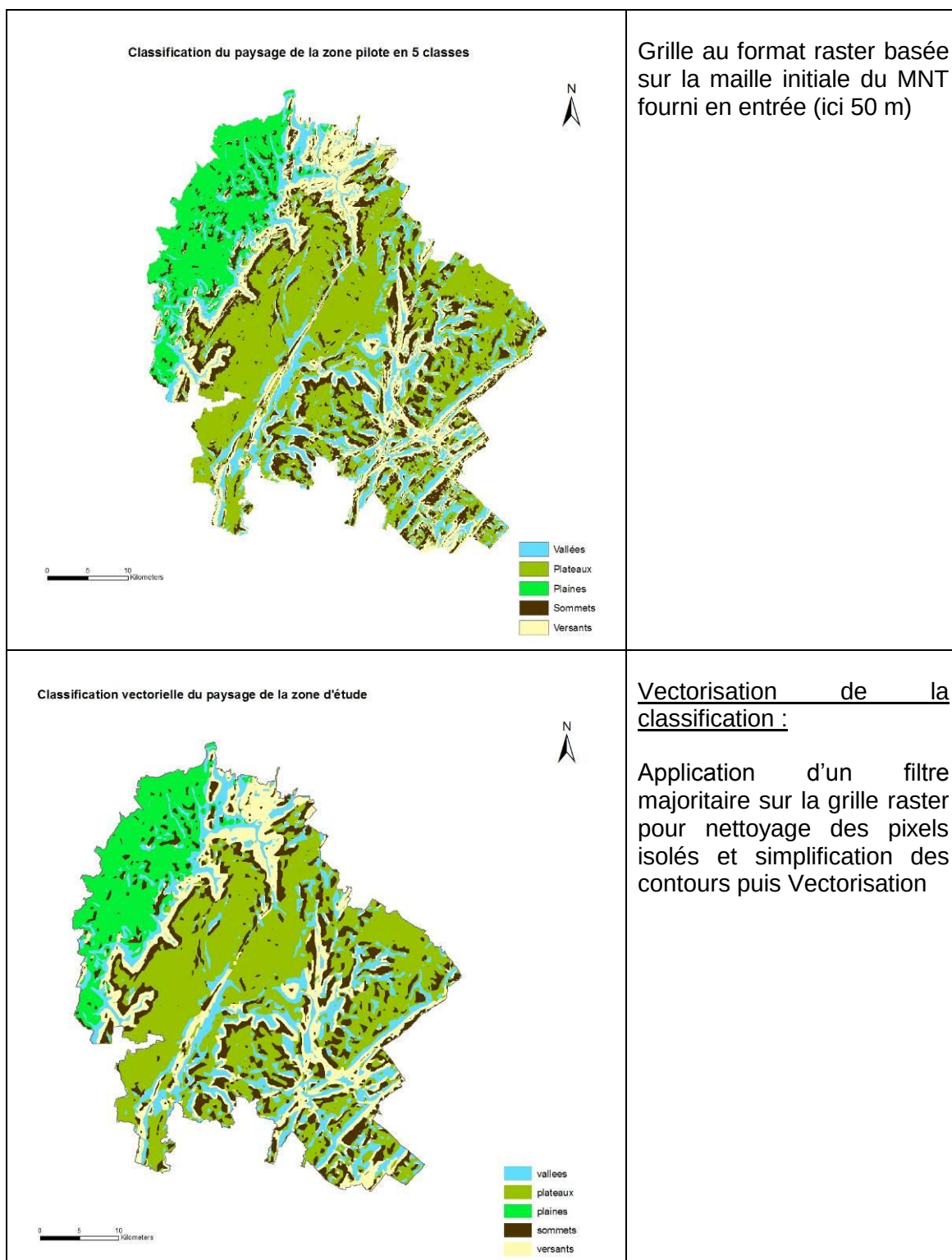


Figure 35 - Zone pilote du Jura : Résultat de la classification en 5 classes morphologiques principales

Caractérisation géologique

La carte géologique 1/50 000 distingue les diverses formations géologiques affleurantes ou sub-affleurantes suivant une échelle lithologique et temporelle très détaillée. Ainsi au niveau de la zone pilote, 127 types d'unités stratigraphiques sont identifiés sur la carte géologique harmonisée. Le degré de détails du découpage stratigraphique de la carte initiale est non seulement inutile dans le cadre de la méthode SDR-MVT développée, mais aussi difficilement manipulable pour l'approche factorielle mise en œuvre.

Il s'agit donc dans un premier temps d'étudier la colonne stratigraphique indiquée au niveau de la carte et de la notice géologique, puis de regrouper les formations selon leur faciès et ce en un minimum de classes (autours d'une dizaine) cohérentes par rapport au contexte environnemental considéré, et aux objectifs méthodologiques. Cette partie de l'analyse nécessite un travail de synthèse par dire d'expert. Il s'agit de regrouper les faciès qui a priori présenteront un comportement mécanique globalement homogène (toutes conditions égales par ailleurs).

Concernant la zone pilote, à partir de la carte géologique harmonisée, 9 classes de faciès ont été distinguées.

La correspondance des codes géologiques des unités litho stratigraphiques, des âges et faciès des formations de la carte géologique harmonisée à 1/50 000 pour le secteur relatif à la zone pilote est indiquée en **Annexe 5**.

Classes de FACIES	Codes des formations lithostratigraphiques
alluvions, moraines	19-20-21-22-23-25-26-27-28-29-30-32-36-40-41-44-45-46-48- 999
calcaires	73-76-83-84-88-94-96-98-103-106-107-110-111-112-113-114-115
conglomérats	64- 66-68-70
marnes, argilites	99-100-101- 116-117- 120
marnes, calcaires	75-77-78-79-80-85-87-90-92-102-104-105-118-119-121-122
sables, argiles, cailloutis consolidés	49-50-54-57
tufs, limons, loess, argiles d'altérations	4-5-6-9-10-11
éboulis, colluvions, glissements, remblais	1-2-3-14-15-47
argiles, grès, dolomies, gypses, schistes, brèches tectoniques	65-124-126-127-128-129

Figure 36 - Correspondance entre les classes de faciès et les numéros de formations concernées par le regroupement.

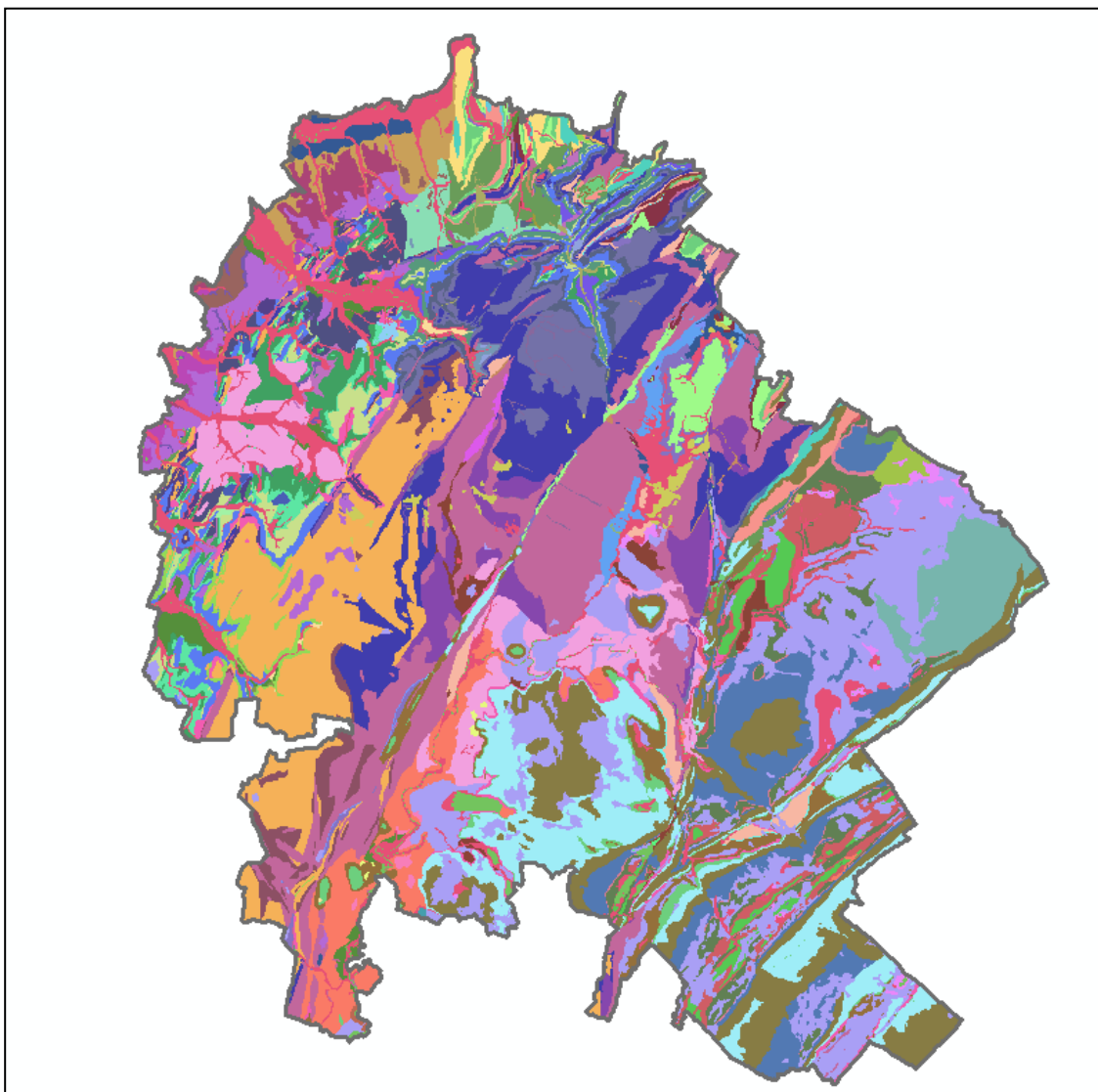


Figure 37 - Zone pilote du Jura : Carte lithostratigraphique initiale, d'après la carte géologique à 1/50 000 harmonisée (base de données du BRGM)

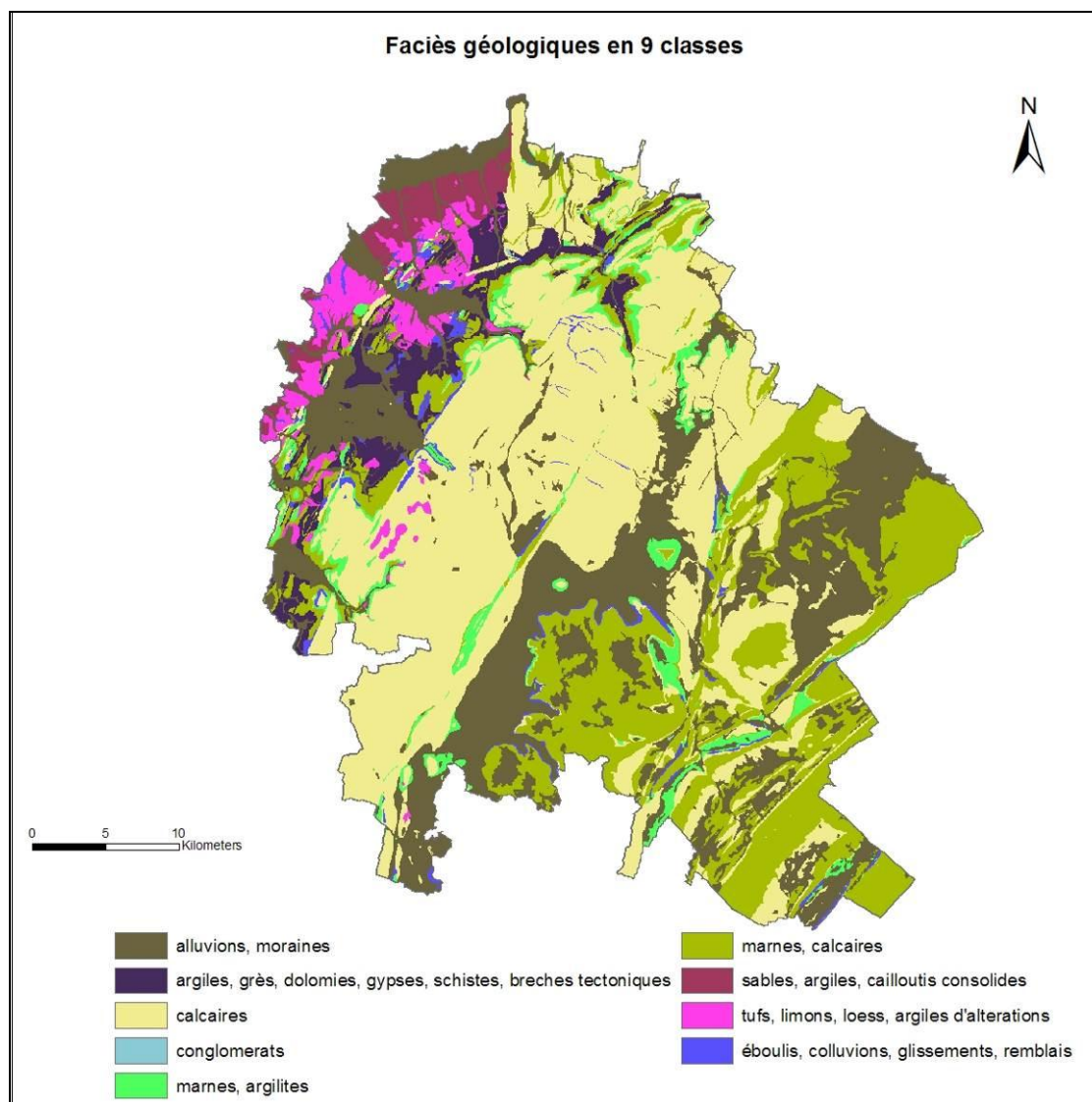


Figure 38 - Zone pilote du Jura : Regroupement des faciès en 9 classes

Caractérisation hydrologique

Concernant cette information, il s'agit d'obtenir une carte de ruissellement. Cette carte est représentée par des valeurs indicatives sur le ruissellement global calculé à partir de deux paramètres : 1) l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux, IDPR et 2) l'Occupation du Sol, OCS.

L'indice IDPR indique les endroits où l'eau est préférentiellement drainée du sol vers le sous-sol « dans l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène, de perméabilité nulle ». L'IDPR a été créé pour réaliser des cartes nationales ou régionales de vulnérabilité des nappes souterraines. Il permet une approche qualitative de l'aptitude des formations du sous-sol à laisser s'infiltrer les eaux de surface vers le milieu souterrain.

Dans l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène, seule la pente et la morphologie des reliefs guident la mise en place des cours d'eau. Mais dans le milieu naturel, les structures géologiques et la composition du sous-sol peuvent aussi avoir une influence significative sur l'établissement des réseaux hydrographiques. La densité de drainage est donc un indicateur révélateur des propriétés des formations géologiques. Un bassin formé de matériaux très perméables aura en général une densité de drainage faible. A l'inverse, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes ou des argiles, va souvent présenter une densité de drainage élevée. L'IDPR constitue un moyen de quantifier ce rôle en comparant un réseau théorique établi dans l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène (indice de développement ID), au réseau naturel mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (de persistance des réseaux PR).

L'indice de développement et de persistance des réseaux présente une métrologie de l'écart constaté entre les deux réseaux.

Les traitements nécessaires ont été développés pour ArcView par le CRWR (Center for Research in Water Ressources). Les données en entrée sont la BD CARTHAGE de l'IGN et le MNT de la BD Alti IGN.

L'IDPR calibré de 0 à 100% permet de constituer une grille de valeurs régionales nommée Rglobal, avec :

- Rglobal < 50 : « Infiltration majoritaire par rapport au ruissellement superficiel »,
- Rglobal > 50 : « Ruissellement superficiel majoritaire par rapport à l'infiltration vers le milieu ».

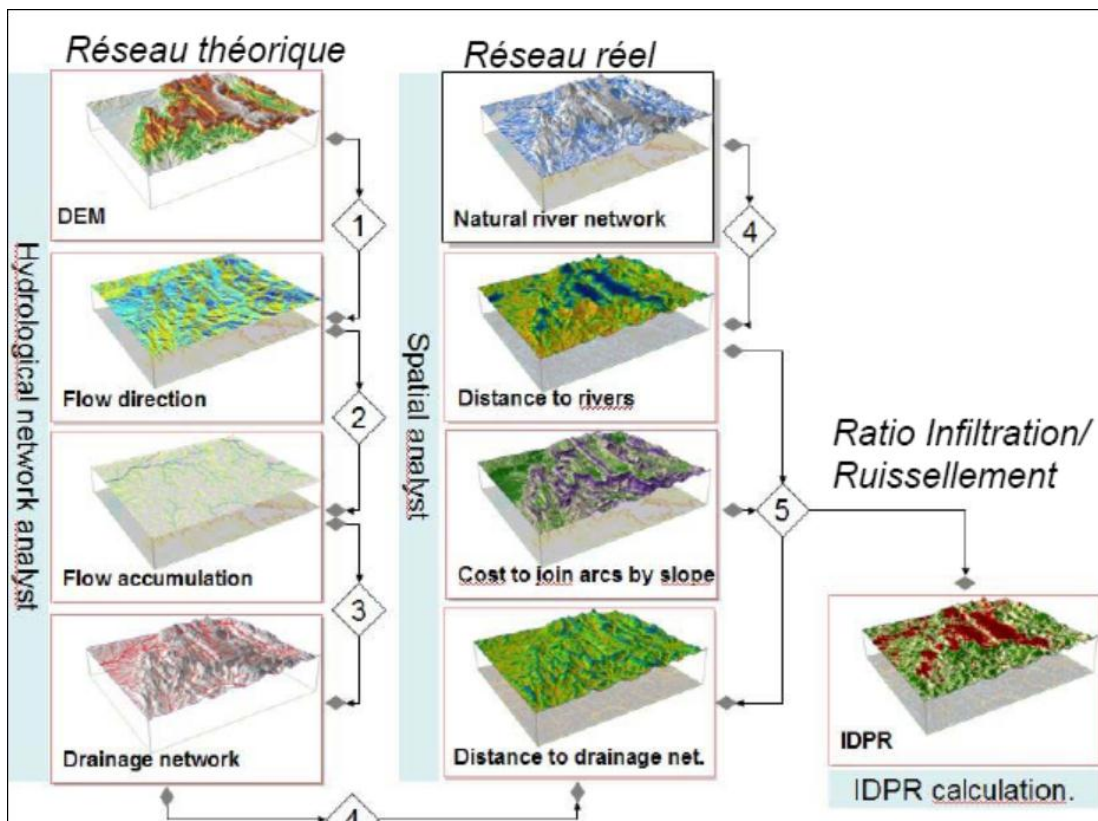


Figure 39 – Principe du calcul de l'IDPR

La seconde variable, OCS, relative à l'occupation des sols (information issues de Corine Land Cover) permet de mieux tenir compte des variations locales d'organisation du territoire. Dans le cadre de la méthode SDR-MVT, elle est discrétisée en 6 classes :

- Zones urbaines
- Territoires agricoles
- Prairies, pâturages
- Forêts et broussailles
- Zone humide
- Surface en eau

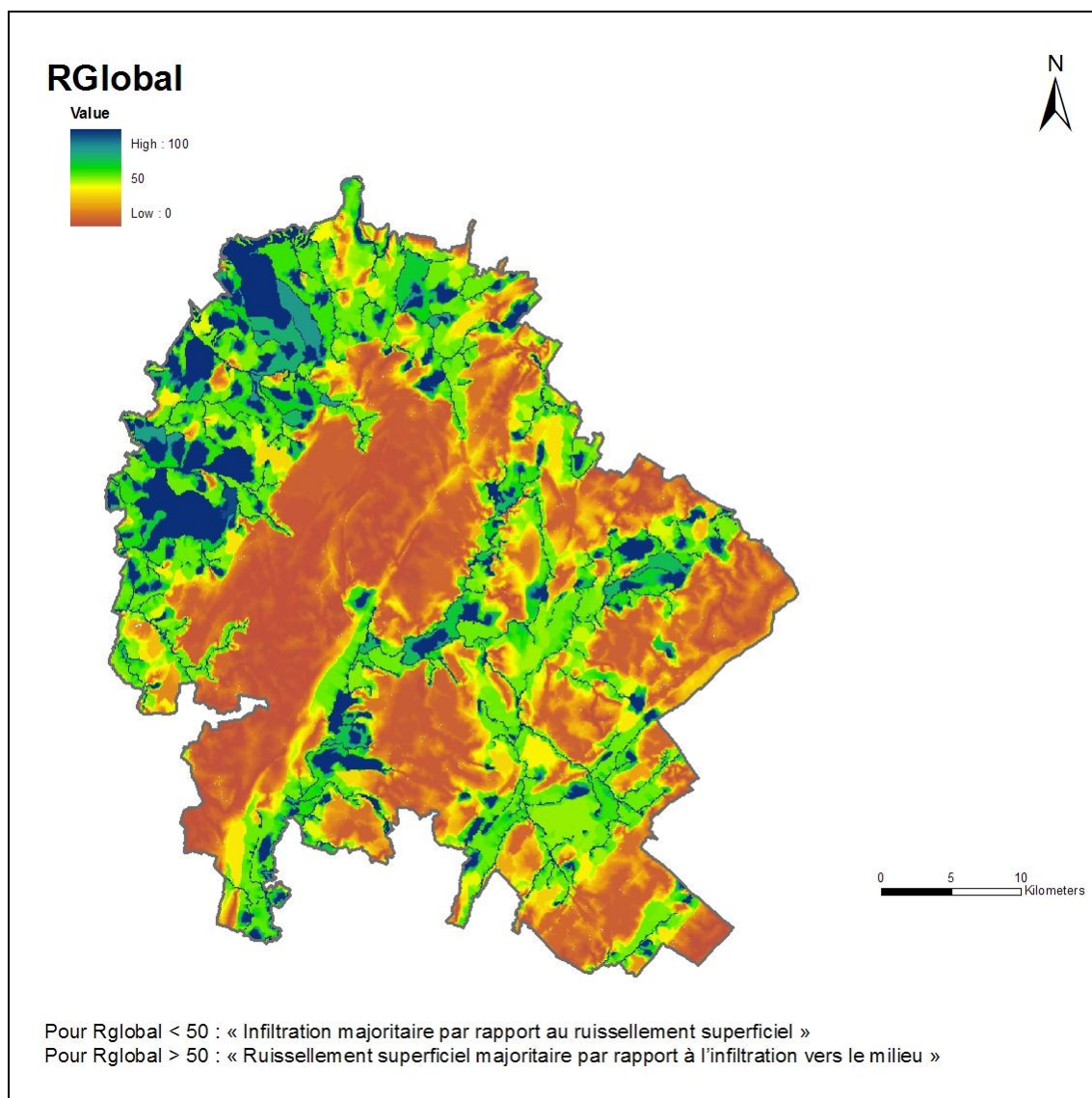


Figure 40 – Zone pilote du Jura : Carte de l'indice de ruissellement Rglobal

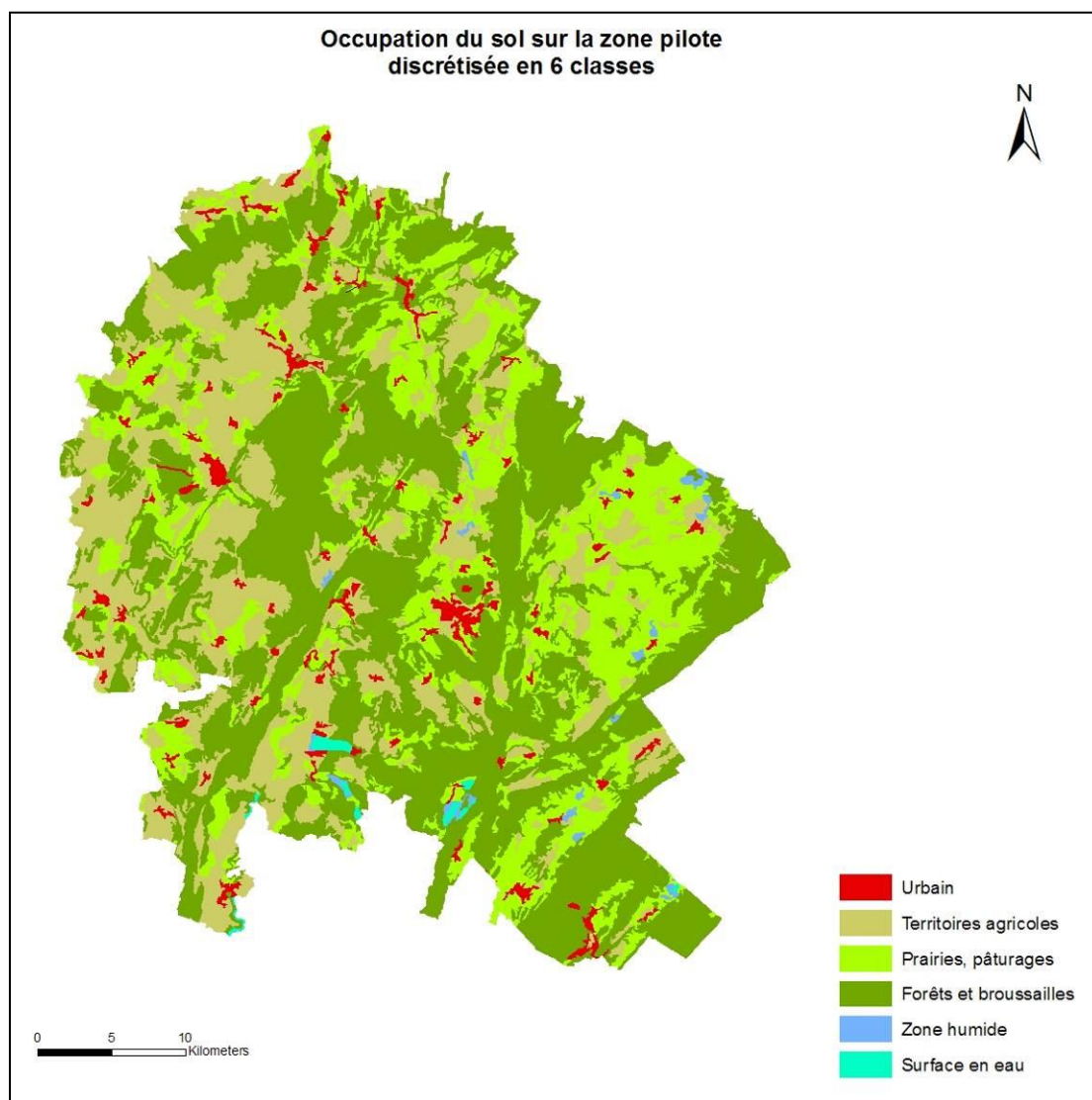


Figure 41 – Zone pilote du Jura : Carte de l'occupation des sols discrétisée de 6 classes

A partir des variables R_{global} et OCS, une mise en relation linéaire simple est réalisée par attribution de valeurs types de coefficient de ruissellement pour une OCS donnée.

Le résultat de cette analyse hydrologique donne une couche nommée « R_{local} ». Les valeurs s'étalent sur une échelle de 0 à 1, respectivement du moins au plus ruisselant.

La Figure 42 présente la carte du « Rlocal » classée en 5 classes de valeurs.

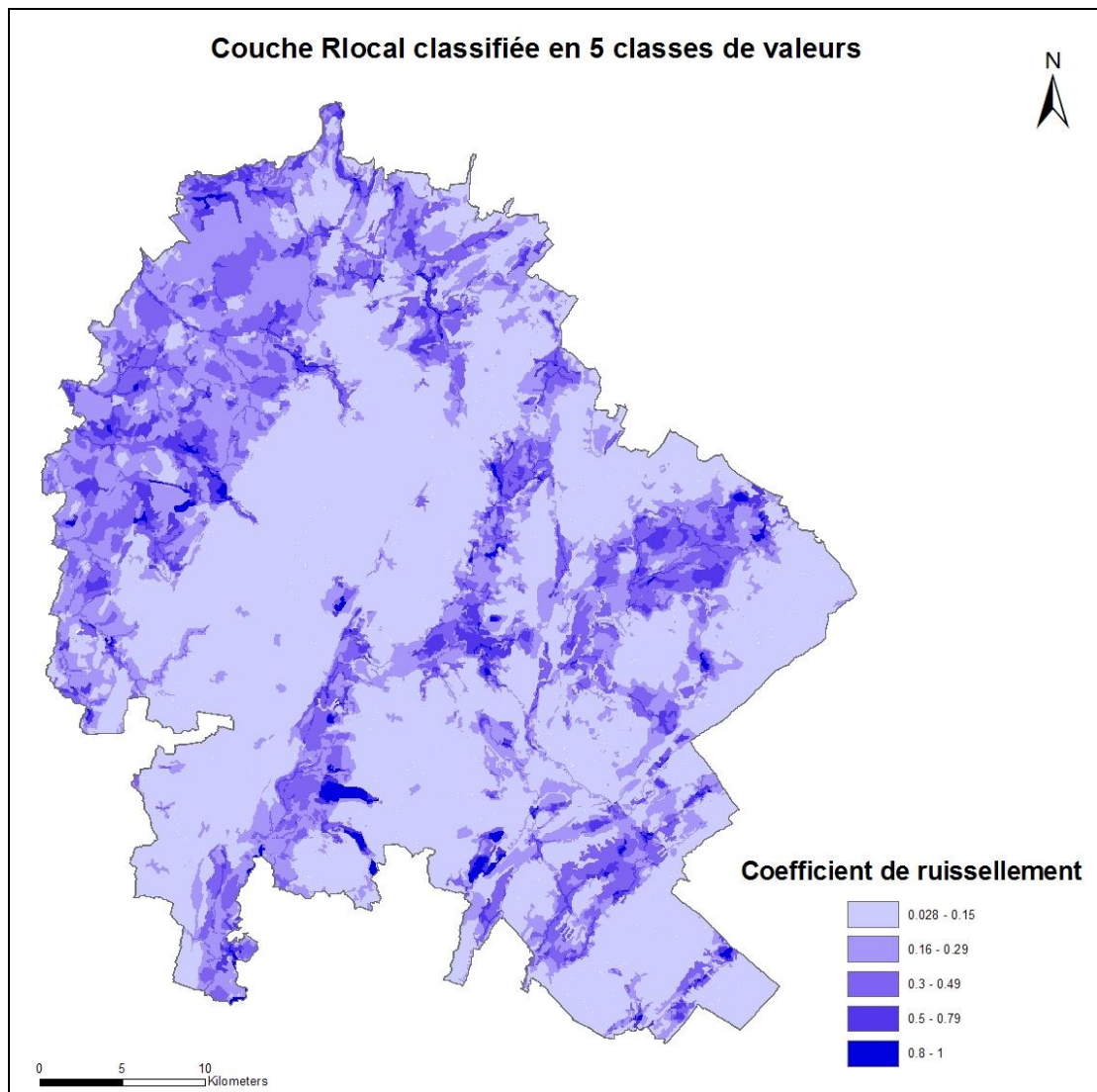


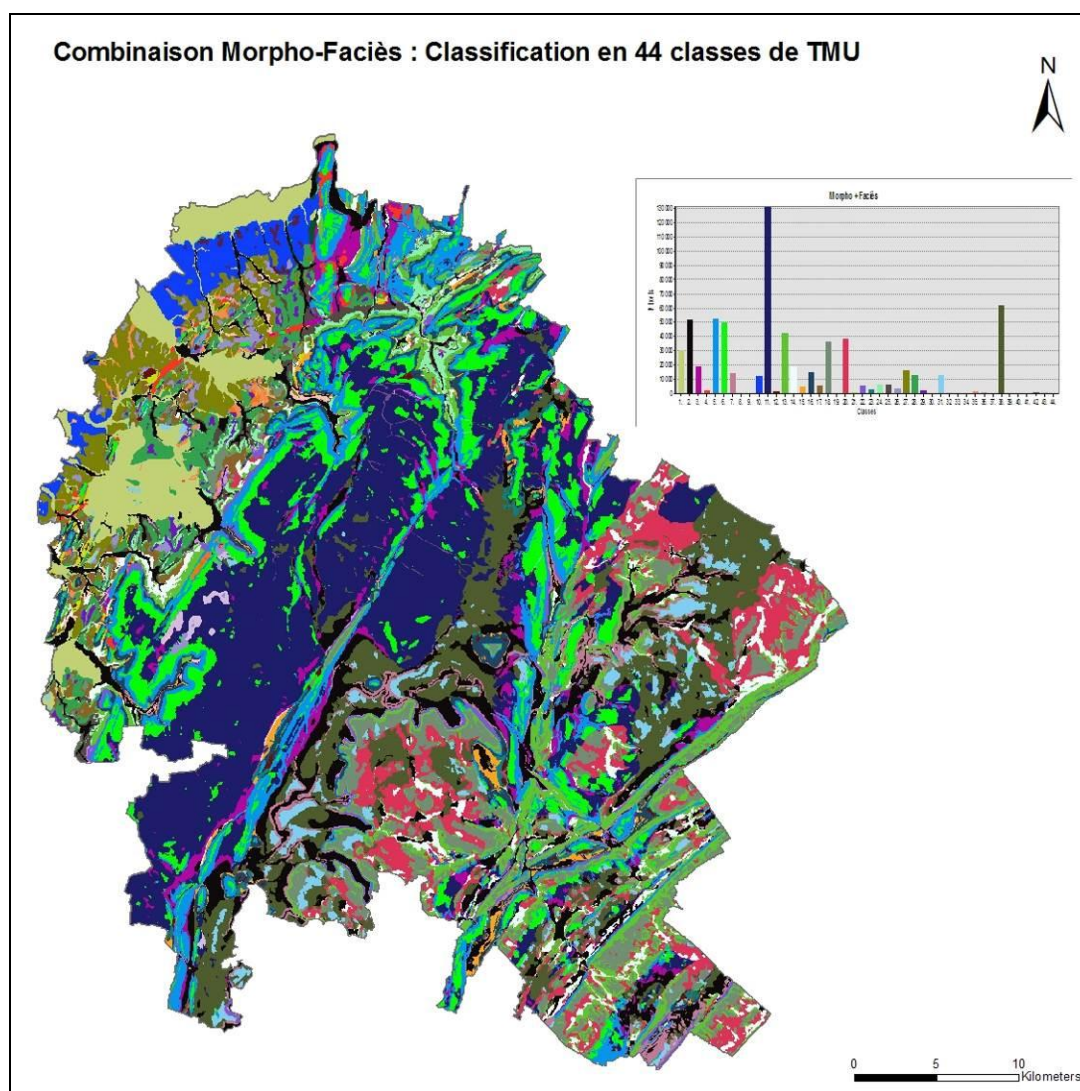
Figure 42 - Zone pilote du Jura : Carte des valeurs du coefficient de ruissellement local, Rlocal

Plaine cultivée et vallées urbanisées ressortent comme assez à très ruisselantes. Inversement plateaux calcaires et montagnes boisées apparaissent peu ruisselants.

7.2.3.2 Classification et cartes des TMU

Sur la base d'une analyse comparative des environnements morphologiques et géologiques, il s'agit d'individualiser les principaux types d'unités de terrain, chaque type étant caractérisé par une combinaison de valeurs morphologiques et de faciès spécifiques.

En théorie, il y a au maximum 45 types de TMU possibles au niveau de la zone d'étude : 5 classes morphologiques x 9 classes de faciès. (cf. Figure 35 et Figure 38). Pour la zone d'étude 44 types de TMU sont identifiés.



7.2.4 Etape 2 : Validation de la typologie TMU, Identification des TMU sensibles, affectation des caractéristiques moyennes

A ce stade du travail, il s'agit de :

- vérifier la cohérence du découpage en TMU et leur classification en 44 classes,
- préciser les facteurs de classification si nécessaire
- caractériser par une colonne de sols type, et donner une estimation des paramètres géotechniques moyens correspondant pour les TMU a priori les TMU sensibles.

7.2.4.1 Validation de la typologie TMU

Parmi les combinaisons possibles, certains TMU présentent des conditions a priori défavorables à la stabilité des pentes. Cette discrimination a priori est complétée par la comparaison entre la répartition des différents types de TMU avec celle des mouvements de terrains historiques ou actuels, sachant que les TMU déjà exposés à des mouvements de terrain présentent a priori des conditions environnementales plus sensibles aux instabilités de versant.

Ce travail de validation s'appuie sur un contrôle sur le terrain de la cohérence du découpage en TMU obtenu précédemment. Des ajustements dans la classification de valeurs morphologique et/ou géologique peuvent apparaître nécessaires pour une meilleure adéquation entre les TMU a priori sensibles et les observations de terrain et données historiques.

En exemple, concernant la zone du Jura, sur la base de la carte préliminaire de TMU, et après nouvelle analyse de terrain, une nouvelle classification des pentes a été réalisée. En effet, même si la classification en 3 classes de pente restait suffisante pour le calcul du TPI (cf. **Annexe 4**), il est apparu nécessaire de préciser les limites de classes de pente critiques par rapport à la stabilité des terrains. Ainsi, l'analyse sur le terrain et la comparaison avec les événements historiques a conduit à définir 4 classes de pente, et ce indépendamment des faciès lithologiques considérés (Figure 44). Il est considéré que dans le cas de faciès sensibles aux glissements, ces derniers sont susceptibles d'apparaître dès lors que la pente est supérieure à 5°.

De même il est apparu nécessaire de préciser la classification des faciès géologiques de certaines formations en précisant leur subdivision et leur contour d'après les cartes géologiques non harmonisées.

Il s'agit dans le cas du Jura, des formations d'âge Charmouthien et Toarcien.

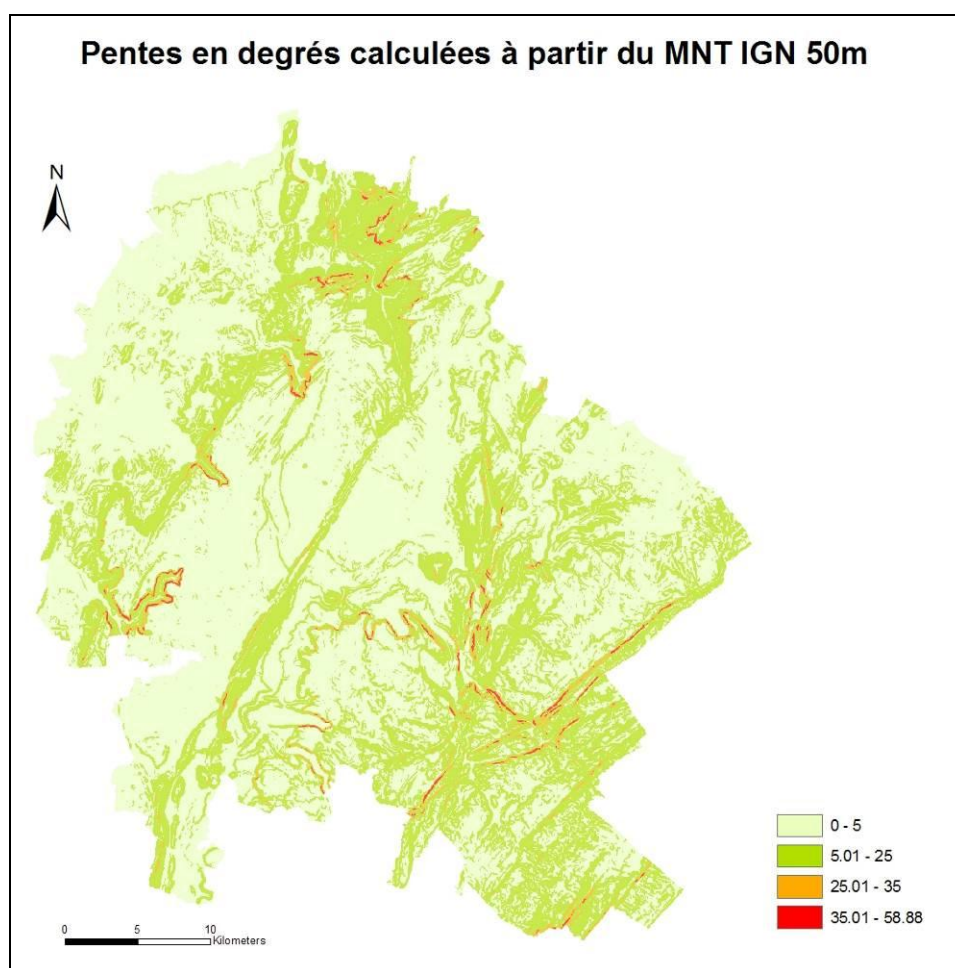


Figure 44 – Zone pilote du Jura : Nouvelle classification des pentes

Le Charmouthien (Figure 45) est intégré à la formation I3 de la carte géologique harmonisée qui regroupe les "Calcaires argileux (à *Pleuroceras*), marnes à *Amaltheus*, oolites ferrugineuses à *Stokesi*, (Banc de Davoei), calcaires à *Belemnites*, lacunes (*Pliensbachien*)". Au niveau du premier regroupement des faciès réalisé pour la mise en place des TMU, le Charmouthien avait donc été placé dans la classe "marnes, calcaires".

Par contre, la carte géologique non harmonisée au 50 000^{ème} différencie la formation Charmouthien du I3 en l'indexant dans les formations I4. Cette formation est présente principalement autour de Salins les Bains, Poligny et un peu vers Champagnole. Elle donne lieu à des glissements fréquents mais localisés comme indiqué dans la notice géologique de la feuille numéro 0556 de Salins-les-Bains :

« Charmouthien ». Dans le Jura, on réunit classiquement, sous ce vocable, un ensemble de marnes et de calcaires marneux ou gréseux qui correspond au Domérien, au Carixien et à une partie du Lotharingien. Ces niveaux n'affleurent qu'à la suite de glissements, fréquents mais localisés, et ne peuvent donc être différenciés cartographiquement sur toute l'étendue de la feuille. »

Des observations de mouvements de terrain impliquant la formation du Charmouthien ont en effet été faites en plusieurs endroits.



Figure 45 - Photos terrain de la formation Charmouthien

La carte lithologique prise en référence a donc était modifiée pour tenir compte de cette formation. Enfin, le faciès Charmouthien regroupé initialement avec les « marnes, calcaires » a été extrait de la classification de faciès initiale et intégré au faciès « Marnes, Argilites ».

De façon comparable, le Toarcien est regroupé au niveau de la carte géologique harmonisée de Salin-les-Bains avec les formations de base du Toarcien inférieur et

moyen (I4ab) à faciès "Schistes carton, marnes à "miches", argilites, lacunes (Toarcien inf. et moyen)" (I4ab). Ce faciès avait donc été intégré initialement dans la TMU "Marnes, argilites".

Néanmoins des traces de mouvements de terrain sont observées au niveau de cette formation. Laquelle est par ailleurs distinguée du I4ab, puisque elle est notée en I5 sur la feuille de Salins-les-Bains. Nous avons donc reprécisé ce découpage au niveau de la carte et de la classification des faciès.

Cela concerne aussi les formations du "Aalénien et Toarcien" (I5-6) de la feuille de Champagnole près du village "Les Nans", intégrée dans la formation "Marnes (Toarcien-Aalénien indifférenciés)" (I4-j1) de la base géologique harmonisée et de fait placée initialement dans la TMU "Marnes, argilites".

D'un point de vue méthode, il peut donc être utile de se référer aux cartes géologiques initiales (non harmonisées), par endroits plus détaillées s'agissant des découpages lithostratigraphiques.

7.2.4.2 Identification des TMU sensibles

Réalisé ultérieurement, le calcul de F_s impose de connaître les caractéristiques mécaniques des TMU. Ce calcul sera réalisé sur les zones les plus exposées aux glissements. L'identification des « TMU sensibles » concerne donc la détermination a priori des zones les plus exposées aux glissements de terrain. Sachant qu'il sera ensuite nécessaire de définir pour chacun d'eux les caractéristiques mécaniques correspondantes.

Pour cela, une analyse en retour des mouvements anciens ou actuels est réalisée. Cette analyse permet de mettre en évidence les unités de terrain déjà soumises à des glissements, Figure 46. Concernant les autres unités aux caractéristiques morphologiques et géologiques comparables, donc appartenant au même type de TMU, on suppose que ces unités sont elles aussi exposées à des instabilités.

Cette analyse en retour concerne dans un premier temps l'identification des faciès les plus sensibles, puis dans un second temps les valeurs de pente critiques.

Ainsi concernant la zone pilote du Jura, sur un total de 58 points de mouvements de terrain géoréférencés, quatre types de TMU caractérisés par des faciès distincts sont apparus comme particulièrement sensibles aux phénomènes de glissements de terrain. Le Tableau 11 indique les ratios de fréquence calculés pour chaque surface normalisée des TMU au niveau desquels des mouvements de terrain ont été notés. Ses résultats indiquent que, la TMU "Versants marnes, argilites" est classée parmi l'une des plus sensibles.

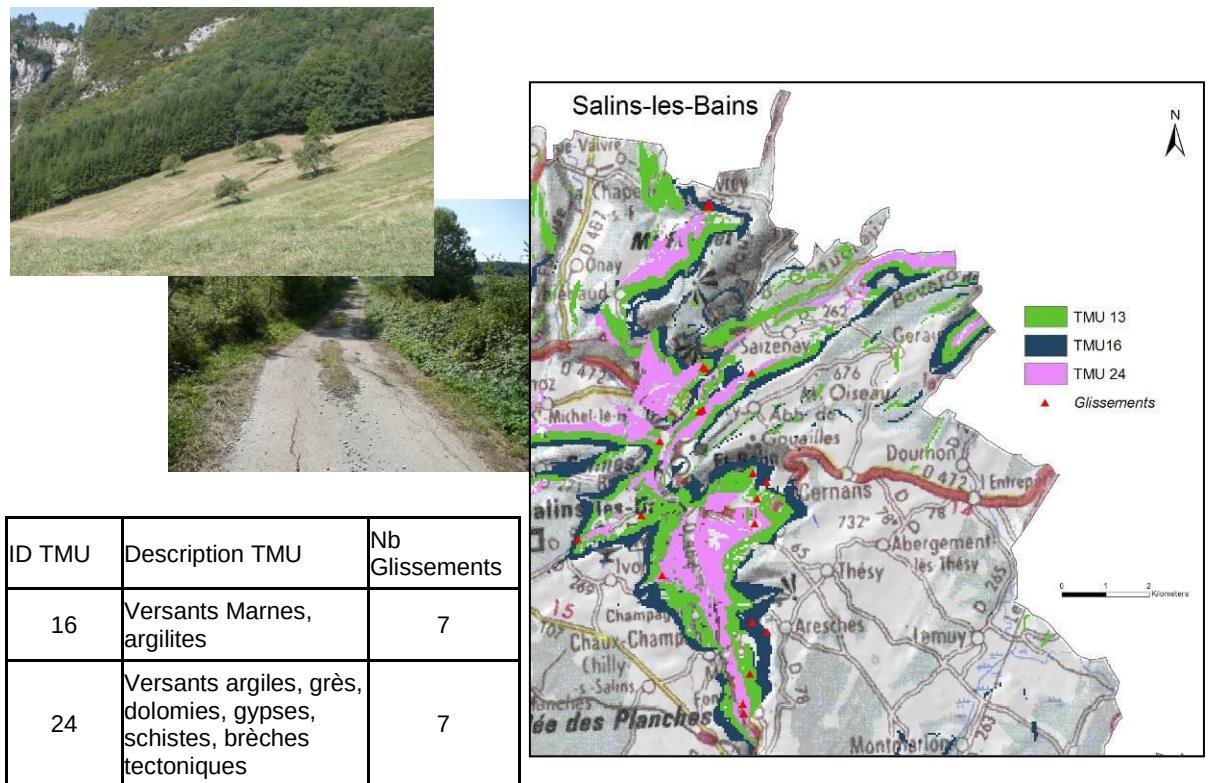


Figure 46 – Zone pilote du Jura : exemple de la superposition des TMU avec les glissements référencés

id TMU	TMU_name	freq_ratio
7	Versants alluvions, moraines	1.14
24	Versants argiles, grès, dolomies, gypses, schistes, brèches tectoniques	4.64
22	Versants éboulis, colluvions, glissements, remblais	4.99
16	Versants marnes, argilites	5.43

Tableau 11 - Zone pilote du Jura : Les 4 types de faciès retenus comme sensibles d'après la localisation des mouvements de terrain observés

L'inventaire des mouvements de terrain permet une première indication des types d'unités de terrain les plus exposés aux glissements. Néanmoins, il peut apparaître nécessaire de compléter cette première indication en ajoutant à cette liste de TMU dits « sensibles » d'autres types de TMU qui semblent eux-aussi a priori susceptibles de subir des glissements de terrain, même si à ce jour et d'après l'inventaire, aucun mouvement n'y a été localisé. Cela n'a pas été le cas pour la zone pilote.

Par contre, les faciès « marnes, argilites » et « argiles, grès, dolomies, gypses, schistes, brèches tectoniques » ont été regroupés du fait de leurs caractéristiques mécaniques très proches.

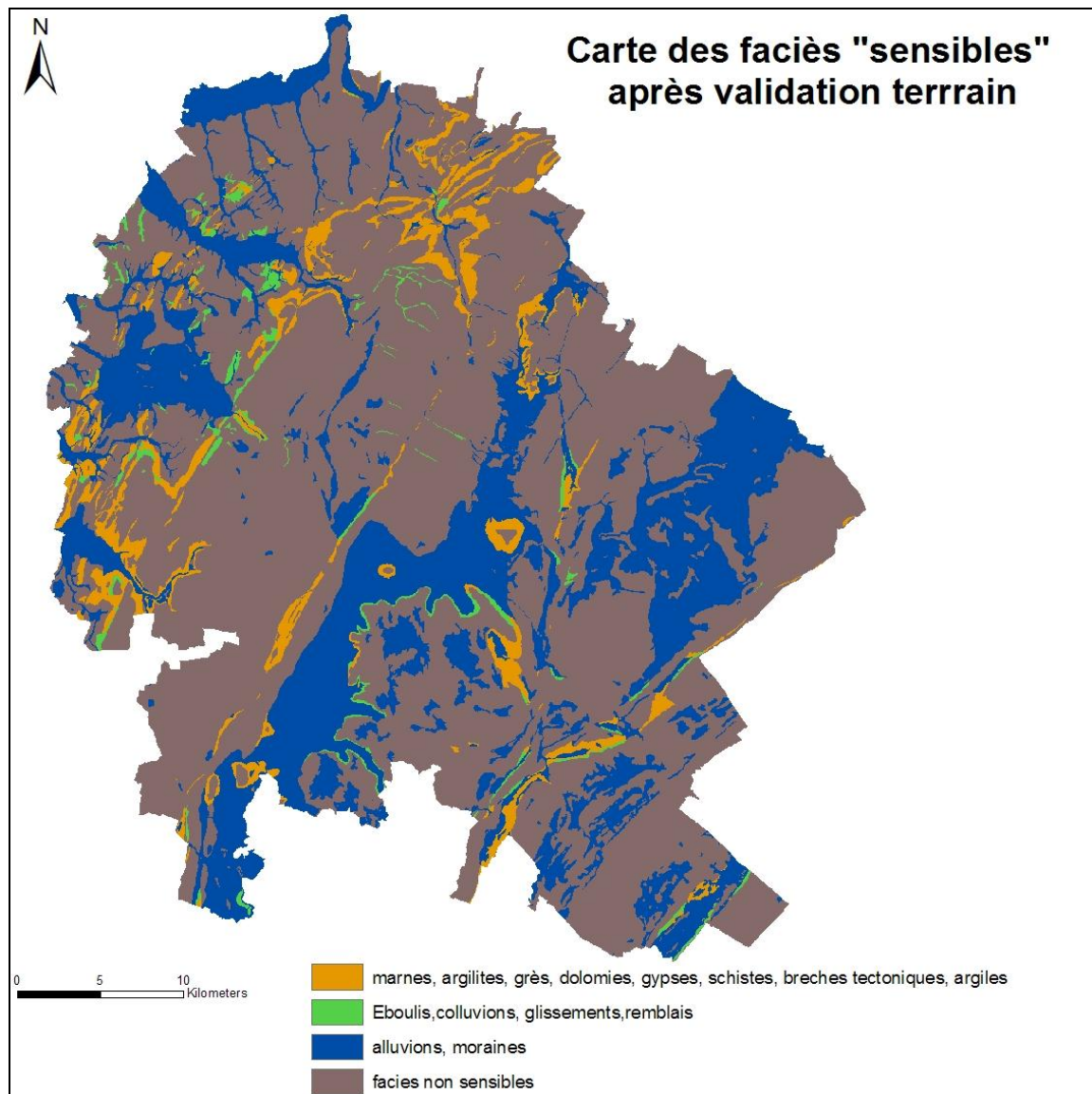


Figure 47 – Zone pilote du Jura : Carte des faciès sensibles aux glissements de terrain

7.2.4.3 Carte des TMU sensibles

Les TMU sensibles aux glissements de terrain sont finalement calculés par croisement entre les classes de pente critiques et la typologie des faciès sensibles.

Il s'agit au total de 9 types de TMU qui sont identifiés comme sensibles aux glissements pour la zone pilote (Figure 48).

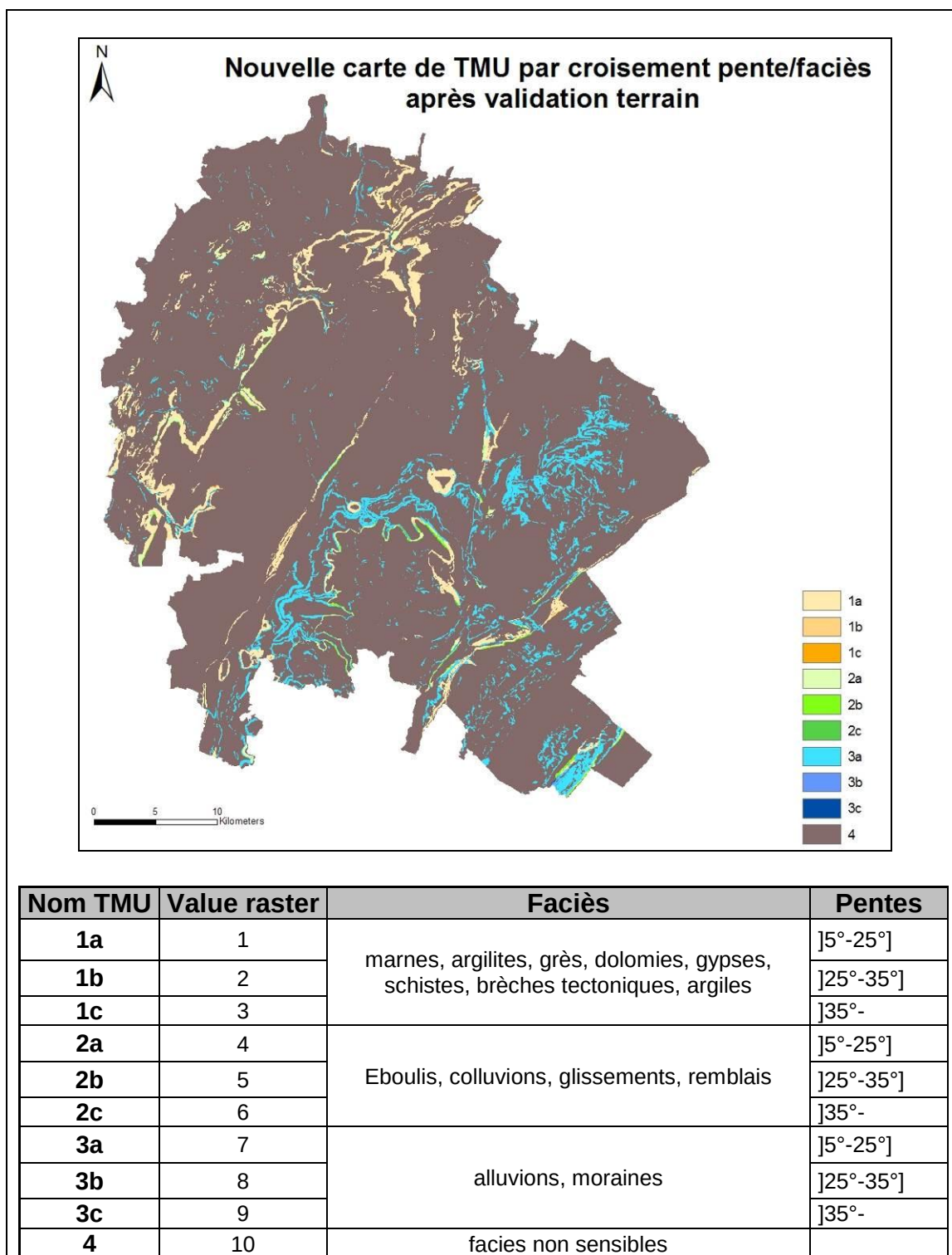


Figure 48 - Zone pilote du Jura : localisation des TMU sensibles aux glissements de terrain et table de correspondance nom du TMU/type faciès/classe de pente

7.2.5 Etape 3 : Calcul de la carte de Fs sous ALICE

La carte des TMU finalisée (Figure 48) représente la carte de zones nécessaires au fonctionnement d'ALICE pour le calcul de l'aléa aux glissements de terrains (cf. **Annexe 6**). Il s'agit maintenant de renseigner chacune d'elles par des caractéristiques mécaniques et des épaisseurs de couches.

7.2.5.1 Calcul des profils topographiques

ALICE calcule le facteur de sécurité des pentes le long de chaque profil topographique considéré. La procédure pour le traitement sous ALICE est présentée en **Annexe 6**.

En premier lieu, il est nécessaire de réaliser une carte des profils sur l'ensemble de la zone pilote. Les profils sont espacés de 50 m (correspondant à la maille du MNT). Cela correspond à la génération de 211 000 profils pour l'ensemble de la zone pilote.

Ensuite, une sélection des profils croisant tout ou en partie les TMU sensibles est conduite. Ce qui représente environ 47 000 profils. Il est en effet *a priori* inutile de traiter des profils qui n'affectent pas de couches sensibles.

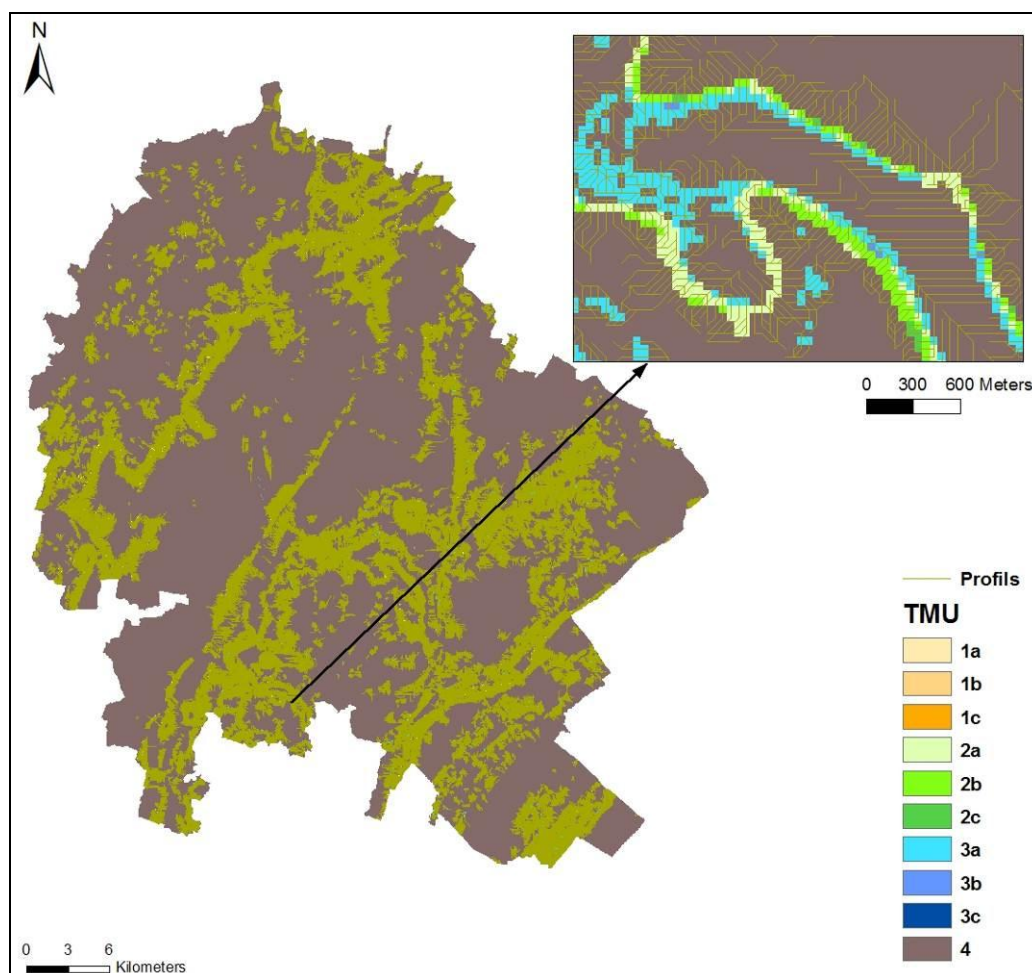


Figure 49 – Zone pilote du Jura : carte des profils croisant les TMU sensibles

7.2.5.2 Définition d'un modèle géologique/géotechnique 3D cohérent/adapté :

Estimation par l'expert des paramètres géotechniques pour les TMU 1a, 2a, 3a

Il faut noter que dans le cadre de cette étude, les caractéristiques mécaniques sont évaluées principalement par rétro-analyse des glissements de terrain historiques. Or, comme il n'était pas possible de connaître avec précision les niveaux d'eau responsables de l'apparition de ces mouvements, le parti a été pris d'estimer les caractéristiques à l'aide de *é®* de la société Terrasol ou d'ALICE en considérant les terrains comme secs. Il est clair que ce parti sous-estime fortement les caractéristiques mécaniques ainsi obtenues. Ces caractéristiques ne peuvent être utilisées que dans le cadre d'une évaluation de la stabilité globale des pentes sur la zone d'étude en considérant que les conditions hydrométéorologiques sont partout les mêmes que celles qui ont présidé au déclenchement de ces glissements. En aucun cas elles ne pourraient être utilisées à d'autres fins.

On aurait pu a contrario considérer les terrains comme complètement saturés, donnant ainsi lors de la rétro-analyse de meilleures caractéristiques mécaniques aux terrains. Mais ignorant la réalité des conditions hydriques, ce principe aurait conduit à une surestimation des caractéristiques des terrains, ce qui ne va pas dans le sens de la sécurité en cas d'utilisation abusive de ces caractéristiques pour des calculs de stabilité de talus.

Dans un cas comme dans l'autre, ce type de choix s'explique par l'imprécision des connaissances que l'on a sur les niveaux d'eau dans les sols à l'échelle de la zone d'étude.

La rétro-analyse des glissements de l'inventaire (cf. 6.2) a été réalisée avec l'aide du logiciel de calcul de stabilité de pente TALREN®.

Elle a concerné plus particulièrement les glissements de terrain situés sur la commune de Salins-les-Bains, ceux-ci ayant fait l'objet de suivi, d'acquisition de données et de diagnostics dans le cadre d'opérations de service public et de recherche. Le tableau suivant synthétise les glissements de la commune de Salins-les-Bains.

Nombre de glissements	Formations 1/50 000	Formations carte géologique harmonisée
17	l_4, l_5, l_{6-5}	$l_3, l_4-j_1, l_{4ab}, t_{6b1}$
2	$l_1 - t_9, t_9$	t_6b_{3-7}, t_6b_2
2	t_{8-7}	t_{6-7}

Sur le terrain, les sites de glissements présentent des pentes moyennes de 20° et en tout cas n'excédant pas 25°. Pour les mêmes sites, les valeurs de pentes extraites du MNT au pas de 50 m sont, la plupart du temps, inférieures aux précédentes, approximativement de 20 à 30% plus faibles.

Compte tenu de ce que l'on peut observer ou déduire des observations sur le terrain (pratiquement pas d'affleurements hormis les barres rocheuses) il apparaît que les pentes susceptibles de glisser sont comprises entre 15° et 30° , éventuellement 35° . Les pentes inférieures à 15° sont trop plates pour glisser, par contre les pentes supérieures au seuil haut (30 à 35°) sont telles que la couverture de sol susceptible de glisser a une épaisseur nulle à négligeable, et que le substratum rocheux est affleurant à sub-affleurant. L'imprécision de ces valeurs est induite d'une part par l'effet de lissage du MNT, d'autre part par les variations d'épaisseurs et de caractéristiques mécaniques du recouvrement superficiel.

Il apparaît que pour l'essentiel l'épaisseur des glissements actuels n'excède pas 5 m et leur longueur 40 à 50 m. Concernant l'eau, l'interprétation des données est plus délicate ; tout est humide mais il ne semble pas que les colluvions argileuses qui glissent soient le siège d'une véritable nappe libre. Elles sont peu perméables et des pressions interstitielles positives s'y développent.

En annexe 7 est rassemblée une série de profils TALREN participant de cette rétro-analyse, Figure 50 en exemple.

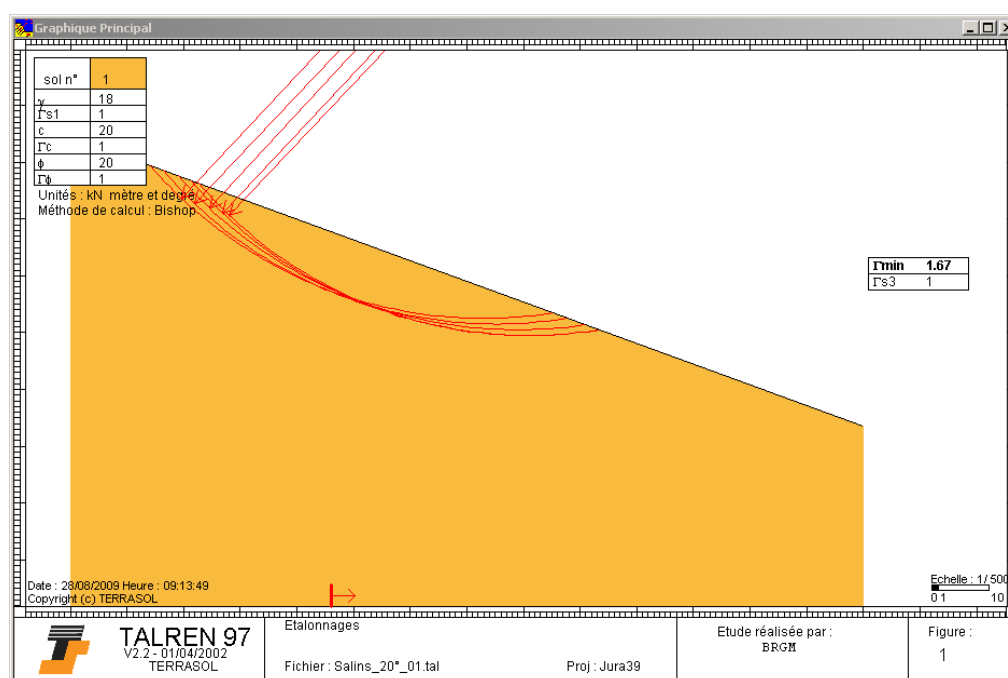


Figure 50 - Exemple de rétro calage pour ajuster les caractéristiques mécaniques

A partir des ajustements des caractéristiques mécaniques de l'étude paramétriques sur les glissements de Salins-les-Bains, il a été possible, en tenant compte des paramètres géologiques moyens pour les autres TMU, d'établir le tableau des caractéristiques mécaniques (Tableau 12) à prendre en compte dans le modèle géotechnique en s'appuyant sur le calcul des FS et aléa sur quelques profils clefs (pente/TMU), Figure 51 et Figure 52.

Au niveau de la cohésion, sa variabilité suit une distribution triangulaire, avec la valeur pic comme nombre principal, la différence avec sa valeur minimale en exposant, et celle avec la valeur principale en indice.

Au niveau de l'angle de frottement, sa variabilité suit une distribution normale, avec le nombre principal comme médiane, et l'écart type indiqué par le signe « $\pm$ ».

Nom TMU	Value raster	Faciès	Pentes	C(KPa)	Phi(°)	Gamma (KN/m3)	épaisseur (en m)
1a	1	marnes, argilites, grès, dolomies, gypses, schistes, brèches tectoniques, argiles	]5°-25°]	5^{-4}_{+4}	15 $\pm$ 5	20	5
1b	2		]25°-35°]	11^{-4}_{+4}	25 $\pm$ 5	20	2.5
1c	3		]35°-	90	45	22	0
2a	4	Eboulis, colluvions, glissements, remblais	]5°-25°]	1^{-0}_{+4}	25 $\pm$ 5	20	5
2b	5		]25°-35°]	11^{-2}_{+2}	35 $\pm$ 5	20	2.5
2c	6		]35°-	90	45	22	0
3a	7	alluvions, moraines	]5°-25°]	5^{-5}_{+5}	20 $\pm$ 5	20	5
3b	8		]25°-35°]	11^{-5}_{+5}	30 $\pm$ 5	20	2.5
3c	9		]35°-	90	45	22	0
4	10	facies non sensibles		90	45	22	0

Tableau 12 - Paramètres géotechniques moyens pour chacune des 9 TMU sensibles

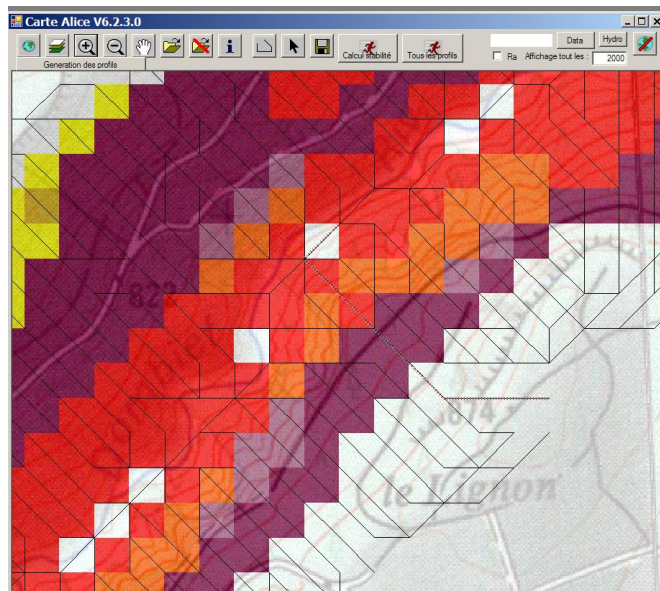


Figure 51 - Génération sous ALICE de profils clefs pour une vérification locale des caractéristiques mécaniques des TMU.

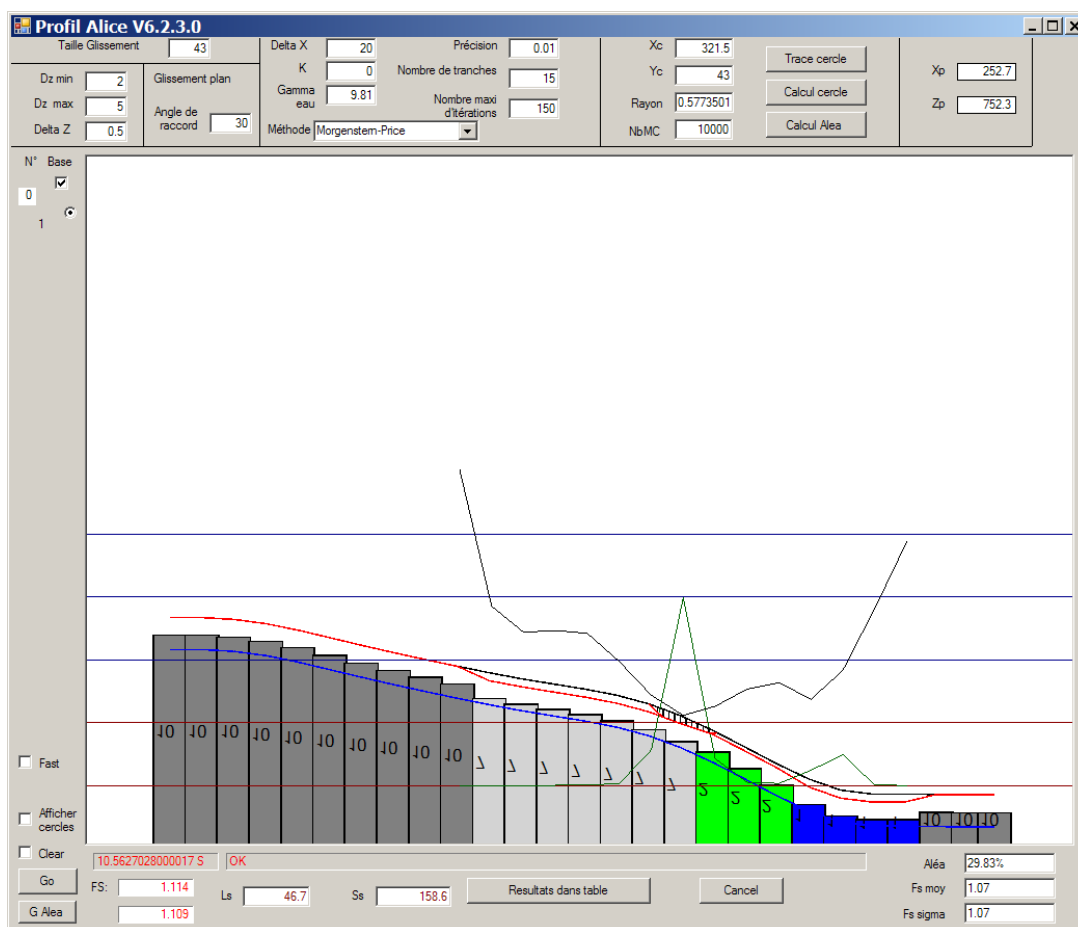


Figure 52 - Exemple de calcul ALICE® le long d'un profil clef

Constitution du modèle géotechnique ALICE®

Compte tenu de l'approche mis en œuvre pour les SDR-MVT, c'est la modélisation par zone qui a été choisi pour constituer le modèle géotechnique ALICE® (on se reportera à l'**Annexe 6** pour plus de détail sur la mise en œuvre). Le modèle est simple. Il est réduit à une couche superficielle sur le substratum (une interface).

Pour chaque zone, l'épaisseur de cette couche et ses caractéristiques mécaniques sont renseignées, à l'aide des valeurs du Tableau 12.

7.2.5.3 Calcul de la carte des FS sur l'ensemble des profils couvrant les TMU sensibles.

Le calcul de la carte des facteurs de sécurité (Figure 53), qui nécessite un faible temps de calcul (de l'ordre de quelques minutes), répond à plusieurs besoins :

- Cette carte permet d'avoir rapidement, dans un premier temps une bonne idée des niveaux relatifs d'aléa, un faible Fs étant a priori le signe d'un niveau d'aléa élevé.
- Elle permet un contrôle des données saisies, en mettant éventuellement en relief les zones où les résultats sont incohérents,
- Comme cela va être développé au chapitre suivant, elle peut servir de base au calcul d'une carte d'aléa.

Cette carte est calculée en prenant les valeurs pivots des cohésions, et médiane de l'angle de frottement.

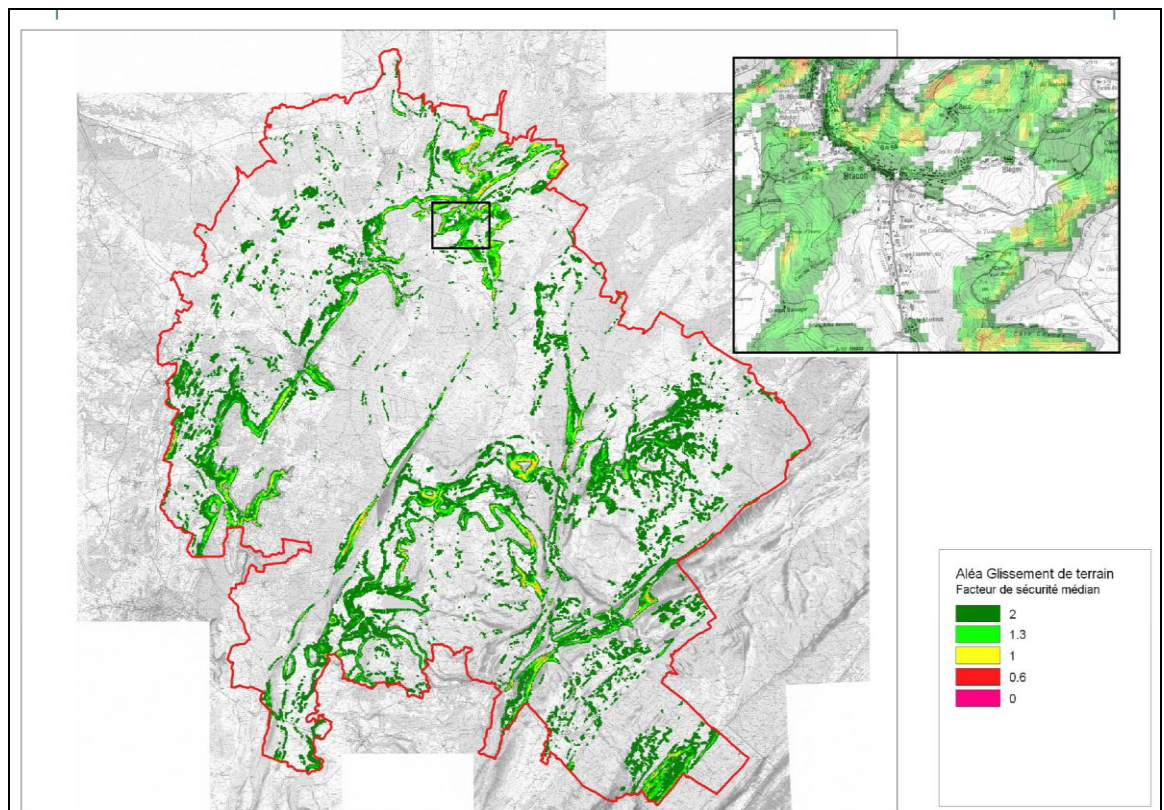


Figure 53 – Zone pilote du Jura : Calcul du FS pour toutes les TMU « sensibles »

7.2.6 Etape 4 : Calcul de la carte d'aléa

Une fois le modèle validé par la carte des Fs, il est possible de lancer le calcul de la carte d'aléa, en précisant le nombre de tirages Monte-Carlo que l'on veut effectuer pour chaque calcul de stabilité. La durée du temps de calcul sera directement proportionnelle à ce nombre.

Ces temps de calcul sont longs, pour des configurations informatiques « standards ». Même en optimisant au mieux les paramètres (distance entre deux glissements le long d'un profil, nombre de tranches, Monte-Carlo sur uniquement la cohésion et l'angle de frottement, nombre de tirage ...), optimisation qui va jouer sur la qualité du résultat, ces temps peuvent être jugés rédhibitoires.

C'est pour cela qu'au chapitre suivant est proposée une méthode alternative, qui permet, moyennant une perte certaine de précision (toutefois quantifiable), de réduire de manière significative les temps de calcul. C'est d'ailleurs cette méthode qui a été utilisée pour produire la carte finale, illustrée Figure 54.

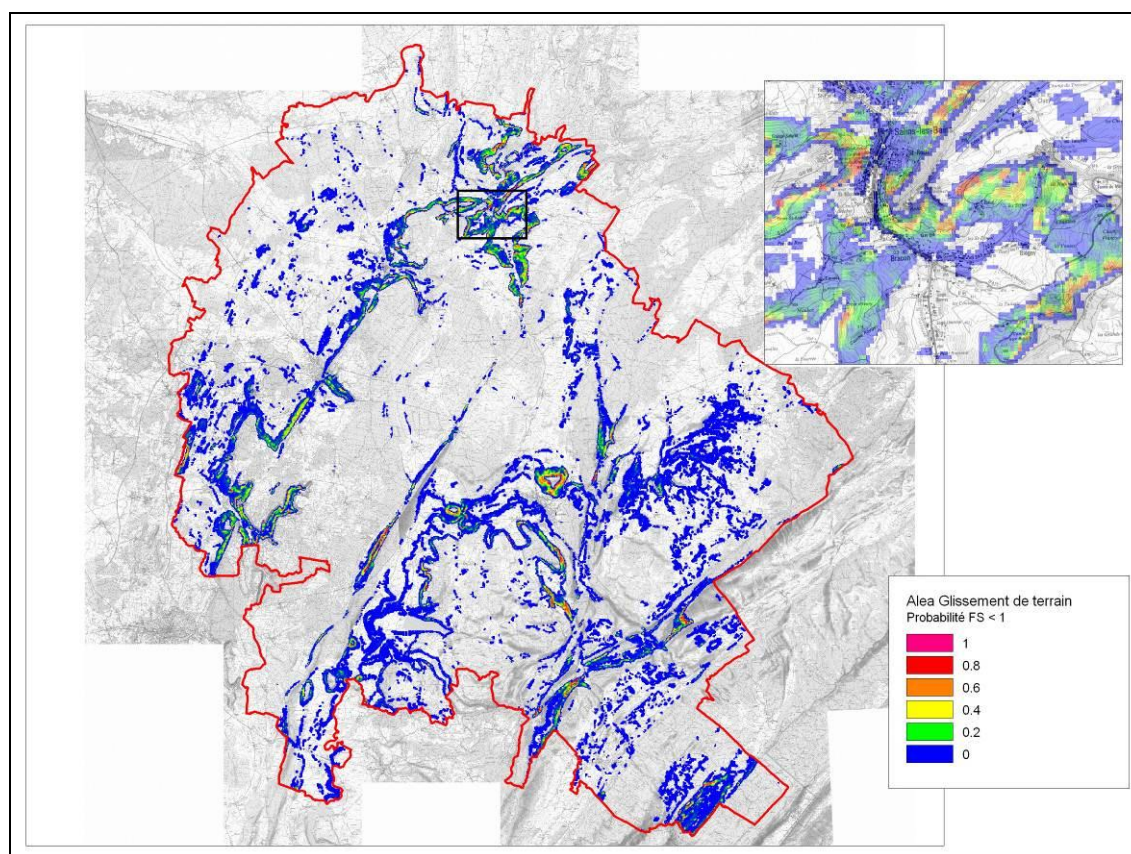


Figure 54 – Zone pilote du Jura : Calcul de la carte d'aléa aux glissements de terrain

7.2.7 Calcul de la carte d'aléa – variante pour réduire les temps de calcul

Relations FS / Alea

Pour pouvoir optimiser les temps de traitement de l'ensemble du pilote, nous avons vérifié s'il existait une corrélation entre la valeur du facteur de sécurité et la valeur de l'aléa, ce pour une TMU donnée.

Autant cette corrélation sera a priori faible, et en tout cas méthodologiquement non significative, si elle est calculée sans prendre en compte la TMU, autant on peut espérer qu'elle le soit dans le contexte lithologique et morphologique (pente) spécifique d'une TMU donnée.

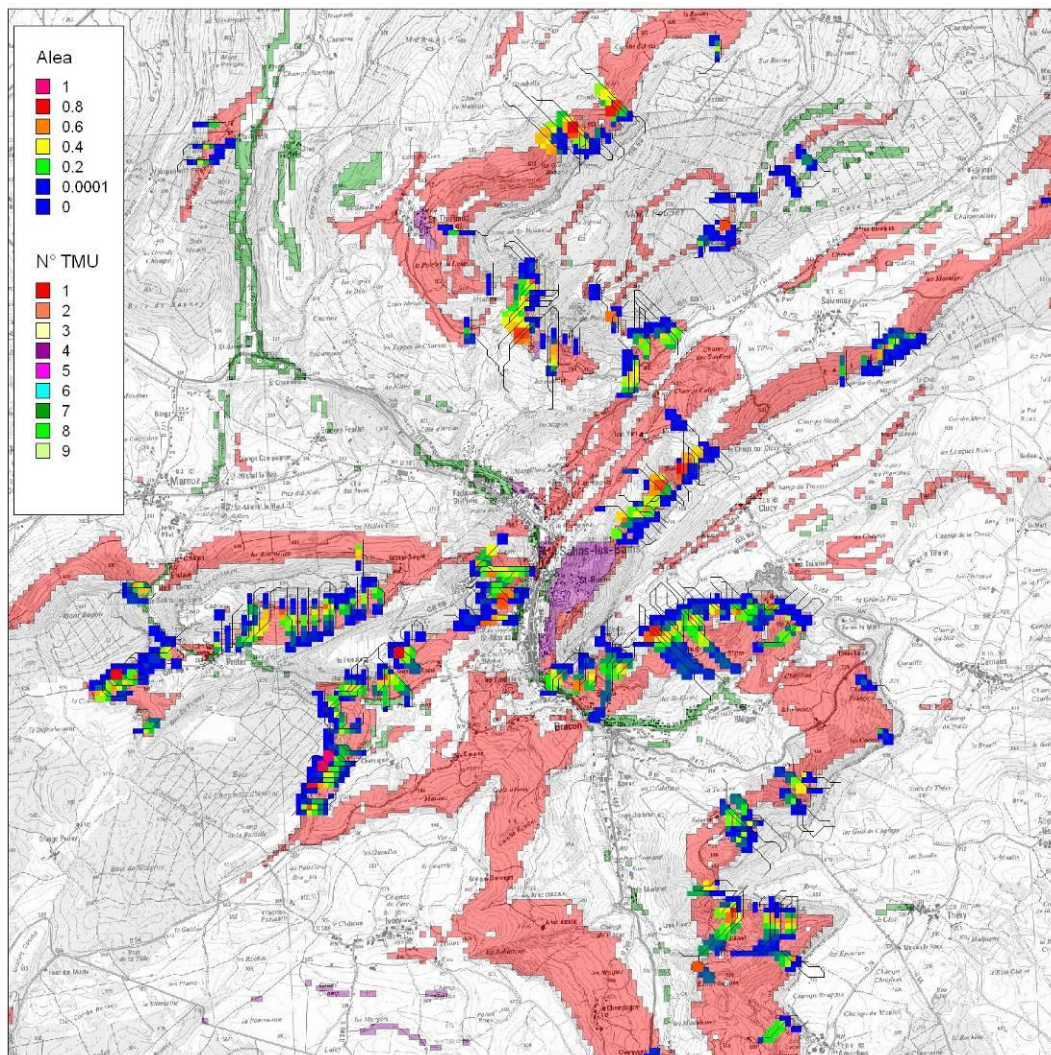


Figure 55 - Sélection et calcul d'aléa pour un certain nombre de profils interceptant la TMU n° 2.

Le but est de ne calculer qu'une carte de Fs, pour chaque TMU, et d'ensuite évaluer l'aléa en appliquant la fonction d'ajustement présentant la meilleure corrélation entre

FS et alea, dans la mesure où la valeur de la corrélation est satisfaisante. Cette valeur permet d'estimer par ailleurs l'erreur induite par cette approche, et donc d'estimer si le compromis est acceptable ou non.

Pour cela, pour chaque TMU, nous avons sélectionné par traitement SIG les profils qui l'interceptaient et en avons tiré un certain nombre (environ 800 profils par TMU sensible). Puis pour cette TMU nous avons calculé l'aléa le long de ces profils (Figure 55). Il est possible alors, en chaque maille où l'aléa a été calculé, de mettre en regard la valeur du FS (cf. chapitre 7.2.5.3), et de les reporter sur un graphique.

Une courbe de type Spline est alors ajustée aux données, puis tabulée (les Splines n'ayant pas d'expression analytique simple), Figure 56.

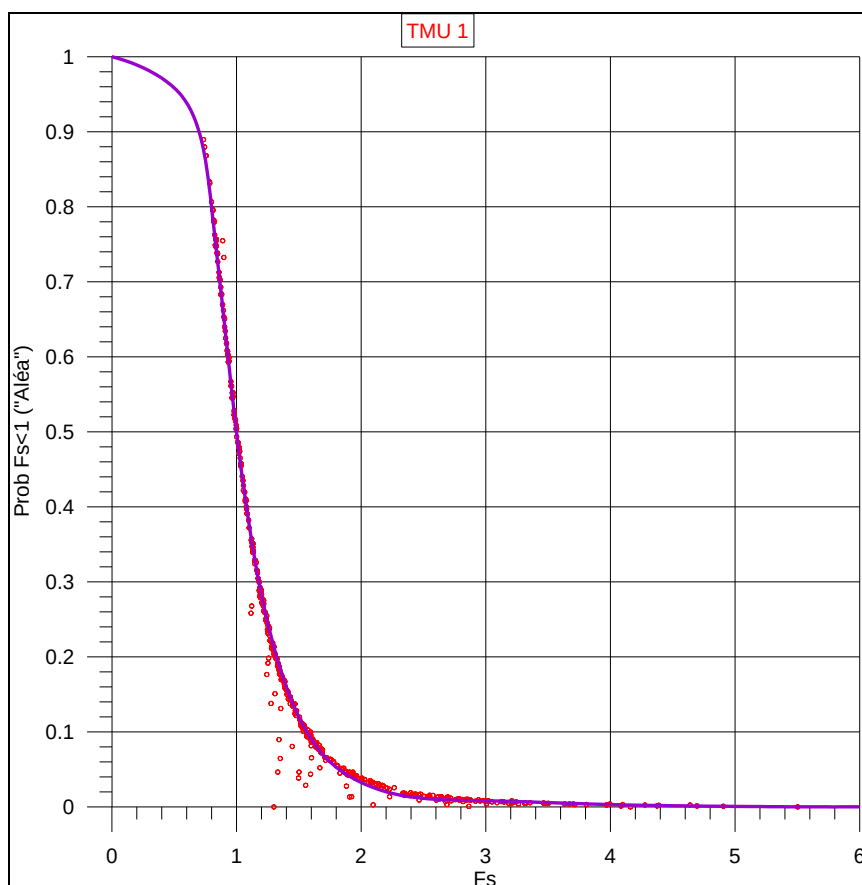


Figure 56 - Report sur un graphique des couples (Fs, Alea) et corrélation avec une courbe spline. Exemple de la TMU 1

Les points situés en dessous de la courbe résultent :

- soit d'un cercle (ou d'un plan) de rupture qui va intercepter des terrains de la TMU1, mais également d'une autre TMU,
- soit d'une géométrie de profil moins pénalisante qu'un plan (convexe) au niveau de la rupture).

Le fait d'appliquer la fonction d'ajustement a donc tendance à « maximiser » l'aléa, donc être sécuritaire.

Pour chaque TMU, une courbe de correspondance entre FS et Aléa est donc calculé, et, appliqué à la carte des Fs, permettant ainsi d'élaborer la carte d'aléa aux glissements de terrain (chapitre 7.2.5.3, Figure 54).

Relation Pente / Alea

Une autre voie d'optimisation pourrait passer par une relation simple entre pente et aléa, pour une TMU donnée. Cette approche permettrait d'éviter de faire non seulement des calculs d'aléa, mais même d'exécuter des calculs de stabilité (Fs) sur l'ensemble du territoire

Le graphique en Figure 57 montre toutefois une très grande dispersion, des corrélations mauvaises, et qu'en tout état de cause, la valeur d'ajustement peut être largement inférieure à la valeur d'aléa calculée avec le modèle. Cette voie d'optimisation a donc été abandonnée.

Par contre, comme il a été démontré plus haut, la démarche de calculs de stabilité en tout point du territoire, le long de profils, est beaucoup plus pertinente pour l'évaluation de l'aléa. C'est cette méthode qui a été retenue pour la réalisation des SDR-MVT.

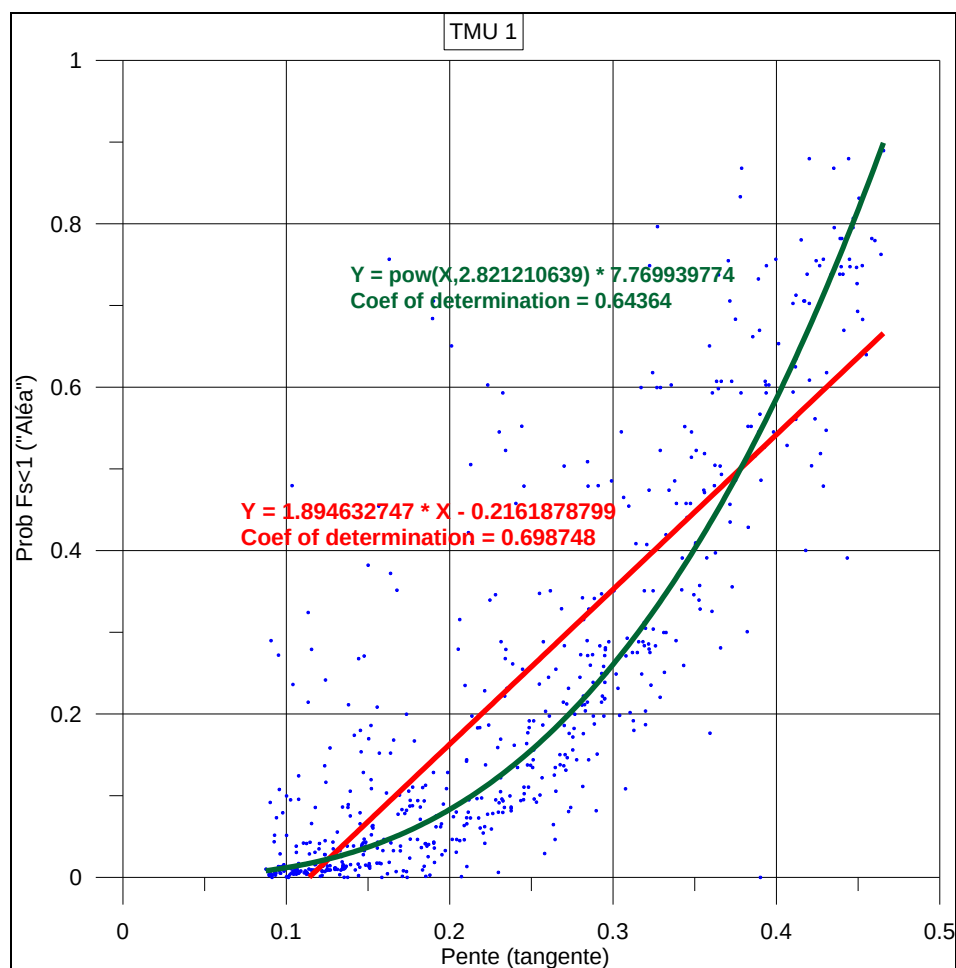


Figure 57 - Relation avec une très faible corrélation entre pente et aléa. (en rouge ajustement d'une droite avec $C = 0,7$, en vert, ajustement d'une fonction puissance $Y = X^a + b$ avec $C = 0,64$)

7.3 EVALUATION DE L'ALEA AUX CHUTES DE BLOCS

Une évaluation de l'aléa aux chutes de blocs comprend deux volets : 1) l'évaluation de l'aléa de rupture (zones de départ potentiel de blocs), qui va apprécier en un lieu donné la probabilité qu'un bloc se détache, et ce en fonction de sa taille ; 2) l'évaluation de l'aléa de propagation des blocs, qui, pour cette étude, va évaluer, en différents points situés en aval, la probabilité qu'un bloc détaché de la zone de départ passe ou atteigne ce point. En toute rigueur, d'autres paramètres pourraient participer à la quantification de cette composante de l'aléa (énergie du bloc, vitesse, hauteur de rebond, ...)

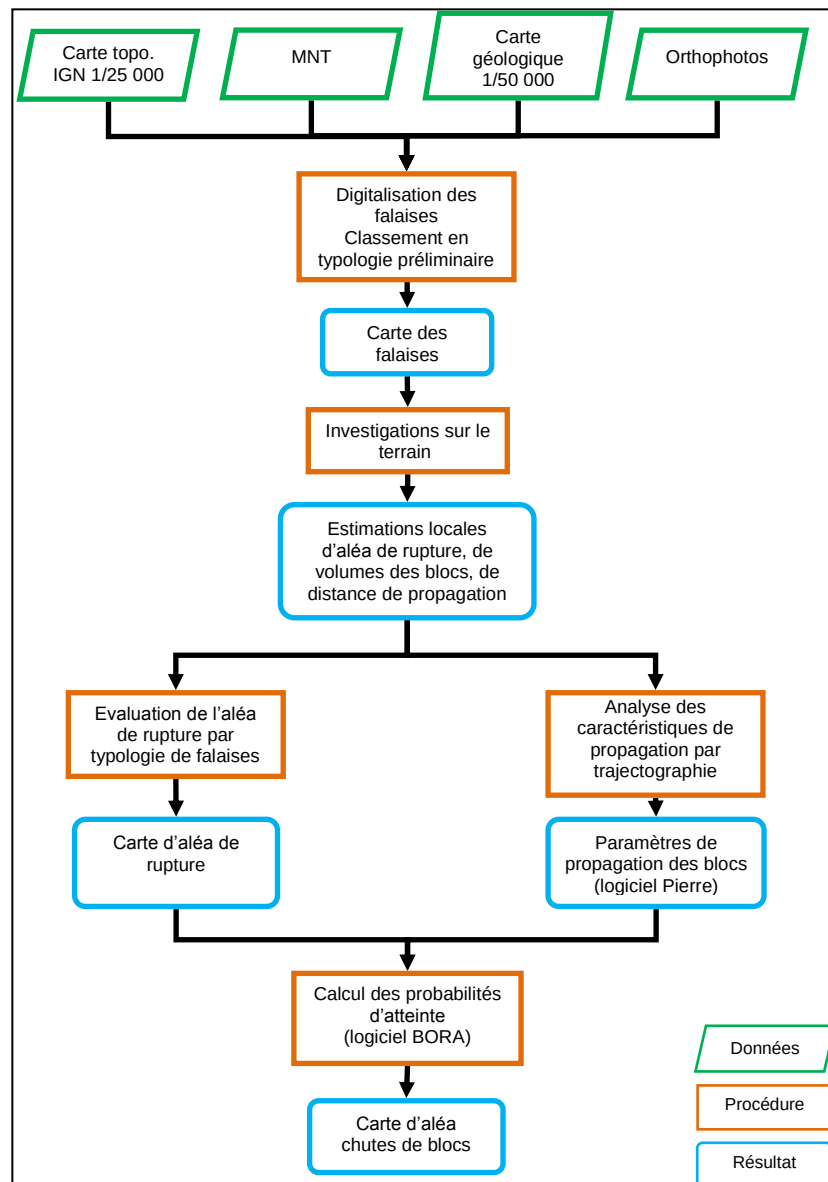


Figure 58 : Démarche pour la cartographie de l'aléa chutes de blocs

La démarche (Figure 58) est basée sur une évaluation d'aléa par expertise, appuyée par des simulations numériques (trajectographie). Il y a 5 étapes de traitements :

- Digitalisation des falaises et classement en une typologie préliminaire,
- Investigations sur le terrain pour valider la typologie des falaises (contexte morphologique et faciès lithologique impliqués),
- Evaluation de l'aléa de rupture pour chaque type de falaise,
- Analyse des caractéristiques de propagation (à l'aide du logiciel de trajectographie Pierre)
- Calcul des probabilités d'atteinte (à l'aide du logiciel BORA)

7.3.1 Etape 1 : Digitalisation des falaises et classement en une typologie préliminaire

Une carte digitalisée des falaises est réalisée en se basant sur les cartes topographiques IGN au 1/25 000, les orthophotos, le MNT et la carte géologique (zones d'éboulis).

Il peut être parfois difficile de s'assurer de la présence de falaises à partir de ces documents de base en raison de l'ambiguïté de certains figurés sur les cartes IGN ou de l'imprécision des photos ou du MNT (pas de 50m), Figure 59.

Les investigations menées ultérieurement sur le terrain permettront de valider certaines zones douteuses. Cette identification des falaises reste néanmoins suffisante pour réaliser une première typologie.

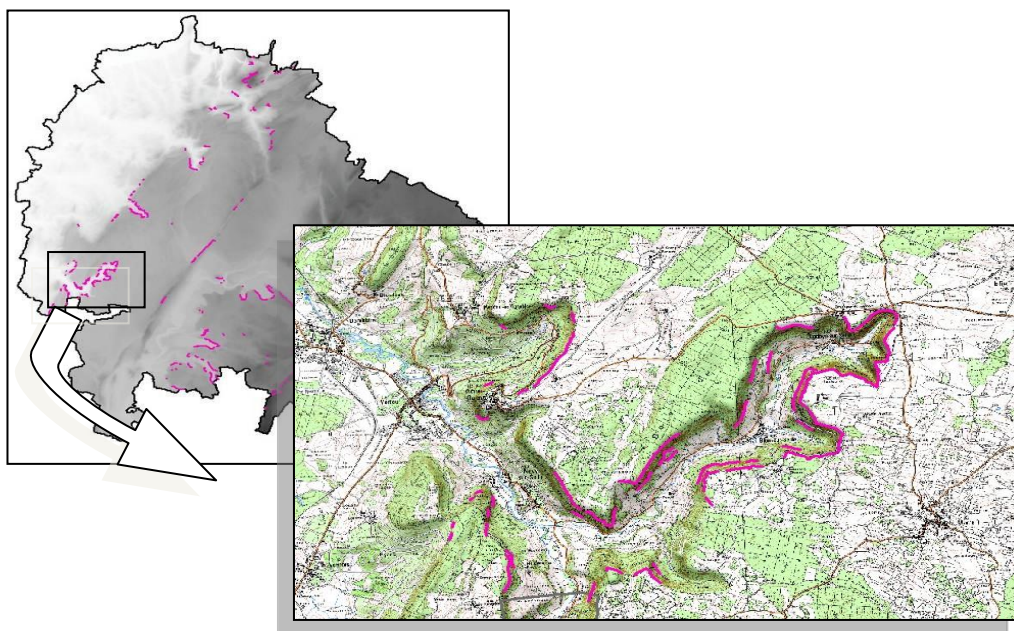


Figure 59 – Identification des falaises

Concernant la zone pilote du Jura, la typologie a été établie en fonction des formations géologiques impliquées (Figure 60 et Figure 61).



Figure 60 - Zone pilote de Jura : les falaises dans le Jurassique moyen

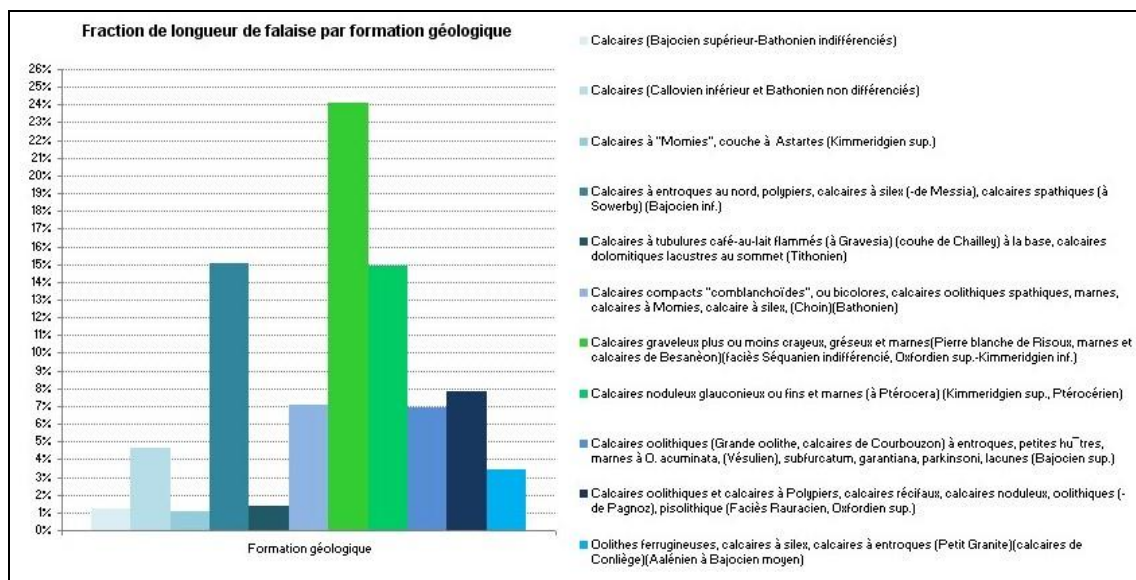


Figure 61 - Zone pilote de Jura : Classement des falaises selon leur formation géologique

7.3.2 Etape 2 : Investigation sur le terrain

Le travail de terrain consiste en premier lieu à vérifier la présence et la localisation des falaises, en confrontant la carte digitalisée avec l'observation in situ.

Ensuite, un échantillonnage de falaises pour chacun des types identifiés a été examiné. Cette analyse concerne les conditions environnementales de la falaise a priori déterminantes pour apprécier leur susceptibilité de rupture (géologie, structure, fracturation, couvert végétal,...).

In fine chaque type de falaise doit être caractérisé par :

- un niveau de susceptibilité de départ de blocs ('activité' des falaises) ;
- un (ou des) volume(s) des blocs ;
- une (ou des) distances moyennes de propagation.

Cette investigation a été réalisée sur trente-trois points sur le terrain. Sur plusieurs points, la difficulté d'accès aux falaises et le couvert végétal ont limité la possibilité d'observation de la fracturation des falaises et des blocs tombés.

7.3.3 Etape 3 : Evaluation de l'aléa de rupture

L'aléa de rupture intègre deux composantes :

- Une composante « intensité », fonction de la taille des blocs susceptibles de se détacher,
- Une composante « fréquence », fonction de la capacité de la zone de départ à fournir des blocs d'une taille donnée.

A l'échelle de la zone d'étude, il n'a pas été possible d'utiliser de manière systématique pour l'évaluation de ces niveaux d'aléa des critères liés à l'observation directe de l'état de la falaise, tel les taux de fracturation, la nature des plans de faiblesse (diaclasses, fractures, joints stratigraphiques...) , leur géométrie (orientation par rapport à la falaise, intersection des différentes familles délimitant les blocs,...).

Pour l'intensité, des estimations qualitatives des niveaux d'aléa de rupture ont été réalisées pour deux types distincts de blocs, classés en fonction de leur volume :

- « petits » blocs (pierres) de l'ordre de quelques dm^3
- « grands » blocs de l'ordre de quelques m^3 .

Pour la fréquence, pour chaque classe de volume, des niveaux d'aléa sont établis par formation géologique (Tableau 13).

Pour les deux catégories de blocs, le niveau d'aléa de rupture a en fait été évalué de manière indirecte, en deux phases.

Une phase préliminaire d'analyse et d'interprétation des légendes des cartes géologiques a permis une évaluation a priori, synthétisée dans le Tableau 13, destinée à orienter le contrôle terrain, avec 3 niveaux d'aléa (Faible/moyen/fort)

Formation géologique	Description	Aléa de rupture «petits» blocs (~dm ³)	Aléa de rupture «gros» blocs (~m ³)*
J2	Calcaires oolithiques massifs, calcaires spathiques, polypiers, entroques, silex (P. parkinsoni), lacunes (Bajocien)	moyen	faible
J2a	Calcaires à entroques au nord, polypiers, calcaires à silex (-de Messia), calcaires spathiques (à Sowerby) (Bajocien inf.)	moyen	faible
J2b	Calcaires oolithiques (Grande oolithe, calcaires de Courbouzon) à entroques, petites huîtres, marnes à O. acuminata, (Vésulien), subfurcatum, garantiana, parkinsoni, lacunes (Bajocien sup.)	fort	faible
J3	Calcaires compacts "comblanchoides", ou bicolores, calcaires oolithiques spathiques, marnes, calcaires à Momies, calcaire à silex, (Choin)(Bathonien)	moyen	faible
J5bA	Marnes et marno-calcaires (couches d'Effingen et du Geissberg), Astarte, calcaires hydrauliques et couches à sphériles (de Champagnole) (faciès Argovien, Oxfordien moyen)	moyen	faible
J5cR	Calcaires oolithiques et calcaires à Polypiers, calcaires récifaux, calcaires noduleux, oolithiques (-de Pagnoz), pisolithique (Faciès Rauracien, Oxfordien sup.)	moyen	faible
J5c-6aS	Calcaires graveleux plus ou moins crayeux, gréseux et marnes (Pierre blanche de Risoux, marnes et calcaires de Besançon) (faciès Séquanien indifférencié, Oxfordien sup.-Kimmeridgien inf.)	moyen	moyen
J6a1	Calcaires noduleux glauconieux ou fins et marnes (à Ptérocera) (Kimmeridgien sup., Ptérocérien)	moyen	faible

Tableau 13 - Niveaux d'aléa de rupture estimés par formation géologique

Ensuite, une phase terrain a permis d'estimer la composante fréquence, en observant ses conséquences, sous la forme du nombre et de la densité des blocs détachés situés en aval de la zone de départ, dans la pente.

Sur la base de cette analyse, avec cette approche qualitative, qui a également pris en compte la fracturation potentiellement induite par la présence de failles (repérées sur les cartes géologiques), on a pu déterminer, à la résolution de l'étude (1/50 000) :

- Un seul niveau d'aléa de rupture, faible à moyen, pour les petits blocs,
- Deux niveaux, un premier qualifié de « faible à moyen », un second « moyen à fort », pour les gros blocs.

7.3.4 Etape 4 : Analyse des caractéristiques de propagation

Pour caractériser le comportement en propagation des blocs, le travail est basé à la fois sur la synthèse des observations de terrain et sur des études trajectographiques via l'usage du logiciel Pierre98, Figure 62.

Les simulations trajectographiques sont réalisées à partir de profils de terrain (géométrie, sols) et de blocs de volumes différents estimés d'après les sites examinés sur le terrain. En l'absence de relevés topographiques spécifiques, les profils ont été tracés par extrapolation des courbes de niveaux de la carte IGN. Les paramètres des sols utilisés sont des paramètres qui ont été calés sur des sols similaires.

Des ordres de grandeur de distance de propagation, pour les 2 classes de blocs, sont évalués sur des profils réalisés au niveau de chaque type de falaise. Ces évaluations sont nécessaires au calcul de la probabilité de propagation sous BORA.

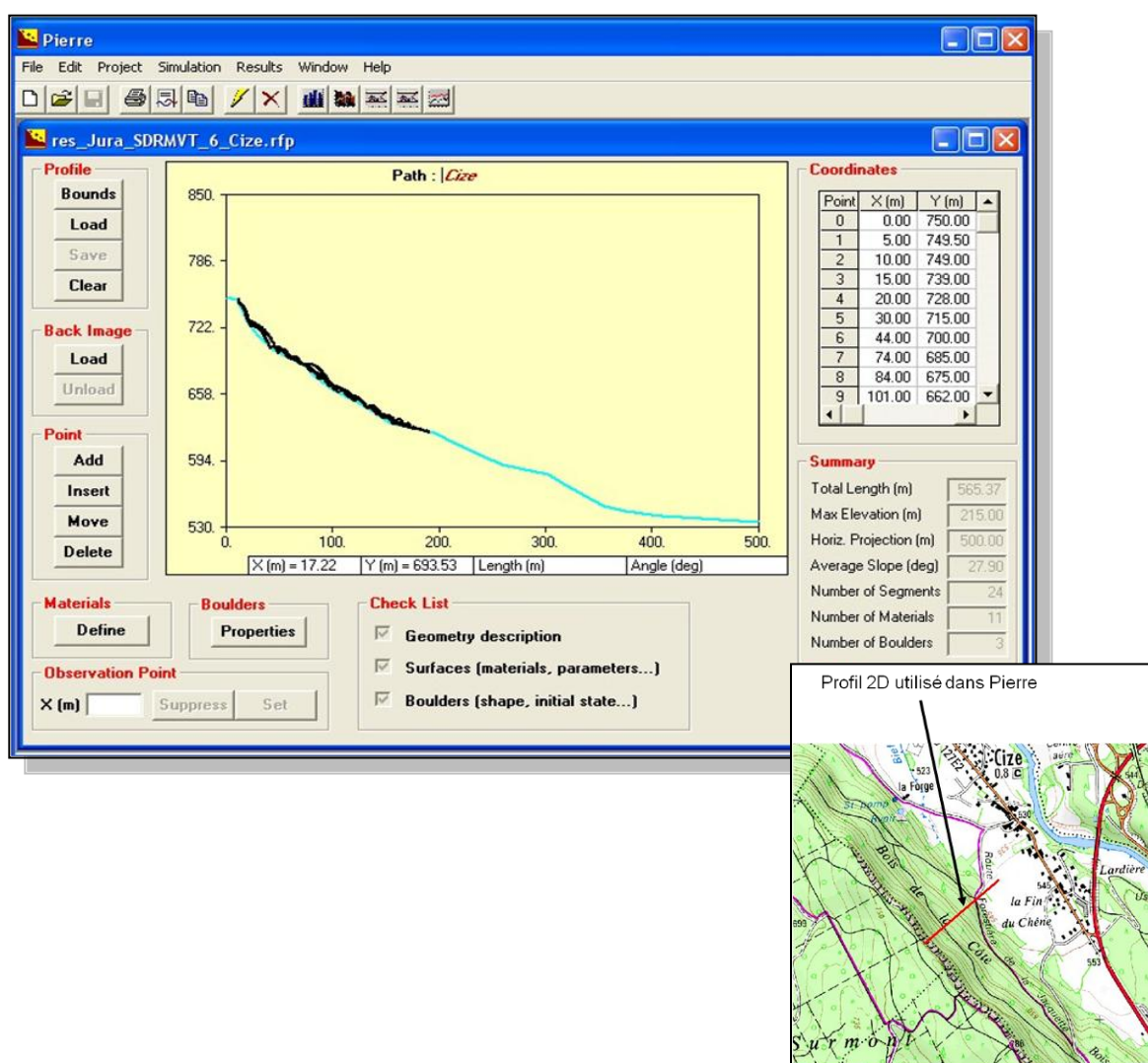


Figure 62 - Simulation trajectographique avec le logiciel Pierre

7.3.5 Etape 5 : Calcul des probabilités d'atteinte et de l'aléa résultant

A ce stade de l'étude, le parti a été pris de considérer les chutes de « gros » blocs et de « petits » blocs comme des phénomènes distincts, même si bien évidemment il n'existe pas de frontières strictes à ce niveau, et qu'il y a une continuité des tailles de blocs.

L'approche retenue nous conduit à qualifier la composante « fréquence » de l'aléa de rupture, sur la base d'une analyse indirecte. Même si les qualificatifs « faible à moyens » sont identiques pour les chutes de « petits » et de « gros » blocs, il est loin d'être prouvé qu'il exprime une fréquence identique (en nombre de blocs ? en volume ?). Ils n'ont de valeur relative que dans leur catégorie de phénomènes.

L'élimination de la composante « intensité » de l'aléa, pour ne travailler que par type de phénomène, présente dans le cas des chutes de blocs l'avantage de pouvoir considérer que l'aléa (probabilité de recevoir un bloc en un lieu donné, pendant une période de référence donnée) est bien le produit de la probabilité de rupture par celle qu'à un bloc qui se détache d'atteindre le lieu donné.

L'aléa de propagation peut être quantifié. Par contre, l'aléa de rupture n'est initialement que qualifié. En considérant de manière empirique, pour les gros blocs, que l'aléa « moyen à fort » produit deux fois plus de blocs que l'aléa « faible à moyen », le parti a été pris d'affecter la valeur de 1 aux premières zones et 0,5 aux secondes.

Sachant par ailleurs que les cartes gros blocs et petits blocs ne peuvent être numériquement comparable entre elle (c'est pour cela que les deux sont nécessaires), le parti a été pris de laisser une valeur de 1 à la probabilité (relative) d'apparition d'un petit bloc (période de référence infinie ⇔ le bloc finira bien un jour par tomber).

Le calcul des probabilités d'atteinte par un bloc en tout point de la zone d'étude est réalisé à l'aide du logiciel BORA, en prenant en entrée :

- la carte des sources de production de blocs (falaises digitalisées) auxquelles est associée leur susceptibilité de rupture (issue de l'étape 3) avec donc des valeurs 0.5 et 1 pour les gros blocs, et une valeur 1 pour les petits,
- les caractéristiques du comportement de propagation des blocs (issues de l'étape 4).

Pour la zone pilote du Jura, deux types de comportement en propagation, suivant les deux classes de volume, ont été de plus considérés (utilisant donc deux paramétrages différents), donnant lieu à deux calculs spécifiques sous BORA.

Sur chacune des deux cartes finales, il est donc possible de comparer en différents points les probabilités d'atteinte par un bloc (d'une classe donnée), qui prend en compte à la fois les probabilités de détachement et de propagation (Figure 63).

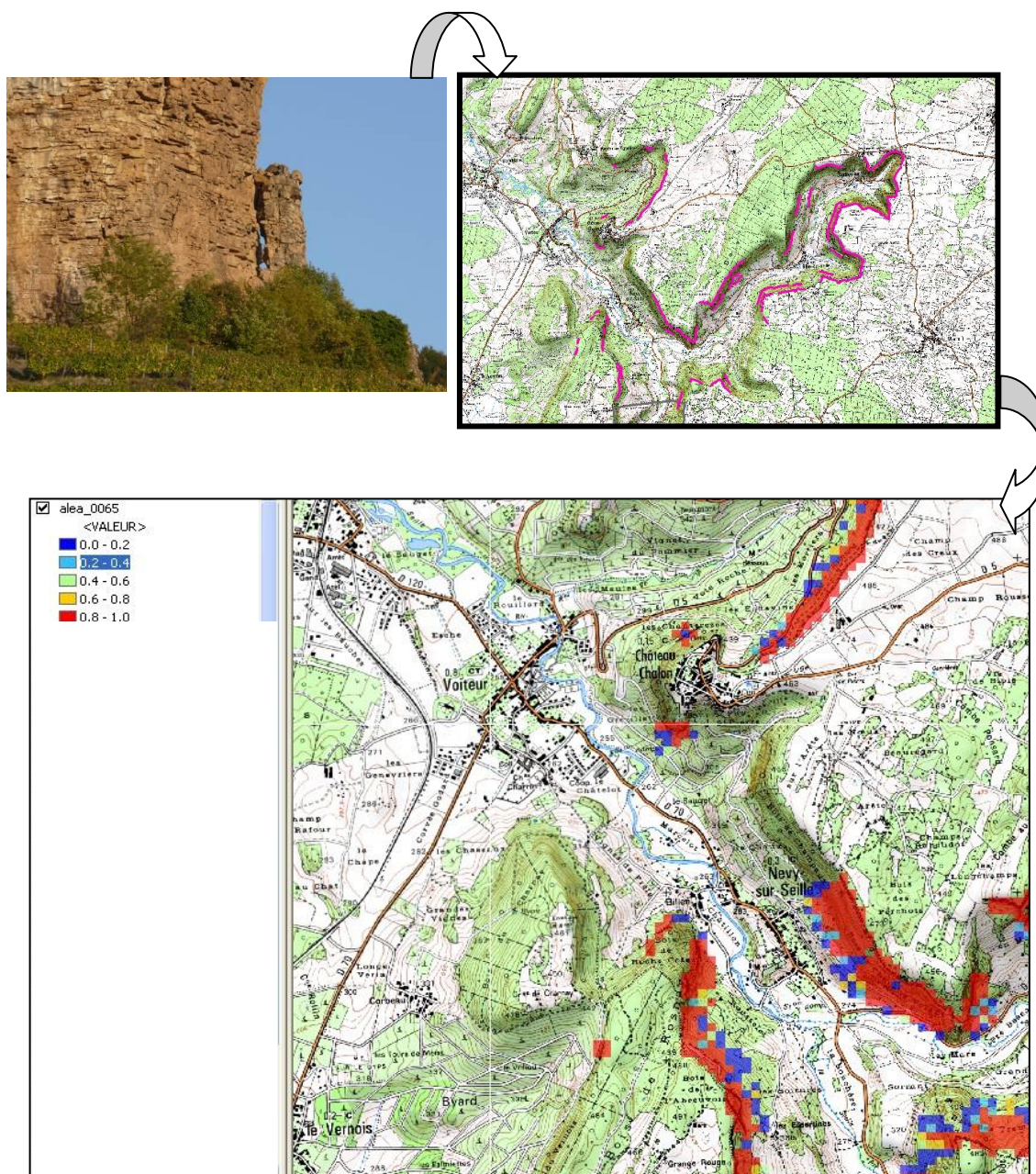


Figure 63 – Zone pilote du Jura : calcul de probabilité d'atteinte des blocs avec le logiciel Bora@ selon les susceptibilité de rupture et le comportement de propagation

7.4 EVALUATION DE L'ALEA AUX COULEES BOUEUSES GENERES PAR LES GLISSEMENTS DE TERRAIN

L'évaluation de l'aléa aux coulées de boue comprend l'évaluation de l'aléa d'initiation de la coulée et l'aléa de propagation.

Les coulées boueuses peuvent être de nature et d'origine variées ; nous les définirons de manière générale comme des phénomènes de transport de matériaux au comportement liquide (mais pouvant comporter une concentration importante d'éléments solides) issus de la mise en mouvement de matériaux meubles par saturation et liquéfaction.

Les principaux facteurs déclenchant des coulées boueuses sont des précipitations importantes et des glissements de terrain actifs. Il s'agit ainsi de phénomènes régis à la fois par les lois de la mécanique des solides et des fluides, dont la modélisation physique est complexe et nécessite une grande quantité de données, notamment les paramètres mécaniques et rhéologiques des matériaux et des données topographiques précises. Dans le cadre des SDR-MVT, cela concerne des coulées de boue générées par la transformation de glissements de terrain actifs.

Pour la zone pilote du Jura, la BDMVT comporte 18 événements de coulées dans le département du Jura, mais peu d'informations sur les caractéristiques d'intensité de la coulée (distance d'arrêt, chemin de propagation, etc.) sont disponibles (une seule étude documentée sur la coulée de Varagna en 2002).

Les données de base sont le MNT au pas de 50m, la carte topographique IGN au 1/25000, la carte géologique au 1/50000.

Etant donné l'échelle d'étude sur la zone pilote et les données disponibles limitées, la méthode d'évaluation de l'aléa est basée sur l'expertise. L'évaluation s'appuie sur les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1) les coulées de boue considérées sont initiées par des glissements de terrain ;

Hypothèse 2) le mouvement de la coulée dépend d'une énergie dont les variations sont fonction de la pente et de la distance parcourue ;

Hypothèse 3) les chemins de propagation suivent préférentiellement les drains.

La démarche pour la cartographie de l'aléa coulées de boue) est schématisée en Figure 64.

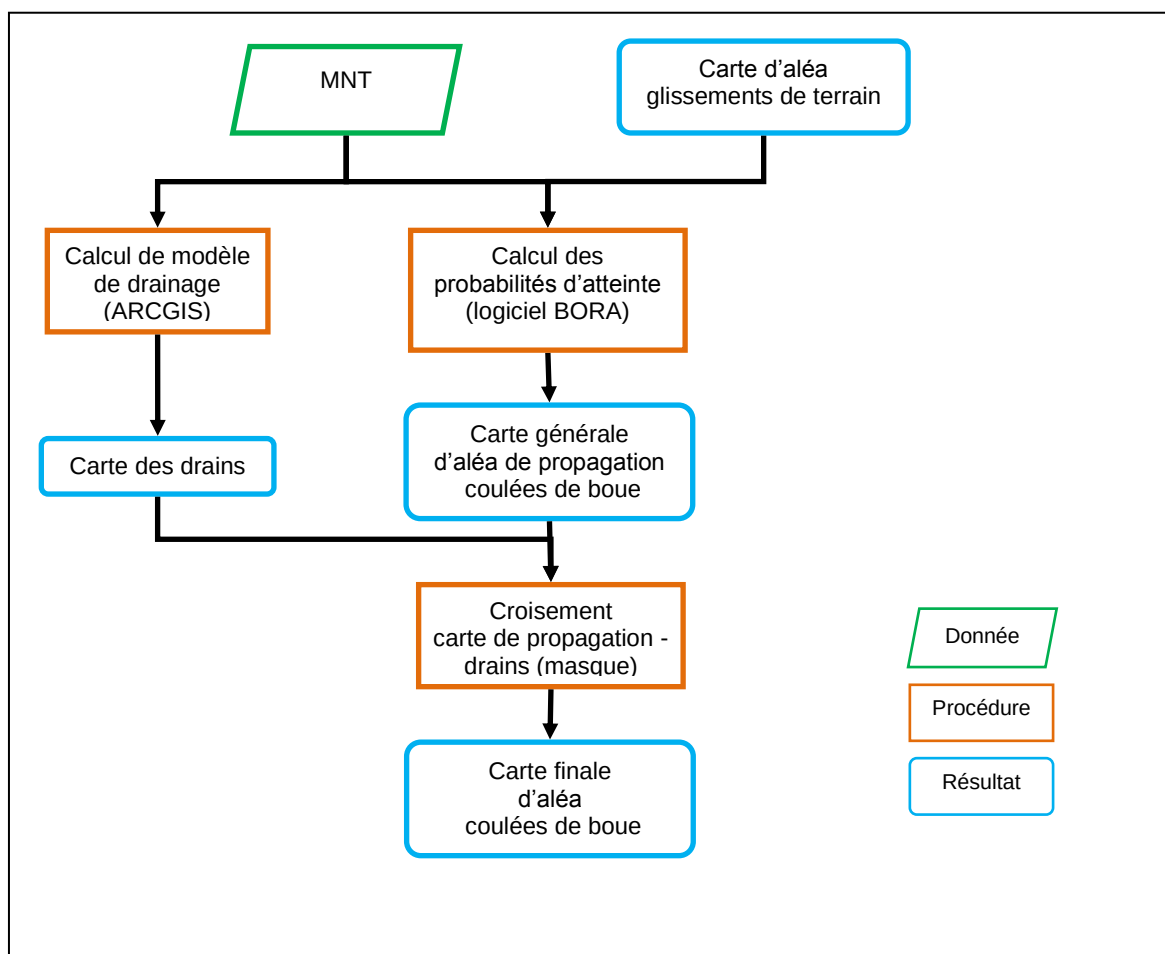
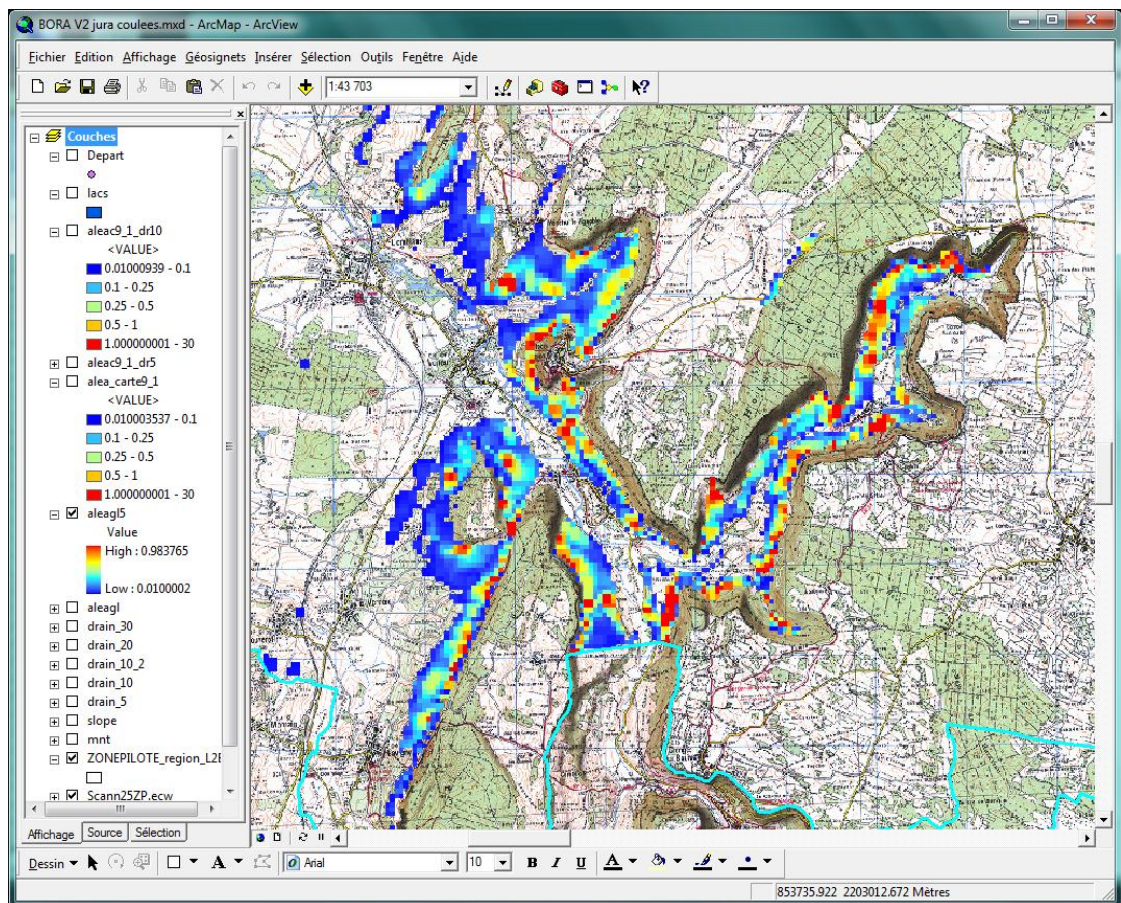


Figure 64 : Démarche pour la cartographie de l'aléa coulées de boue

7.4.1 Etape 1 : Cartographie de l'aléa aux glissements de terrain :

Les zones et les aléas de départ sont données par la carte d'aléa glissement de terrain (cf. hypothèse 1).

La carte d'aléa aux glissements de terrain est celle réalisée précédemment (cf. § 7.2 Evaluation de l'aléa aux glissements de terrain). Seules les cellules avec un aléa supérieur à 0,01 sont conservées.



La carte d'aléa aux glissements de terrain (aleagl5) est prise en référence pour ce qui concerne les zones de départ des coulées.

Figure 65 – Zone pilote du Jura (extrait) : Carte des zones de départ des coulées

7.4.2 Etape 2 : Calcul des probabilités d'atteinte

Le calcul des probabilités d'atteinte par des coulées de boue sur la zone d'étude est réalisé à l'aide du logiciel BORA@. Ce logiciel calcule la probabilité d'atteinte d'une masse en déplacement en fonction de paramètres de dispersion latérale et du calcul d'une pseudo énergie libérée.

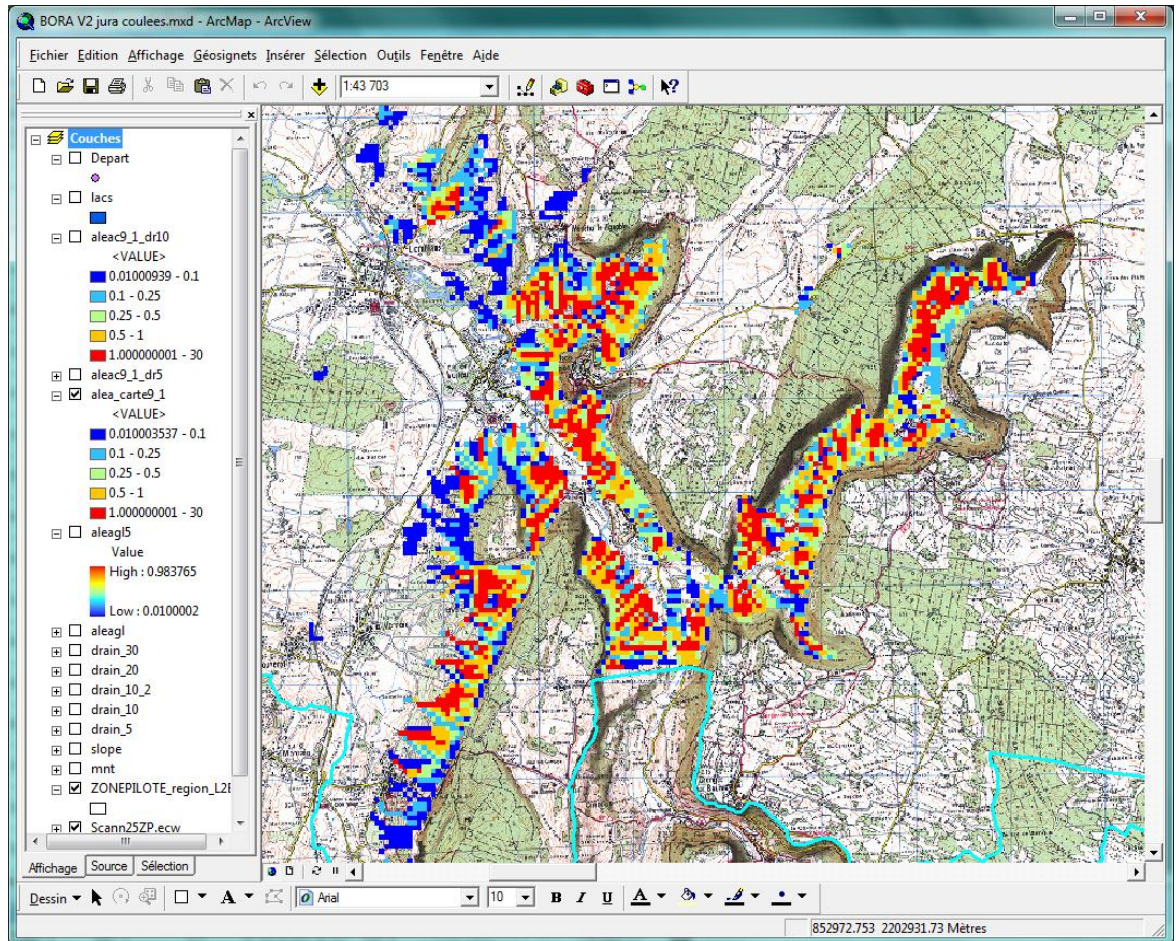
Les événements historiques sur la zone d'étude sont insuffisant pour caler les paramètres liés à la propagation des coulées de boue. A défaut, des valeurs de paramètres probables ont donc été adoptées par dire d'expert (Figure 66).

Une première carte, où en tout point est évaluée la probabilité d'atteinte par des coulées de boue issues de glissements est ainsi obtenue (Figure 67).

The screenshot shows the 'Programme Bora - Parametres' window. It contains the following fields and controls:

- Left Column:** P1 (10), P2 (30), E1 (-1), E2 (1), E3 (2), EMAX (4).
- PA : Prime axe:** PA 0° (2), PA P1 (9), PA P2 (9), PA 90° (9).
- Right Column:** mnt (mnt_fl), pente (pente), direction (dir), Mvt (aleagl5).
- Bottom Left:** PMIN (0.01), config_c2.txt, EDISP 0 à 1 (0.99), Si EDISP = 1, pas de dispersion.
- Buttons:** Configuration, Calcul pente - direction, Calcul Carte, param par défaut, go, exit.
- Radio Buttons:** Aléa = P (selected), Aléa = E x P, normal (selected), log décimal.

Figure 66 – Zone pilote du Jura : fenêtre de paramétrage sous BORA, avec indication des paramètres retenus au niveau du pilote



La carte des probabilités d'atteinte par des coulées de boue (alea_carte9_1) est obtenue en faisant un calcul de Bora à partir de la carte d'aléa aux glissements de terrain (aleagl5).

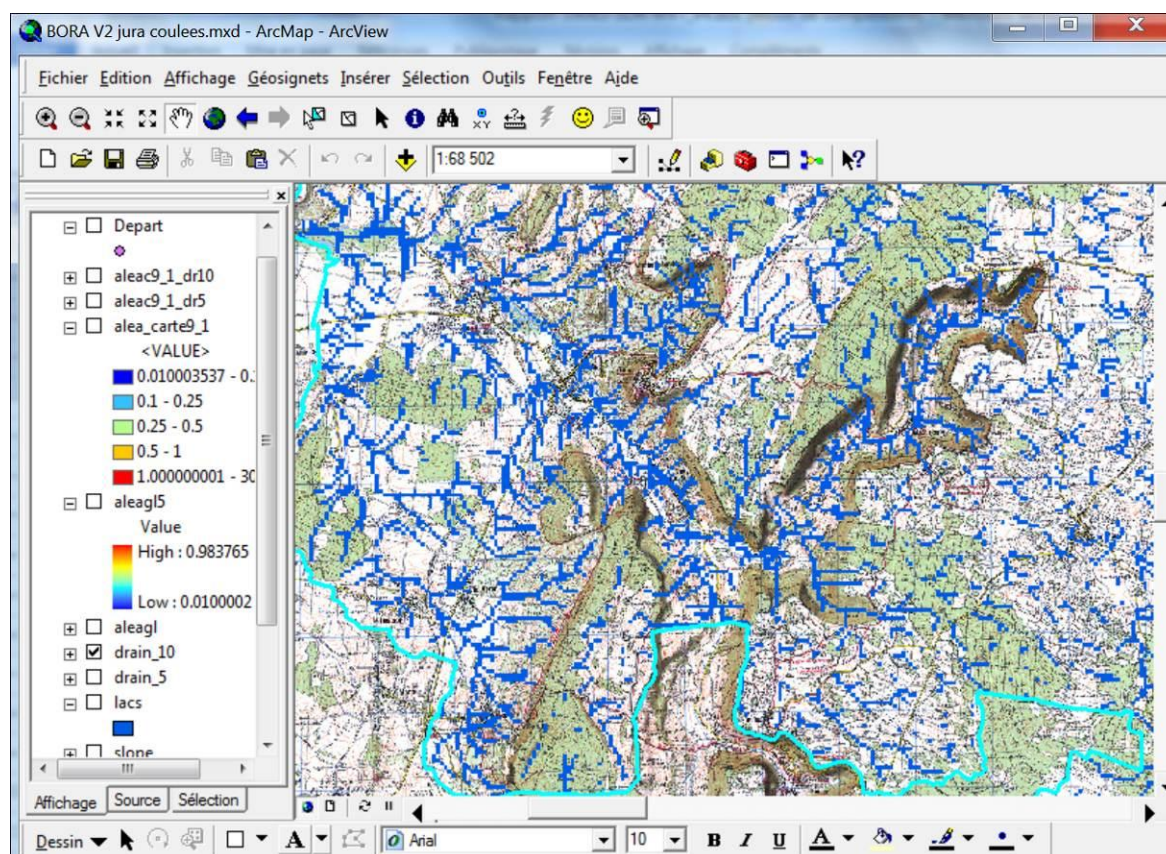
Figure 67 – Zone pilote du Jura (extrait) : Carte des probabilités d'atteinte par des coulées de boue

7.4.3 Etape 3 : Calcul d'un modèle de drainage (ARCGIS)

L'objectif est de calculer une carte des drains, correspondant aux chemins de propagation préférentiels des coulées (suivant la troisième hypothèse).

A partir du MNT, un modèle de drainage est calculé avec le logiciel ARCGIS à partir de cartes de direction et d'accumulation, elles-mêmes calculées à partir du MNT.

Il a été choisi de définir toute cellule associée à une surface drainée d'au moins 2.5 ha, comme appartenant à un drain, compte tenu de l'échelle de rendu de la cartographie d'aléa. Ce seuil de 2.5 ha est estimé de manière arbitraire, à défaut de données suffisantes. Il est à noter aussi qu'un MNT de 50 m n'a pas une résolution suffisante pour représenter précisément la morphologie des versants influençant le ruissellement et la propagation des coulées.



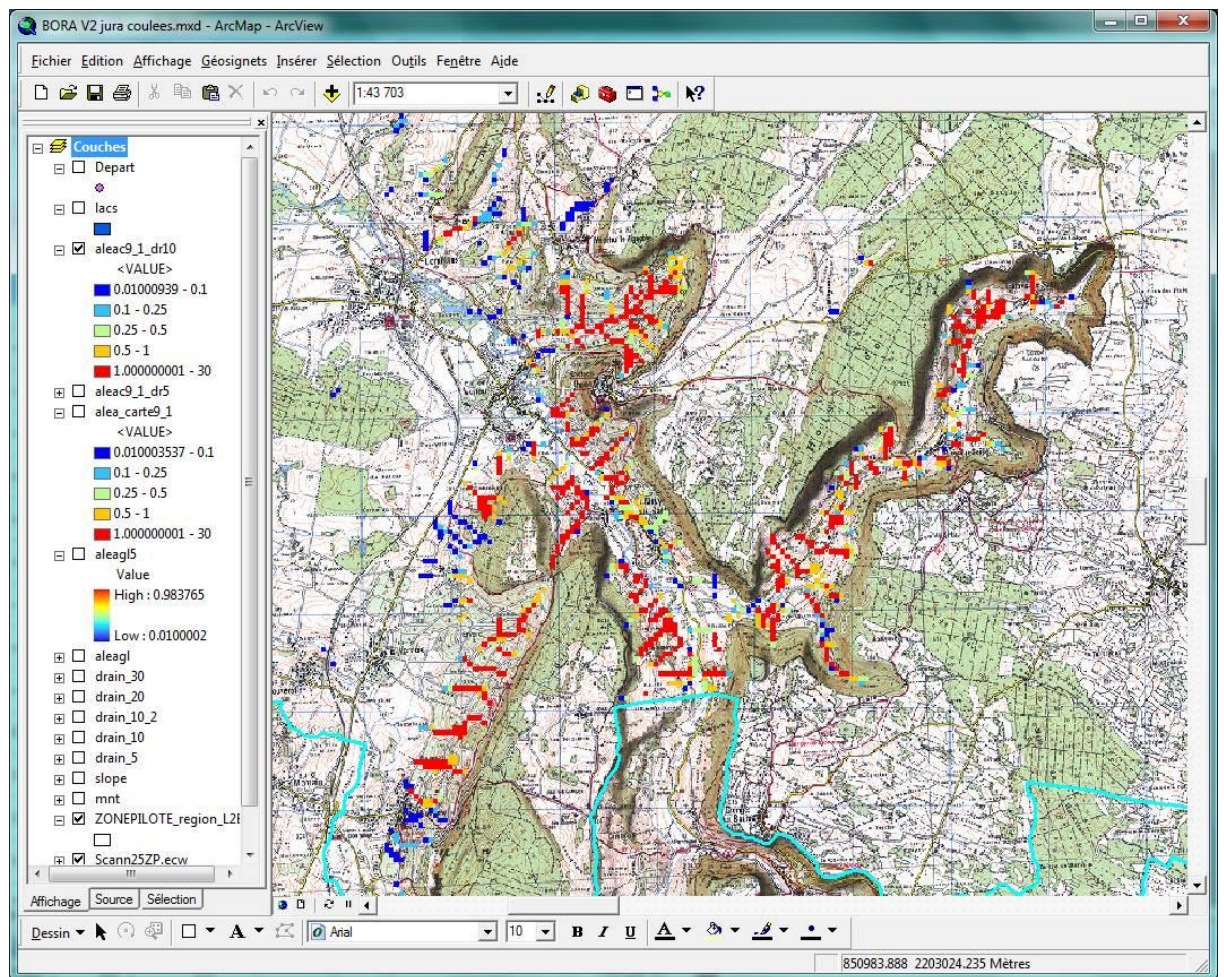
La carte des drains est calculée à partir de traitement sous ARCGIS (calculs direction et accumulation). Pour la carte finale des drains, seules les zones d'accumulation au moins égale à 10 mailles sont retenues.

Figure 68 - Zone pilote du Jura (extrait) : Carte des drains

7.4.4 Etape 4 : Croisement carte de propagation – carte des drains

La carte finale d'aléa aux coulées de boue est obtenue par intersection sous ARCGIS de la carte d'aléa propagation et la carte des drains. Seules les cellules communes sont conservées.

Cette démarche méthodologique et la carte d'aléa résultante peuvent être largement améliorée, mais cela nécessiterait de disposer de données supplémentaires, notamment sur les événements historiques.



La carte d'aléa aux coulées de boue est obtenue par l'intersection de la carte d'aléa propagation (alea_carte9_1) et la carte des drains (drain_10).

Figure 69 – Zone pilote du Jura (extrait) : Carte d'aléa aux coulées de boue issus des glissements de terrain

7.5 ZONE PILOTE DU JURA - CARTES D'ALEAS AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN

Le Tableau 14 et la Figure 70 présentent les limites des communes de la zone pilote du Jura et les numéros INSEE correspondant. Ces illustrations doivent faciliter le repérage des communes par rapport aux données sur les aléas et les risques.

Suivant la démarche décrite dans les chapitres précédents (cf. 7.2 à 7.4), la Figure 71 à la Figure 74 présentent les cartes d'aléa obtenues sur la zone pilote, respectivement : aux glissements de terrain, aux chutes de « petits » blocs, aux chutes de « gros » blocs, aux coulées de boue.

ABERGEMENT-LE-GRAND	39002	CHEVROTAINE	39143	LEMUY	39291
ABERGEMENT-LES-THESY	39004	CONTE	39165	LENT	39292
AIGLEPIERRE	39006	DARBONNAY	39191	MATHENAY	39319
ANDELLOT-EN-MONTAGNE	39009	DENEZIERES	39192	MESNOIS	39326
ARDON	39015	FAY-EN-MONTAGNE	39222	MIEGES	39329
ARSURE-ARSURETTE	39020	GRANGE-DE-VAIVRE	39259	MIGNOVILLARD	39331
BARRETAINE	39040	GRANGES-SUR-BAUME	39260	MONTHOLIER	39354
BELLEFONTAINE	39047	IVREY	39268	MONTIGNY-LES-ARSURES	39355
BERSAILLIN	39049	LAC-DES-ROUGES-TRUITES	39271	MONTIGNY-SUR-L'AIN	39356
BESAIN	39050	LE LATET	39281	MONTROND	39364
BIEF-DU-FOURG	39053	LAVIGNY	39288	LES NANS	39381
BLOIS-SUR-SEILLE	39057	MARNOZ	39315	NEVY-SUR-SEILLE	39388
BLVE	39058	MIERY	39330	PICARREAU	39418
BONNEFONTAINE	39065	MOLAMBOZ	39337	PILLEMOINE	39419
BOURG-DE-SIROD	39070	MONTMARLON	39359	PORT-LESNEY	39439
BRACON	39072	MOUCHARD	39370	SAINT-LAURENT-EN-GRANDVAUX	39487
BRERY	39075	THESY	39529	SAINT-THIEBAUD	39495
BUVILLY	39081	LES ARSURES	39019	SYAM	39523
LES CHALESMES	39091	CHAMOLE	39094	VANNOZ	39543
CHAMBLAY	39093	LA CHAUX-DU-DOMBIEF	39131	VERGES	39550
CHAMPAGNE-SUR-LOUE	39095	CHILLY-SUR-SALINS	39147	LE VERNIOIS	39553
LA CHAPELLE-SUR-FURIEUSE	39103	CLUCY	39155	VERS-EN-MONTAGNE	39554
CHARCIER	39107	COMMUNAILLES-EN-MONTAGNE	39161	FORT-DU-PLASNE	39232
CHARENCOY	39108	GRAMANS	39176	LADOYE-SUR-SEILLE	39272
LA CHATELAIN	39116	CRANCOT	39177	MENETRU-LE-VIGNOBLE	39321
CHATELNEUF	39120	CRANS	39178	MESNAY	39325
LA CHAUMUSSE	39126	CROTENAY	39183	MIREBEL	39332
CIZE	39153	DOMBLANS	39199	MOLPRE	39340
CUVIER	39187	DOURNON	39202	MONT-SUR-MONNET	39366
ESSERVAL-COMBE	39213	DOYE	39203	MOURNANS-CHARBONNY	39372
LA FAVIERE	39221	ECLUEUX	39206	NEUVILLEY	39386
FONCINE-LE-BAS	39227	EQUEVILLON	39210	PLENISE	39427
FONTENU	39230	ESSERVAL-TARTRE	39214	RIX	39461
GERAISE	39248	LA FERTE	39223	SAINT-CYR-MONTMALIN	39479
LE LARDERET	39277	LE FIED	39225	SAINT-GERMAIN-EN-MONTAGNE	39481
LA LATETTE	39282	FONCINE-LE-HAUT	39228	SAINT-LOTHAIN	39489
LE LOUVEROT	39304	FRAROZ	39237	SAIZENAY	39497
MONNET-LA-VILLE	39344	GILLOIS	39254	SAPPOIS	39503
MOUTOUX	39376	GROZON	39263	SONGESON	39518
PASSENANS	39407	LONGCOCHON	39298	SUPT	39522
PATORNAY	39408	LOULLE	39301	VALEMPOLIERES	39540
PLENISETTE	39428	MARIGNY	39313	LE VAUDIOUX	39545
TOULOUSE-LE-CHATEAU	39533	LA MARRE	39317	ARESCHE	39586
TOURMONT	39535	MOLAIN	39336	NEY	39389
VILLERS-FARLAY	39569	MONAY	39342	NOZEROY	39391
VILLETTE-LES-ARBOIS	39572	MORBIER	39367	LES PLANCHES-EN-MONTAGNE	39424
ABERGEMENT-LE-PETIT	39003	PAGNOZ	39403	PLASNE	39426
ARBOIS	39013	LE PASQUIER	39406	PONT-DU-NAVOY	39437
AUMONT	39028	LES PLANCHES-PRES-ARBOIS	39425	SAFFLOZ	39473
BIEF-DES-MAISONS	39052	PONT-DE-POITTE	39435	SALINS-LES-BAINS	39500
BILLECUL	39055	PONT-D'HERY	39436	VADANS	39539
BRAINANS	39073	PRETIN	39444	VEVY	39558
CENSEAU	39083	PUBLI	39445	VOITEUR	39582
CERNANS	39084	PUPILLIN	39446	ONGLIERES	39393
CERNIEBAUD	39085	SAINT-LAMAIN	39486	POLIGNY	39434
CHAMPAGNOLE	39097	VAUX-SUR-POLIGNY	39548	SIROD	39517
CHAPOIS	39105	VILLERSERINE	39568	VILLENEUVE-D'AVAIL	39565
CHATEAU-CHALON	39114	DOUCIER	39201		
CHATILLON	39122	ENTRE-DEUX-MONTS	39208		
CHAUSSENANS	39127	LE FRASNOIS	39240		
CHAU-DES-CROTENAY	39129				

Tableau 14 – Zone pilote du Jura : nom et numéro INSEE des communes (cf. Figure 70)

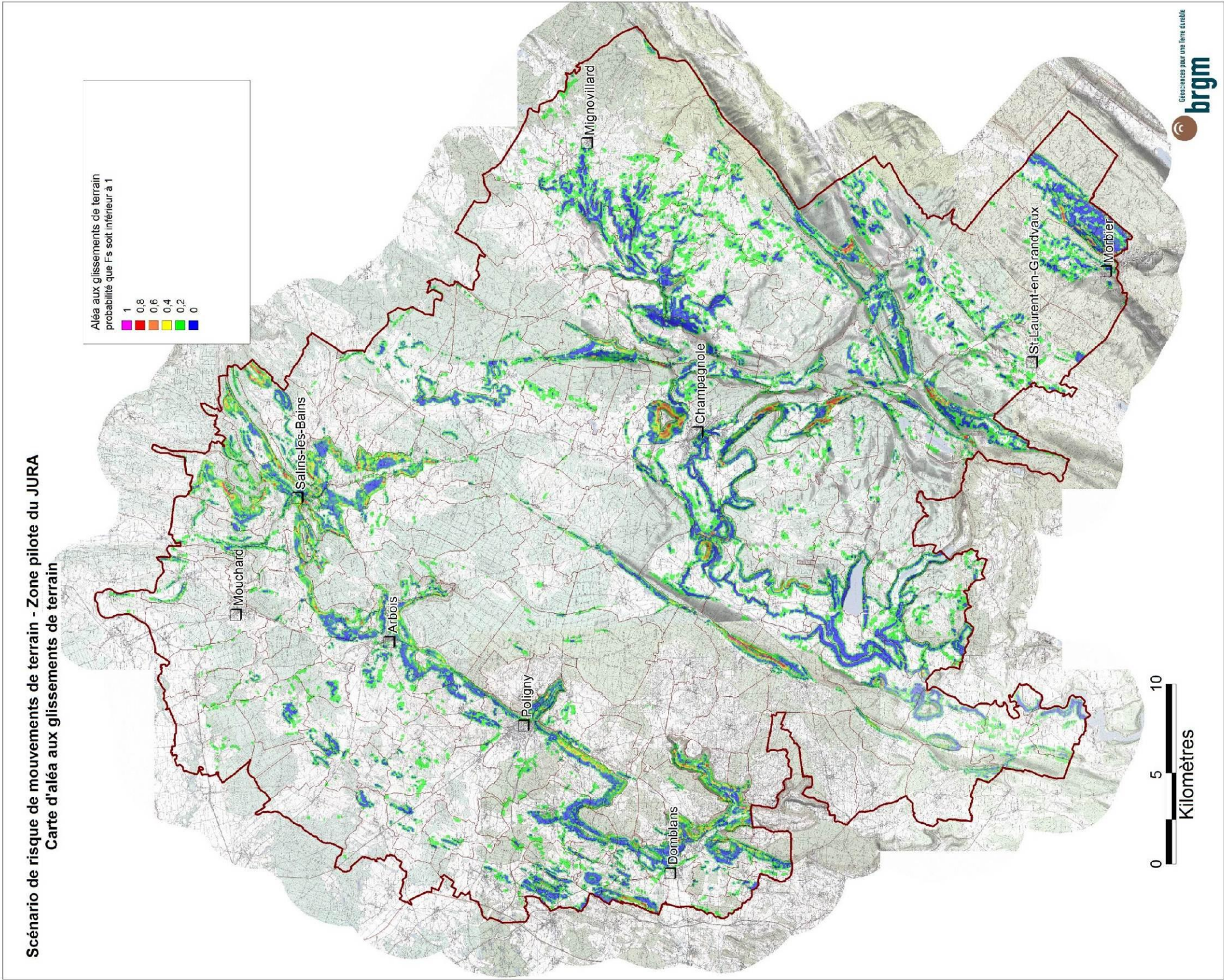


Figure 70 – Zone pilote du Jura : Carte de la limite des communes accompagnée de leur numéro INSEE (cf. Tableau 14)

Figure 71 – Zone pilote du Jura : carte de l'aléa aux glissements de terrain

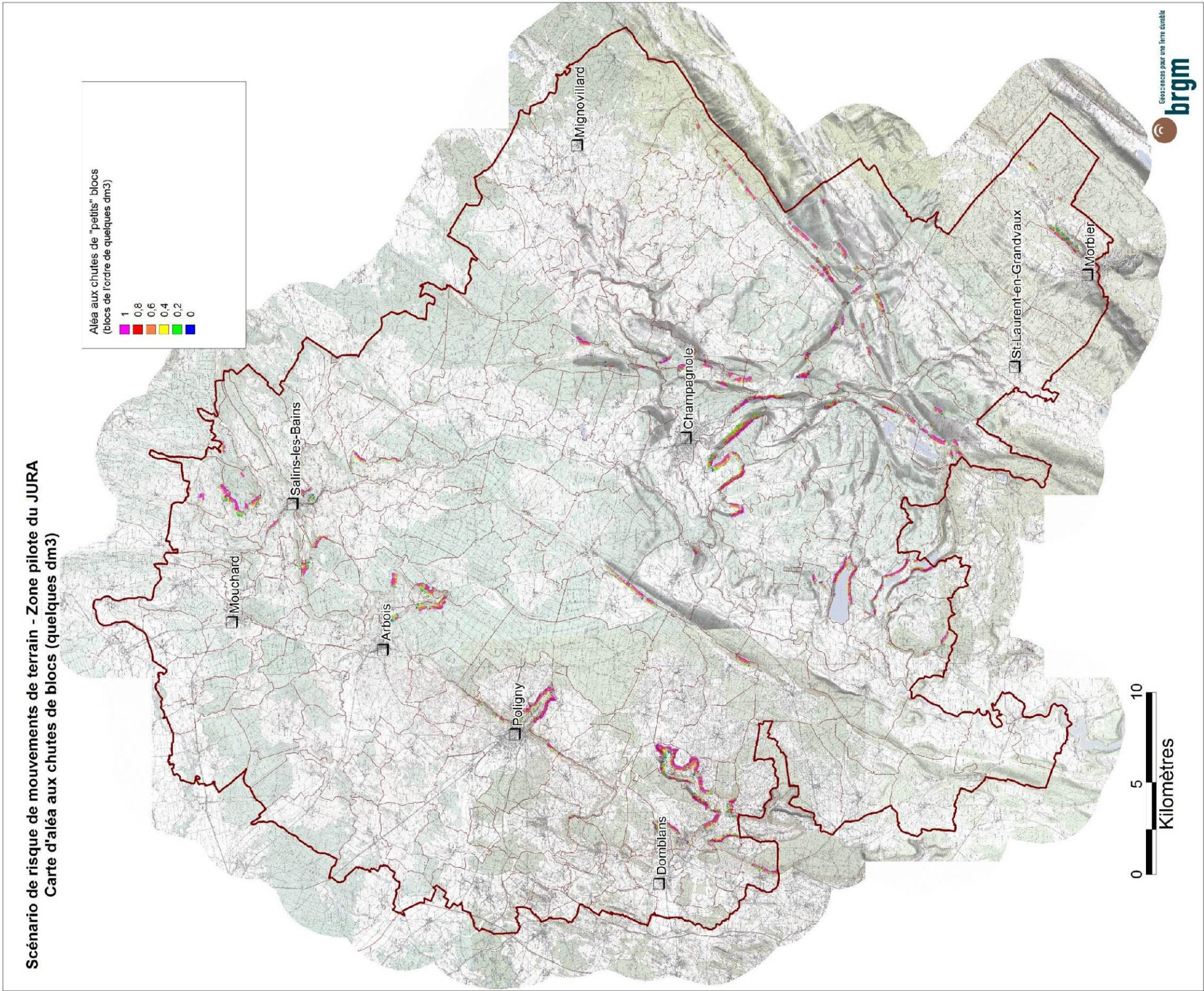


Figure 72 - Zone pilote du Jura : carte de l'aléa aux chutes de « petits » blocs

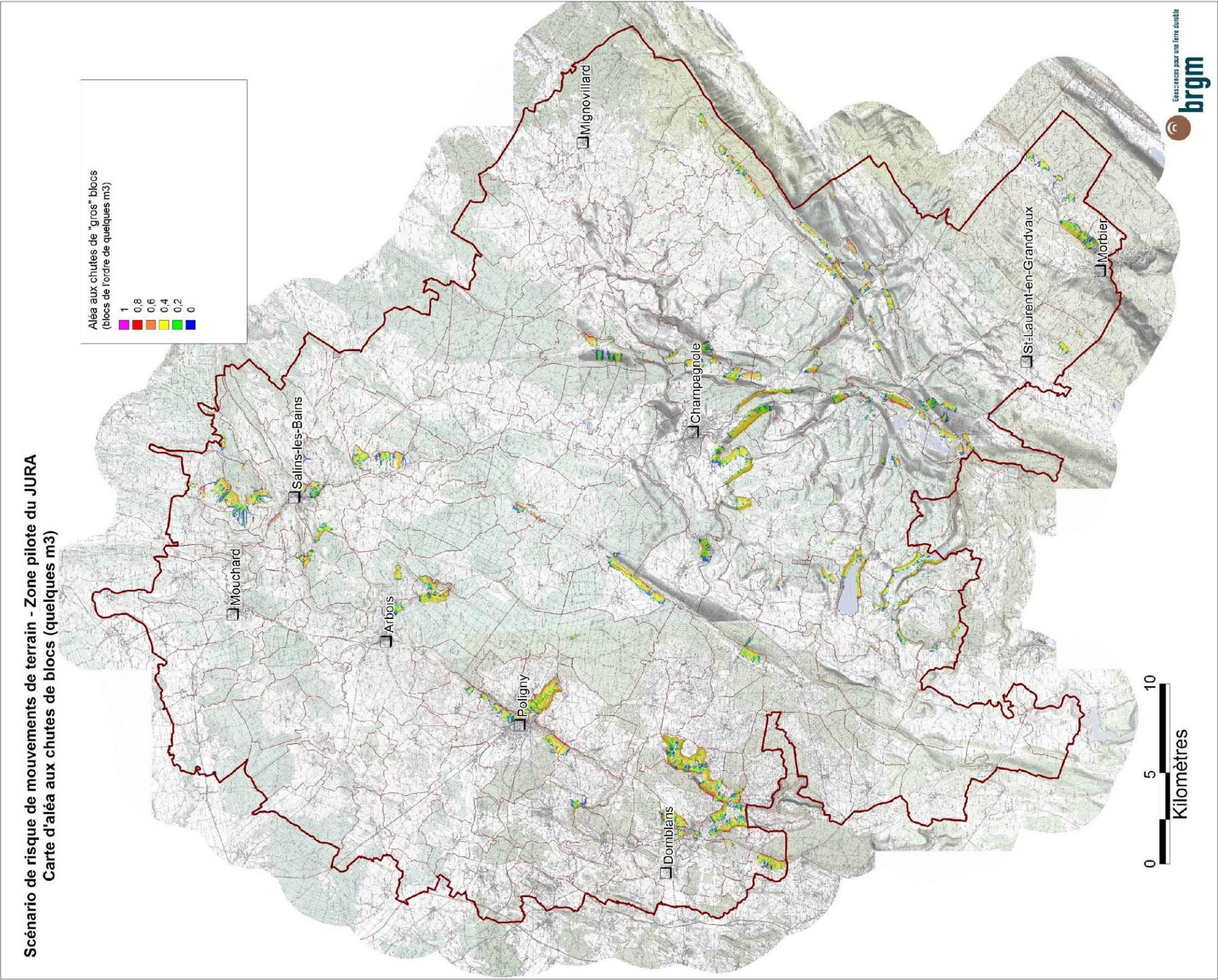


Figure 73 - Zone pilote du Jura :
carte de l'aléa aux chutes de
« gros » blocs

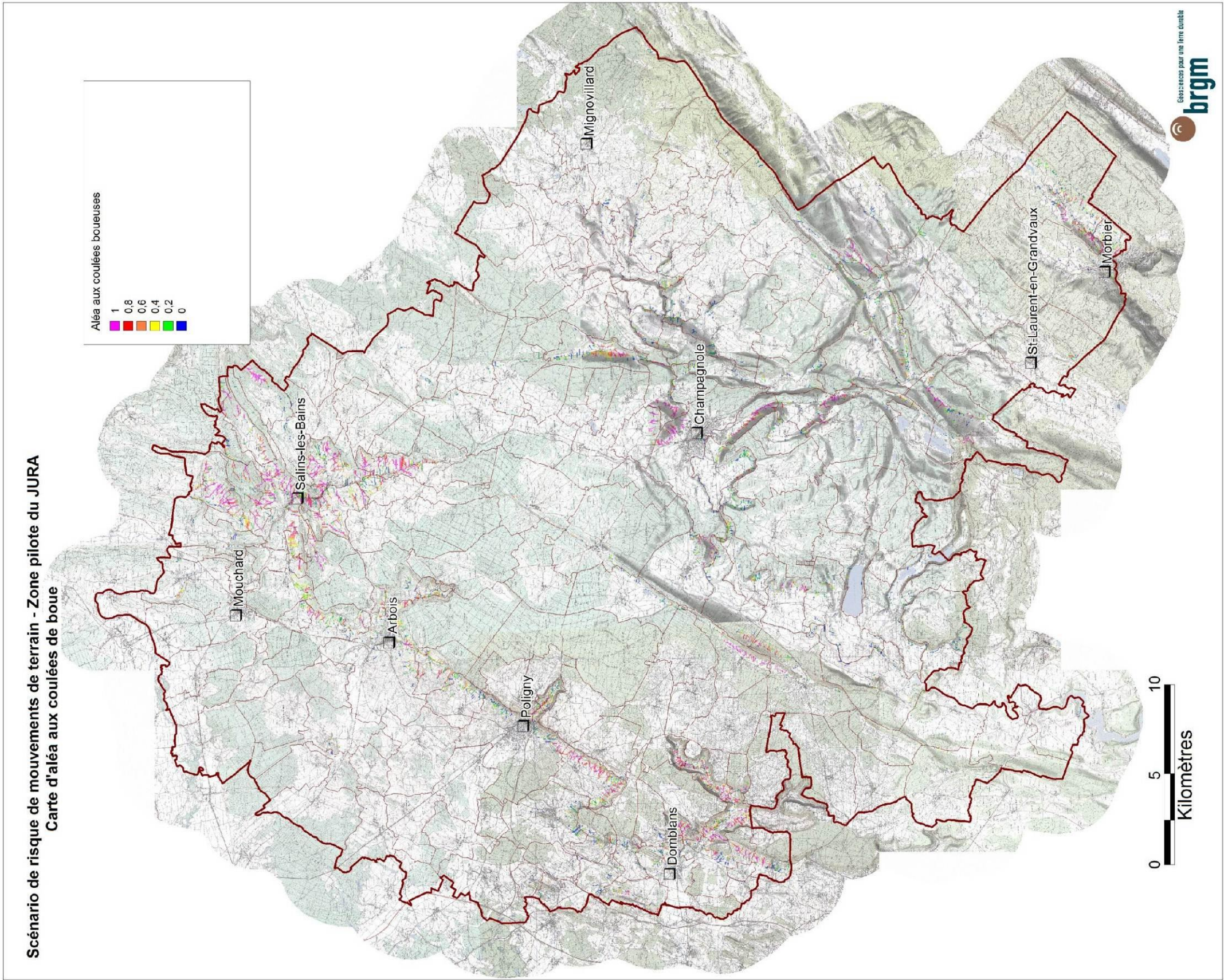


Figure 74 – Zone pilote du Jura : carte de l'aléa aux coulées de boue

8. Analyse du risque

L'analyse de risque, dans le cadre du SDR-MVT, a pour objectif une hiérarchisation des communes pour orienter et aider la décision en matière de programmation des plans de prévention des risques. En conséquence, la nature des enjeux sur lesquels va porter cette analyse doit être adaptée à cette problématique.

Les principes retenus pour conduire cette analyse ont été présentés au chapitre 7.

8.1 CHOIX DES ENJEUX POUR L'ANALYSE DE RISQUE

Pour l'analyse du risque, le comité de pilotage du site pilote a retenu :

- Comme unité territoriale, le territoire communal, dans son ensemble, pour avoir une vision globale de l'exposition aux différents phénomènes de mouvements de terrain
- Les zones bâties du territoire, pour focaliser l'analyse sur les zones à enjeux,
- Le réseau routier, en marge de la problématique PPR au sens strict, mais en raison de son importance et de sa vulnérabilité aux phénomènes de mouvements de terrain.

Ces enjeux sont issus de la BD Carto IGN (cf. chapitre 5.2.6).

Dans certaines communes rurales, la BD Carto ne mentionne pas de zones bâties. Le fichier a alors été complété par analyse des cartes topographiques et des photographies aériennes, puis digitalisation des contours de ces zones.

Le réseau routier principal a été extrait de la BD CARTO, avec une sélection de la valeur « Liaison principale » de l'attribut « vocation ».

8.2 PRINCIPES DE CALCUL DE L'EXPOSITION

L'exposition d'un élément exposé ponctuel est relativement simple à évaluer. Il suffit, à partir des coordonnées géographiques de cet objet, de calculer le numéro (numéro de ligne et de colonne) de la maille de la carte d'aléa, d'y lire la valeur et de l'affecter en tant qu'attribut à l'élément exposé.

Pour les éléments exposés linaires (type réseau routier) ou surfaciques (zone bâtie, commune...) la méthode est plus complexe, l'aléa n'étant pas constant sur l'ensemble de l'élément.

8.2.1.1 Eléments surfaciques

Chaque élément surfacique est représenté dans le SIG par un polygone. Chaque polygone possède un identifiant unique, nombre entier stocké dans la table attributaire de la couche vectorielle (Figure 75, table « Attributs de Polygones »).

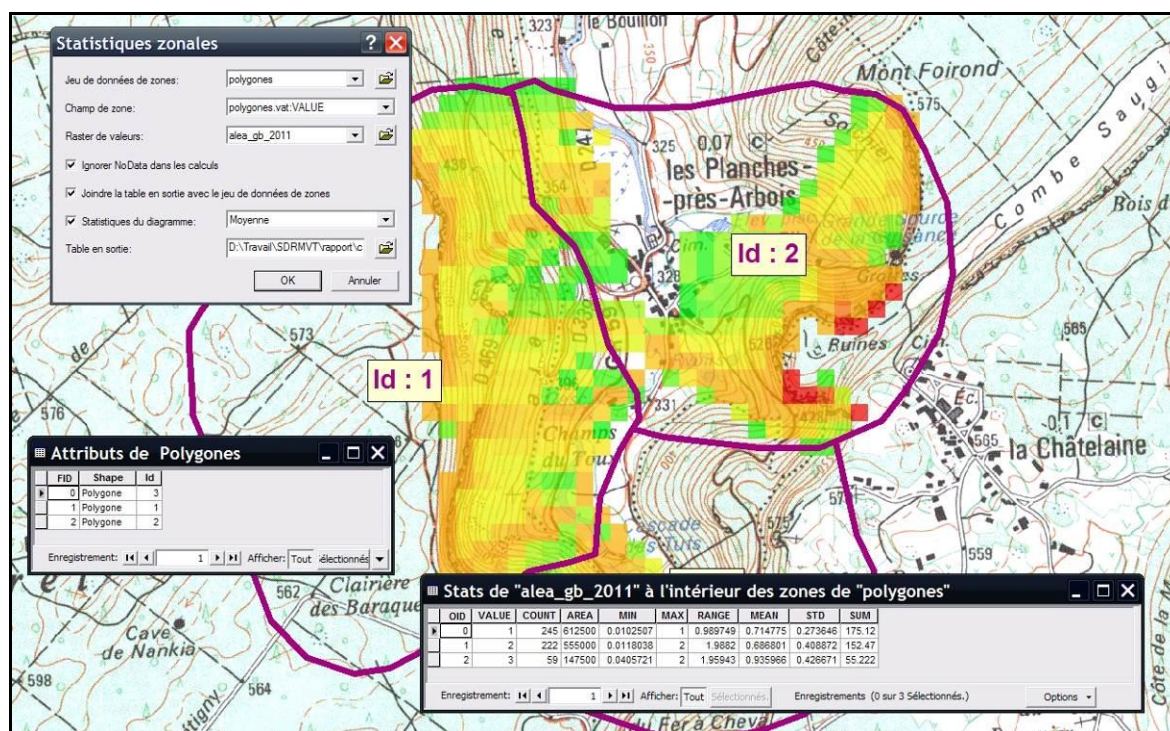


Figure 75 - exemple de calcul de l'exposition des éléments surfaciques

Une opération de Statistiques zonales (module Spatial Analyst d'ARCGIS) permet de calculer, pour chaque polygone, des valeurs statistiques (somme, moyenne, écart type, etc.) sur les mailles de la carte d'aléa incluses dans ces polygones. Ces statistiques sont regroupées par numéro de polygones dans la table « Stats de ... » (Figure 75), puis, par jonction de table, sont rapportées à la carte des polygones.

8.2.1.2 Eléments linéaires.

Quel que soit le phénomène, l'aléa évolue de manière continue le long d'un réseau. Afin d'évaluer l'exposition locale, les segments (« polygones » au sens SIG) qui constituent ce réseau sont découpées en tronçon pour lesquels le niveau d'aléa est homogène. Cette intersection entre le maillage régulier de la carte d'aléa et les polygones est effectuée par un module du logiciel ARMAGEDOM@brgm, qui a été intégré à ALICE®. Elle est illustrée à la Figure 76.

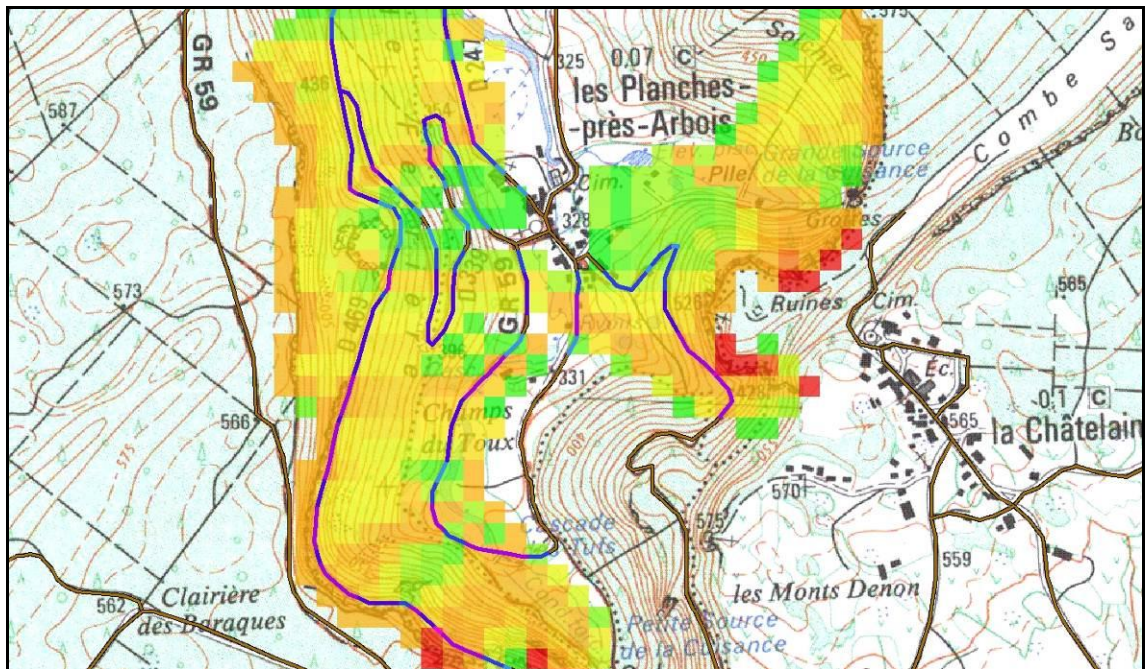


Figure 76 - Illustration de l'algorithme de calcul de l'intersection de polygones avec un fichier grille

A chaque tronçon est associé le niveau d'aléa en tant qu'attribut.

Cette opération permet de connaître les caractéristiques (localisation, longueur, niveau d'aléa) des tronçons exposés d'une route.

Si au préalable le réseau routier a été découpé par la carte des communes, avec pour chaque route un attribut « code INSEE de la commune » renseigné, il est possible d'agréger au niveau de chaque commune la somme des produits « longueur de tronçon » x « niveau d'aléa du tronçon », permettant ainsi de connaître, pour chaque commune, la longueur totale théorique de réseau affectée par un phénomène, pour le niveau de sollicitation de référence.

8.3 CARTES DE RISQUE

Elles résultent de la confrontation entre les quatre cartes d'exposition et les enjeux retenus (Commune, bâti, réseau routier, réseau routier principal).

Pour les cartes de risque communal et de risque au bâti, deux types de cartes sont présentées : des cartes de risque absolu et des cartes de risque relatif. Le niveau de risque est fonction de l'exposition globale de la zone, mais aussi de sa surface : à niveau d'exposition moyen identique, une zone deux fois plus vaste qu'une autre va présenter un niveau de risque deux fois plus élevé.

La carte de risque absolu est une carte qui présente, pour chaque enjeu (commune ou zone bâtie), le produit entre sa surface et une exposition « moyenne », probabilité avec une valeur comprise entre 0 et 1. Cette valeur, exprimée en hectares, est en fait calculée en chaque maille de l'enjeu, et sommée au niveau de cet enjeu.

Le risque est dit absolu, car, à exposition moyenne égale, un enjeu « important » (surface de la commune ou de la zone bâtie) présente une valeur absolue du risque plus importante qu'un enjeu plus réduit.

La carte de risque absolu établit une hiérarchisation visant un objectif d'efficacité absolu, qui peut se formuler de la manière suivante : « si l'on n'avait à choisir qu'une seule commune pour faire porter les efforts de prévention, en disposant de moyens illimités, laquelle serait choisie ? ».

Deux aspects limitent l'intérêt de la carte de risque absolu (qui reste toutefois essentielle dans l'analyse) :

- l'aspect « rentabilité » de la prévention. Cette rentabilité d'une action de prévention peut être définie par le ratio entre le gain de sécurité résultant de l'action et le coût de cette action. Suivant sa nature, il n'est pas certain qu'une action d'une dimension donnée soit globalement plus efficace en milieu urbain qu'en milieu rural. Les deux exemples, ci-après, illustrent ainsi des situations opposées :
 - la réalisation d'un plan de prévention des risques peut s'avérer tout aussi coûteux, voire plus, pour une petite commune que pour une grosse. Son coût de mise en œuvre va dépendre en effet – entre autre - de la complexité du contexte et de la superficie à traiter. Il peut être dans ce cas plus rentable de le mettre en œuvre de manière prioritaire sur la commune importante, présentant un niveau de risque absolu plus fort que sur la petite.
 - Une action d'information préventive, faiblement dotée, sera a priori beaucoup plus efficace sur une petite commune que sur une grosse, chaque habitant recevant individuellement une « part » plus importante d'information, part qui a ainsi plus de chance de dépasser le seuil minimum qui la rend audible et efficace. Dans ce cas, la hiérarchisation basée sur le risque absolu n'est pas pertinente.

- L'aspect « égalité de traitement du citoyen³ ». Un citoyen est en droit d'attendre, si ce n'est le même niveau de sécurité, en tout cas la même attention sur sa sécurité quel que soit l'endroit où il habite. Peu importe alors de savoir si globalement la commune où il habite présente un niveau de risque absolu élevé, il est dans ce cas important de connaître la probabilité que ses biens, en particulier le logement, ont d'être endommagés, et, surtout, de pouvoir comparer (appréciation relative) cette probabilité avec celle de logements situés ailleurs.

Pour ces raisons, il est proposé une **carte de risque relatif**, laquelle renseigne, au niveau de l'ensemble de la commune ou pour les zones bâties, le taux d'exposition moyen (risque absolu / surface de la zone). Contrairement à la carte de risque absolu (qui évalue de manière globale la somme des dommages potentiels que risque de subir une commune), ces cartes sont destinées à mettre en évidence les communes pour lesquelles un logement quelconque présente (en moyenne) le niveau de risque le plus élevé.

Cette carte peut répondre à la question « où faut-il acheter un logement pour minimiser le risque ? ».

8.3.1 Cartes de risque communal

Pour chaque phénomène de mouvements de terrain, à savoir 1) glissements, 2) coulées, 3) chutes de gros blocs, 4) chutes de petits blocs, sont calculées deux cartes :

- Une carte communale de risque absolu (**Annexe 8**, cartes **1 à 4**),
- Une carte communale de risque relatif (**Annexe 8**, cartes **5 à 8**).

Ces deux types de cartes sont élaborés par calcul d'exposition d'éléments surfaciques. Les résultats sont reportés par communes.

³ « La France est une République indivisible, laïque, démocratique et sociale. Elle assure l'égalité devant la loi de tous les citoyens sans distinction d'origine, de race ou de religion... » : Article 1^{er} de la constitution de 1958. « Les hommes naissent et demeurent libres et égaux en droits... » : Article 1^{er} de la déclaration des droits de l'homme et du citoyen. « La Nation proclame la solidarité et l'égalité de tous les Français devant les charges qui résultent des calamités nationales. » : Préambule de la constitution du 27 octobre 1946. La déclaration des droits de l'homme et le Préambule de la constitution de 1946 font partie du bloc de constitutionnalité.

Carte de risque absolu (Figure 77)

Pour chaque commune, on calcule le produit d'attribut « SUM » de la table « Stat » par la taille de la maille en hectare (0.25 ha), ce qui permet de connaître la superficie communale théorique susceptible d'être affectée par le phénomène pour une sollicitation hydro-pluviométrique extrême.

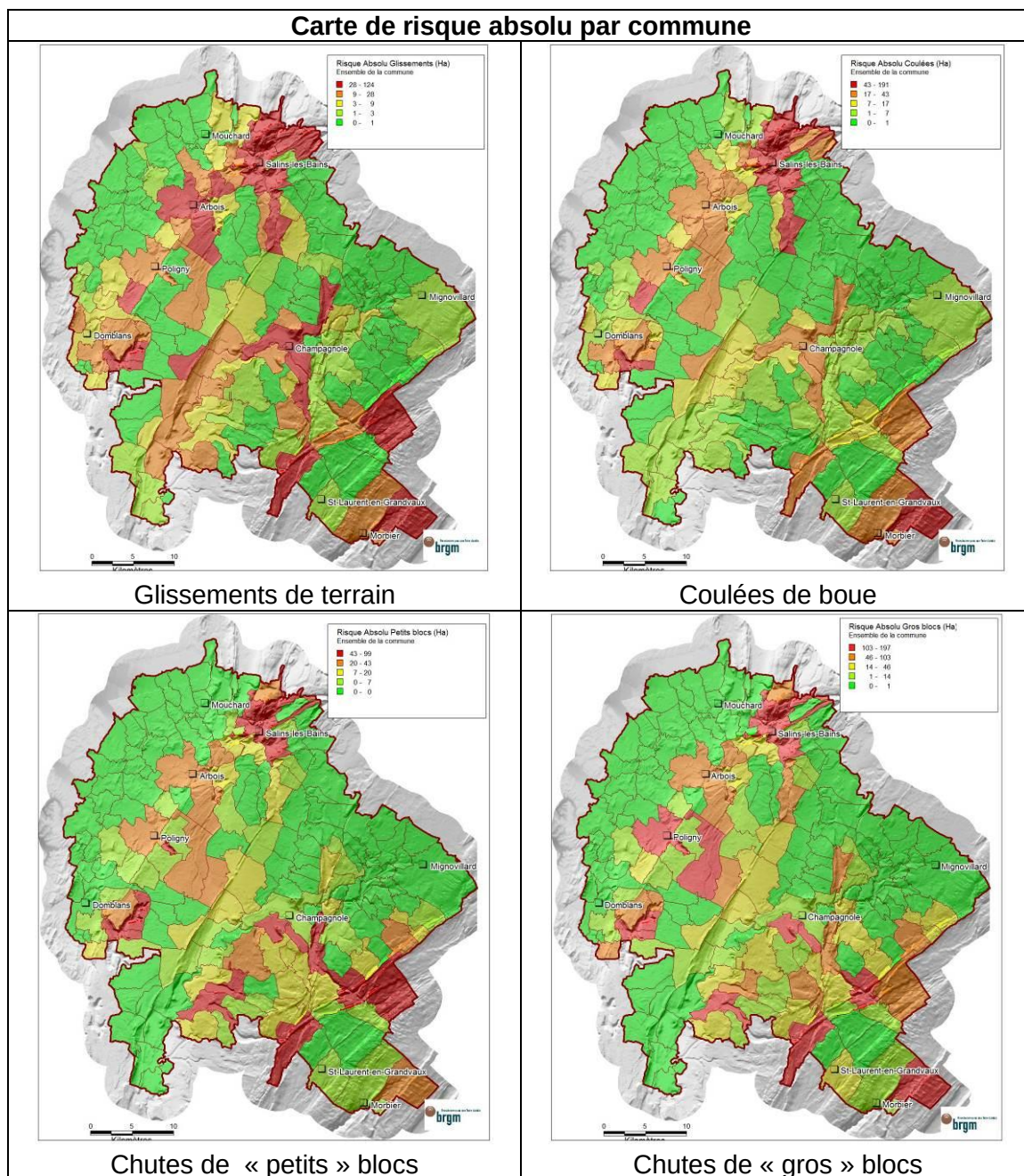
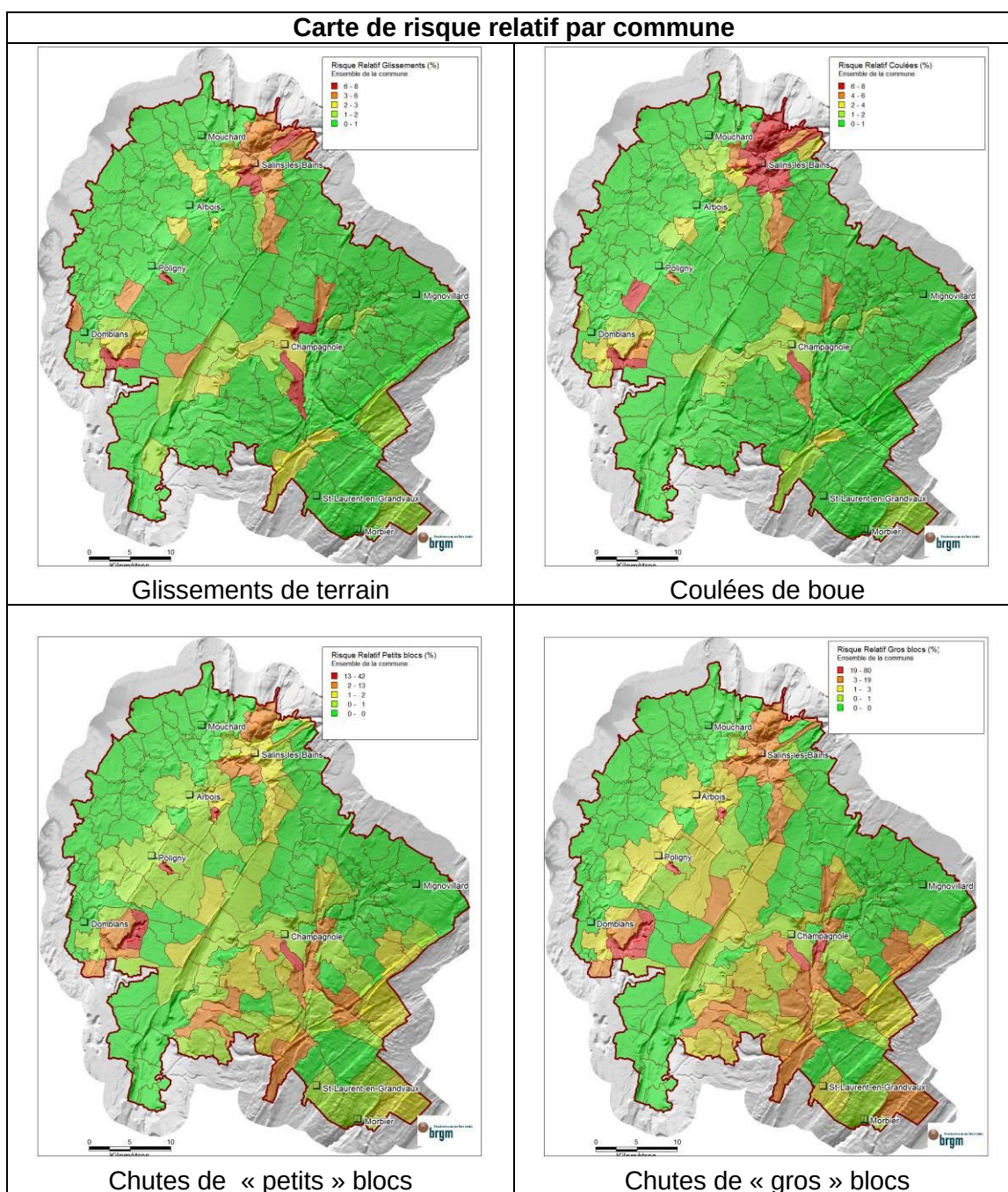


Figure 77 – Cartes de risque absolu par commune

Carte de risque relatif (Figure 78)

Pour chaque commune, on calcule le rapport entre le risque absolu (une surface en hectare) par la surface de la commune (colonne Area de la table « stat ») et on l'exprime en pourcentage. Ce risque relatif permet de connaître la proportion de la superficie communale théorique susceptible d'être affectée par le phénomène pour une sollicitation hydro-pluviométrique extrême, par rapport à l'ensemble de la commune.



8.3.2 Cartes de risque du bâti, représenté au niveau communal

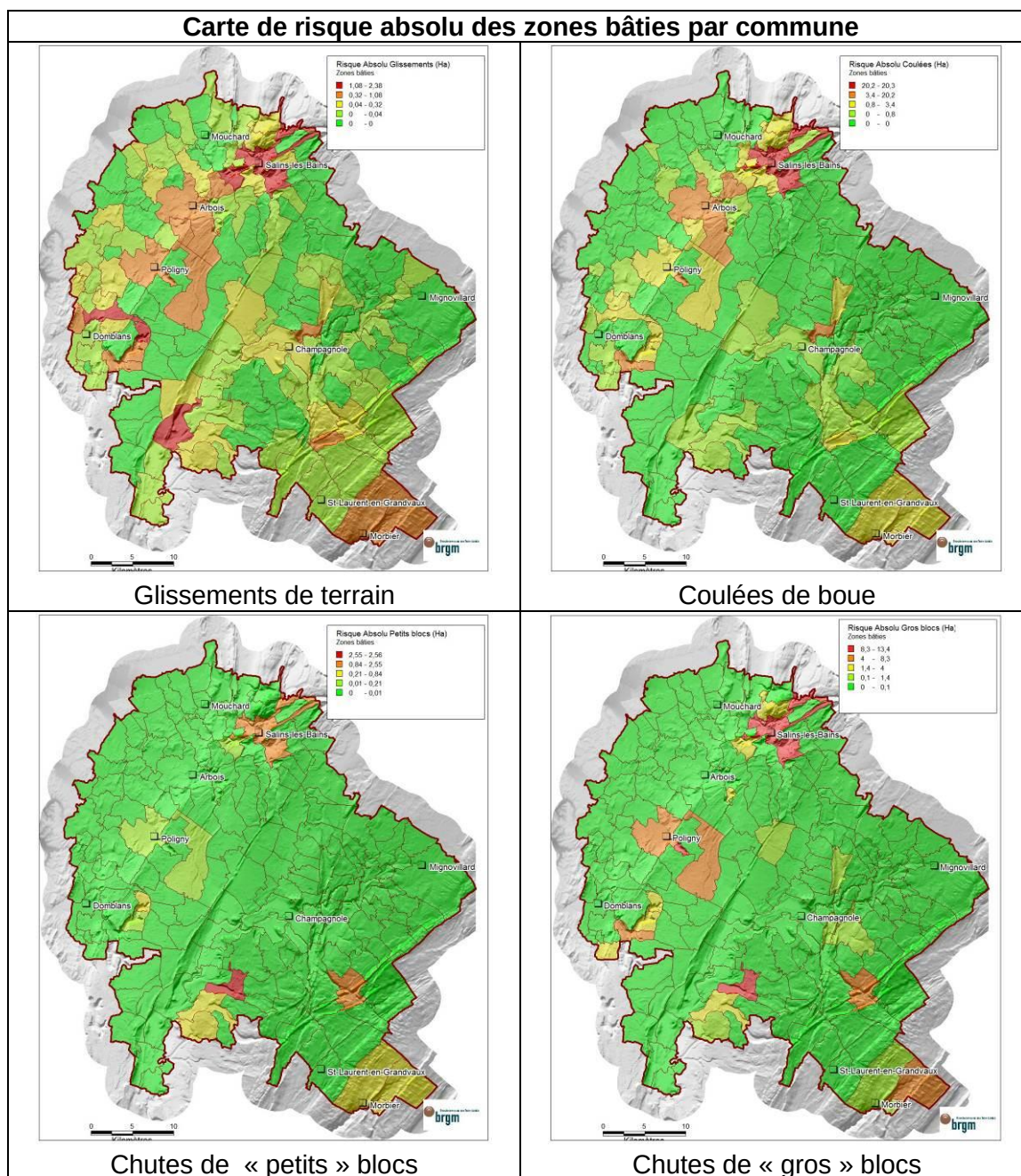
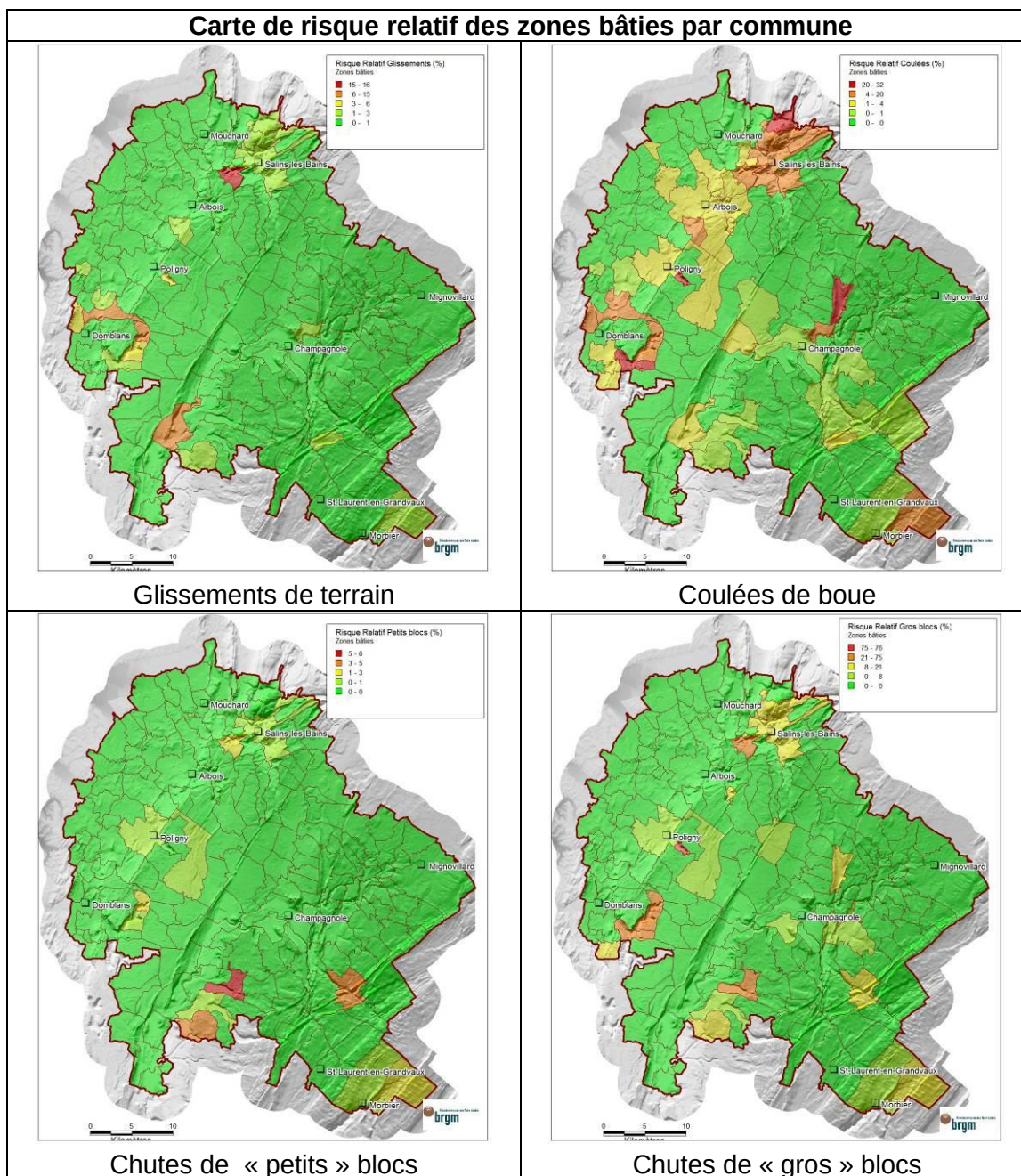


Figure 79 – Cartes de risque absolu des zones bâties par commune

De la même manière qu'au chapitre précédent (8.3.1), 4 cartes de risque absolu (en Figure 79 et Annexe 8, cartes 9 à 12), et quatre de risque relatif sont calculées pour le bâti (en Figure 80 et Annexe 8, cartes 13 à 16).

Pour le calcul de l'exposition, les polygones de référence ne sont plus les communes, mais les zones bâties. Par contre, les résultats ne sont pas reportés au niveau cartographique par une symbolique (couleur) sur les polygones de contour des zones bâties, mais sur les communes englobantes. Cela nécessite une opération SIG d'agrégation, une commune pouvant comporter plusieurs zones bâties.



8.3.3 Cartes de risque du réseau routier

Le réseau routier a été traité dans son ensemble, puis plus spécifiquement le réseau routier principal, et cela toujours pour les quatre aléas.

8.3.3.1 Carte d'exposition du réseau routier dans son ensemble et sur le réseau principal

Bien que résultant d'une simple intersection entre la carte d'aléa et le réseau routier, la carte brute d'exposition du réseau, reportant pour chaque phénomène les niveaux d'aléa le long du tracé à l'échelle de la maille, a été composée afin de localiser avec une bonne précision les portions pouvant poser problèmes.

La Figure 81 présente les 4 cartes obtenues pour l'exposition du réseau routier total. La Figure 82 correspond à celles du réseau routier principal.

8.3.3.2 Carte des niveaux de risque du réseau routier par commune

Ces cartes montrent les valeurs de risque, somme des produits entre la longueur d'un tronçon et du niveau d'aléa auquel il est exposé. Le résultat est ainsi agrégé au niveau de chaque commune traversé par les tronçons, et représenté sur une carte par type de phénomène.

La Figure 83 présente les 4 cartes de risque du réseau routier total. La Figure 84 correspond à celles du réseau routier principal.

On trouvera en **Annexe 8**, l'ensemble des cartes sur le risque du réseau routier, avec :

	Exposition ensemble sur réseau (longueur de route)	Risque du réseau routier total	Exposition sur réseau principal (longueur de route)	Risque du réseau routier principal
Risque de glissements de terrain	Carte 17	Carte 18	Carte 19	Carte 20
Risque de chutes de « petits » blocs	Carte 21	Carte 22	Carte 23	Carte 24
Risque de chutes de « gros » blocs	Carte 25	Carte 26	Carte 27	Carte 28
Risque de coulées de boue	Carte 29	Carte 30	Carte 31	Carte 32

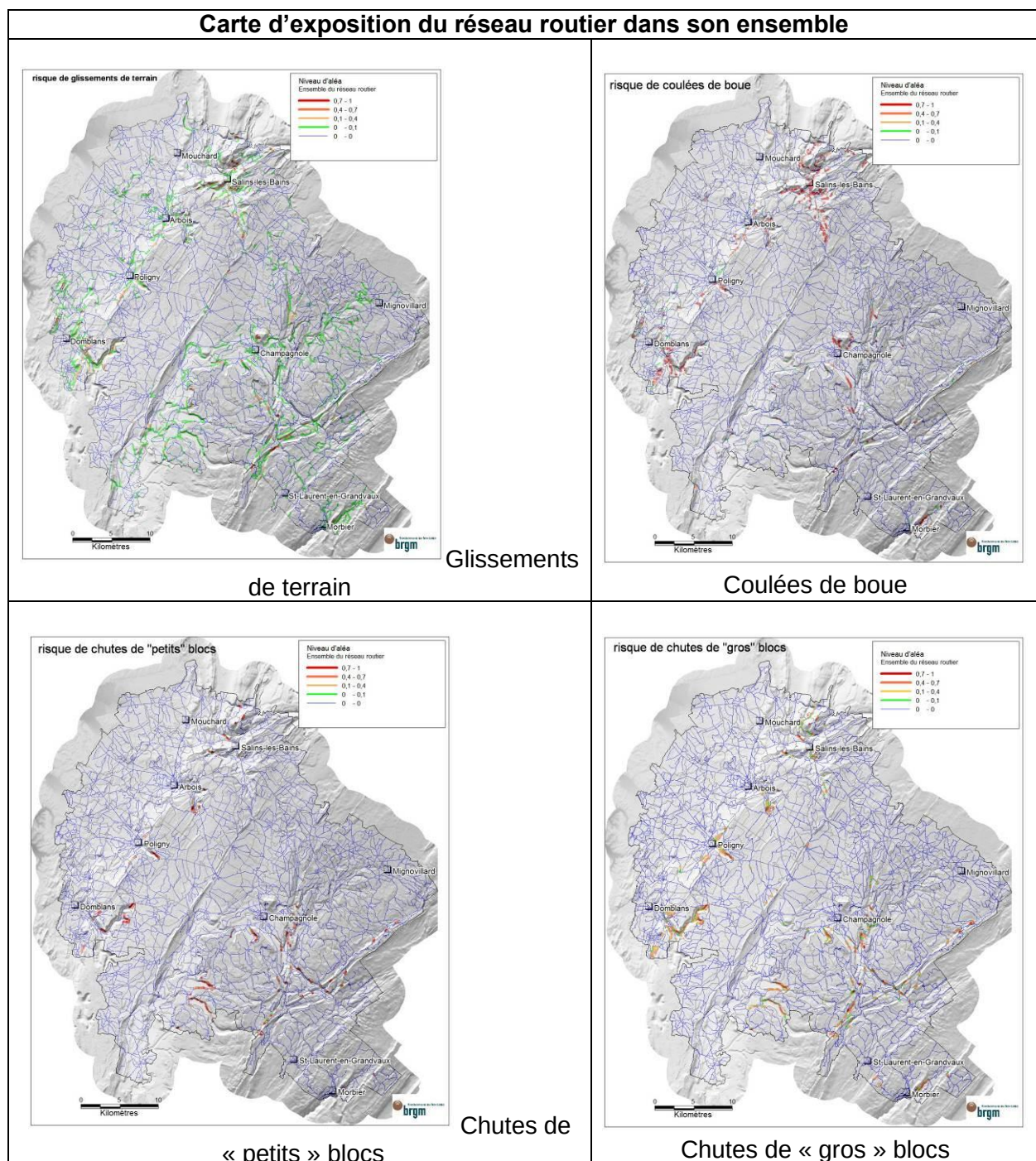


Figure 81 – Cartes d'exposition du réseau routier dans son ensemble

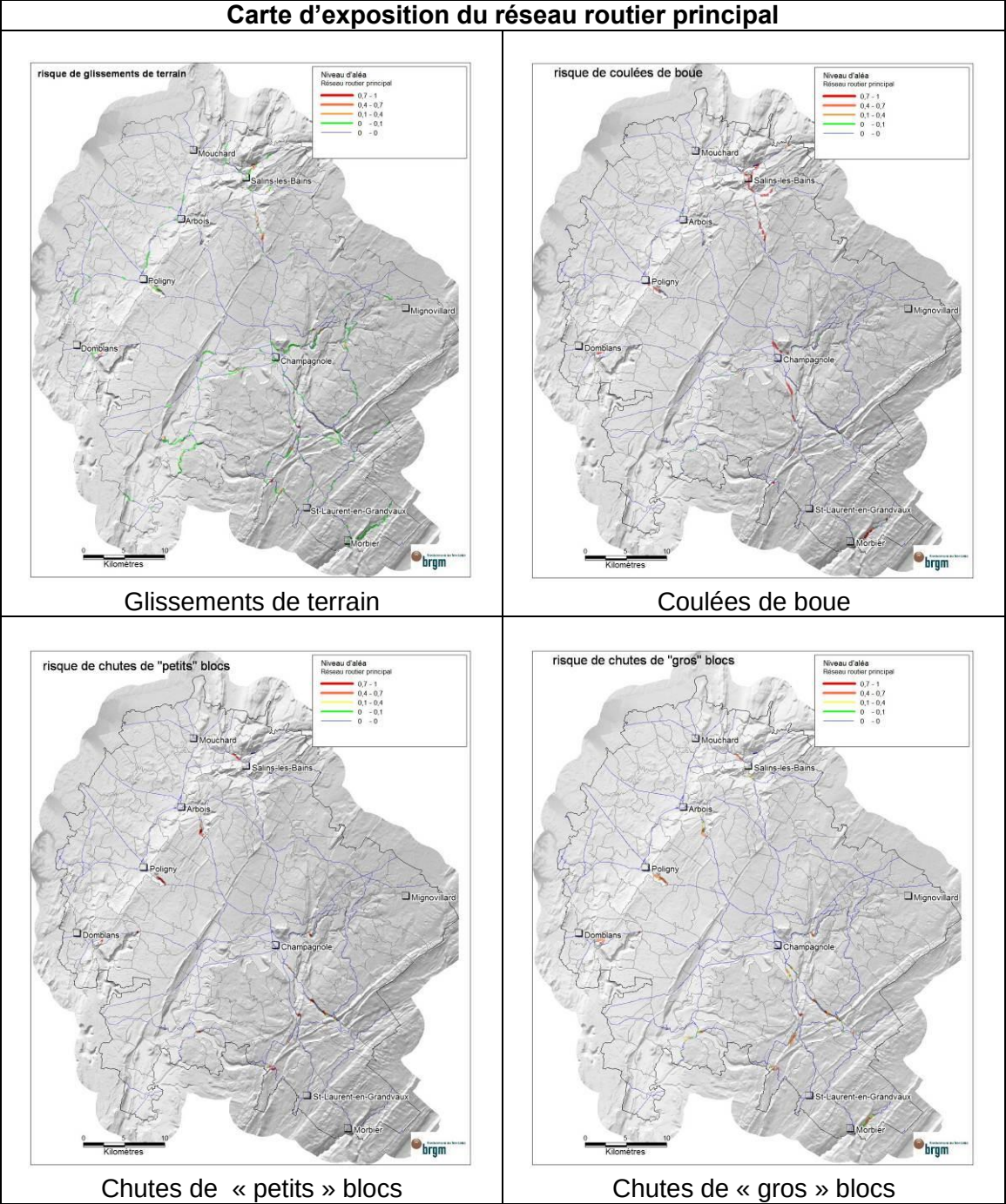


Figure 82 – Cartes d'exposition du réseau routier principal

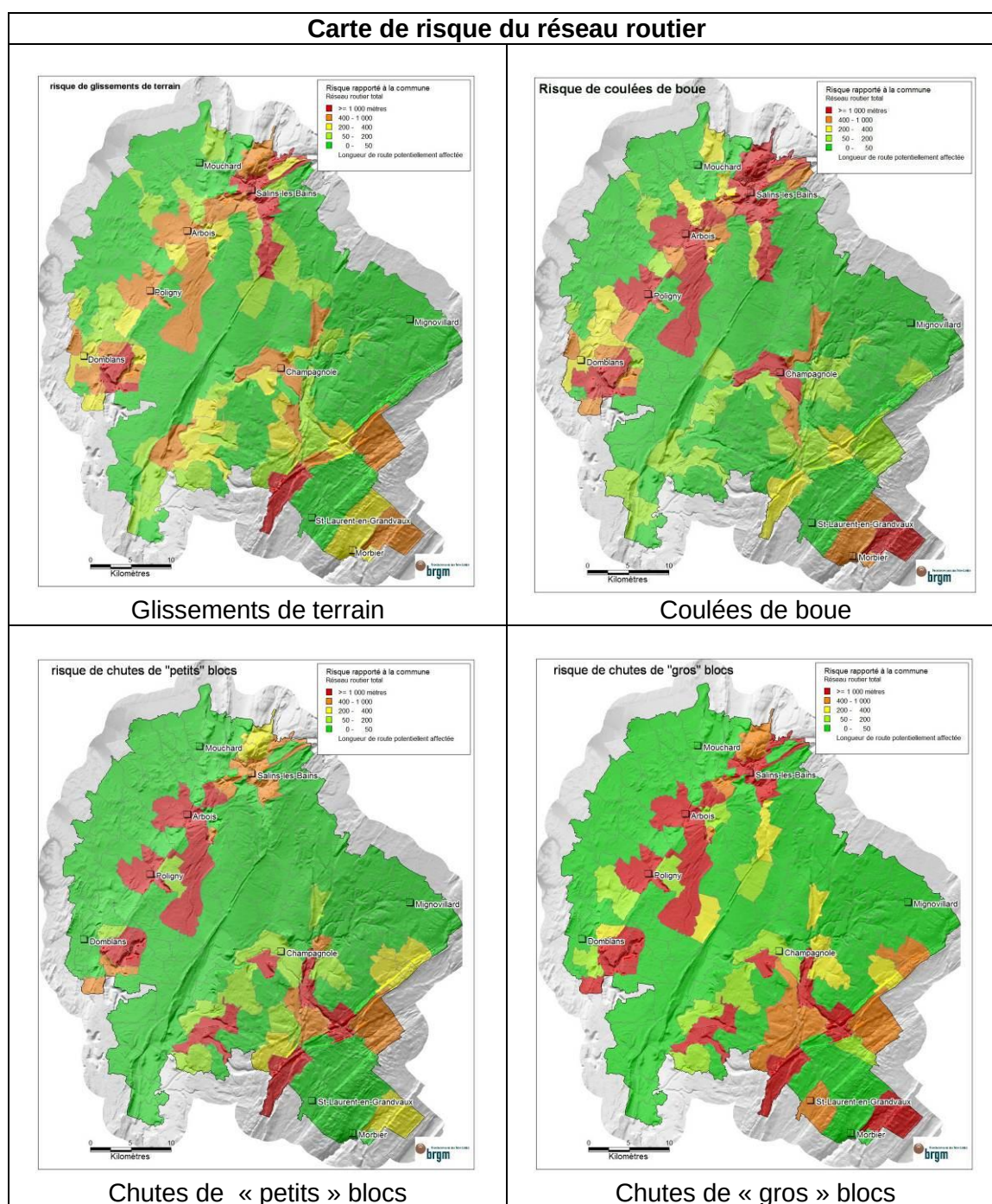


Figure 83 – Cartes de risque du réseau routier dans son ensemble

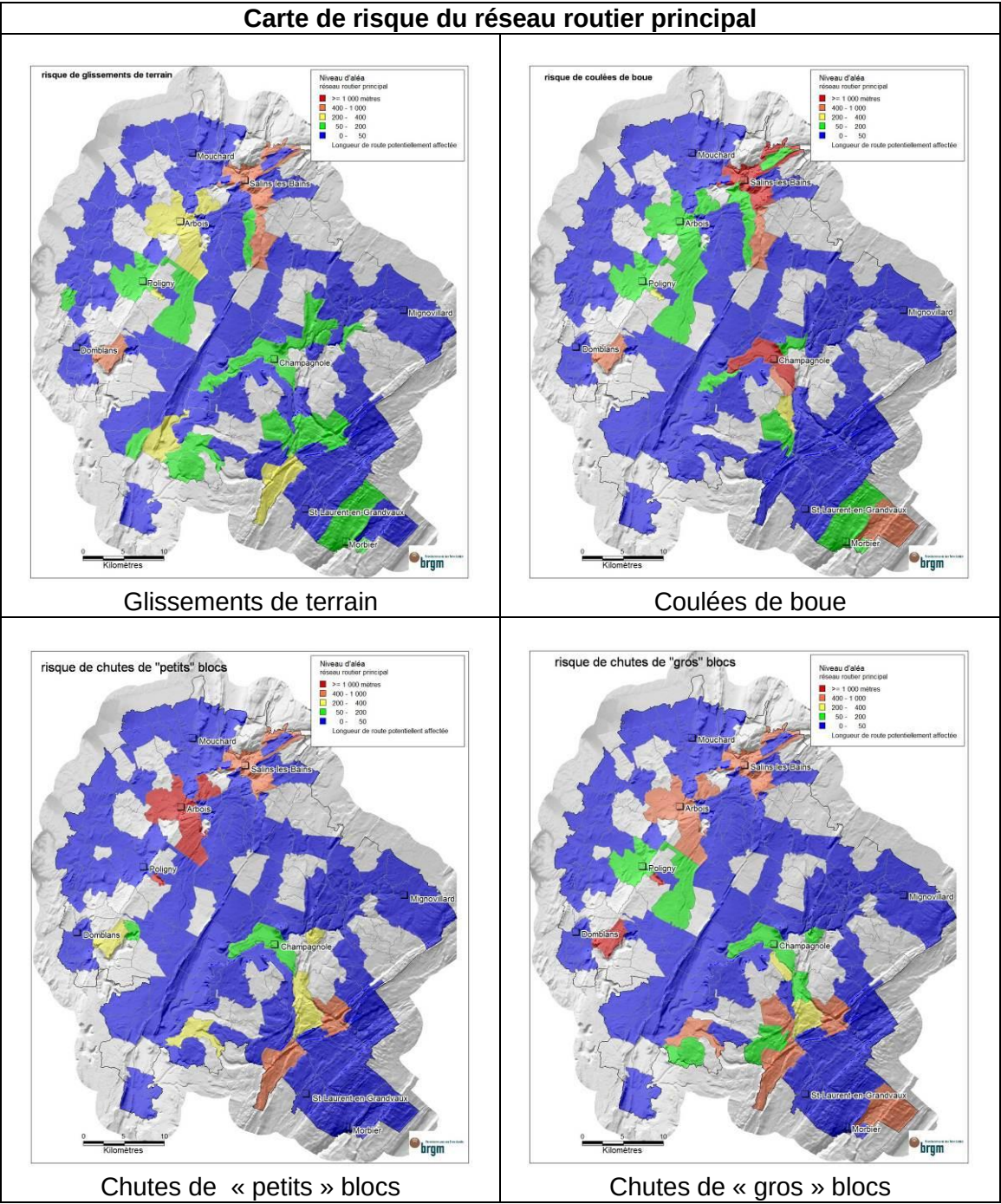


Figure 84 – Cartes de risque du réseau routier principal

8.4 HIERARCHISATION DU RISQUE A L'ECHELLE DEPARTEMENTALE

Les cartes de risques explicitées aux chapitre précédent présentent la spécificité de proposer une quantification du risque, ce pour un phénomène donné.

On peut donc, par exemple, en conclure que le risque aux zones bâties de Salins-les-Bains, avec 2,4 Ha potentiellement affectés, est environ 5 fois plus important qu'à Poligny, où seulement 0,44 Ha seraient touchés, et ce pour le phénomène hydro-pluviométrique de référence.

Si les glissements étaient les seuls phénomènes de mouvements de terrain à prendre en compte au niveau de la programmation des Plans de Prévention des Risques, ces cartes constitueraient un outil particulièrement objectif de hiérarchisation.

Mais deux faits, liés, viennent limiter le plein usage de ces cartes :

- L'évaluation de la composante « aléa de rupture » des phénomènes de chutes de blocs, gros ou petits, reste basée sur une approche purement qualitative, même si son expression est relativement arbitrairement quantifiée.
- Même si des méthodes de quantification de cette composante de l'aléa avaient pu être mises en œuvre, il aurait fallu pouvoir comparer les fréquences des phénomènes déclencheurs des chutes de bloc et celles des glissements de terrain.

Ce sont là les deux aspects sur lesquels les spécialistes doivent faire encore un gros effort de recherche et développement.

Le nombre important de cartes produites aux chapitres précédents, et ceux pour des phénomènes différents, rendent difficile une hiérarchisation des communes. La nécessité de disposer d'éléments d'aide à la décision plus simples et plus efficaces, tenant compte des contraintes qu'impose une qualification partielle de l'aléa chutes de blocs, a conduit à mettre en œuvre une approche simplifiée par analyse multicritère.

Comme il vient d'être rappelé, la nature des valeurs retenues pour élaborer toutes ces cartes sont différentes d'une carte à l'autre.

Afin de faciliter la lecture et l'exploitation des cartes, le parti a été pris de limiter le nombre de classes à cinq (il est toutefois toujours possible de connaître les valeurs individuelles des valeurs de chaque commune). Cette contrainte nous a conduit à retenir une méthode de classification relativement universelle, celle des « seuils naturels » (« natural breaks ») de Jenks et Caspall (1971).

Chaque commune, pour chaque type de risque (absolu/relatif), pour chaque type d'enjeux (total commune/zone bâtie) et pour chaque phénomène, a reçu une note de 0 à 4, fonction de cette classification, qui correspond donc à sa position dans la légende des cartes (0 : vert – 4 : rouge). Ces notes, 16 par communes, ont été regroupées dans un fichier global (Figure 85)

NOM_COMMUNE	INSEE	PB_CTOTABS	PB_CBATABS	PB_CTOTREL	PB_CBATREL	GB_CTOTABS	GB_CBATABS	GB_CTOTREL	GB_CBATREL	CL_CTOTABS	CL_CBATABS	CL_CTOTREL	CL_CBATREL	GL_CTOTABS	GL_CBATABS	GL_CTOTREL	GL_CBATREL
ABERGEMENT-LE-GRAND	39002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABERGEMENT-LES-THEY	39004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AIGLEPIERRE	39006	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	2	0	0	0
ANDELOT-EN-MONTAGNE	39009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
ARDON	39015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ARSURE-ARSURETTE	39020	3	0	2	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BARRETAINE	39040	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BELLEFONTAINE	39047	3	2	2	2	4	3	3	2	4	2	1	3	4	3	1	1
BERSAILLIN	39049	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
BESAIN	39050	3	0	2	0	3	0	3	0	1	0	0	0	1	0	0	0
BIEF-DU-FOURG	39053	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
BLOIS-SUR-SEILLE	39057	4	1	4	1	4	2	4	3	3	2	3	3	4	3	3	2
BLYE	39058	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	1	1	0
BONNEFONTAINE	39065	2	0	2	0	2	0	3	0	3	0	1	0	4	0	3	0
BOURG-DE-SIROD	39070	4	0	3	0	3	1	4	1	1	0	0	0	1	0	0	0
BRACON	39072	2	0	3	0	2	0	3	0	4	2	4	3	4	2	4	0
BRERY	39075	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	3	3	3	3	2

Figure 85 - Extrait de la feuille Excel de notation globale

Reste alors à définir, pour chaque type de risque et pour chaque type d'enjeux, la règle arithmétique de combinaison des notes. Si les risques « élémentaires » étaient équivalents, la somme des quatre notes élémentaires (celles des quatre phénomènes) pourrait être une bonne formulation.

Mais ce n'est pas le cas. Une note résulte de la classification des valeurs de risque, et non de la valeur elle-même. Une note de 4 pour le risque coulée correspond par exemple à des niveaux de risque (surface potentiellement inférieure) plus faibles que pour la même note pour le risque glissement. Mais, a contrario, une coulée est potentiellement plus dangereuse pour certains enjeux qu'un glissement... Il peut donc être utile de pondérer les notes de chaque catégorie par un coefficient multiplicateur.

Le choix des valeurs de ces coefficients est forcément très subjectif. La méthode a toutefois l'avantage d'être très facile à mettre en œuvre, et des calculs différents, pour prendre en compte des avis ou des besoins divers, peuvent être aisément réalisés.

A titre démonstratif, nous avons choisi une valeur de 2 pour les coefficients correspondant aux notes des glissements et des chutes de gros blocs, et de 1 pour les deux autres.

On a établi, par type de risque et type d'enjeux, des cartes illustrant les résultats, notés sur 24 (Figure 86 à Figure 89). Bien évidemment, plus la note est élevée, plus le niveau de risque global est important.

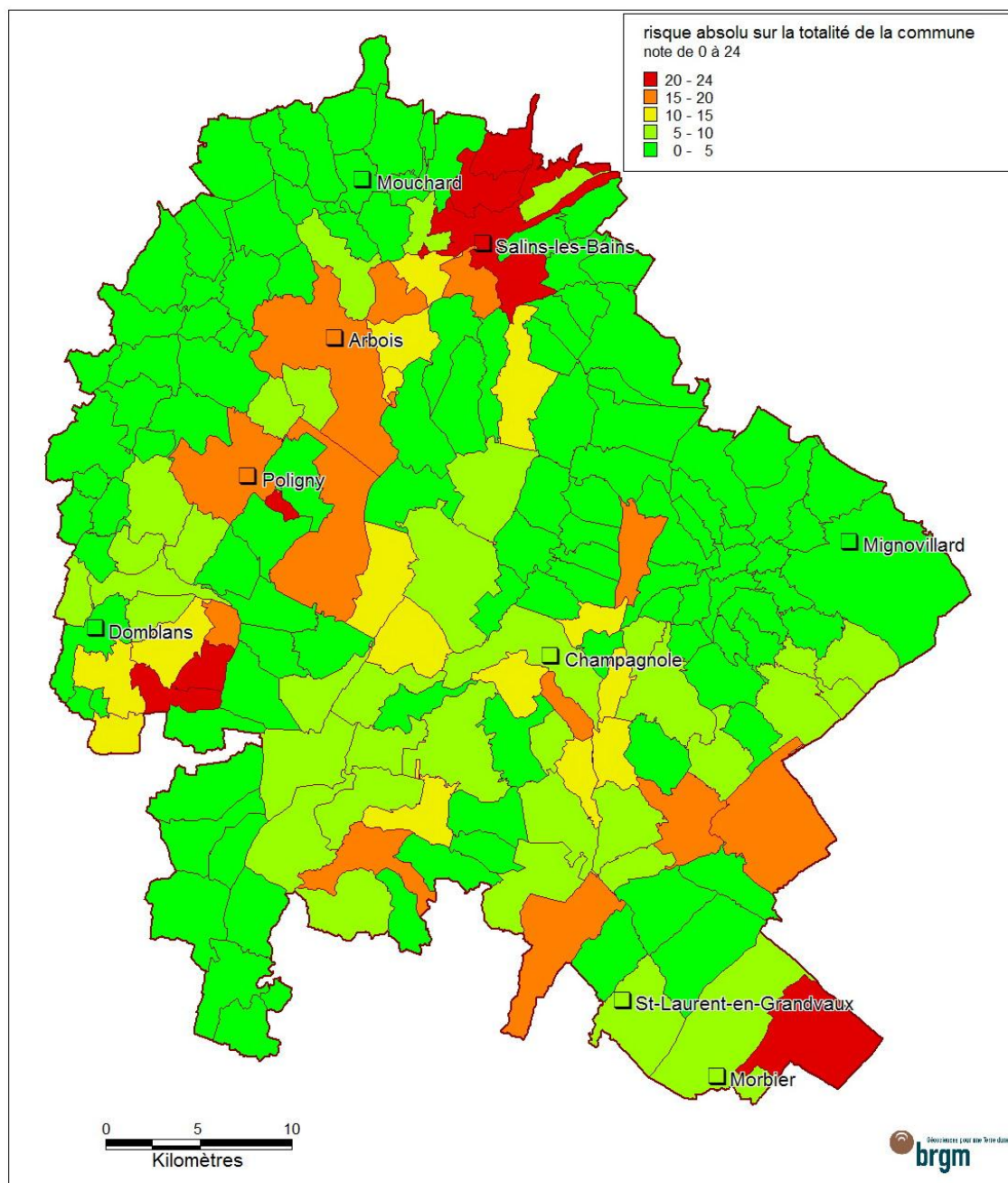


Figure 86 - Carte du risque absolu sur la totalité de la commune

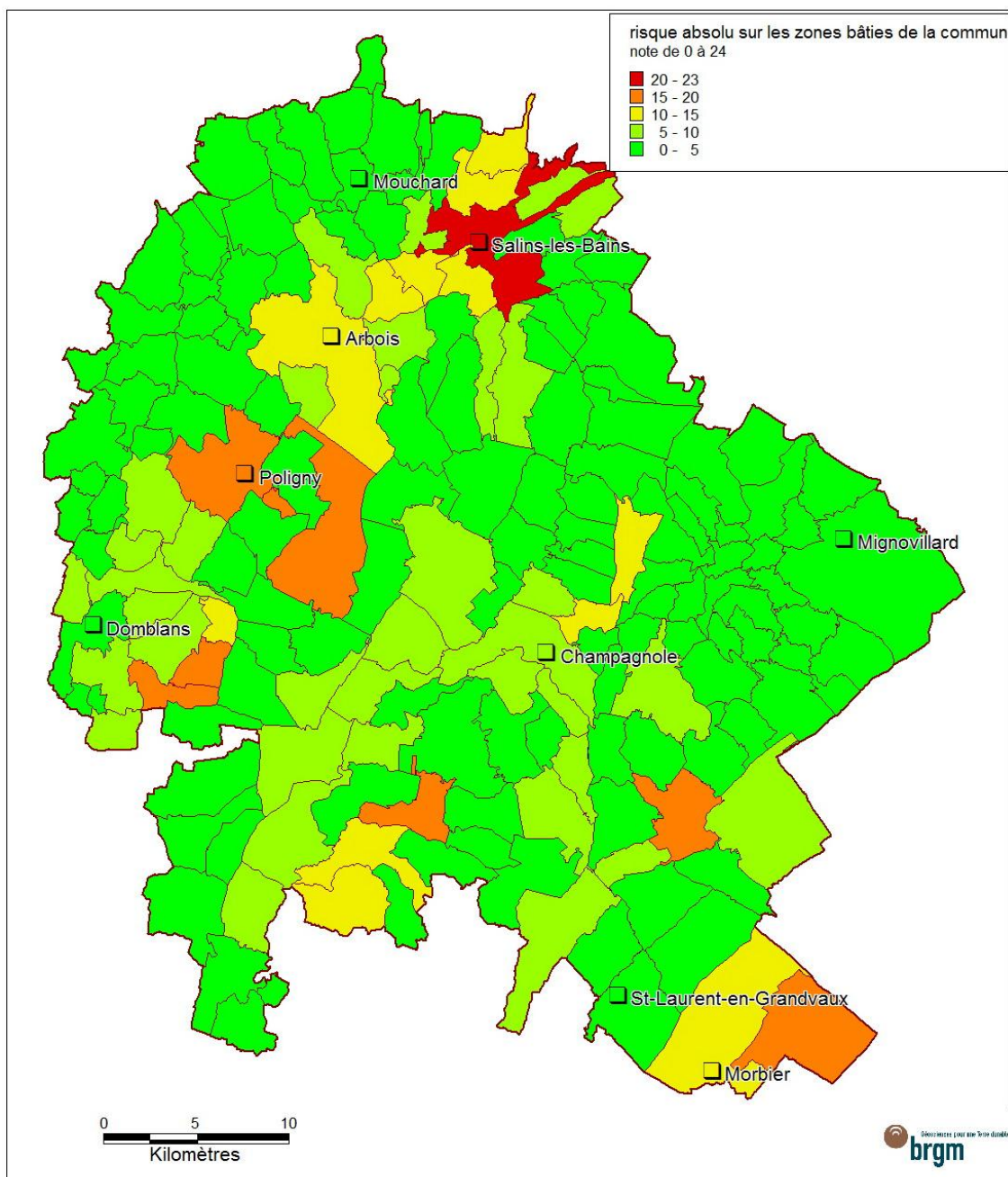


Figure 87 - Carte du risque absolu sur les zones bâties de la commune

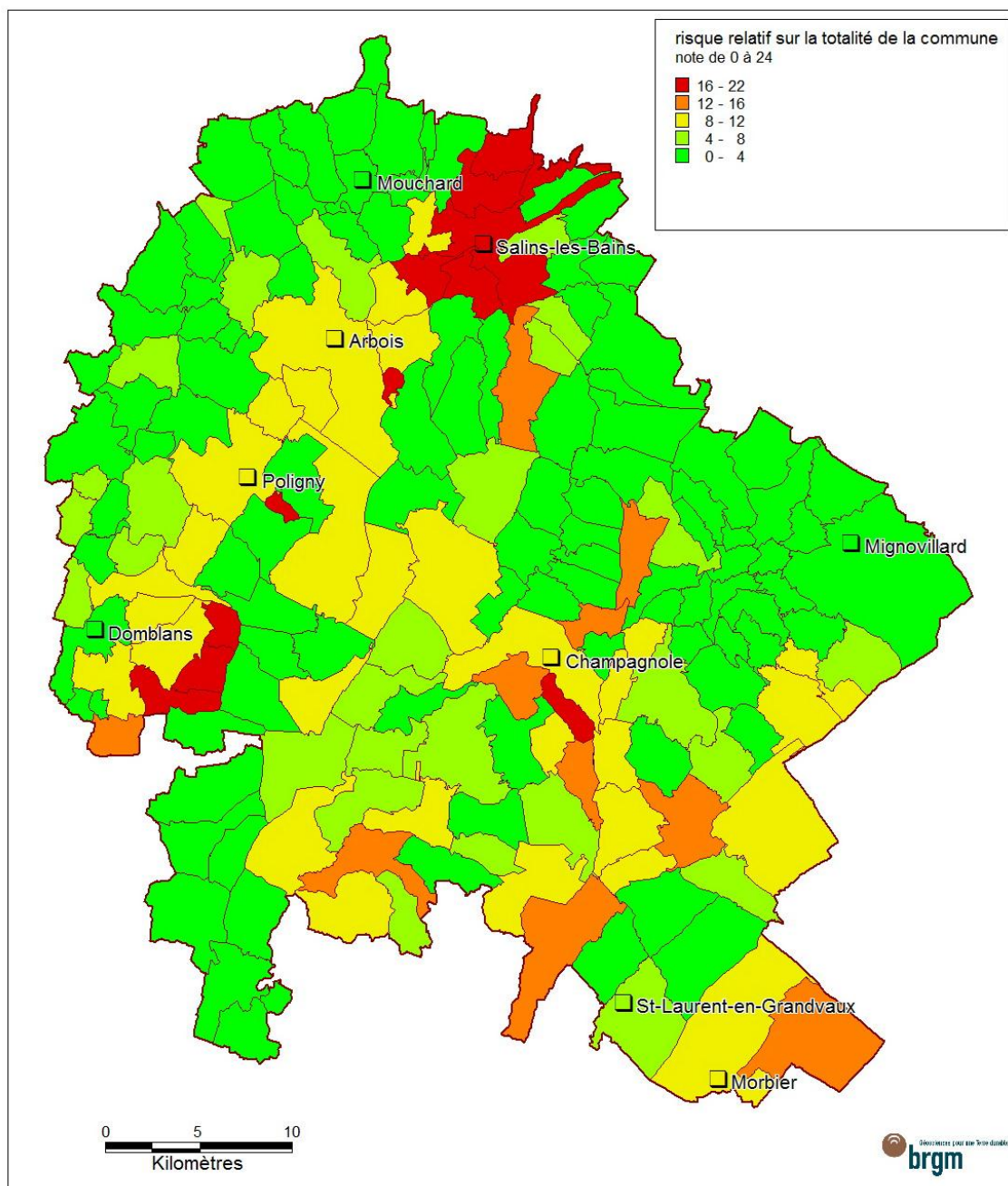


Figure 88 - Carte du risque relatif sur la totalité de la commune

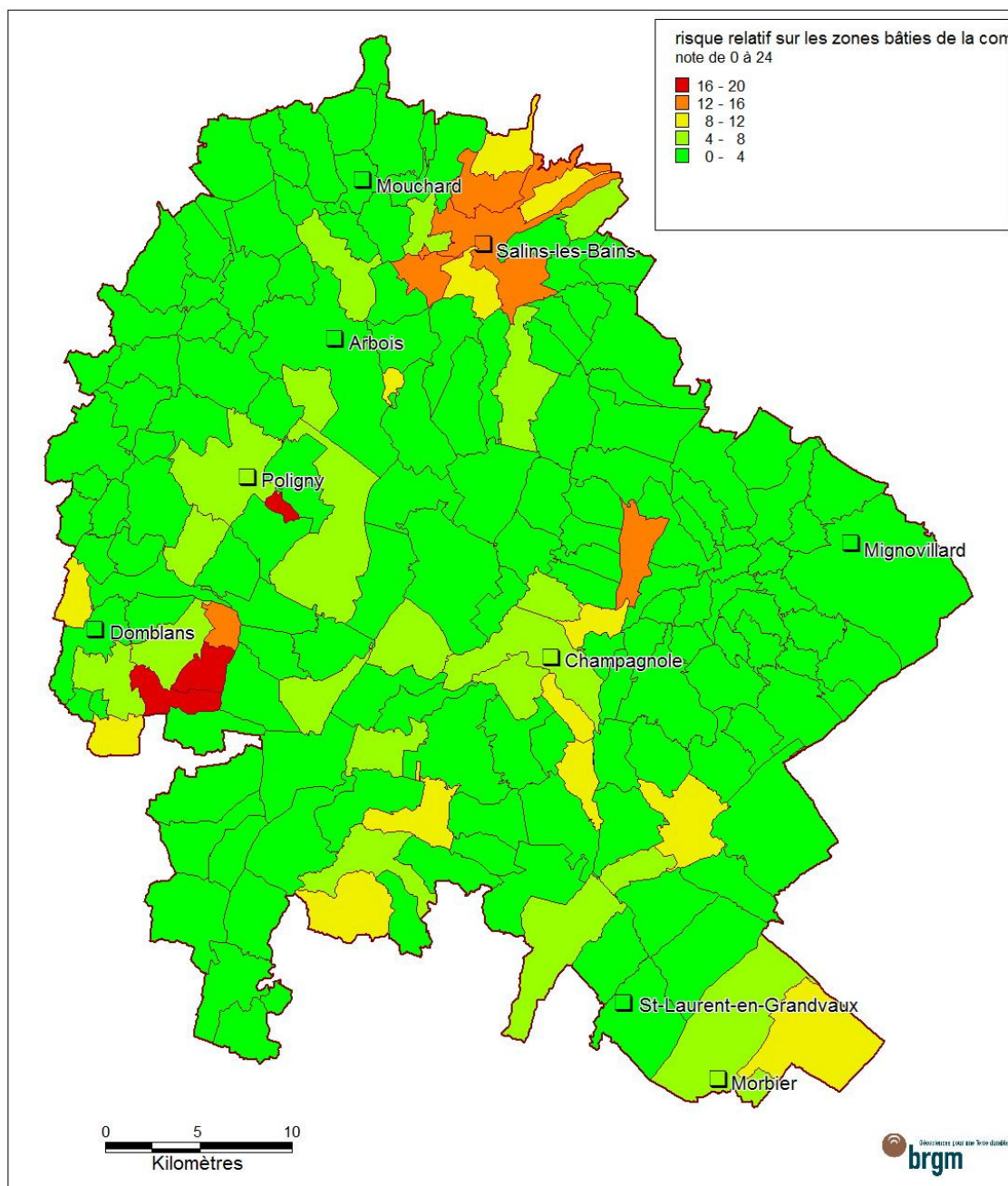


Figure 89 - Carte du risque relatif sur les zones bâties de la commune

On remarque que la ville de Salins – les – Bains montre une valeur de risque toujours très élevée, quelle que soit la carte. Les niveaux de risque de Poligny sont également pour la plupart élevés.

Des classements plus formels peuvent être établis, sous forme de listes de résultats. Ne sont affichés dans les tableaux présentés en exemple (Tableau 15 à Tableau 18) que les communes qui ont des notes supérieures « à la moyenne ». On y retrouve toujours Salins-les-Bains, et souvent Poligny.

En ce qui concerne l'interprétation de ces cartes et tableaux, il est clair qu'une commune qui figure dans le peloton de tête pour chaque tableau mérite a priori un traitement prioritaire. Il semble logique ensuite de privilégier le risque au niveau des zones bâties (même si par définition elles s'étendront dans des zones non bâties). Par contre, choisir entre risque relatif et risque absolu est plus délicat, et pourrait faire l'objet d'une analyse plus fine de type « coût-bénéfice ».

NOM_COMMUNE	INSEE	PB_CTOTABS	PB_CBATABS	PB_CTOTREL	PB_CBATREL	GB_CTOTABS	GB_CBATABS	GB_CTOTREL	GB_CBATREL	CL_CTOTABS	CL_CBATABS	CL_CTOTREL	CL_CBATREL	GL_CTOTABS	GL_CBATABS	GL_CTOTREL	GL_CBATREL	Classe TOTABS
NEVY-SUR-SEILLE	39388	4	0	3	0	4	3	4	3	4	3	4	4	4	3	4	1	24
VAUX-SUR-POLIGNY	39548	4	0	4	0	4	4	4	4	2	3	3	4	3	3	4	2	22
SAINT-THIEBAUD	39495	4	0	3	0	4	2	3	2	4	2	4	3	4	2	3	1	22
SALINS-LES-BAINS	39500	4	3	2	1	4	4	3	2	4	4	4	3	4	4	3	1	22
BELLEFONTAINE	39047	3	2	2	2	4	3	3	2	4	2	1	3	4	3	1	1	21
BLOIS-SUR-SEILLE	39057	4	1	4	1	4	2	4	3	3	2	3	3	4	3	3	2	21
IVREY	39268	3	0	3	0	3	0	3	0	4	2	4	4	4	2	3	1	21
LES NANS	39381	2	0	2	0	3	1	3	2	3	2	3	4	4	2	3	0	19
LADOYE-SUR-SEILLE	39272	4	2	4	2	3	2	4	3	2	2	2	3	3	4	2	3	18
POLIGNY	39434	3	1	1	1	4	3	2	1	3	2	0	2	3	3	0	0	18
BRACON	39072	2	0	3	0	2	0	3	0	4	2	4	3	4	2	4	0	16
ARBOIS	39013	3	0	1	0	3	0	2	0	3	3	0	2	4	3	0	0	16
LES PLANCHES-EN-MONTAGNE	39424	4	3	3	3	4	3	3	2	2	1	0	1	3	2	0	0	16
CIZE	39153	4	0	4	0	4	0	4	0	3	0	4	0	4	1	4	0	15
LA CHAUX-DU-DOMBIEF	39131	4	0	3	0	4	0	3	0	3	0	1	0	4	1	2	0	15
DOUCIER	39201	4	2	3	1	4	2	3	1	1	1	0	1	2	2	0	0	15
FONCINE-LE-HAUT	39228	4	0	2	0	3	0	2	0	3	1	0	1	4	1	1	0	15
LAVIGNY	39288	2	0	3	0	3	2	3	2	2	1	1	2	2	1	1	0	14
PRETIN	39444	2	1	3	2	2	2	3	3	2	2	2	3	3	4	2	4	14
NEY	39389	4	0	3	0	4	0	3	1	2	0	1	0	3	2	1	0	14
LES PLANCHES-PRES-ARBOIS	39425	3	0	4	0	3	2	4	2	0	0	2	2	2	1	2	0	13
SYAM	39523	4	0	3	0	3	0	3	0	1	1	0	1	1	1	0	0	13
FONTENU	39230	4	4	3	4	3	4	3	3	0	1	0	1	1	1	0	0	12
CHATEAU-CHALON	39114	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0	2	0	3	0	2	0	12
CROTENAY	39183	2	0	1	0	2	0	2	0	2	1	0	2	3	1	1	0	12
EQUEVILLON	39210	1	0	1	0	1	0	2	0	3	3	2	3	4	3	4	1	12
PONT-D'HERY	39436	2	0	2	0	3	0	3	0	4	0	3	0	4	1	3	0	12
MESNAY	39325	2	0	2	0	2	0	2	0	2	1	1	2	2	1	0	0	12

Tableau 15 - Classement des communes pour le risque absolu sur la totalité de la commune

NOM_COMMUNE	INSEE	PB_CTOTABS	PB_CBATABS	PB_CTOTREL	PB_CBATREL	GB_CTOTABS	GB_CBATABS	GB_CTOTREL	GB_CBATREL	CL_CTOTABS	CL_CBATABS	CL_CTOTREL	CL_CBATREL	GL_CTOTABS	GL_CBATABS	GL_CTOTREL	GL_CBATREL	Classe BATABS
SALINS-LES-BAINS	39500	4	3	2	1	4	4	3	2	4	4	4	3	4	4	3	1	23
BELLEFONTAINE	39047	3	2	2	2	4	3	3	2	4	2	1	3	4	3	1	1	18
VAUX-SUR-POLIGNY	39548	4	0	4	0	4	4	4	4	2	3	3	4	3	3	4	2	17
NEVY-SUR-SEILLE	39388	4	0	3	0	4	3	4	3	4	3	4	4	4	3	4	1	17
LES PLANCHES-EN-MONTAGNE	39424	4	3	3	3	4	3	3	2	2	1	0	1	3	2	0	0	16
BLOIS-SUR-SEILLE	39057	4	1	4	1	4	2	4	3	3	2	3	3	4	3	3	2	15
FONTENU	39230	4	4	3	4	3	4	3	3	0	1	0	1	1	1	0	0	15
POLIGNY	39434	3	1	1	1	4	3	2	1	3	2	0	2	3	3	0	0	15
SAINT-THIEBAUD	39495	4	0	3	0	4	2	3	2	4	2	4	3	4	2	3	1	14
LADOYE-SUR-SEILLE	39272	4	2	4	2	3	2	4	3	2	2	2	3	3	4	2	3	14
PRETIN	39444	2	1	3	2	2	2	3	3	2	2	2	3	3	4	2	4	13
MORBIER	39367	1	2	1	1	1	1	1	1	3	2	0	1	3	3	0	0	12
LES NANS	39381	2	0	2	0	3	1	3	2	3	2	3	4	4	2	3	0	12

Tableau 16 - Classement des communes pour le risque absolu sur les zones bâties de la commune

NOM_COMMUNE	INSEE	PB_CTOTABS	PB_CBATABS	PB_CTOTREL	PB_CBATREL	GB_CTOTABS	GB_CBATABS	GB_CTOTREL	GB_CBATREL	CL_CTOTABS	CL_CBATABS	CL_CTOTREL	CL_CBATREL	GL_CTOTABS	GL_CBATABS	GL_CTOTREL	GL_CBATREL	Classe TOTREL
LADOYE-SUR-SEILLE	39272	4	2	4	2	3	2	4	3	2	2	2	3	3	4	2	3	22
BLOIS-SUR-SEILLE	39057	4	1	4	1	4	2	4	3	3	2	3	3	4	3	3	2	21
VAUX-SUR-POLIGNY	39548	4	0	4	0	4	4	4	4	2	3	3	4	3	3	4	2	21
NEVY-SUR-SEILLE	39388	4	0	3	0	4	3	4	3	4	3	4	4	4	3	4	1	21
SALINS-LES-BAINS	39500	4	3	2	1	4	4	3	2	4	4	4	3	4	4	3	1	20
PRETIN	39444	2	1	3	2	2	2	3	3	2	2	2	3	3	4	2	4	19
CIZE	39153	4	0	4	0	4	0	4	0	3	0	4	0	4	1	4	0	18
BRACON	39072	2	0	3	0	2	0	3	0	4	2	4	3	4	2	4	0	17
IVREY	39268	3	0	3	0	3	0	3	0	4	2	4	4	4	2	3	1	17
SAINT-THIEBAUD	39495	4	0	3	0	4	2	3	2	4	2	4	3	4	2	3	1	17
LES PLANCHES-PRES-ARBOIS	39425	3	0	4	0	3	2	4	2	0	0	2	2	2	1	2	0	16
BELLEFONTAINE	39047	3	2	2	2	4	3	3	2	4	2	1	3	4	3	1	1	15
LES NANS	39381	2	0	2	0	3	1	3	2	3	2	3	4	4	2	3	0	15
LE VAUDIOUX	39545	2	0	3	0	2	0	3	0	3	1	3	1	4	1	4	0	14
NEY	39389	4	0	3	0	4	0	3	1	2	0	1	0	3	2	1	0	14
DOUCIER	39201	4	2	3	1	4	2	3	1	1	1	0	1	2	2	0	0	13
EQUEVILLON	39210	1	0	1	0	1	0	2	0	3	3	2	3	4	3	4	1	13
PONT-D'HERY	39436	2	0	2	0	3	0	3	0	4	0	3	0	4	1	3	0	13
LES PLANCHES-EN-MONTAGNE	39424	4	3	3	3	4	3	3	2	2	1	0	1	3	2	0	0	13
LAVIGNY	39288	2	0	3	0	3	2	3	2	2	1	1	2	2	1	1	0	12
LA CHAUX-DU-DOBIEF	39131	4	0	3	0	4	0	3	0	3	0	1	0	4	1	2	0	12
BOURG-DE-SIROD	39070	4	0	3	0	3	1	4	1	1	0	0	0	1	0	0	0	11
FONTENU	39230	4	4	3	4	3	4	3	3	0	1	0	1	1	1	0	0	11
ARBOIS	39013	3	0	1	0	3	0	2	0	3	3	0	2	4	3	0	0	11
CHATEAU-CHALON	39114	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0	2	0	3	0	2	0	11
ENTRE-DEUX-MONTS	39208	1	0	1	0	1	0	1	0	2	2	2	2	3	3	2	1	11
SYAM	39523	4	0	3	0	3	0	3	0	1	1	0	1	1	1	0	0	11
POLIGNY	39434	3	1	1	1	4	3	2	1	3	2	0	2	3	3	0	0	11

Poligny, bien qu'ayant une note inférieure à la moyenne de 12, présente toutefois un niveau non négligeable.

Tableau 17 - Classement des communes pour le risque relatif sur la totalité de la commune

NOM_COMMUNE	INSEE	PB_CTOTABS	PB_CBATABS	PB_CTOTREL	PB_CBATREL	GB_CTOTABS	GB_CBATABS	GB_CTOTREL	GB_CBATREL	CL_CTOTABS	CL_CBATABS	CL_CTOTREL	CL_CBATREL	GL_CTOTABS	GL_CBATABS	GL_CTOTREL	GL_CBATREL	Classe BATREL
VAUX-SUR-POLIGNY	39548	4	0	4	0	4	4	4	4	2	3	3	4	3	3	4	2	20
NEVY-SUR-SEILLE	39388	4	0	3	0	4	3	4	3	4	3	4	4	4	3	4	1	18
BLOIS-SUR-SEILLE	39057	4	1	4	1	4	2	4	3	3	2	3	3	4	3	3	2	16
PRETIN	39444	2	1	3	2	2	2	3	3	2	2	2	3	3	4	2	4	15
LADOYE-SUR-SEILLE	39272	4	2	4	2	3	2	4	3	2	2	2	3	3	4	2	3	15
LES NANS	39381	2	0	2	0	3	1	3	2	3	2	3	4	4	2	3	0	14
SALINS-LES-BAINS	39500	4	3	2	1	4	4	3	2	4	4	4	3	4	4	3	1	14
SAINT-THIEBAUD	39495	4	0	3	0	4	2	3	2	4	2	4	3	4	2	3	1	13

Tableau 18 - Classement des communes pour le risque relatif sur les zones bâties de la commune

9. Conclusion

■ La prise en compte dans les documents d'urbanisme du risque induit par les phénomènes de mouvements de terrain se fait par le biais du Plan de Prévention des Risques mouvements de terrain (PPR-MVT) ou, à défaut, du Plan Local d'Urbanisme (PLU). Ceux-ci sont réalisés à l'échelle de la commune.

La méthodologie SDR-MVT développée dans le cadre de cette étude n'a pas pour objectif de se substituer aux démarches utilisées aujourd'hui pour la cartographie de l'aléa dans le cadre des PPR-MVT. L'échelle concernée est en effet plus petite (de l'ordre de 1/50 000). Par contre, elle propose une démarche cartographique cohérente de l'aléa et du risque mouvements de terrain indépendante du contexte géographique, et à travers la mise en œuvre d'une démarche accessible à des ingénieurs géologues, géotechniciens et/ou géomorphologues, en limitant au mieux les informations et interprétations dites à « dire d'expert ».

■ La méthode SDR-MVT est mixte puisqu'elle combine à la fois des résultats issus de l'analyse à « dire d'expert » et de calculs mécaniques. A chaque type de phénomène correspond une carte d'aléa par classe d'intensité. Ces cartes représentent donc une probabilité d'occurrence du type de phénomène (ou mécanisme) considéré.

Pour les glissements de terrain, l'évaluation de la probabilité en un lieu donné d'avoir une rupture, pour un forçage donné tiendra compte : 1) d'un modèle de calcul de stabilité de pente, 2) de la variabilité des valeurs des paramètres caractérisant les « facteurs permanents ».

Pour les chutes de blocs, une évaluation semi quantitative de l'aléa de rupture est développée, puis une évaluation probabiliste de l'aléa propagation. Deux catégories de blocs sont par ailleurs distinguées, représentant deux classes d'intensité, avec les blocs de volume de quelques décimètres cube, et ceux de quelques mètres cube.

Pour les coulées, l'évaluation de l'aléa combine la carte d'aléa glissement (apport en matériaux constitutifs de la coulée) et un calcul de propagation le long de drain ou vallons.

■ Les enjeux retenus pour les SDR-MVT sont les zones bâties (ou urbanisées) et les voies de communication routière. La vulnérabilité des enjeux est représentée par une fonction binaire (indemne/détruit) selon qu'ils sont touchés (ou pas) par l'instabilité.

Deux types de cartes de risque complémentaires entre-elles sont établis : les cartes de risque absolu indiquent la superficie d'un territoire communal ou longueur de réseau routier de la commune susceptible d'être affecté par un mouvement de terrain,

Les cartes de risque relatif indiquent la proportion d'un territoire communal ou longueur de réseau routier susceptible d'être affecté par un mouvement de terrain.

La démarche de hiérarchisation globale du risque de mouvements de terrain s'appuie sur une pondération des résultats de calculs du risque absolu ou relatif suivant le type de phénomène considéré. Cependant, les cartes d'aléa et de risque étant géoréférencées et structurées dans un SIG unique, celles-ci constituent un outil pour la classification du risque de mouvements de terrain. A partir de ces cartes, il est en fait possible de fixer d'autres critères de hiérarchisation globale du risque qui paraîtraient plus pertinents en fonction de la problématique considérée.

■ Les processus d'évaluation proposés pour les SDR-MVT autorisent une comparaison inter-départementale tant au niveau des cartes d'aléa que des cartes de risque. Ainsi à moyen terme, la réalisation des SDR-MVT sur les départementaux les plus exposés au risque gravitaire pourrait conduire à une hiérarchisation du risque mouvements de terrain à l'échelon national.

Concernant les cartographies à plus grande échelle, les évaluations des aléas peuvent constituer un référentiel pour un calage des échelles d'aléa (en particulier dans le cadre d'une homogénéisation de cartes issues d'analyses empiriques différentes, notamment pour la mise à jour des PPR existants). Les cartes d'aléas constituent aussi des données utiles dans le choix de sites pour la mise en œuvre d'analyses plus sophistiquées.

Ainsi, Concernant le territoire du Jura, la comparaison des cartes départementales d'aléa et de risque obtenues par le SDR-MVT avec celles des PPR existants permettrait :

- 1) d'identifier les secteurs où vraisemblablement le risque est, selon le cas, sous ou sur évalué, et ainsi,
- 2) contribuer à la mise en cohérence des PPR existants et à la hiérarchisation des priorités pour la programmation des Plans de Prévention des Risques Mouvements de terrain sur le reste du département du Jura.

■ Les processus proposés pour la réalisation des SDR-MVT sont cohérents avec ceux proposés dans le cadre des derniers résultats de la recherche scientifique internationale. Néanmoins, de nombreux points de ces évaluations restent à préciser voire à développer, comme en particulier l'intégration du contexte hydrogéologique, la probabilité d'occurrence des phénomènes, ou la quantification de l'aléa rupture pour les chutes de blocs.

10. Références bibliographiques

- Aleotti P., Chowdhury R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 58 : 21–44.
- Al-Homoud A. S, Tahtamoni, W., 2000. Comparison between predictions using different simplified Newmarks' block-on-plane models and field values of earthquake induced displacements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19(2), 73–90.
- Amadesi E., Vianello G., 1978. Nuova guida alla realizzazione di una carta di stabilità dei versanti. *Mem Soc Geol It* 19 :53–60
- Anbalagan R., 1992. Terrain evaluation and landslide hazard zonation for environmental regeneration and land use planning in mountainous terrain. *Proc. VI Int Symp on Landslides, Christchurch, New Zealand*, 2 : 861–868
- Anderson M.G., Howes S., 1985. Development and application of a combined soil water-slope stability model. *Q J Eng Geol* 18:525–530.
- Antoine P., 1977. Réflexions sur la cartographie ZERMOS et bilan des expériences en cours. *BRGM Bull, Sect III*, 1–2 :9–20.
- Antoine P., 1978. Glissements de terrain et aménagement de la montagne. *Bulletin de la Société vaudoise des Sciences Naturelles*. N. 353, 74(1): 1-4.
- Aubry D., Modaressi A., Modaressi H., 1990. A constitutive model for cyclic behaviour of interfaces with variable dilatancy. *Computers and Geotechnics* 9(1/2), 47–58.
- Audru J.C., Messin M., 2000. Plan de prévention des risques naturels pour les vallées de la Largue et du Traubach (68) : cartographie de l'aléa mouvements de terrain. *BRGM/RP-50292-FR*, 48 p.
- Baeza C., Corominas J., 1996. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of statistical techniques. *Proc VII Int Symp on Landslides, Trondheim, June 1996*, 1 : 147–152.
- Baillifard F., 2004. Détection par SIG des zones rocheuses à fortes susceptibilités d'éboulement. *Université de Lausanne, Lausanne*, 194 pp.
- Baltassat.j.m., Charbonneyre.p., 1995 - Hycosi. Reconnaissance par méthode geoelectrique et sismique réfraction du glissement de terrain des Prés Moureaux a Salins les bains (jura) *BRGM/RR-38571-FR*
- Basma A.A., Kallas N., 2004. Modeling soil collapse by artificial neural networks. *Geotechnical and Geological Engineering*. v22. 427-438.
- Baum R.L., 2000. Computer Programs for Limit-Equilibrium Slope-Stability Analysis - Fellenius, Bishop and Janbu.
- Bernknopf R.L., Campbell R.H., Brookshire D.S., Shapiro C.D., 1988. A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with application for economical evaluation. *Bull of the Assoc Engin Geologists*, 25 :39–56.
- Bogaard T., Monge O., 1997- Hydrological modelling of the La Beline slope, Salins-les-Bains, Jura, France. *BRGM/RR-39513-FR*

- Bonham-Carter G.F., 1994. Geographic Information System for Geoscientists : modelling with GIS. Computer methods in the Geosciences, vol. 13, Pergamon Press, 1994.
- Bouquier L., Dubasque J.M., 1975. Carte des zones exposées à des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol (ZERMOS) à 1/25 000. Région d'Embrun, Chorges (Hautes-Alpes). Notice explicative. BRGM.
- Bourrier F., 2008. Modélisation de l'impact d'un bloc rocheux sur un terrain naturel, application à la trajectographie des chutes de blocs. Thèse doctorale de l'Institut Polytechnique de Grenoble.
- Cancelli A., Crosta G., 1993. Hazard and risk assessment in rockfall prone areas. In: Skipp, B.O. (Ed.), Risk Reliability in Ground Engineering. Thomas Telford, London, pp. 177–190.
- Cannon S.H., Savage W.Z., 1988. A mass change model for debris flow. The Journal of Geology 96, 221– 227.
- Capolongo D., Refice A., Mankelov J., 2002. Evaluating earthquake-triggered landslide hazard at the basin scale though GIS in the upper Sele river valley. Surveys in Geophysics 23: 595–625.
- Carrara A., 1983. Multivariate methods for landslide hazard evaluation. Mathematical Geol, 15 : 403–426.
- Carrara A., Cardinali M., Detti R., Guzzetti F., Pasqui V., Reichenbach P., 1990. Geographical Information System and multivariate models in landslide hazard evaluation In: Proc of the 6th Int Conf Field Workshop on Landslides, Switzerland-Austria-Italy. Aug 31st–Sept 12th 1990, 1 :17–28.
- Cascini L., 2008. Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. Engineering Geology 102 (2008) 164–177
- Cascini L., Bonnard C., Corominas J., Jibson R., Montero-Olarte J., 2005. Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development. State of the Art Report (SOA7). In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (Eds.), Proceedings of the International Conference on "Landslide Risk Management", Vancouver (Canada). Taylor and Francis, London, pp. 199–235.
- Chacón J., Irigaray C., Fernández T., El Hamdouni R., 2006. Engineering geology maps : landslides and geographical information systems. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 65 : 341-411.
- Chau K.T., Lo, K.H., 2004. Hazard assessment of debris flows for Leung King Estate of Hong Kong by incorporating GIS with numerical simulations. Natural Hazards and Earth System Sciences (2004) 4: 103–116.
- Chau K.T., Tang Y.F., Wong R.H.C., 2004. GIS based rockfall hazard map for Hong Kong. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41 (3), 530–530.
- Chen H., Lee C.F., 2003. A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes. Geomorphology 51(4):269–288.
- Chowdhury R.N., Xu D.W., 1994. Slope System Reliability with General Slip Surfaces. Soils & Foundations, 34: 99–105.
- Chowdhury R.N., Xu D.W., 1995. Geotechnical System Reliability of Slopes, Reliability Engineering & System Safety, 47: 141–151.

- Chung C.F., Fabbri A.G., 1993. The representation of geoscience information for data integration. *Non Renewable Resources*, vol. 2, n° 2, 1993, p. 122-139.
- Corominas J., 1996. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal* 33, 260–271.
- Corominas J., Moya J., 2008. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering Geology* 102 (2008) 193–213
- Cruchet M., Labbe M., 1996. Cartographie des risques géologiques. Cartographie de l'aléa «mouvements de terrain». Commune de Salazie. La Réunion. (1/25 000). BRGM/RR-39133-FR, 47 p.
- Cruchet M., Temey I., 1997. Cartographie des risques géologiques. Cartographie de l'aléa «mouvements de terrain». Bassin de la rivière Langevin. Commune de Saint-Joseph (1/25000). BRGM/RR-39505-FR. 22 p.
- Cruden, D. M., Varnes, D. J., 1996. Landslide types and processes; In: *Landslides Investigation and Mitigation*, A. K. Turner and R. L. Schuster, eds.: National Research Council, Transportation Research Board, Special Report 247, p. 3675.
- Dai F.C., Lee C.F., 2003. A spatiotemporal probabilistic modelling of storm induced shallow landsliding using aerial photographs and logistic regression. *Earth Surf Process Landforms* 28(5): 527-545.
- Dai F.C., Lee C.F., Ngai Y.Y., 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology* Volume 64, Issue 1, April 2002, p. 65-87.
- Davis T.J., Keller C.P., 1997. Modelling uncertainty in natural resource analysis using fuzzy sets and Monte Carlo simulation: slope stability prediction. *Int J Geogr Inf Sci* 11(5):409–434.
- D'Elia B., 1992. Dynamic aspects of a landslide reactivated by the November 23, 1980 Irpinia earthquake (southern Italy). In: *Proceedings French-Italian Conference on slope stability in seismic areas*, Bordighera, Italy. pp. 25–32, Faccioli & Pecker (eds.), Ouest Editions.
- Denlinger R.P., Iverson R. M., 2001. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain, 2. Numerical predictions and experimental tests, *J. Geophys. Res.*, 106(B1), 553–566.
- Dietrich W.E., Bellugi D., Real de Asua R., 2001. Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management. In: Wigmosta MS, Burges SJ (eds) *Land use and watersheds: human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas*: American Geophysical Union, Water Science and Applications 2:195–227.
- Dorren L., Jaboyedoff M., Voyat I., 2007. Identification des zones instables : échelles et outils (SIG, LIDAR, observations naturelles), auscultation.
- Duncan J.M., Wright S.G., 2005. *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons, Inc.
- Dussauge C., Helmstetter A., Grasso J.R., Hantz D., Desvarreux P., Jeannin M., Giraud A., 2002. Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Natural Hazard and Earth System Sciences* 2, 15–26.

- Effendiantz L., Guillemin P., Rochet L., Pauly J.-C., Payany M., 2004. Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux, guide technique LCPC.
- Ermini L., Catani F., Casagli N., 2005. Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology* 66, 327-343.
- Evans S., Hungr O., 1993. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Can. Geo. J.*, 30, 620-636.
- Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z. (2008) On behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology* Volume 102, Issues 3-4, 1 December 2008, p. 99-111.
- Fratini P., Crosta G., Carrara A., Agliardi F., 2007. Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology* 94 (2008) 419-437.
- Ghilardi P., Natale L., Savi F., 2001. Modeling Debris Flow Propagation and Deposition, *Physics and Chemistry of the Earth*, 26(9), 651-656.
- Godt J.W., Baum R.L., Savage W.Z., Salciarini D., Schulz W.H., Harp E.L., 2008. Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. *Engineering Geology* 102 (2008) 214-226.
- Gokceoglu C., Sonmez H., Ercanoglu M., 2000. Discontinuity controlled probabilistic slope failure risk maps of the Altindag (settlement) region in Turkey. *Engineering Geology* 55 (2000) 277-29
- Gritzner M.L., Marcus W.A., Aspinall R., Custer S.G., 2001. Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modelling and topographic attributes, Payette River, Idaho. *Geomorphology* 37 (1-2), 149-165.
- Guisan, A., S. B. Weiss and A. D. Weiss. 1999. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Kluwer Academic Publishers. Plant Ecology*. 143:107-122.
- Gunther A., Carstensen A., Pohl W., 2004. Automated sliding susceptibility mapping of rock slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4, 95-102.
- Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P., 1999. Landslide hazard evaluation : a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy, *Geomorphology*, vol. 31, 1999, p. 181-216.
- Guzzetti F., Crosta G., Detti R., Agliardi F., 2002, STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences*, vol.28, no.9, pp.1079-1093.
- Hammond C., Hall D., Miller S., Swetik P., 1992. Level I stability analysis (LISA) documentation for version 2.0, Gen Tech Rep INT-285, For Serv. US Dep of Agric, Ogden, Utah, 1992.
- Hantz D., Dussauge-Peissier C., Jeannin M., Vengeon J-M., 2003. Rock fall hazard assessment : From qualitative to quantitative failure probability. *Fast Slope Movements*, Naples, 2003, pp.263-267.
- Heim A., 1932. *Bergsturz und Menschenleben* - Fretz und Wasmuth, Zurich, 218 pp.
- Hoek E., Bray J.W., 1981. *Rock Slope Engineering*, 3rd edition. Institution of Mining and Metallurgy, London.

- Humbert M., 1977. La cartographie ZERMOS. Modalités d'établissement des cartes des zones exposées à des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol. Bulletin du BRGM. Section III, n°1/2: 5-8.
- Hungr, O., Evans S.G., 1988. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, vol. 1. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 685–690.
- Hungr O., Evans S.G., Hazzard J., 1999. Magnitude and frequency of rockfalls and rock slides along the main transportation corridors of south-western British Columbia. Canadian Geotechnical Journal 36, 224–238.
- Hürlimann M., Rickenmann D., Medina V., Bateman A., 2008. Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment Engineering Geology 102 (2008) 152–163.
- Hutchinson J.N., 1986. A sliding-consolidation model for flow slides. Canadian Geotechnical Journal 23, 115– 126.
- Iverson R.M., 2000. Landslide triggering by rain infiltration. Water Resources Research 36 (7), 1897–1910.
- Jaboyedoff M., Baillifard F., Dussauge C., Mazzoccola D., 2002. Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises – Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin, Programme Interreg II C «FALAISES », III. Méthodes d'étude des instabilités de falaises.
- Jaboyedoff M., Baillifard F., Philippossian F., Rouiller J.D., 2004. Assessing fracture occurrence using "weighted fracturing density": a step towards estimating rock instability. Natural Hazards and Earth System Sciences 4, 83–93.
- Jaboyedoff M., Labiouse V., 2003. Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Jade S., Sarkar S., 1993. Statistical models for slope stability classification. Engineering Geology, 36 :91–98.
- Jenks, George F. et Caspall, Fred C. (1971). Error on choroplethic maps: Definition, measurement, reductions. Annals of the Association of American Geographers, Volume 61, Number 2, Pages: 217 – 244.
- Jenness J., 2005, Documentation "Topographic Position Index", site Internet : Esri
- Jibson R.W., Harp E.L., Michael J.A., 2000. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. Eng Geol 58(3–4):271–289.
- Kieffer, D. S., R. Jibson, E.M. Rathje and K. Kelson, 2006, Landslides Triggered by the 2004 Niigata Ken Chuetsu, Japan, Earthquake, Earthquake Spectra, Volume 22, No. S1, pages S47–S73, March 2006; © 2006, Earthquake Engineering Research Institute
- Kramer S.L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Labiouse V., Heidenreich B., Desvarreux P., Viktorovitch M., Guillemin P., 2002. Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises – Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin, Programme Interreg II C «FALAISES », IV. Etudes trajectographiques.

- Laigle D., Coussot P., 1997. Numerical modelling of mudflows. *Journal of Hydraulic Engineering* 123 (7), 617–623.
- Lee S., Ryu J.H., Won J.S., Park H.J., 2004. Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Eng. Geol.* 71, 289-302.
- Le Jeune F., Besse A., 1996 - Etude par microgravimétrie en profils-tests sur le site de Salins-les-Bains (Jura). BRGM/RR-39093-FR
- Leone F., Asté J.P., Leroi E. 1996, L'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrains : pour une meilleure quantification du risque/ The evaluation of vulnerability to mass movements : towards a better quantification of landslide risks. In: *Revue de géographie alpine*. 1996, Tome 84 N°1. pp. 35-46.
- Leone F., Vinet F., 2006, « La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels », dans la « Vulnérabilité des sociétés et territoires face aux menaces naturelles », Ouvrage collectif sous la direction de Leone F. et Vinet F., Georisques.
- Leroi E., Monge O., 1996 - HYCOSI – Impact of hydrometeorologic changes on slope instability. Reconnaissance et instrumentation du site de Salin-les-bains (39), *Compte-rendu- d'intervention*. Rapport BRGM/RR-38890-FR
- Leroi E., Monge O., Bogaard T., 1997- HYCOSI - Impact of hydrometeorologic changes on slope instability. *Rapport de synthèse*. BRGM/RR-39794-FR
- effectiveness. ISMES publ. n.90. Bergamo, 51-53.
- Lopez-Caballero F., 2003. Influence du Comportement Non Linéaire du Sol sur les Mouvements Sismiques Induits dans des Géo-Structures. Thèse de doctorat, École Centrale Paris, France.
- Lopez-Caballero F., Modaressi A., 2001. Evaluation of seismic slope stability using a non-linear soil behavior. In: *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, pp 1107-1112, eds : Desai et al., A.A. Balkema.
- Luzi L., Pergalani F., Terlien M.T.J., 2000. Slope vulnerability to earthquakes at subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems. *Eng Geol* 58:313–336.
- Malatrait.a.m., 1991 - Commune de Salins-les-bains (jura) - Falaise du fort belin, examen des risques de chute de masses rocheuses et définition des parades. BRGM/RR-32452-FR
- Makdisi F.I., Seed H.B., 1978. Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations. *Journal of Geotechnical Engineering Division - ASCE* 104(7), 849–867.
- Marçot N., Mirgon C., Colas B., 2007. IVème Contrat de Plan Etat Région "Risques naturels et nuisances - Action : Données, information, évaluation sur les risques naturels" Cartographie des mouvements de terrain dans la vallée du Bas Buëch - Laragnais – Hautes-Alpes (05) Phase 1 – Cartographie de l'aléa mouvements de terrain au 1/50 000e – Rapport BRGM RP-55184-FR. 90p.
- Mardhel V., Frantar P., Uhan J., Mio A., 2004. Index of development and persistence of the river networks as a component of regional groundwater vulnerability assessment in

- Slovenia. .Int. Conf. groundwater vulnerability assessment and mapping. Ustron, Poland, 15-18 June 2004., Poland.
- Mardhel V., Gravier A., Koch-Mathian J-Y., Nowak C., Terreyre J.L., Raguet M., Garnier C., 2006, Cartographie de la vulnérabilité simplifiée des eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie. Application aux sites BASOL, Colloque international - Gestion des grands aquifères - 30 mai-1er juin 2006, Dijon, France
- Marquínez J., Duarte R.M., Farias P., Jimenez Sanchez M., 2003. Predictive GIS-based model of rockfall activity in mountain cliffs. *Natural Hazards* 30 (3), 341–360.
- Maurin G., Messin M., 2000. Plan de prévention des risques naturels de la vallée de la Largue (68). Evaluation et cartographie de l'aléa mouvements de terrain. BRGM/RR-40823-FR, 96 p.
- Maurizot P., Lafoy Y., 1999. Cartographie des aléas naturels (Mouvements de terrain, érosion) dans le Territoire de Nouvelle-Calédonie, Zone de Tontoua (1/25 000). Carte informative des phénomènes recensés. Carte géologique du substrat et des formations superficielles. BRGM/RR-40776-FR, 32 p.
- Mellal, A. (1997), Analyse des effets du comportement non-linéaire des sols sur le mouvement sismique, *Doctorate thesis*, Ecole Centrale de Paris, France
- Meneroud J.-P., Calvino A., 1976. Carte ZERMOS, Zones Exposées à des Risques liés aux Mouvements du Sol et du Sous-Sol à 1: 25.000, Région de la Moyenne Vesubie (Alpes Maritimes).BRGM, Orléans, France.
- Michel F. (2008) Le Tour de France d'un Géologue – Nos paysages ont une histoire – Coédition BRGM, Delachaux & Niestlé, 384 pages.
- Miles S.B., Ho C.L., 1999. Rigorous landslide hazard zonation using Newmark's method and stochastic ground motion simulation. *Soil Dyn Earthquake Eng* 18(4):305–323
- Modaressi H., Aubry D., Faccioli E., Noret C., 1995. Numerical modelling approaches for the analysis of the earthquake triggered landslides. In: 3rd International Conference on recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol. II. pp. 833–843, St. Louis, Missouri. Eds. Prakash.
- Moiriat D., Kramers E., 2002. Evaluation et cartographie de l'aléa mouvements de terrain dans la région de Ribeauvillé (68) : étude détaillée. BRGM/RP-51999-FR, 42 p.
- Mompelat J.M., 1994. Unités cartographiques et évaluation de l'aléa mouvements de terrain en Guadeloupe. Thèse doctorale de l'Université Paris 6 Pierre et Marie Curie.
- Monge O., Bogaard T., Leroi E., 1997- Hydrological and geotechnical investigation of the La Beline slope, Salins-les-Bains, Jura, France. BRGM/RR-39514-FR
- Monge O., Leroi E., 1997 - HYCOSI - Impact of hydrometeorologic changes on slope instability. Instrumentation du site de Salins-les-Bains (39). Rapport d'avancement - 3ème année. - BRGM/RR-39172-FR
- Moon V., Blackstock H., 2003. A methodology for assessing landslide hazard using deterministic stability models. *Nat Hazards* (in press), Digitally available, pp 1–23.
- Morgenstern, N.R., and Price, V.E. 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 15(1): 79–93.

- Morgenstern, N.R., and Price, V.E. 1967. A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces. *Computer Journal*, 9: 388–393.
- Moriwaki Y., Idriss I.M., Doyle E.H., 1982. Earthquake-induced deformations of soft clay slopes. *Journal of Geotechnical Engineering Division – ASCE* 108(11), 1475–1493.
- Newmark N.M., 1965. Effect of earthquake on dams and embankments. *Géotechnique* 15(2), 139–160.
- O'Brien J.P., Julien P.J., Fullerton W.T., 1993. Two-dimensional water flood and mudflow simulation, *J. Hydr. Res.*, 119(2), 244– 261.
- Onofri R., Candian C., 1979. Indagine sui limiti di massima invasione di blocchi rocciosi franati durante il sisma del Friuli del 1976. *Reg. Aut. Friuli - Venezia Giulia, CLUET*, 42 pp.
- Pierson L.A., Davis S.A., Van Vickie R., 1990. Rockfall hazard rating system implementation manual. Report FHWA-OR-EG-90–01, Federal Highway Administration (FHWA). U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- Randall W.J, Edwin L.H., John A.M., 2000. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Eng Geol* 58:271–289.
- Refice A., Capolongo D., 2002. Probabilistic modelling of uncertainties in earthquake-induced landslide hazard assessment. *Comput Geosci* 28(6):735–749.
- Remond C., 1997. Cartographie des aléas géologiques du « Bassin des risques » de Montceau-les-Mines (71). BRGM/RR-39719-FR, 2 vol., 108 p.
- Salciarini D., Godt J.W., Savage W.Z., Baum R.L., Conversini P., 2008. Modeling landslide recurrence in Seattle, Washington, USA. *Engineering Geology* 102 (2008) 227–237.
- Sarma S.K., 1979. Stability analysis of embankments and slopes. *Journal of Geotechnical Engineering Division - ASCE* 105(12), 1511–1524.
- Sarma S.K., Chlimintzas G., 1998. Developement of new model for sliding block displacements. Progress Report 2, Seismic Ground Displacements as a Tool for Town Planning, Design and Mitigation, Imperial College, London.
- Sassa K., 1988. Geotechnical model for the motion of landslides. In: Bonnard, C. (Ed.), *Proceedings of 5th International Symposium on Landslides, Lausanne*. Balkema, Rotterdam, pp. 37–55.
- Savage S. B., Hutter, K., 2001. The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout, part I, Analysis, *Acta Mechanica*, 86, 201–223.
- Scheidegger A., 1973. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mechanics* 5, 231– 236.
- Sedan O., 2011. Logiciel ALICE version 7 - Guide Utilisateur. Rapport BRGM/RP-60004-FR
- Sedan O. et al., 2002. « Département de la Haute-Corse – Aléa Mouvements de Terrain », BRGM-R-38724.
- Soeters R., Van Westen C.J., 1996. Slope instability, recognition, analysis, and zonation. In : Turner A.K., Schuster R.L. (eds), *Landslides investigation and mitigation*,

- Transport Research Board, National Research Council, special report 247, 1996, p.129-177.
- Stamatopoulos C., 1996. Sliding system predicting large permanent co-seismic movements of slopes. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 25(10), 1075–1093.
- Takahashi T., Nakagawa H., Harada T., Yamashiki Y., 1992. Routing debris flows with particle segregation, *J. Hydr. Res.*, 118(11), 1490–1507.
- Terlien M.T.J., Van Westen C.J., Van Asch T.W.J., 1995. Deterministic modelling in GIS-based landslide hazards assessment. In: Carrara A., Guzetti F. (eds) *Geographical information system in assessing natural hazards. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, vol 5. Kluwer, Dordrecht, pp 57-77.
- Terrier M., Marçot N. et Sedan O., 2002. Bassin Versant de la Roya (Alpes Maritimes) – Cartographie de l'aléa mouvements de terrain, échelle 1/50000, BRGM/RP-51791-FR.
- Terrier M., Sedan O. et Furic S., 2003. Cartographie de l'aléa mouvements de terrain, échelle 1/25 000: secteurs de Breil-sur-Roya, Fontan, la Brigue, Saorge, Tende. BRGM/RP-52513-FR. 145 p.
- Thierry P., Rivet F. et Vanoudheusden E., 2008. Scénarios risque mouvements de terrain (y compris effondrement de cavités) dans les agglomérations urbaines : Application à une agglomération pilote (Marseille) – Rapport final Rapport BRGM RP-56335-FR, 122 pp., 35 Illustrations, 54 tableaux, 6 annexes
- Thiéry D., 2003. Logiciel GARDENIA, version 6.0. Guide d'utilisation. BRGM/RP-52832-FR, 102 p.
- Thiery Y., Sterlacchini S., Malet J.-P., Puissant A., Maquaire O., 2004. Modélisation spatiale de la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain. Programme de recherche ALARM (Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountainous Areas), contribution EOST N° 2004.13-UMR7516.
- Tika-Vassilikos T., Sarma S.K., Ambraseys N., 1993. Seismic displacements on shear surfaces in cohesive soils. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 22(8), 709–722.
- UNIGE - Draft document (2003) I Level methodology for the vulnerability assessment of current buildings and guidelines for the implementation-RISK-UE WP4. Vulnerability assessment of current buildings. 28 p.
- Van Asch T.W.J., Kuipers B., Van der Zanden D.J., 1993. An information system for large scale quantitative hazard analyses of landslides. *Z fur Geomorphologie Suppl-Bd* 87:133–140.
- Van Beek L.P.H., Van Asch T.W.J., 2003. Regional assessment of the effects of land-use change on landslide hazard by means of physically based modelling. *Nat Hazards* 31:289–304.

- Van Westen C.J., 2000. The modelling of landslide hazard using GIS. *Surveys in Geophysics*, vol. 21, 2000, p. 241-255.
- Van Westen C.J., Rengers N., Soeters R., 2003. Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*, vol. 30, 2003, p. 399-419.
- Van Westen C.J., Van Asch T.W.J., Soeters R., 2006. Landslide hazard and risk zonation — why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Volume 65, Number 2 p.167-184.
- Van Westen C.J, Castellanos E., Kuriakose S.L. (2008) Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview, *Engineering Geology* 102 (2008) 112–131
- Varnes D. J., 1978. Slope movement types and processes. In: Schuster R. L. & Krizek R. J. Ed., *Landslides, analysis and control*. Transportation Research Board Sp. Rep. No. 176, Nat. Acad. of Sciences, pp. 11–33
- Varnes D.J., 1984, *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. Paris; UNESCO; 63 p.
- Visintainer P., Turrini M.C., 1995. Carta della pericolosità di eventi naturali della Val Duron (Trentino Alto Adige). *Geologia Tecnica e Ambientale*, 2 :17–33
- Wieczorek G.F., 1996. Landslide triggering mechanisms. In: Turner AK, Shuster RL (eds) “*Landslides: investigation and mitigation*”. Transportation Research Board – National Research Council, Special Report 247, pp 76–90.
- Wieczorek G.F., Morrissey M.M., Iovine G., Godt J., 1998. Rockfall hazards in the Yosemite Valley. U.S. Geol. Survey Open-File Report 98/467, 8 pp.
- Xie M., Esaki T., Zhou G., 2004. GIS-Based Probabilistic Mapping of Landslide Hazard Using a Three-Dimensional Deterministic Model. *Natural Hazards* 33: 265–282.
- Zêzere J.L., Rodrigues M.L., Reis E., Garcia R., Oliveira S., Vieira G., Ferreira A.B., 2004. Spatial and temporal data management for the probabilistic landslide hazard assessment considering landslide typology. In: Lacerda W.A. et al. (ed), *Landslides, evaluation and stabilization*. Proceedings of the 9th international symposium on landslides, Rio de Janeiro, vol. 1, p. 117-125.
- Zhou G., Esaki T., Mitani Y., Xie M., Mori J., 2003. Spatial probabilistic modelling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach. *Eng Geol* 68(3–4):373–386.
- Zhu D.Y., Lee C.F., Qian Q.H., Chen G.R., 2005. A concise algorithm for computing the factor of safety using the Morgenstern-Price method. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 42, no. 1, pp. 272-278. Feb. 2005.
- Zornette N., Nedellec J.L., et Vincent M., 2002. Bassin versant de l'Hérault – Cartographie de l'aléa « mouvements de terrain », BRGM/RP-51923-FR.
- Weiss, A. 2001. Topographic Position and Landforms Analysis. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA.

Annexe 1 - Indications sur les actions nécessaires pour atteindre les niveaux de précisions requis pour les zonages

Tableaux ci-après extraits de Fell et al. (2008)

Table 8 Activities required to preparing a landslide inventory	
Characterisation method	Activities
Basic	Prepare an inventory of landslides in the area from aerial photographs and /or satellite imagery, and by mapping and from historic records. The inventory includes the location, classification, volume (or area) and so far as practicable the date of occurrence of landsliding. Identify the relationship to topography, geology and geomorphology Show this information on inventory maps along with topographic information including contours, property boundaries, mapping grid, roads and other important features such as streams and water-courses.
Intermediate	The same activities as Basic plus Distinguish different parts of the landslides Map landslide features and boundaries Collect and assess historical information on the activity of landsliding. Analyse the past evolution of the land use to know whether human activities have had an influence on the incidence of landslides
Advanced	The same activities as Intermediate plus Prepare an inventory of geotechnical data Implement investigations to better define geotechnical conditions Geotechnical analysis to understand slope instability processes Advanced temporal cataloguing of periodic reactivations of the same hazard and temporal windowing of specific triggering events to provide periodic inventory data sets which can then be used in advanced validation approaches.

Table 9

Landslide susceptibility zoning-activities required to characterise, determine the spatial distribution of potential landslides and their relationship to topography, geology and geomorphology

Characterisation method	Activities
Basic	Prepare a geomorphologic map⁽¹⁾ Prepare a landslide inventory as described in Table 8⁽¹⁾ Prepare calculations of the % of the total landslide count for each susceptibility class, the % of the area affected by landslides for each class and the % of each class in comparison to the total study area and classify according to Table 4. Correlate the incidence of landsliding with the geology and slope to delineate areas susceptible to landsliding. For regional zoning correlate the incidence of landsliding with rainfall or snowmelt, and/or seismic loading Prepare the landslide susceptibility zoning map superimposed on the topography with a suitable legend. Implement the data and the maps in a GIS (recommended)
Intermediate	The same activities as basic plus Obtain basic soil classifications and depths in the study area Classify more complex terrain units. Qualitative rating of the landslide susceptible areas based on overlapping techniques Develop quantitative ratings (often relative rating) of landslide susceptible areas based on data treatment techniques Implement the data and the maps in a GIS (recommended)
Advanced	The same activities as Intermediate plus Detailed mapping and geotechnical investigations to develop an understanding of the mechanics of landsliding, hydrogeology and stability analyses. Perform data treatment analysis (discriminate; neural networks; fuzzy logic; logistic regression; etc) and develop quantitative ratings to obtain susceptibility classes Perform deterministic and/or probabilistic stability analyses Implement the data and the maps in a GIS (recommended)

Note. (1) The landslide inventory and geomorphologic mapping should be carried out at intermediate and advanced levels for intermediate and advanced level susceptibility zoning.

Table 10

Activities required for assessing the travel distance and velocity of potential landslides

Travel distance and velocity analysis method	Activities
Basic	Collect and assess historical information on travel distances and velocity. Assess limiting travel distances from geomorphologic data and old landslide deposits. Assess the likely travel distance and velocity from consideration of the classification of the potential landslides, geology and topography. Based on this information assess the limit (greatest) likely travel distance for each classification of potential landslide.
Intermediate	The same activities as Basic plus Assess likely landslide mechanisms and classification of soils in the landslides Use empirical methods based on travel distance angle or shadow angle to assess travel distance accounting for the uncertainty in the empirical methods and data inputs. Assess velocity from potential energy and travel distance using simple sliding block models.
Advanced	The same activities as Intermediate plus Investigate geotechnical properties of the slope materials as required by numerical models Use numerical models to model travel distance and velocity.

Table 11

Activities required for assessing the frequency of rock falls, slides from cuts, fills and retaining walls, and small landslides on natural slopes

Frequency assessment method	Activities
Basic	Frequency established based on the relative freshness of the morphological features of the scars and landside deposits taking into account the presence of active geomorphic events (e.g. slope undermining by either river or sea erosion) Frequency established based on interpretation of numbers of landslides from aerial photographs taken at known time intervals Assess the historic frequency of rock falls, slides from cuts, fills and retaining walls, or small landslides on natural slopes from basic incident databases
Intermediate	The same activities as Basic plus Assess the historic frequency of rock falls, slides from cuts, fills and retaining walls, or small landslides on natural slopes from incident databases. Where appropriate, develop and use frequency magnitude curves. Use proxy data such as silent witnesses (e.g. damage to trees and dendrochronology). More detailed analysis of rainfall including the effects of antecedent rainfall, rainfall intensity and duration on the incidence of individual landslides (the threshold) or large numbers of landslides. For seismically-induced landsliding, relate the incidence of sliding to seismic loading including the peak ground acceleration and magnitude of the earthquake using empirical methods.
Advanced	The same activities as Intermediate plus Assess geotechnical parameters of the soils. Model slope factors of safety from geotechnical parameters and rainfall frequency or piezometric data. For seismically-induced landslides, analyse displacements using 'Newmark' type analyses and for liquefiable soils, the likelihood of liquefaction and flow sliding.

Table 12

Activities required for assessing the frequency of landsliding for large landslides on natural slopes

Frequency assessment method	Activities
Basic	Assess the historic frequency of landsliding from the incident database including activity indicators such as cracked buildings, displaced fences, bent and tilted trees. Assess frequency from geomorphology evidence such as the freshness of slide scarps and other surface features associated with landslide movement using subjective assessment.
Intermediate	The same activities as Basic plus As above, and use of proxy data such as carbon 14 dating, lichenometry dating of vegetation buried by sliding, or in raised alluvial terraces in valleys which may have been blocked by landsliding. Relate history of landsliding to rainfall intensity and duration and antecedent rainfall, or to snow melt. Assess the likelihood of seismically-induced sliding from consideration of the mechanics of the landslide. Use empirical and simplified methods to assess likely displacements during earthquakes. As an alternative to estimating from historic data, assess frequency by subjective assessment, e.g. by assessing the probability of landsliding given a rainfall or seismic load.
Advanced	The same activities as Intermediate plus As above and relating the history of landsliding or factor of safety to rainfall, slope geometry, piezometric levels (where available), geotechnical properties, and factors of safety. For seismically-induced landsliding analyse displacements using 'Newmark' type analyses and for liquefiable soils, the likelihood of liquefaction and flow sliding.

Table 13

Activities required for assessing the elements at risk

Method for assessing elements at risk	Activity
Basic	Make an assessment of: the population who live, work and travel through the area; property such as houses, buildings, roads, railways and services which are permanently in the area; and property such as vehicles which travel through the area. For existing development base this on the current and proposed land use. For new development estimate from proposed land use and occupancy. Where applicable assess environmental values which may be affected by landsliding. Generic classifications based on the main land uses, namely urban, industrial, infrastructure, or agricultural.
Intermediate	As above in greater degree of detail. Economic consequences may be included.
Advanced	As above in detail. Economic consequences will be estimated such as the implications of loss of a road providing access to a town until repairs are carried out.

Table 14

Activities required for assessing the temporal-spatial probability of the elements at risk

Method for assessing temporal-spatial probability	Activity
Basic	<i>Life loss risks</i> For persons at risk in residential areas assume that their temporal-spatial probability is 1.0. For other type of developments such as factories and schools, make an approximate assessment of temporal-spatial probability from the likely pattern of use of the buildings. For roads and railways and other situations with transient populations at risk; make an approximate assessment of temporal-spatial probability from the traffic volumes and velocities. <i>Property loss risks</i> For buildings the temporal-spatial probability is 1.0. For vehicles, make an approximate assessment of temporal-spatial probability from the traffic volumes and velocities.
Intermediate	<i>Life loss risks</i> For all situations estimate temporal-spatial probability taking account of the nature of development, living and work pattern, existence of protected places (e.g. reinforced shelters), traffic (where relevant) and the intensity of landsliding. <i>Property loss risks</i> As for basic assessment although in more detail (e.g. allowing for the variability of trajectories of rock falls).
Advanced	As above, with greater detail in the assessment, particularly the temporal/spatial distribution of the elements at risk.

Annexe 2 - Listes des mouvements de terrain répertoriés dans BDMVT à fin 2010

Type de mouvement	commune du point d'enregistrement	lieu-dit	autre commune concernée	fiabilité des informations	préjudices humains	dommages aux biens
CB	LA CHAUX-DU-DOMBIEF	Combes-Sur-Villard entrée du tunnel	Non	Moyenne	Non	Oui
CB	SALINS-LES-BAINS	falaise du fort belin	Non	Moyenne	Non	Oui
CB	BELLEFONTAINE	Col de la Bucle	Non	Forte	Non	Non
CB	BESAIN	Forêt communale	Non	Moyenne	Non	Non
CB	BIEF-DES-MAISONS	Forêt de la Haute Joux	Non	Moyenne	Non	Non
CB	BLOIS-SUR-SEILLE	Côte de Boeuvron	Non	Moyenne	Non	Non
CB	BRERY	Sur le Mont	Non	Forte	Non	Non
CB	CHARENCY	-	Non	Moyenne	Non	Non
CB	CIZE	Bois de la Côte	Non	Moyenne	Non	Non
CB	LA CHAUX-DU-DOMBIEF	-	Non	Moyenne	Non	Non
CB	LADOYE-SUR-SEILLE	Sur Lioutre	Non	Moyenne	Non	Non
CB	LE FRASNOIS	Côte de Maclu	Non	Moyenne	Non	Non
CB	LE FRASNOIS	Belvédère des Quatre Lacs	Non	Faible	Non	Non
CB	LES PLANCHES-EN-MONTAGNE	Les Côtes Chaudes	Non	Moyenne	Non	Non
CB	LES PLANCHES-PRES-ARBOIS	Grottes des Planches	Non	Faible	Non	Non
CB	MIERY	En Cugny	Non	Moyenne	Non	Non
CB	NEY	Sous Bois de Ney - Bénédegand	Non	Moyenne	Non	Non
CB	POLIGNY	Croix de St Savin	Non	Forte	Non	Non
CB	POLIGNY	sous la roche du midi, au débouché de la reculée de vaux	Non	Moyenne	Non	Non
CB	POLIGNY	Grande Corniche	Non	Forte	Non	Non
CB	POLIGNY	Croix du Dan	Non	Forte	Non	Non
CB	PONT-D'HERY	D 78 - Les Grillières	Non	Forte	Non	Non
CB	PONT-D'HERY	D 467 - Ruisseau de Pré d'Héry	Non	Forte	Non	Non
CB	SALINS-LES-BAINS	Cascade de Gouaille	Non	Forte	Non	Non
CB	SALINS-LES-BAINS	Redoute de Greimbach	Non	Forte	Non	Non
CB	SALINS-LES-BAINS	Fort Belin	Non	Forte	Non	Non
CB	SALINS-LES-BAINS	Flanc est de la Côte d'Arelle	Non	Forte	Non	Non
CB	SALINS-LES-BAINS	Champ de Noeuds - D 472 - Chemin des Gabelous	Non	Forte	Non	Non
CB	SALINS-LES-BAINS	Les Cornes	Non	Forte	Non	Non
CB	SALINS-LES-BAINS	Fort St-André	Non	Forte	Non	Non
CB	SIROD	Rocher des Commères	Non	Moyenne	Non	Non

CB	VAUX-SUR-POLIGNY	Falaises sous Chaussenans	Non	Moyenne	Non	Non
CB	VAUX-SUR-POLIGNY	Falaises sous Chaussenans	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	BUVILLY	BUVILLY	Non	Moyenne	Non	Oui
Gt	CERNANS	-	Non	Moyenne	Non	Oui
Gt	POLIGNY	MONT DE VAUX	Non	Moyenne	Non	Oui
Gt	POLIGNY	Nationale 5 à l'est de Vaux sur Poligny	Non	Moyenne	Non	Oui
Gt	SALINS-LES-BAINS	les Sistes, E de Salins-les-Bains sur route qui mène à la Gouaille	Non	Moyenne	Non	Oui
Gt	SALINS-LES-BAINS	les sicons	Non	Moyenne	Non	Oui
Gt	ARBOIS	-	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	ARESCHE	Le Val	Non	Forte	Non	Non
Gt	BELLEFONTAINE	Statue Sacré Coeur	Non	Forte	Non	Non
Gt	BELLEFONTAINE	Nord-ouest du village	Non	Forte	Non	Non
Gt	BELLEFONTAINE	Le Rigoulet	Non	Forte	Non	Non
Gt	BLOIS-SUR-SEILLE	Sous Vêru	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	BLOIS-SUR-SEILLE	Les Esterpois	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	BLOIS-SUR-SEILLE	L'Abeille	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	BLOIS-SUR-SEILLE	Côte de Boeuvon	Non	Faible	Non	Non
Gt	BLOIS-SUR-SEILLE	Les Galopas	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	BLOIS-SUR-SEILLE	Sous Vêru	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	BLOIS-SUR-SEILLE	En Messepierre	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	BRACON	Cavaroze	Non	Forte	Non	Non
Gt	BRACON	en Maubos	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	BRACON	Combe Patouillet - Les Pommereaux	Non	Forte	Non	Non
Gt	BRACON	Ferme St-André	Non	Forte	Non	Non
Gt	BRACON	Granges Sauvaget - Arloz-Dessous	Non	Forte	Non	Non
Gt	BRERY	Chaux de Poix	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	CHAMPAGNOLE	Bois de Taravent	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	CHARENCY	Les Poicheux	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	CHARENCY	Les Champs Louvots	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	CHATEAU-CHALON	sur D 5 Chambon	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	CHATEAU-CHALON	Les Echavins	Non	Faible	Non	Non
Gt	CHATEAU-CHALON	Les Mortiers	Non	Faible	Non	Non
Gt	CHATEAU-CHALON	La Serve	Non	Faible	Non	Non
Gt	CHATEAU-CHALON	Les Grévillettes	Non	Faible	Non	Non
Gt	CHATEAU-CHALON	Les Grévillettes	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	CHATEAU-CHALON	Les Mortiers	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	CHATEAU-CHALON	en Messepier les Galepas	Non	Moyenne	Non	Non

Gt	CHATILLON	Les Ebalèves	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	CHAUX-CHAMPAGNY	Champagny du Bas	Non	Forte	Non	Non
Gt	CHAUX-CHAMPAGNY	Les Malpas	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	CIZE	La Forge	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	DOMBLANS	pre Femery	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	DOMBLANS	Pré Fréméry	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	DOMBLANS	Lya	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	ENTRE-DEUX-MONTS	Sous le Rachet	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	EQUEVILLON	La Cude	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	ESSERVAL-COMBE	Les Teppes	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	FONCINE-LE-HAUT	La Grange Charnoz - Le Bas de Ville	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	FONCINE-LE-HAUT	Refuge du Paradis	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	FRONTENAY	Côte de Vau	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	FRONTENAY	Pré Collin	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	GRANGES-SUR-BAUME	le Couvent, ouest de Granges sur Baume	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	IVREY	-	Non	Faible	Non	Non
Gt	IVREY	-	Non	Faible	Non	Non
Gt	IVREY	Combe d'Aval	Non	Faible	Non	Non
Gt	LADOYE-SUR-SEILLE	Bois de Mouriaux	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	LE LOUVEROT	Le Bouachot	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	LE VERNOIS	Combe Rollin	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	MARIGNY	rive droite de l'Ain au NO de Marigny	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	MENETRU-LE- VIGNOBLE	Vignes du Pommier	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	MENETRU-LE- VIGNOBLE	les Mortiers, 1km ESE du Menetru-le- Vignoble, S du virage du D5	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	MENETRU-LE- VIGNOBLE	Beaumont	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	MIERY	Sous Plasne	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	MIERY	La Brenne	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	MIERY	La Châtelaine	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	MIERY	La Tournelle	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	MIERY	Les Bordes	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	MOLPRE	Champ de Pellot	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	MONAY	Nord-ouest du Mont	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	MONTIGNY-LES- ARSURES	Plenise	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	NEVY-SUR-SEILLE	Côte Argaux	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	NEVY-SUR-SEILLE	La Chaux	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	NEVY-SUR-SEILLE	Billen, ouest de Nevy-sur-Seille	VOITEUR- (39582)-	Moyenne	Non	Non
Gt	NEVY-SUR-SEILLE	entre les Longschamps et CD 204, E du Nevy-sur-	BLOIS- SUR- SEILLE-	Moyenne	Non	Non

		Seille	(39057)-			
Gt	NEVY-SUR-SEILLE	Rousselet	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	NEVY-SUR-SEILLE	Les Vignes de Prêle	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	PASSENANS	Prêle	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	PASSENANS	Nord du cimetière	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	PASSENANS	Les Grandvaux	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	POLIGNY	Sous la Roche du Pénitent	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	POLIGNY	RN5 - entrée sud-est de Poligny	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	POLIGNY	Les Grands Roussots	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	POLIGNY	les Trouillots	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	POLIGNY	sur D 257 le Baudoyen	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	POLIGNY	Sous les Lémons	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	POLIGNY	Les Lémons	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	POLIGNY	Les Argilliers	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	POLIGNY	Les Grands Roussots	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	PONT-DE-POITTE	au S de Point de Poitte sur les berges du lac de Vouglans	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	PONT-DE-POITTE	Sur Lépinay	Non	Forte	Non	Non
Gt	PONT-DE-POITTE	Sous les Côtes	Non	Forte	Non	Non
Gt	PONT-DE-POITTE	Sous Chat	Non	Forte	Non	Non
Gt	PONT-D'HERY	-	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	PONT-D'HERY	B. de Bonnet	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	PONT-D'HERY	Cercennes du Haut	Non	Forte	Non	Non
Gt	PONT-D'HERY	Ruisseau de Pré d'Héry	Non	Forte	Non	Non
Gt	PONT-D'HERY	Les Madeleines	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	PONT-D'HERY	Boisset	Non	Forte	Non	Non
Gt	PONT-D'HERY	Haut de Vie Neuve	Non	Forte	Non	Non
Gt	RIX	Trébief	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	SAINT-LAMAIN	Champ du Four	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	SAINT-LOTHAIN	Sous Mont	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	SAINT-LOTHAIN	Rouchasson - L'Echenaud	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Ste Anne entre la Barbarine et la Ferme de Tout Vent	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Les Sistes - Ruisseau de Gouaille	Non	Forte	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Les Naturades - Ruisseau de Gouaille	Non	Forte	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Les Chambenoz	Non	Forte	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Champ Colin, Nord-Est du Salins-les-Bains	Non	Moyenne	Non	Non

Gt	SALINS-LES-BAINS	(Blégny) en Chatillon sur N.72	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Combe aux Boeufs - Remeton	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Loge Sornay	Non	Forte	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Les Naples - Bief des Roussets	Non	Forte	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Champs Français	Non	Forte	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	bief des Roussetes	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Creux Lagne	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Les Vouses	Non	Forte	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	les Vouses	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Les Sicon	Non	Forte	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Mont-Cernans	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Les Mélin Col	Non	Forte	Non	Non
Gt	SALINS-LES-BAINS	Faubourg St-Pierre - Transformateur	Non	Forte	Non	Non
Gt	SIROD	Froide Fontaine	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	TOULOUSE-LE-CHATEAU	Fangy - Saumey	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	VAUX-SUR-POLIGNY	Les Dîmes	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	VAUX-SUR-POLIGNY	Les Dimes	Non	Faible	Non	Non
Gt	VAUX-SUR-POLIGNY	Le Baudoyen	Non	Faible	Non	Non
Gt	VAUX-SUR-POLIGNY	Sous le Baudoyen	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	VAUX-SUR-POLIGNY	L'Ermitage	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	VAUX-SUR-POLIGNY	-	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	VOITEUR	Les Grandes Vignes	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	VOITEUR	bois du Vernois	Non	Moyenne	Non	Non
Gt	VOITEUR	Corbeau	Non	Moyenne	Non	Non
Coulée	BELLEFONTAINE	Chaux Mourant	Non	Forte	Non	Non
Coulée	BELLEFONTAINE	D 18	Non	Forte	Non	Non
Coulée	PONT-DE-POITTE	Bief de Rossant - La Suisse	Non	Forte	Non	Non
Coulée	SALINS-LES-BAINS	Ruisseau du Faubourg St-Pierre	Non	Forte	Non	Non
Coulée	SALINS-LES-BAINS	Blégny - Ruisseau des Vouses	Non	Forte	Non	Non
ErB	BLOIS-SUR-SEILLE	Berges de La Mouille, les Saûges	Non	Faible	Non	Non
ErB	BRERY	Des Quinques jusqu'au Moulin de BRERY	Non	Faible	Non	Non
ErB	CRAMANS	La Bataille	Non	Faible	Non	Non
ErB	LADOYE-SUR-SEILLE	Entre D 204 et la rivière Seille	Non	Moyenne	Non	Non
ErB	MONT-SUR-MONNET	Moulin de Pierre	Non	Faible	Non	Non
ErB	PORT-LESNEY	Pré des Gravieres	Non	Faible	Non	Non

Annexe 3 - Approche statistico-historique, basée sur l'inventaire mouvements de terrain (méthode statistique)

Les données disponibles

Dans le cadre d'une approche cartographique statistique basée sur le catalogue des événements historiques, pour une zone donnée, le niveau d'aléa sera proportionnel au nombre d'événements recensés. Une telle approche exige de disposer de données de qualité sur la localisation et l'occurrence des événements mouvements de terrain, mais aussi un catalogue le plus exhaustif possible.

Une analyse de l'ensemble des mouvements de terrain recensés au sein de la base de données nationale (www.BDMVT.net) a été réalisée, afin d'étudier la possibilité de bâtir une méthode d'évaluation quantitative de l'aléa, basée sur une analyse statistique de la répartition des mouvements. Cette analyse a permis de recenser plus de 17 500 mouvements, dans cinq typologies différentes (glissements de terrain, éboulements/chute de blocs, coulée de boue, effondrement, érosion de berge). La localisation est très hétérogène allant du mètre à l'échelle de la commune (> 1km). La précision de la date est elle aussi très hétérogènes, allant du qualitatif « récurrent » à « supérieur au siècle ».

Afin d'évaluer la faisabilité d'une approche statistico-historique, la BDMVT a fait l'objet des analyses et traitements suivants :

- récupération des événements relatifs aux 3 grands types de mouvements : chutes de blocs, glissements, coulées,
- choix de conditions de filtrage pour l'acquisition d'un catalogue de données pertinents pour la réalisation d'une cartographie de type SDR- MVT,
- analyse de la diversité et la qualité des informations accessibles après filtrage.

L'évaluation de l'aléa mouvements de terrain suppose une bonne maîtrise des paramètres de localisation et de date de l'événement. Dans ce cadre, les filtrages suivants ont été appliqués :

Filtre n°1 : Précision de la localisation inférieure ou égale à la centaine de mètres, la précision hectométrique étant adaptée à l'échelle d'étude départementale. Cette résolution est cohérente avec la plupart des données, dont le MNT au pas de 50 m de l'IGN, ou la carte géologique à 1/50 000.

Filtre n°2 : Précision de la date de l'événement au moins annuelle, pour qu'une corrélation entre événement climatique (e.g. les précipitations) et occurrence des instabilités garde un sens ; la résolution temporelle annuelle est celle à ne pas dépasser.

Filtre N°3 : champ « fiabilité », que possède la base de données. Le critère « fiabilité » est un indice qualitatif (« fort », « Moyen », « faible »), qui se base sur des critères de précision de la localisation, de la précision de la date, de quantité d'informations sur sa description. On remarquera que ce champ n'a pas été utilisé comme unique critère afin d'éviter les effets de compensation entre les critères et/ou pour maîtriser la subjectivité lors de l'entrée des données.

Résultats sur le filtrage des événements exploitables dans le cadre d'une approche statistico-historique

Le nombre d'événements recensés après chaque filtrage est indiqué ci-après :

Type de mouvement	Nombre initial	Après filtre sur « Localisation »	Après filtre sur « Date »	Après filtre sur « Fiabilité »
Glissements	5128	3505	2132	2041
Chutes de blocs & Eboulements rocheux	3440	1709	1220	1083
Coulées	910	341	295	246

Tableau 19 - Nombre d'événements recensés dans BDMVT et sélectionnés pour une approche cartographique statistico-historique en France

Pour les événements de type coulées de boue : le recensement sur le territoire national est initialement très faible (moins de 1 000 événements). L'application des filtres réduit d'un facteur 5 le nombre d'événements dits « fiables ». Vouloir dériver des critères objectifs et quantifiables biaiserait indéniablement les résultats, l'échantillon n'étant pas représentatif.

En ce qui concerne les glissements et éboulements :

Localisation

La précision de la localisation des événements est relativement mal connue (c'est le filtre le plus discriminant), Figure 90. En effet, avec le filtre appliqué (précision à minima d'ordre hectométrique), pour certains départements, l'ensemble des événements sont éliminés. L'exemple du département des Pyrénées – Atlantique est illustratif : 52 événements y sont recensés et après filtrage, un seul mouvement reste validé. La précision de la localisation de ces mouvements est au mieux communale. Près de 50 % des communes ont une superficie comprise entre 3 km² et 10 km² avec une moyenne de 14 km². La précision peut dans ce cas être estimée entre 2 et 3 kilomètres, ce qui est clairement inexploitable dans l'optique d'une cartographie de l'aléa à l'échelle départementale (typiquement au 1/50 000ème).

Date d'occurrence

Par contre, les dates des événements est un paramètre connue avec plus de précision, ce qui ouvre de bonnes perspectives sur l'étude de la composante temporelle (i.e. la probabilité d'occurrence), que l'on étudiera dans la suite.

Discussion sur la mise en œuvre d'une méthode statistico-historique basée sur la BDMVT pour la réalisation des SDR-MVT

De façon générale :

- La bonne précision sur la date d'occurrence ouvre la perspective d'une corrélation entre extrema pluviométriques annuelles et glissement de terrain. Une corrélation à la résolution mensuelle peut être envisagée, voire journalière pour les éboulements.
- Peu d'informations descriptives sont accessibles, ce qui confirme la difficulté d'adapter une approche déterministe à l'échelle départementale. Par contre, la donnée lithologique est bien renseignée : une analyse statistique lithologie – évènement est à envisager.
- L'importance du paramètre « précipitations » est clairement mise en avant en tant que facteur déclenchant des instabilités.

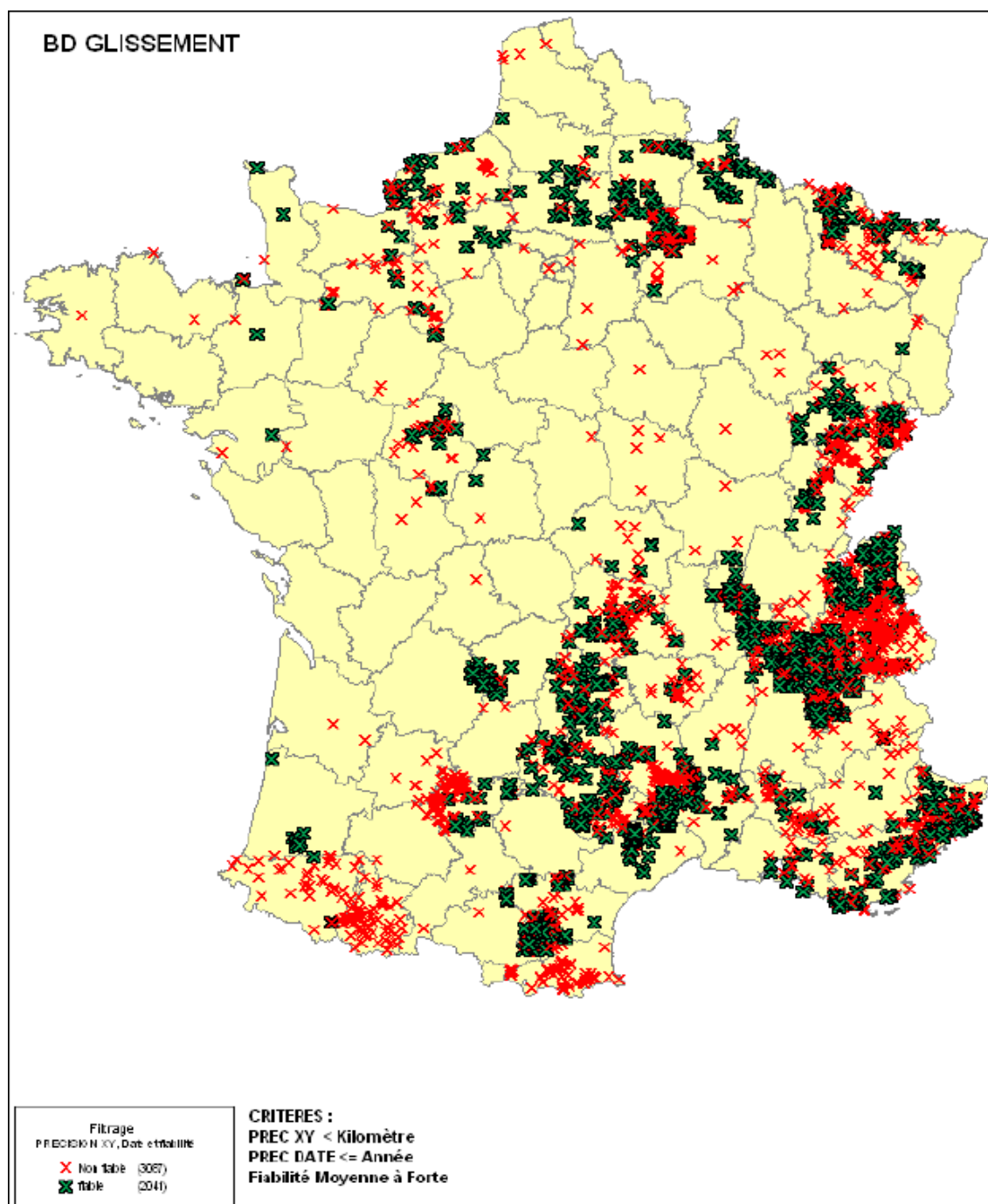
A titre de synthèse, la carte de répartition des évènements « glissements de terrain » et « éboulements » avant et après filtrage sont présentées, Figure 90. Cette comparaison montre que plusieurs présentent soit une grande pauvreté de mouvements recensés, soit une faible « fiabilité » vis-à-vis des critères. Il reste à démontrer que les départements « riches » présentent un nombre d'évènements suffisant pour quantifier l'aléa. De fait, actuellement, si la base BDMVT peut constituer ponctuellement une aide précieuse pour distinguer les principales périodes d'instabilité régionale, par contre elle reste très insuffisante pour une cartographie systématique de l'aléa aux mouvements de terrain à l'échelle des départements français.

Glissements de terrain

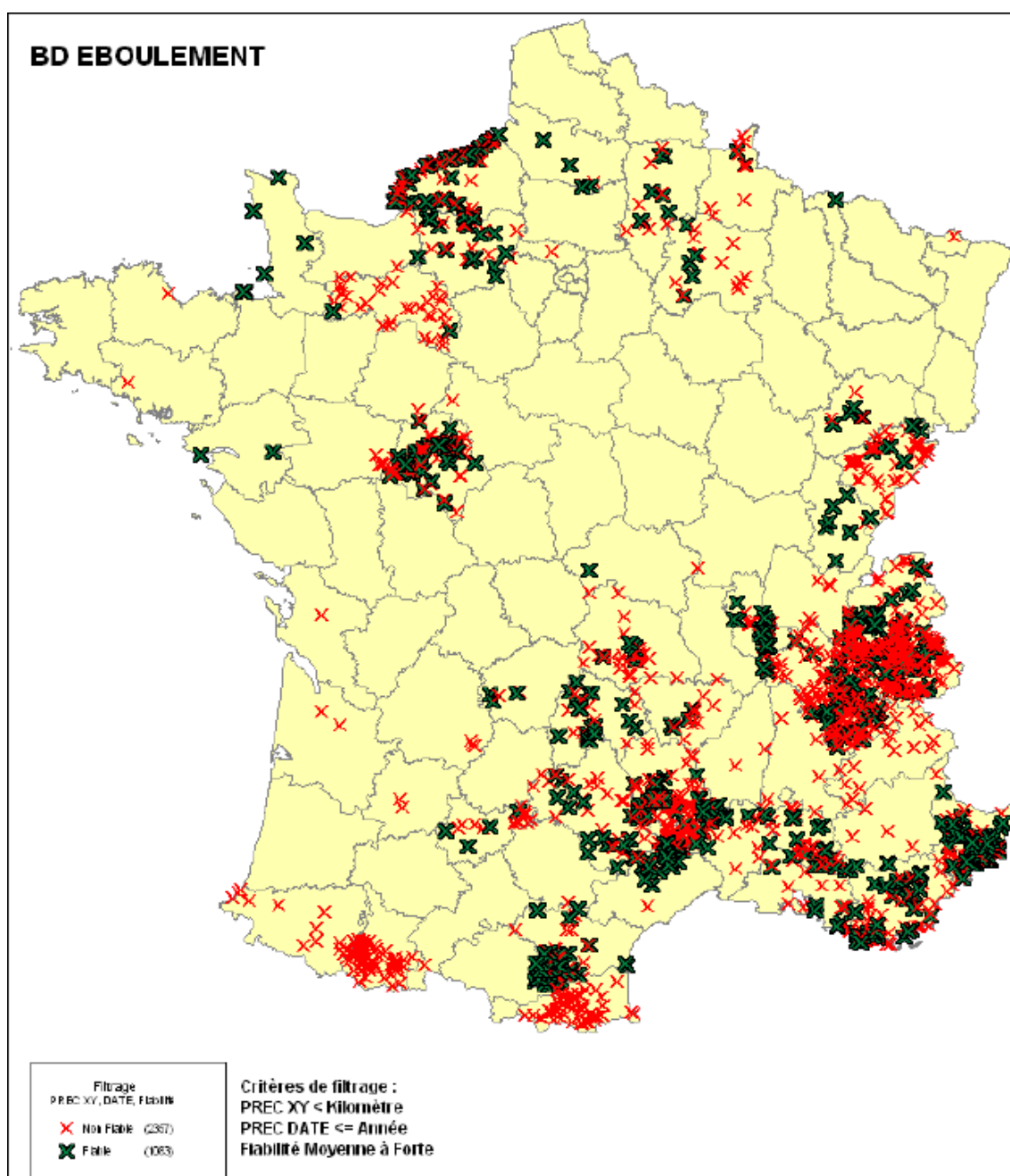
Description générale		
Précision de la localisation	50 %	à 10 m près
	50 %	à 100 près
Précision de la date	Moins de 30 %	A l'année
	40 %	Au mois
	20 %	A la journée
	Moins de 5 %	Récurrent
Fiabilité générale	65.5 %	Forte
Qualité de la saisie, de la validation, du recueil	Moins de 25 %	Des informations accessibles
Dommages aux biens	Un peu plus de 50 %	Oui
Description géologie et géométrie		
Données générales : Volume et dénivelé	Moins de 30 %	Des informations accessibles
Données précises : largeur, amplitude, pente et nombre de blocs	Moins de 50 %	Des informations accessibles
Géologie (lithofaciès et stratigraphie)	Un peu plus de 50 %	Des informations accessibles
Description de l'origine		
Origine	Près de 60 %	Naturelle
	Près de 25 %	Anthropique (pompage, travaux, ...)
	Moins de 15 %	Inconnue
Facteur naturel déclenchant	37.5 %	Pluviosité (avec certitude)
	15 %	Pluviosité (probable)
	5 – 15 %	Autres (fonte, séisme, érosion, embâcle,...)
	Moins de 30 %	Inconnue
	Près de 60 %	Naturelle
	Près de 25 %	Anthropique (pompage, travaux, ...)

Eboulements

Description générale		
Précision de la localisation	40 %	à 10 m près
	60 %	à 100 près
Précision de la date	20 %	A l'année
	20 %	Au mois
	45 %	A la journée
	5 %	Récurrent
Fiabilité générale	75 %	Forte
Qualité de la saisie, de la validation, du recueil	Moins de 33 %	Des informations accessibles
Dommages aux biens	Un peu plus de 50 %	Oui
Description géologie et géométrie		
Données générales : Volume et dénivelé	Moins de 25 %	Des informations accessibles
Données précises : largeur, amplitude, pente et nombre de blocs	Moins de 15 %	Des informations accessibles
Géologie (lithofaciès et stratigraphie)	60 %	Des informations accessibles
Description de l'origine		
Origine	Plus de 50 %	Naturelle
	Moins de 15 %	Anthropique (pompage, travaux, ...)
	Près de 35%	Inconnue
Facteur naturel déclenchant	Moins de 25 %	Pluviosité (avec certitude)
	20 %	Pluviosité (probable)
	Moins de 20 %	Erosion (avec certitude)
	Moins de 10 %	Erosion (probable)
	5 – 10 %	Autres (fonte, séisme, érosion, embâcle,...)
	Moins de 20 %	Inconnue



A –Glissements de terrain



B – Chutes de blocs & éboulement

Figure 90 - Répartition des glissements de terrain et éboulements avant et après application des critères de sélection

Annexe 4 - Tests méthodologiques non retenus pour l'évaluation de l'aléa aux glissements de terrain

Analyse morphologique

Choix du Modèle Numérique d'Altitude à utiliser

Pour cela, nous disposons comme donnée de base du MNT IGN et du SRTM 3. Dans cette première analyse, il a par conséquent été nécessaire de justifier, en premier lieu, le choix fait sur l'un des deux MNT étant très différents dans leur résolution et dans leur méthode de génération.

Pour rappel, le SRTM3 est produit à une maille de 90m avec une précision Z de plus ou moins 16 m. Ce modèle numérique d'altitude a été développé par l'USGS et la NASA sur la base d'un vol spatial radar. Le modèle est créé par interférométrie à une résolution spatiale de 90 m et il est disponible gratuitement par téléchargement depuis 2003.

Nous rappelons qu'en règle générale, plus le pas du MNT est lâche plus les formes de terrain sont molles et généralisées ; Sachant que, dans notre démarche, nous cherchons en outre à faire ressortir les formes du relief et que notre zone pilote apparaît avoir un relief relativement accidenté, le choix d'un MNT à mailles plus fines tend ainsi à se justifier.

Une analyse de la distribution en surfaces des différentes classes de pentes en % pour les deux MNT est présentée dans le tableau suivant :

		Maille de 50 m		Maille de 90 m	
Classe	Pente	km ²		km ²	
1	0 - 15 %	1329	79%	1395	83%
2	15 - 30 %	238	14%	200	12%
3	> 30 %	110	7%	80	5%
Total		1676		1676	

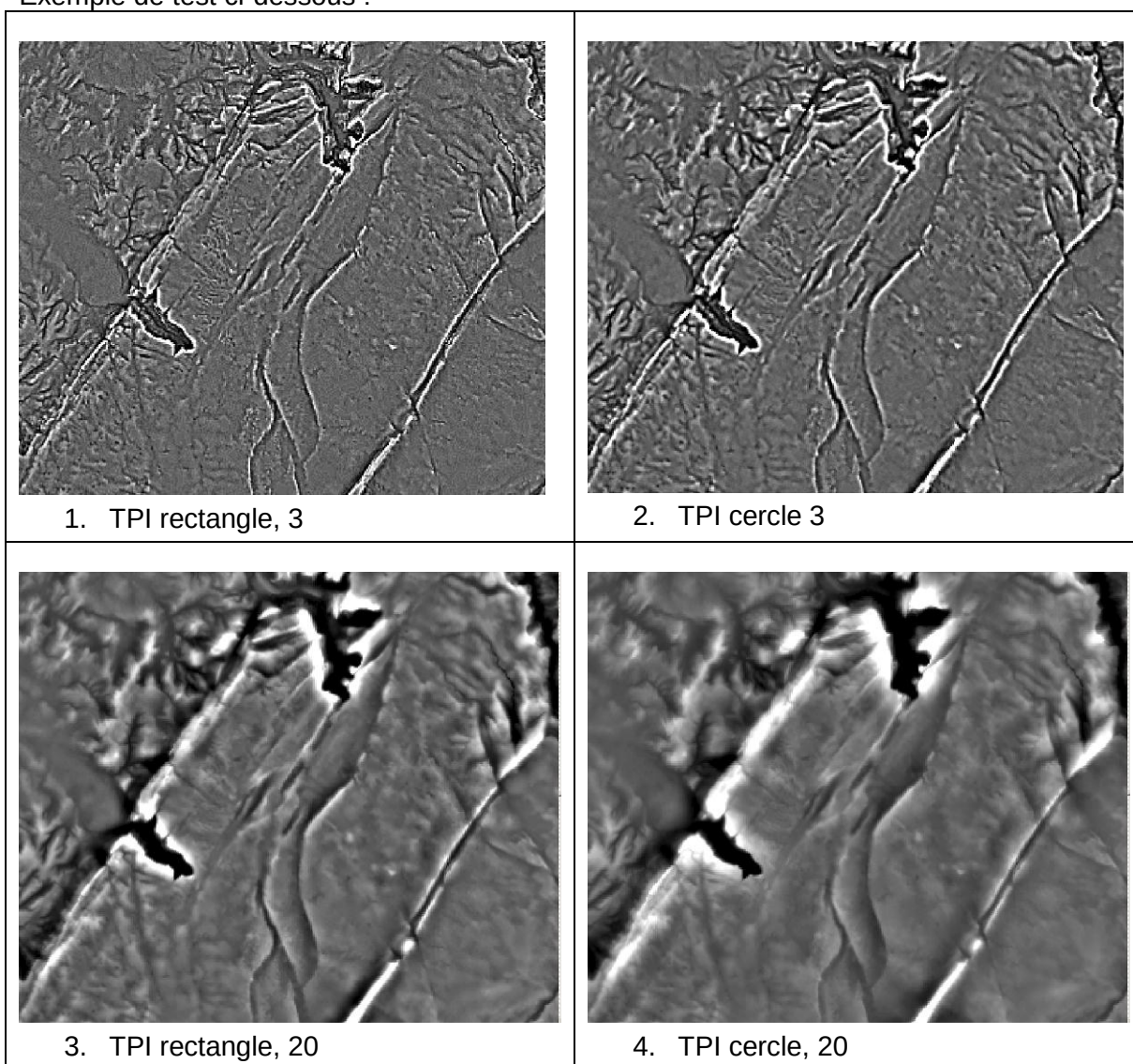
Figure 91 : Distribution en surfaces des classes de pente pour chacune des résolutions de MNT

La règle de lissage des formes de terrain en fonction du pas de la grille est soulignée par cette analyse de distribution. Plus la résolution du MNT est faible, plus la surface classée dans les premières catégories est importante.

Choix du voisinage adéquat pour le calcul du TPI

Le calcul du TPI étant totalement dépendant des effets d'échelle (cf. posters⁴). Par conséquent, plusieurs tests ont été réalisés afin de choisir le voisinage le mieux adapté à notre étude

Exemple de test ci-dessous :



Résultat 4 retenu pour notre étude : voisinage cercle 20

⁴ Weiss, A. 2001. *Topographic Position and Landforms Analysis*. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA.

→ L'analyse de voisinage en Cercle apporte un lissage plus important par rapport à l'analyse du voisinage en rectangle qui apparaît faire ressortir plus précisément les formes du relief. De plus, le choix d'analyser la zone avec un voisinage de type large apporte un second niveau de lissage qui permettra une meilleure adéquation par rapport à l'objectif principal de recréer une lecture synthétique des formes du paysage sur la zone pilote.

Dans la boîte à outils Topography tools, deux algorithmes de classification du paysage sont proposés et ont été testés sur notre zone pilote

- ☐ Outil « Slope Position Index » en 6 classes
- ☐ Outil « Landform Classification » en 10 classes

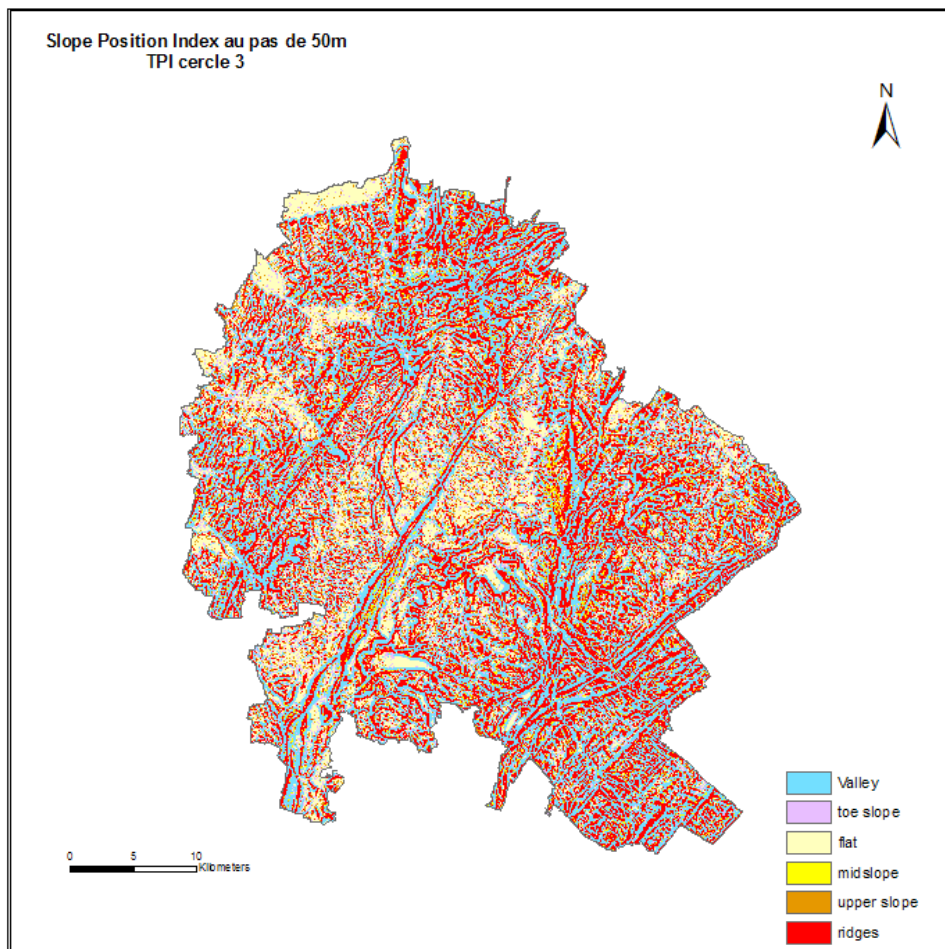
- Slope Position Index basé sur le calcul du TPI et de la pente (ici TPI cercle 20) qui donne une classification du paysage en 6 classes maximum

Par conséquent, les résultats de cet Index sont également très dépendants des effets d'échelle, le choix du voisinage d'analyse du TPI est donc aussi déterminant dans ce cas.

Dans ce calcul, les bornes des 6 classes sont fixées en utilisant une discrétisation par écart-type sur la grille TPI complétée par des seuils fixés manuellement sur la grille de pente :



Test Avec TPI à voisinage plus resserré :



Plusieurs tests ont été exécutés dont voici quelques exemples ci-dessus mais aucun n'a été probant : Aucune démarcation entre la plaine, le plateau jurassien, vallées trop marquées sur la plaine...

→ Indice rejeté pour notre cas d'étude

- Landform Classification en 10 classes maximum

Cette méthode de classification permet de combiner en donnée d'entrée en plus de la pente, deux grilles de TPI à deux échelles différentes (petit et grand voisinage). Elle suggère par conséquent un résultat composé d'une plus grande variabilité dans les types de paysage. De manière générale, la gamme de valeurs du TPI augmentant avec l'échelle, une standardisation des grilles TPI est donc opérée en début de processus avec la moyenne à 0 et l'écart type à 1. Ensuite les bornes de classes sont manuellement définies en choisissant d'optimiser la classification pour chaque type de paysage (Cf. Ref Poster Weiss).

Voir figure ci-dessous : classification automatique du paysage en 10 classes testée à partir d'une analyse du voisinage à deux échelles distinctes: cercle TPI 3 et cercle TPI 20.

Le plateau est très peu mis en valeur dans cette classification. Une trop grande nomenclature ne permet pas de distinguer les grandes structures du paysage, de plus certains pixels apparaissent mal classés.

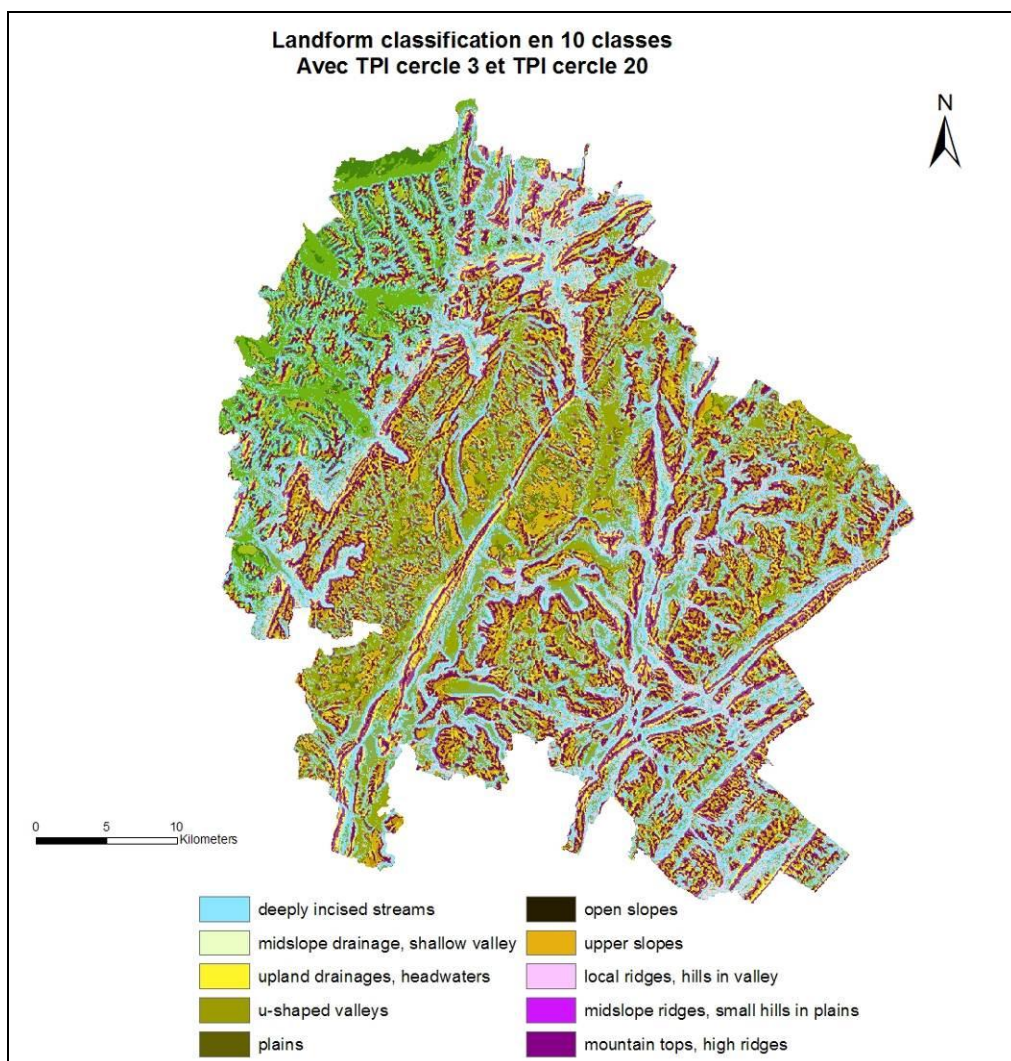
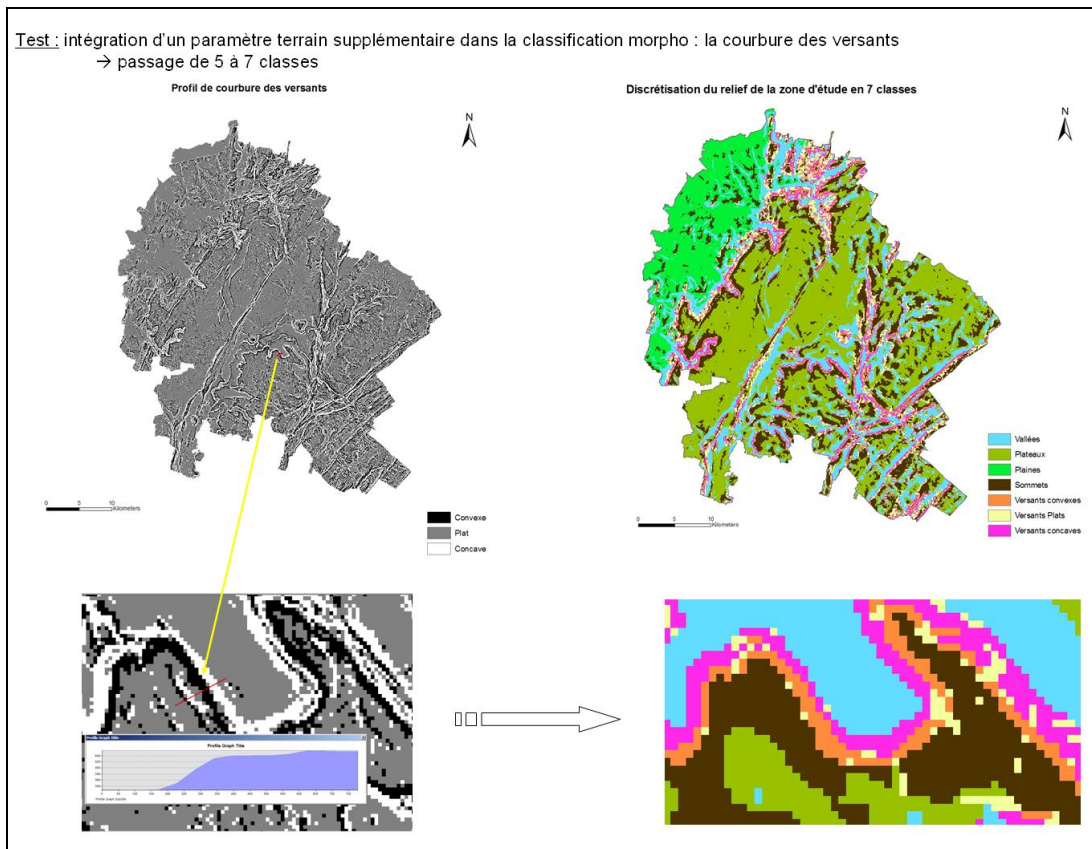


Figure 92: Classification automatique en 10 classes

→ Indice rejeté pour notre cas d'étude

Choix de la classification morpho



Choix du nombre de TMU

Premier exercice de croisement Morpho + Géol : Nombre de combinaisons possibles
65 classes

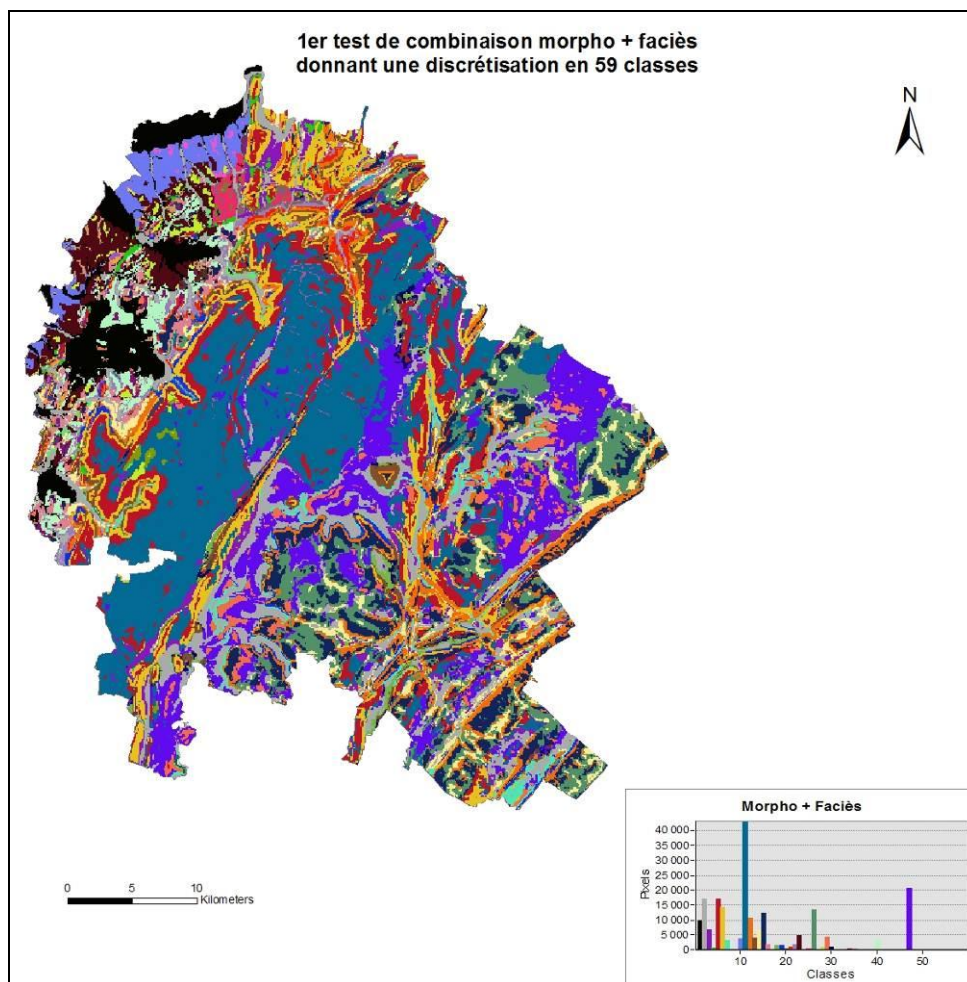


Figure 93: Premier exercice de combinaison Morpho-géol

Trop d'hétérogénéité, par conséquent les faciès sont regroupés en 9 classes distinctes.

Annexe 5 – Correspondance code lithostratigraphique - âge - faciès des terrains pour le secteur de la zone pilote, d'après la carte géologique à 1/50 000 (BRGM)

CODE	NOTATION	DESCRIPTION
1	X	Dépôts anthropiques, remblais, amendements importants
2	E-S	Eboulis, groise
3	Eb	Brèches de pente
4		Tufs et travertins
5	OE	Limons en placages
6	OE-H	Limons complexes en épandage interfluves ou plateaux
8	Ñú	Formation d'altération à grains de limonite avec concrétions ferrugineuses, croûte calcareuse sur calcaires
9	í-S	Argiles d'altération mélangées à des dépôts soliflués
10	í	Argiles d'altération sur terrains variés
11	ís	Argiles sableuses de décalcification à chailles et silex
12	ís/F	Argiles résiduelle et sables argileux, graviers et galets siliceux (terrasses de Viriat, Marnes de Bresse)
13	HS	Sables grossiers roux quartzo-feldspathiques à gros éléments siliceux roulés ou non (quartz, chailles) peu épais
14	S	Glissements
15	C	Colluvions
16	CF	Collu-alluvions
19	Fz	Alluvions récentes (actives ou stabilisées) indifférenciées, graviers, sables, argiles
20	Fz2	Alluvions modernes actives
21	Fz1	Alluvions modernes stabilisées, parfois recouvertes (limons)
22	FzL	Alluvions lacustres
23	FzT	Tourbes et alluvions lacustres associées
25	Fx-y	Alluvions anciennes en terrasses non datées, graviers, sables, silts, argiles

26	Fy3	Graviers polygéniques ou calcaires, galets, sables siliceux ou calcaires parfois argileux, limons argileux (terrasses alluviales basses, Saint-Usage, +5/+8m)(W ³ rm, post-W ³ rm)
27	Fy2	Graviers, sables, silts, argiles (terrasses alluviales moyennes : +15/+17 m)
28	Fy1	Graviers, sables, silts, argiles (terrasse haute : +27/+32 m) (W ³ rm),
29	FG	Alluvions fluvio-glaciaire indifférenciées
30	F-G	Alluvions et moraines glaciaires indifférenciées
31	Fgy	Fluvioglaciaire w ³ rmien
32	Py	Cône de déjection inactif, graviers de pieds de monts, éboulis (W ³ rm)
34	Gy-z	Moraine terminale à arcs nets (Saint-Claude)(W ³ rm)
35	Gy	Moraines indifférenciées (W ³ rm)
36	GyJ	Moraines (à blocs) à éléments jurassiens (W ³ rm)
40	GLy2	Rythmites varvées glacio-lacustres (W ³ rm)
41	GLy1	Alluvions de delta glacio-lacustre (W ³ rm)
42	FLx	Cailloutis fluviaux à la base, silts argileux et argiles lacustres varvées carbonatées au sommet (Formation de Saint-Cosme)(Riss)
43	Gx	Sédiments périglaciaire sablo-calcaires rubannés anté-W ³ rm
44	FGx	Fluvioglaciaire (Riss)
45	Fx-z2	Alluvions anciennes , sables et graviers, des vallées non sèches des plateaux (Riss)
46	Fx-z1	Alluvions anciennes des vallées sèches des plateaux (Riss)
47	Fx-z0	Colluvions remaniées et limons des fonds de gouttières (Riss)
48	Gw	Moraines (Mindel)
49	lign/p2-3	Lentilles de lignite (sables roux supérieurs d'Aumont, Gatey, Balaiseaux ; sables à galets du Pliocène supérieur de Bresse ; argiles d'Oussières)
50	p-IVSr	Sables roux avec marnes, silts micacés, argiles (Argiles et cailloutis de Bresse, Aumont, Gatey, Balaiseaux, Billey-Sampans)(Plio-quatenaire de la Bresse)
51	p-IV SS	Sables et cailloutis (-supérieurs de la Forêt de Chaux, -de la Forêt d'Arne, -Evans), matériel alpin, galets de grès parfois(Plio-Quatenaire)

52	p-IVCRh	Cailloutis polygénique alpins-rhodaniens, quartzites roulés dominants, matrice argileuse ou argilo-sableuse (Saint-Etienne-du-Bois)
53	p-IVCCa	Conglomérats à galets calcaires, matrice argileuse ou sableuse (Cgl. de Chilly-sur-Salins, Saint-Etienne-du-Bois) (Pliocène)
54	p3í	Argiles et argiles sableuses (-d'Oussières, -Etrepigny, -d'Asnans ?) (Pliocènesup.)
55	p3S	Sables (-de Foulenay), localement à galets (Pliocène sup.)
57	p1-2Crh	Cailloutis alluviaux inférieurs de la Forêt de Chaux à matériel aplin (Pliocène inf. à moyen)
59	pMBs	Marnes, sables, argiles, cailloutis, silts siliceux micacés, roux parfois lités (sommet des marnes de Bresse)
60	pMBCa	Marnes, sables parfois carbonatés (gris bleuté), argiles, silts ; passées de lignite, concrétions calcaires (Marnes et sables de Bresse à épaississement vers le sud)(Pliocène)
61	pMBC	Marnes grumeleuses brun-beige à blanchâtres à gros éléments calcaires : concrétions et parfois blocailles (Marnes de Bresse)(Pliocène)
62	pMBí	Marnes et argiles à niveaux tourbeux, sables et silts carbonatés ou non, argiles réfractaires (Terre d'Engobe ou Blanc de Bresse)
63	pS	Sidérolithique (Châteauneuf), argiles bleues et sables à graviers (Berthelange) (Pliocène probable)
64	m6P	Poudingues continentaux calcaires à limonite (Arsures, Pagnoz) (Pontien, Miocène sup.)
65	m5-6B	Brèches tectoniques à éléments calcaires (Ivrey, Orbagna) (Pontien, Miocène sup.)
66	g-m	Conglomérats grossiers calcaires du Jura (Gompholites) et marnes (brèches de Narlay)(Oligocène-Miocène)
67	m	Argiles bariolées, calcaires lacustres, grès (Aquitaniens-Miocène indifférenciés)
68	m2	Conglomérats polygéniques, grès glauconieux, molasses (Burdigalien)
70	g	Conglomérats polygéniques argileux à microcodium (Conglomérat de Dijon) avec marnes saumon, lacustre (Oligocène)
72	g2b	Conglomérats à éléments jurassiens, marnes, gypse, silex (Chattien supérieur)
73	c1-4	Calcaires blanchâtres crayeux et argileux, grès (25m)(Cénomaniens-Turonien-Sénonien inférieur)

74	n6-c1	Calcaires crayeux (Albien-Cénomaniens indifférenciés)
75	n5-6	Sables verts glauconieux, marnes foncées, calcaires clairs (Aptien-Albien)
76	n4	Calcaires blancs à jaunâtres graveleux, oolithique, récifaux, parfois asphalté (facies type "Urgonien")(Barrémien)
77	n3	Calcaires jaune clair en dalles (Pierre Jaune de Neuchâtel) et marnes gris bleu pâteuses à Exogyra couloui (Marnes d'Hauterive)(Hauterivien)
78	n2	Calcaires en dalle, roux à limonite (Complexe des calcaires roux, Limonite de Métabief), marnes grises à bleuâtres (Marnes d'Arzier, Marnes de Censeau), calcaires en barres épaisses avec marno-calcaires (Marbre bâtard) (15-30m) (Valanginien)
79	n1	Calcaires fétides, dolomitiques, brèches à cailloux noirs, argiles verdâtres, marnes claires, dolomies et gypse (Purbeckien, Berriasien)
80	j6-7	Calcaires, calcaires dolomitiques, marnes à E. virgula (Portlandien-Kimméridgien indifférenciés)
82	j5-6	Calcaires, calcaires dolomitiques, marnes, grès argileux (Oxfordien supérieur - Kimméridgien inférieur indifférenciés)
83	j7	Calcaires à tubulures café-au-lait flammés (à Gravesia) (couche de Chailley) à la base, calcaires dolomitiques lacustres au sommet (Tithonien)
84	j6	Calcaires massifs à débris, calcaires grés-marneux, calcaires massifs détritiques(200m)(Kimméridgien)
85	j6b	Calcaires marneux à Ptérocera à la base, marnes et calcaires à Exogyra virgula au sommet (Kimméridgien sup.)
86	j6a2	Calcaires parfois dolomitique et marnes à Exogyra virgula (Kimmeridgien supérieur, Virgulien)
87	j6a1	Calcaires noduleux glauconieux ou fins et marnes (à Ptérocera) (Kimmeridgien sup., Ptérocérien)
88	j6a	Calcaires à "Momies", couche à Astartes (Kimmeridgien sup.)
89	J6a2S	Calcaires fins massifs à passées oolithiques, calcaires récifaux ou lités, calcaires en dalles à débris marneux (Séquanien supérieur, Kimmeridgien terminal)

90	j5c-6aS	Calcaires graveleux plus ou moins crayeux, gréseux et marnes (Pierre blanche de Risoux, marnes et calcaires de Besançon)(faciès Séquanien indifférencié, Oxfordien sup.-Kimmeridgien inf.)
91	j5c2-6aS	Calcaires du séquanien moyen et supérieur indifférenciés (Oxfordien terminal-Kimmeridgien inf.)
92	j5c2-6a1S	Marnes grises et calcaires gréseux, oolithiques, lumachelliques ou argileux bioclastiques (Séquanien moyen, Oxfordien terminal-Kimmeridgien basal)
93	j5c2R	Calcaires micritiques, oolithiques ou graveleux à oncolithes algaires, crayeux (Calcaire de Morillon, d'Aranc)(Rauracien sup.-Oxfordien terminal)
94	j5c1S	Calcaires fins blancs crayeux, calcaires graveleux jaunes, se terminant par une dalle calcaire gréseuse (Séquanien inférieur, Oxfordien sup. basal)
95	j5c-6aS(1)	Calcaires récifaux, calcaires en dalles et marnes (Séquanien et Rauracien indifférenciés, Oxfordien sup.-Kimmeridgien inf.)
96	j5cR	Calcaires oolithiques et calcaires à Polypiers, calcaires récifaux, calcaires noduleux, oolithiques (-de Pagnoz), pisolitique (Faciès Rauracien, Oxfordien sup.)
98	j5c1R	Calcaires coralliens rauraciens (25-30m) (Oxfordien sup. basal)
99	j5bA	Marnes et marno-calcaires (couches d'Effingen et du Geissberg), Astarte, calcaires hydrauliques et couches à sphériles (de Champagnole) (faciès Argovien, Oxfordien moyen)
100	j5abA	Marnes bleues pyriteuses plastiques à entroques, calcaires argilo-siliceux gris (Argovien, Oxfordien inf. et moyen)
101	j5a	Marnes gris-noir à Ammonites pyriteuses à Creniceras renggeri (Oxfordien inférieur)
102	j4-5	Calcaires argileux oolithiques et marnes (Callovien-Oxfordien indifférenciés)
103	j3-4	Calcaires (Callovien inférieur et Bathonien non différenciés)
104	j4	Marnes, calcaires argileux, "Dalle nacrée", lumachelles, calcaire oolithique ferrugineux, phosphates, pseudo-brèche, lacune (Callovien)
105	j4c	Marnes et calcaires argileux, oolithes ferrugineuses, niveaux à fossiles phosphatés, pseudo-brèche, lacunes (Callovien sup.)

106	j4a	Calcaires localement oolithiques, lumachelles, marnes, "Dalle nacrée", lacunes (Callovien inf.)
107	j3	Calcaires compacts "comblanchoïdes", ou bicolores, calcaires oolithiques spathiques, marnes, calcaires à Momies, calcaire à silex, (Choin) (Bathonien)
108	j3bc	Marnes à Rhynchonelles (-de Champforgeron), calcaires compacts "comblanchoïdes" (-de la Citadelle), calcaires oolithiques spathiques, calcaires graveleux (type "Forest Marble"), lacunes (Bathonien moyen à sup.)
109	j3a	Calcaires oolithiques bioclastiques à tâches, calcaires marneux en dalles fines (Bathonien inf.)
110	j2c-3	Calcaires (Bajocien supérieur-Bathonien indifférenciés)
111	j2	Calcaires oolithiques massifs, calcaires spathiques, polypiers, entroques, silex (P. parkinsoni), lacunes (Bajocien)
112	j2b	Calcaires oolithiques (Grande oolithe, calcaires de Courbouzon) à entroques, petites huîtres, marnes à O. acuminata, (Vésulien), subfurcatum, garantiana, parkinsoni, lacunes (Bajocien sup.)
113	j2a	calcaires à entroques au nord, polypiers, calcaires à silex (-de Messia), calcaires spathiques (à Sowerby) (Bajocien inf.)
114	j1-2	Oolithes ferrugineuses, calcaires à silex, calcaires à entroques (Petit Granite)(calcaires de Conliège)(Aalénien à Bajocien moyen)
115	j1	Calcaires oolithiques (-de Vellefaux), calcaires argilo-sableux, calcaires à Cancellophycus, oolithes ferrugineuses (-de Rosnay) (Aalénien)
116	l4-j1	Marnes (Toarcien-Aalénien indifférenciés)
117	l	Marnes (Lias indifférencié)
118	lt	Marnes et calcaires (Lias et Trias indifférenciés)
119	l4c	Marnes micacées (à Dumortiera), calcaires argilo-sableux (Couche de l'Etoile), oolithe ferrugineuse inf. (-de Blois) (Toarcien sup.)
120	l4ab	Schistes carton, marnes à "miches", argilites, lacunes (Toarcien inf. et moyen)
121	l3	Calcaires argileux (à Pleuroceras), marnes à Amaltheus, oolithes ferrugineuses à Stokesi, (Banc de Davoei), calcaires à Belemnites, lacunes (Pliensbachien)
122	l1-2	Calcaires à Gryphées, marnes, calcaires argileux (Hettangien-Sinemurien)

123	t7-l1	Grès miacés et marnes litées, schistes noirs micacés à nodules calcaires, calcaires bleu noir lumachelliques (Rhétien-Hettangien)
124	t7	Argiles brun rouge (-de Levallois), argilites et grès grossiers, schistes noirs (Rhétien),
126	t6b3-7	Grès, dolomies, marnes bariolées, dolomies, gypse, argiles schisteuses noires et "chocolat" (Keuper sup.-Rhétien)
127	t6-7	Marnes irisées lie-de-vin et vertes, dolomies grises (Keuper indifférencié)
128	t6b2	Argiles et marnes bariolées dolomitiques (Marnes irisées supérieures), lie-de-vin (Châlin), argile (de Chanville) (Keuper sup.)
129	t6b1	Dolomie (-de Beaumont, -Moellon), argiles et marnes bariolées (Marnes irisées moyennes), grès à roseaux (Keuper moyen)
131	t3-6a1	Grès fins argileux, argiles rouges ou grises et dolomies argileuses (Muschelkalk inf. et moyen et Lettenkohle inférieure)
132	t6a	Formations salifères, marnes bariolées, dolomie "limite" (Lettenkhole)
133	t5	Dolomies argileuses, calcaires dolomitiques (- de la Serre), oolithiques, à entroques (Muschelkalk supérieur)
135	t1-2	Grès grossiers feldspathiques oxydés, grès fins, argiles (Buntsandstein inf. à sup. indifférencié)
136	t2	Grès (-de Menotey), argilites gréseuses, grès grossiers arkosiques (Mn), grès à Voltzia (Buntsandstein sup.)
137	t1ab	Conglomérat principal grès (-de l'Arsot, -de Moisse, -de Base) (Buntsandstein inf. à moyen)
138	r1-3	Grès conglomératiques et pélites à la base (Autunien sup.), argiles, grès et conglomérats violacés (Permien)
139	aâ	Eurites, mylonitiques à la base évoluant vers le haut en tufs pyroclastiques ou vitroclastiques
140	μÒ	Gneiss à résidus
141	μâg	Gneiss à résidus à grenats
142	â2M	Granites monzonitiques porphyriques avec enclaves basiques
143	ý	Enclaves basiques
999	hydro	Réseau hydrologique

Annexe 6 – Description des fonctionnalités du logiciel ALICE® utilisés dans le cadre de la méthode SDR-MVT

Extrait de Sedan O. (2011) - Logiciel ALICE version 7 - Guide Utilisateur, Rapport BRGM/RP-60004-FR

Le programme ALICE® permet :

- D'établir des cartes de susceptibilité quantifiée aux glissements de terrain, sous forme de probabilité d'apparition du phénomène, ce pour une sollicitation hydro-pluviométrique ou/et sismique donnée.
- La mise à disposition des outils permettant, notamment avec les calculs de stabilité le long de profils spécifiques, de caler les valeurs des paramètres d'entrée. L'utilisateur mettra notamment à profit sa connaissance des mouvements passés, intégrant ainsi le retour d'expérience qu'ils peuvent apporter.
- De tenir compte de la variabilité et des incertitudes des paramètres mécaniques des terrains.
- De fournir la composante de base qui autorise l'établissement, au-delà des cartes de susceptibilité, des cartes de risque lorsque exposition, vulnérabilité et valeur des éléments exposés sont connues.

The screenshot displays the 'Parametrage Alice V7.7.9.0' window. Key sections include:

- Chemin de projet:** Fields for project path and selection table/workbook.
- Modèle : Global data:** Settings for raster files, number of interfaces, and simulation parameters like calculation step, profile length, and iteration count.
- Paramètres par défaut des simulations:** Default values for simulation parameters such as precision, gamma, and base.
- Zones:** Configuration for zones, including names, counts, and calculation methods.
- Couches:** Settings for layers, including names, counts, and calculation methods.
- Position des interfaces entre couches:** Options for interface positions, such as by thickness or by raster map.
- Occupation des sols et ruissellement:** Settings for soil occupation and runoff, including coefficients and rainfall rates.

figure 94 : formulaire de saisie des données générales du modèle

Le texte ci-après décrit les fonctionnalités du logiciel utilisées dans le cadre de la méthode SDR-MVT. Pour connaître l'ensemble des fonctionnalités du logiciel il sera utile de se référer au rapport de O. Sedan (2011).

ALICE nécessite en entrée un modèle géotechnique de la zone d'étude.

Le modèle géotechnique est une représentation de la répartition des différentes couches de terrain présentes dans la zone d'étude et qui sont susceptibles d'être impliquées dans la problématique des glissements de terrain. Par représentation on entend d'une part la géométrie de ces couches (présence, épaisseur, ..) et d'autre part leurs caractéristiques mécaniques.

ALICE® permet l'usage de deux types de modélisations géotechniques, sachant que ces types correspondent plus à une manière de concevoir le modèle qu'à des contraintes informatiques (les modèles « hybrides » sont possibles). Il s'agit des modèles par zones, et des modèles par isohypses.

Dans le cas de la méthode SDR-MVT, c'est le modèle par zone qui est utilisé. A chaque zone correspond une coupe de sol type, empilement de couches sur un substratum. Les caractéristiques de chaque couche sont spécifiques à la zone (i.e. la couche 1 de la zone 1 peut être complètement différente de la couche 1 de la zone 2). Pour chaque zone, l'épaisseur des couches et leurs caractéristiques mécaniques sont renseignées. La dernière couche représente le substratum.

La carte des zones résulte souvent d'une analyse et de combinaisons de cartes thématiques (cartes de litho-faciès, dérivées de cartes géologiques, combinées avec des cartes morphologiques, dérivées du MNT). Dans le cas de la méthode SDR-MVT, il s'agit de la carte des TMU, Terrain Mapping Unit (cf chapitre suivant 7.2).

Pour chaque zone, et pour chaque couche, les caractéristiques mécaniques doivent être renseignées (champs 32 à 38 de la figure 94).

La cohésion (34) en Kpa, l'angle de frottement interne (35) en degrés et le poids volumique (38) kN/m³ sont explicités sous forme de distributions probabilistes.

Les types de distribution suivants sont disponibles :

- Constante : la valeur est une constante
- Uniforme : la valeur est équiprobable entre deux bornes (mini et maxi)
- Normale : la valeur est distribuée suivant une loi normale, caractérisée par une valeur médiane et un écart-type.
- Triangulaire : la distribution est de forme triangulaire. L'utilisateur considère qu'il n'est pas possible que la valeur soit inférieure à un minimum, et supérieure à un maximum, et que la valeur qui correspond au sommet du triangle est la plus probable. Ce type de raisonnement rappelle par certains aspects une approche possibiliste.
- Trapèze : la distribution est de forme trapézoïdale. Proche de la précédente, l'utilisateur considère toutefois que les valeurs au niveau du plateau sont équiprobables.

La position des interfaces entre couche est définie par l'épaisseur de chaque couche pour ce type de modèle. Elle est saisie sous forme de constante pour la zone (40), dans la version actuelle d'ALICE® (pas de distribution probabiliste des épaisseurs).

Possibilité de tenir compte d'un modèle hydrologique

Le niveau d'eau dans le sol peut être imposé en fixant une profondeur, qui sera constante sur l'ensemble de la ZE.

Pour saisir cette profondeur l'utilisateur indique :

- Une profondeur minimale (sous forme de nombre réel négatif) (26)
- Une profondeur maximale (réel négatif avec une valeur absolue supérieure ou égale à celle de la profondeur minimale) (27)
- Un taux de remplissage (30)

Le taux de remplissage, variant entre 0 et 1, permet de calculer la profondeur effective (0 : profondeur effective = profondeur maximale ; 1 : profondeur effective = profondeur minimale)

Si la profondeur minimale est égale à la profondeur maximale, le taux de remplissage n'a aucune influence.

Ce taux de remplissage, qui permet de simuler les effets d'une surcharge hydrique induite par un évènement (ou une série d'évènements) hydro-pluviométriques, peut être le résultat d'une modélisation de type GARDÉNIA, développé par le BRGM (Thiéry, 2003).

Le modèle hydrologique basé sur le code de calcul GARDENIA est un modèle hydrologique global, qui simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) à l'aide d'un système de trois ou quatre réservoirs :

- les premières dizaines de centimètres de sol dans lesquels a lieu l'évapotranspiration ;
- une zone intermédiaire qui produit un écoulement rapide ;
- une ou deux zones aquifères qui produisent l'écoulement lent.

Les données d'entrée sont des séries de précipitations, l'évapotranspiration potentielle et les paramètres liés aux lois de transferts entre réservoirs. Les paramètres liés aux réservoirs doivent être évalués par calage à l'aide de séries de niveaux piézométriques ou de débits (sur plusieurs années).

Par un calage avec des cartes de niveaux piézométriques minimaux et maximaux sur la zone d'étude, le niveau de remplissage des réservoirs peut être traduit en une carte de niveaux de nappe, correspondant à une date t suivant un historique de

précipitations donné. Cette carte piézométrique constitue une des données d'entrée du calcul de la carte d'aléa.

ALICE® calcule en tout point de la zone d'étude les facteurs de sécurité et leur distribution le long de profils topographiques.

S'il est possible de saisir la trace d'un profil sur la carte à l'aide des outils MapInfo, il serait fastidieux de vouloir couvrir l'ensemble de la zone d'étude de cette manière. En conséquence, ALICE® (Figure 95) dispose d'un module spécifique qui calcule un ensemble de profils, espacés d'une distance égale à la taille de la maille du MNT. La trace de ces profils est visible sur la Figure 95.

Ce module utilise comme données d'entrée (figure 94, 4 à 7)

- MNT
- Pente
- Direction de pente
- Accumulation

Les deux dernières cartes raster sont calculées grâce aux fonctions hydrologiques de l'extension Spatial Analyst du logiciel ARCGIS. La pente est également calculée avec ARCGIS.

Un autre paramètre contrôle également la génération des profils. Il s'agit de la surface drainée minimale (figure 94), exprimé en nombre de mailles du MNT, pour que la maille soit considérée comme appartenant à un drain. Un profil part d'une crête ou d'un point haut (mailles pour lesquelles la surface drainée est nulle), et se termine au niveau d'un drain (Figure 95).

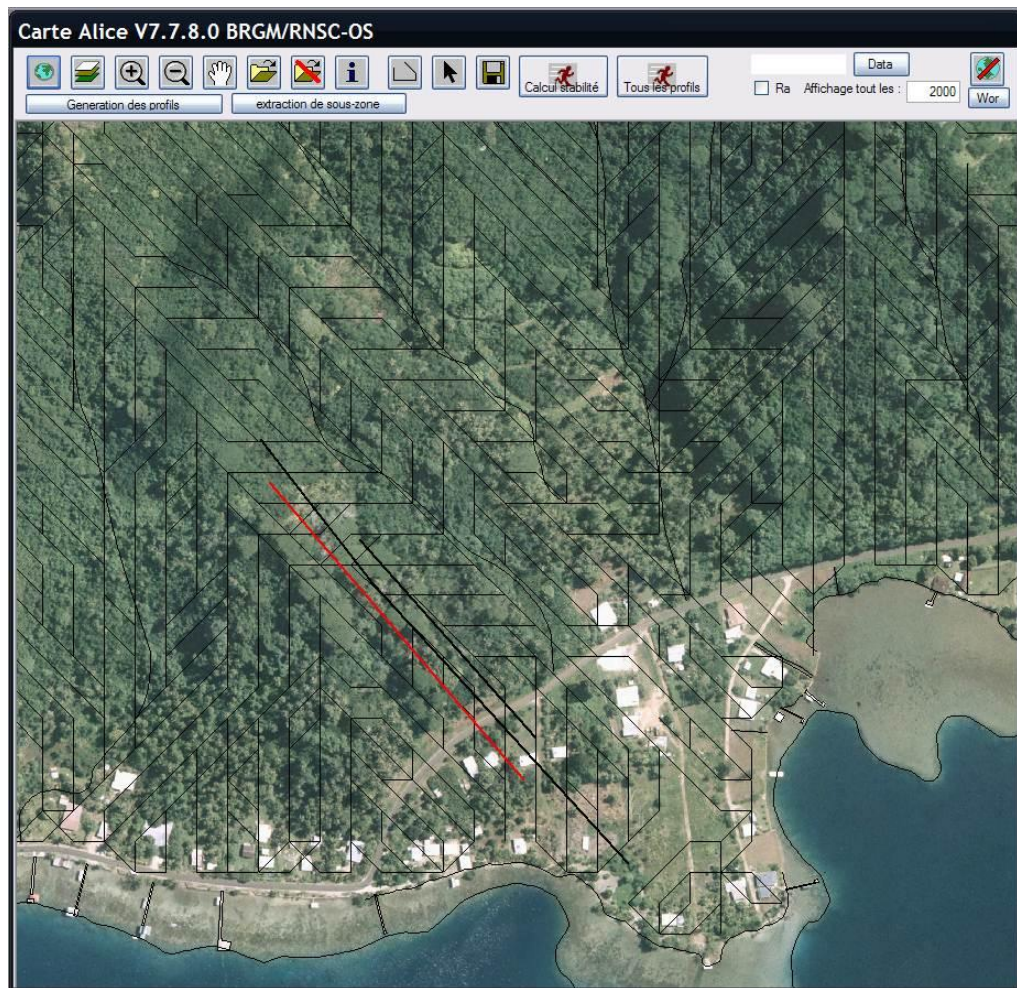


Figure 95 - Exemple de carte de la trace des profils topographiques (traits noirs sur la figure) générés par ALICE® pour le calcul de F_s

Paramétrage par défaut des simulations

Une série de paramètres concernant :

- La géométrie des profils topographiques
- La géométrie de la surface de rupture
- Le fonctionnement du modèle de stabilité

ont des valeurs par défaut qui sont saisies dans la fenêtre de données d'ALICE® (figure 94).

Il s'agit :

Géométrie :

- Du pas de calcul du profil (11) en mètre, ou distance entre deux points du profil. Ce pas peut (et souvent doit) être inférieur à la taille de la maille du MNT, pour notamment éviter des pseudos – ruptures de pente d'une maille à l'autre.
- Du pas X entre deux glissements (12), en mètres. C'est la valeur de distance horizontale qui sépare deux glissements le long du profil, c'est-à-dire là où sera calculé le FS et sa distribution. Plus cette distance sera faible, plus les résultats seront précis, mais plus le temps de calcul sera long.
- La taille du glissement (13). Un calcul ALICE® se fait pour une taille de glissement donnée, qui résulte de l'analyse typologique des glissements potentiels et passés de la ZE. Si plusieurs types et donc plusieurs tailles doivent être étudiés, plusieurs calculs ALICE® doivent être lancés.
- Profondeurs mini (14), maxi (15) et Pas entre profondeur (16) sont des valeurs en mètres, utilisées pour définir les cercles de rupture, lorsque ce mode de calcul est activé.
- Angle de raccord pour glissement plan (17), en degrés. C'est l'angle que fait le débouché de la rupture à l'amont et à l'aval du glissement, avec la pente, lorsque le mode de calcul par glissement plan est activé.

Paramètres du calcul de stabilité :

- Nombre de tranches (18). La masse potentiellement instable est découpée en tranche verticale d'égale largeur. Plus elles sont nombreuses, plus le calcul est précis, mais plus il est long.
- Précision (19), nb max itérations (20). Pour atteindre une précision donnée du calcul de FS, le modèle va itérer un certain nombre de fois. La méthode de Morgenstein et Price converge dans ALICE® majorité des situations très vite. Si ce n'est pas le cas en moins d'itérations que le nombre maximum fixé, la méthode renvoi une valeur indéterminée (qui est traitée par ALICE®).
- Gamma eau (21) kN/m^3 . C'est le poids volumique de l'eau.
- K sismique (22), en g. C'est le coefficient de charge sismique, en général égal à une demi-valeur de Peak Ground Acceleration (PGA).
- Base (0 : cercle – n° interface : plan) (23): ce nombre entier caractérise le type par défaut de géométrie de rupture. La valeur 0 impose un calcul par cercles de rupture, utilisant les paramètres 14, 15 et 16. Dans le cas d'un glissement plan, c'est l'interface entre deux couches qui délimite la base du glissement. Et c'est le n° d'interface qui est renseigné.
- Pente minimale pour le calcul de FS (25) en degrés. Afin de réduire les temps de calculs, l'utilisateur peut indiquer la pente entre le point haute et bas du glissement en dessous de laquelle le calcul de FS n'est pas réalisé.

Toutes ces valeurs sont des valeurs par défaut, et peuvent être modifiées au moment du calcul, comme cela est décrit ci-après.

Calcul le long d'un profil

Les calculs de stabilité le long d'un profil sont très utiles en phase de constitution du jeu de données nécessaires au calcul d'une carte ALICE®. Ils permettent également de rétro-analyser des glissements anciens, et ainsi d'ajuster les caractéristiques mécaniques des couches, au-delà des essais de laboratoire ou de l'expertise.

Pour permettre ce type de calcul, un profil doit être déterminé.

Il faut sélectionner un profil existant avec l'outil (1) de la figure 96.



figure 96 : choix d'un profil pour des calculs de stabilité

On peut éventuellement en saisir un au préalable avec l'outil (2). Une fois le profil sélectionné, l'appui sur le bouton (3) affiche la fenêtre de calcul le long d'un profil (figure 97).

Cette figure montre un profil avec un calcul de glissement circulaire.

Le bouton (1) permet de tracer le cercle de centre X_c , Y_c et de rayon 60.

Le bouton (2) permet de calculer le facteur de sécurité FS médian qui s'affiche en (4).

Le bouton (3) permet de calculer la distribution pour les NbMC tirages Monte-Carlo. La probabilité de $FS < 1$ s'affiche en (5), la forme de la distribution en (6).

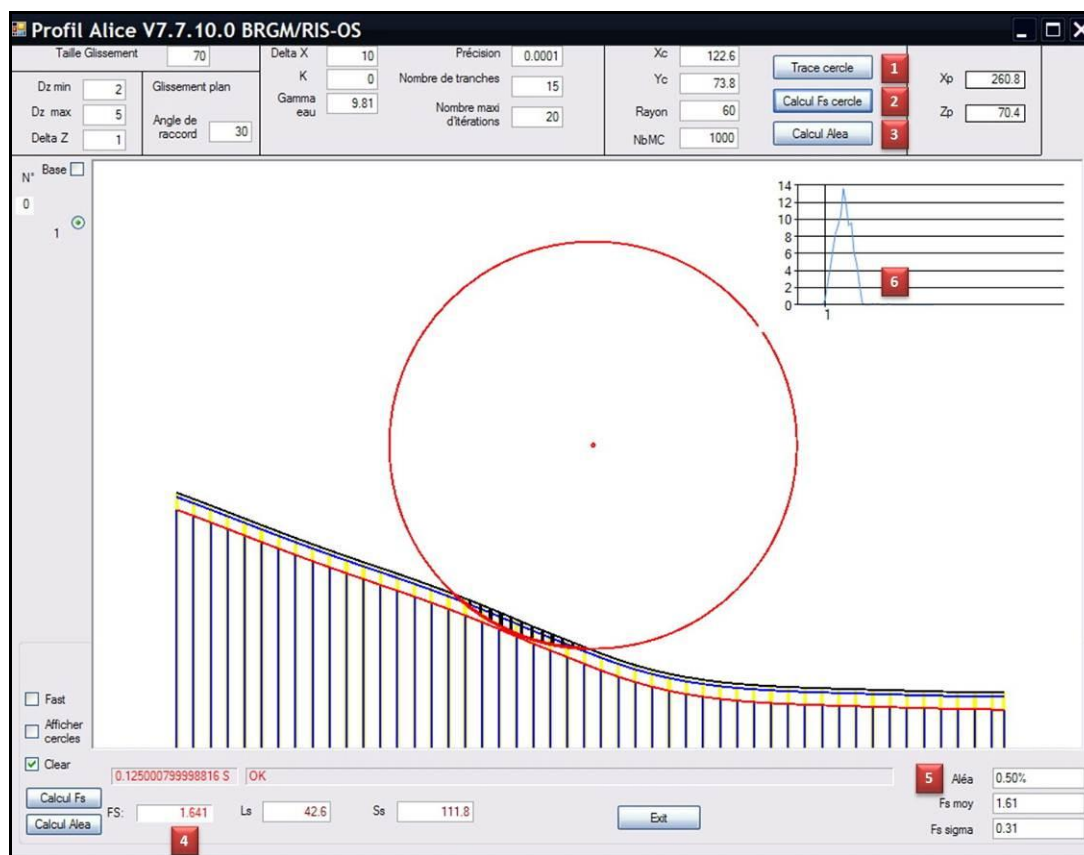


figure 97 : fenêtre Profil ALICE® - calcul en un point

La figure 98 illustre un calcul avec des glissements plan (« base » cochée en (1)), tout le long du profil. Lorsqu'un calcul de FS (2) est demandé, les glissements potentiels sont calculés tout le long du profil, à intervalle régulier (deltaX). La courbe d'évolution du facteur de sécurité (4) s'affiche. L'axe vertical est gradué de manière non linéaire. En partant du bas, les lignes horizontales correspondent respectivement à FS=0, FS=1, FS=2, FS= 10 et FS=100.

La géométrie la moins stable est affichée, avec le facteur de sécurité médian.

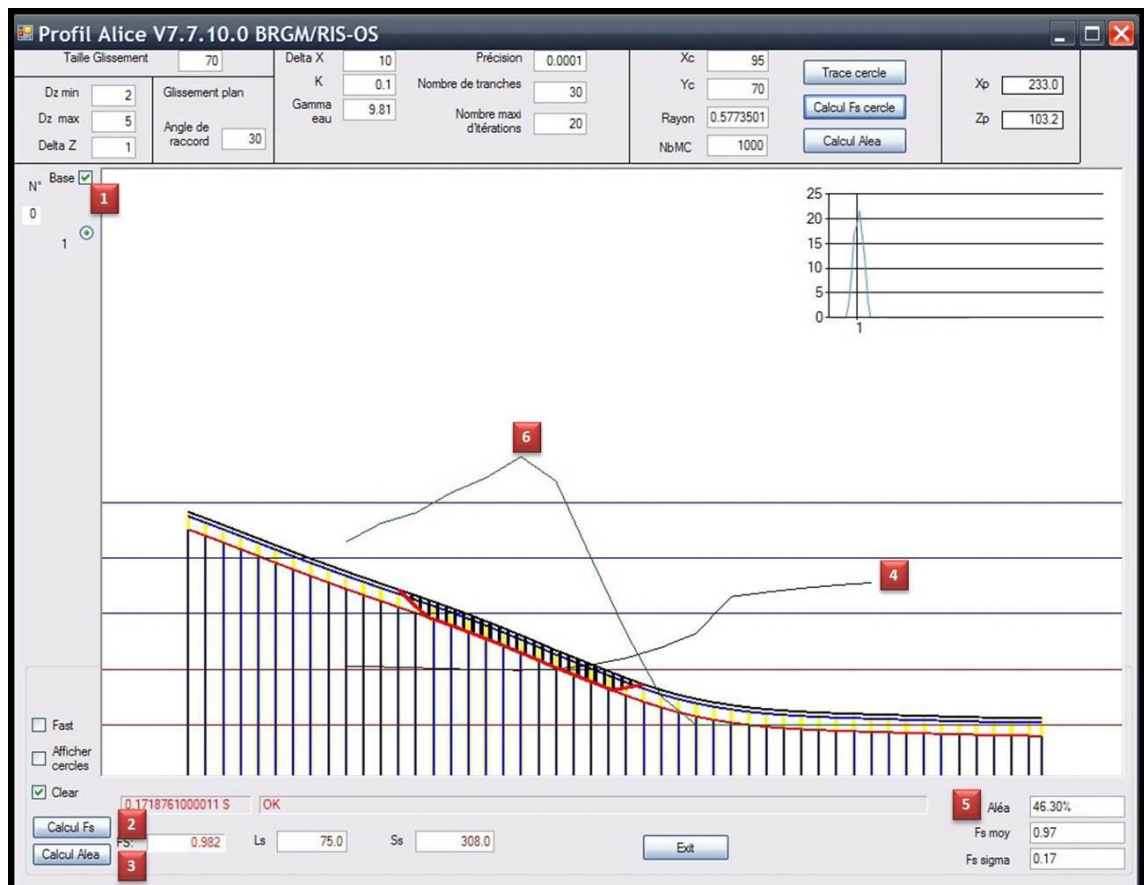


figure 98 : fenêtre Profil ALICE® - calcul le long du profil

Lorsqu'un calcul d'aléa (3) est demandé, la distribution des facteurs de sécurité, et la probabilité de $FS < 1$ sont également calculées pour tous les glissements potentiels le long du profil. La courbe d'évolution de la probabilité (6) s'affiche. L'axe vertical est gradué de manière linéaire (sommet de la fenêtre à 100%).

Calcul d'une carte

Une fois les paramètres du modèle calés, il est possible de calculer une carte. Pour cela ALICE® :

- calcule chaque profil comme décrit au chapitre précédent,
- reporte les résultats sur une carte raster.

Compte tenu de la proximité des profils, mais aussi du fait que le pas de calcul des glissements le long du profil peut être inférieur à la taille de la maille du MNT, plusieurs résultats peuvent être calculés pour une même maille. Dans ce cas le FS le plus faible, et l'aléa (probabilité $FS < 1$) le plus fort est conservé.

Le calcul d'une carte se fait à partir de la fenêtre carte, par appui sur le bouton « tous les profils » (figure 99).

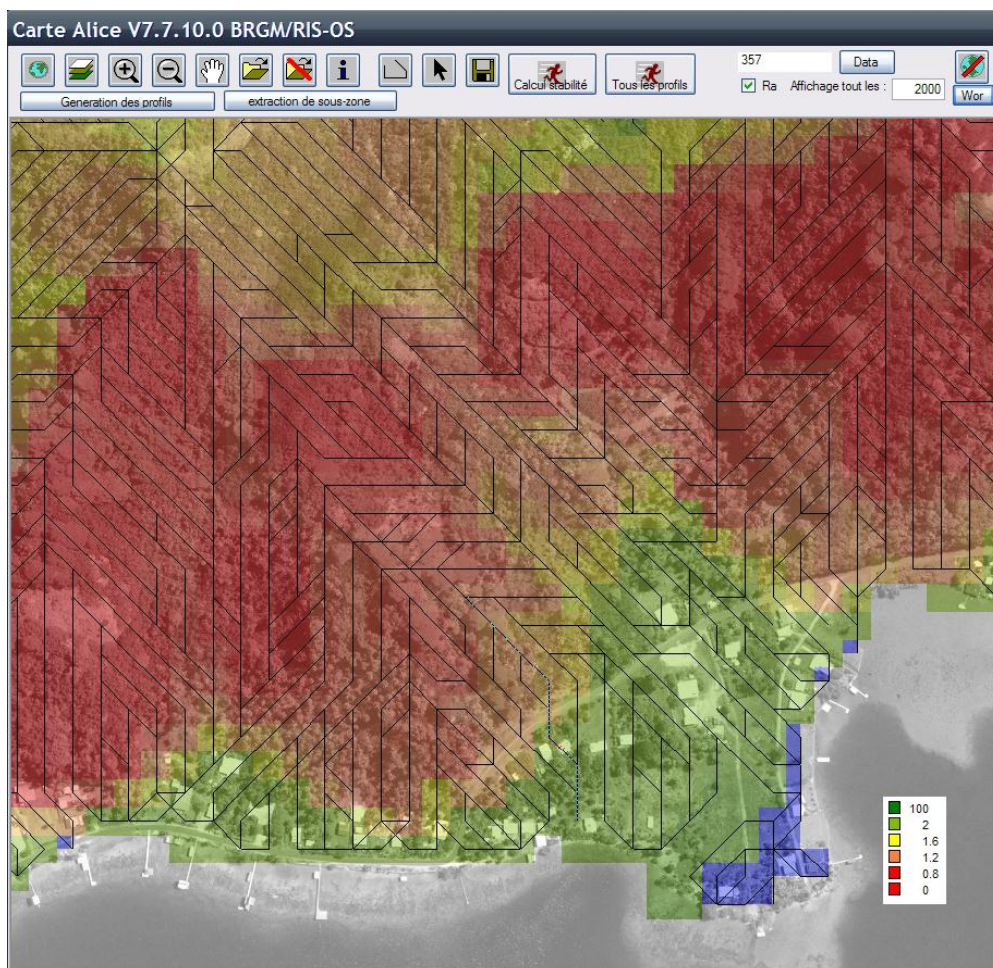


figure 99 : Carte ALICE® des facteurs de sécurité

L'utilisateur est invité ensuite à saisir le nombre de tirages Monte-Carlo pour le calcul. Pour calculer une carte de facteur de sécurité (figure 99), il faut indiquer le chiffre 1, dans tous les autres cas c'est la carte d'aléa (figure 100) qui est calculée.

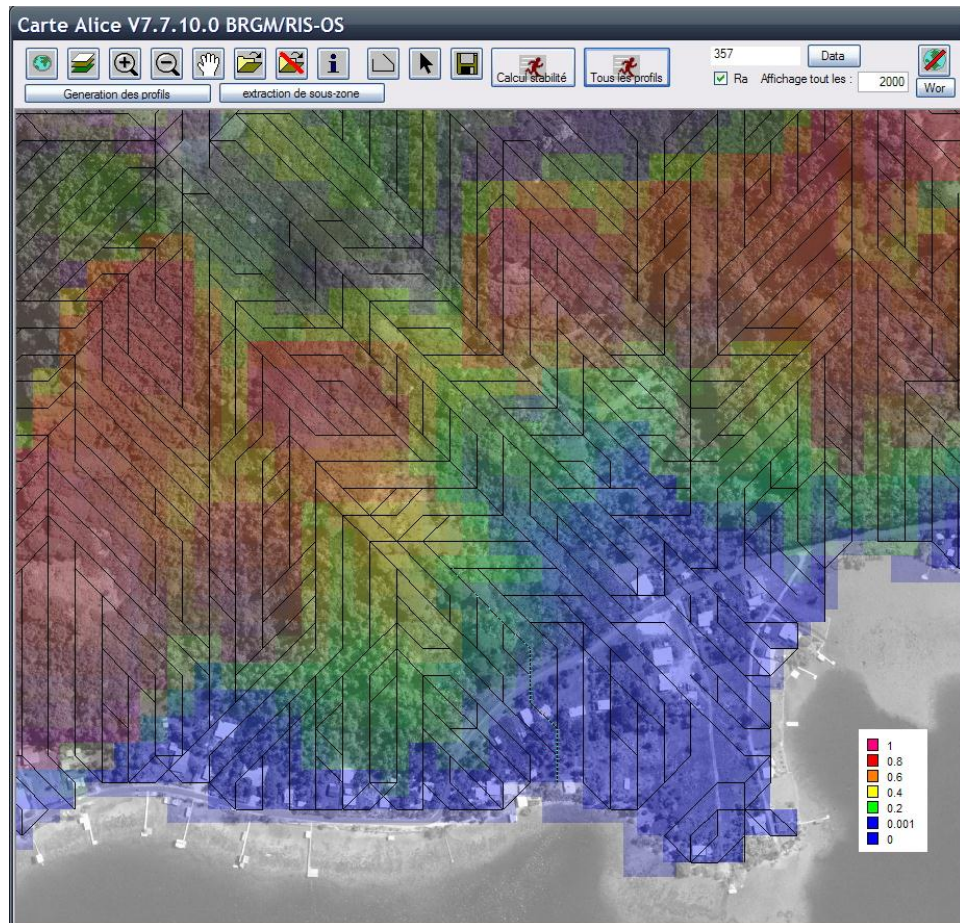
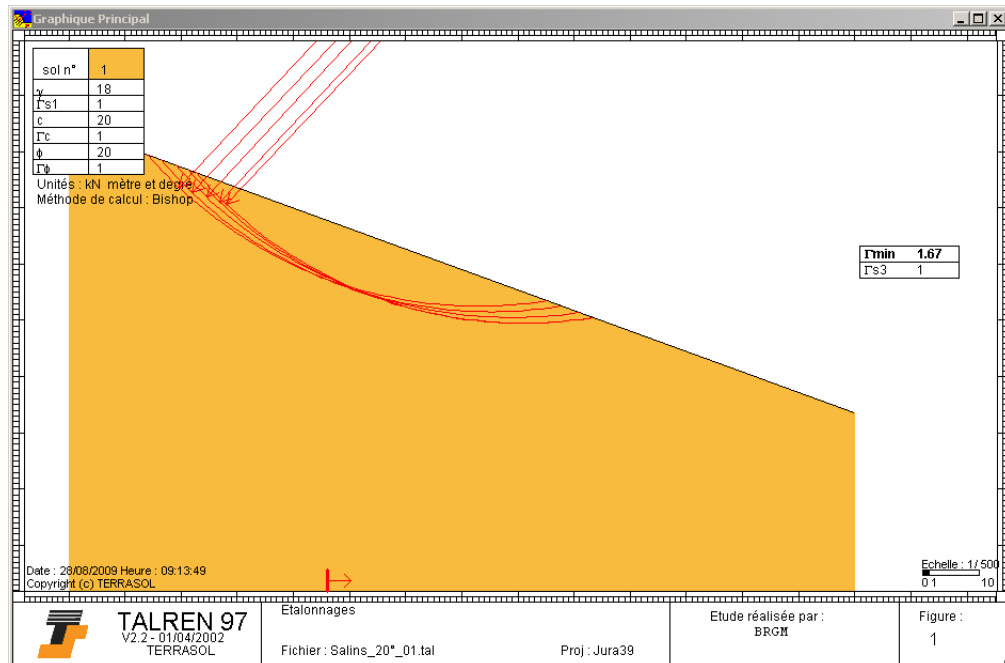
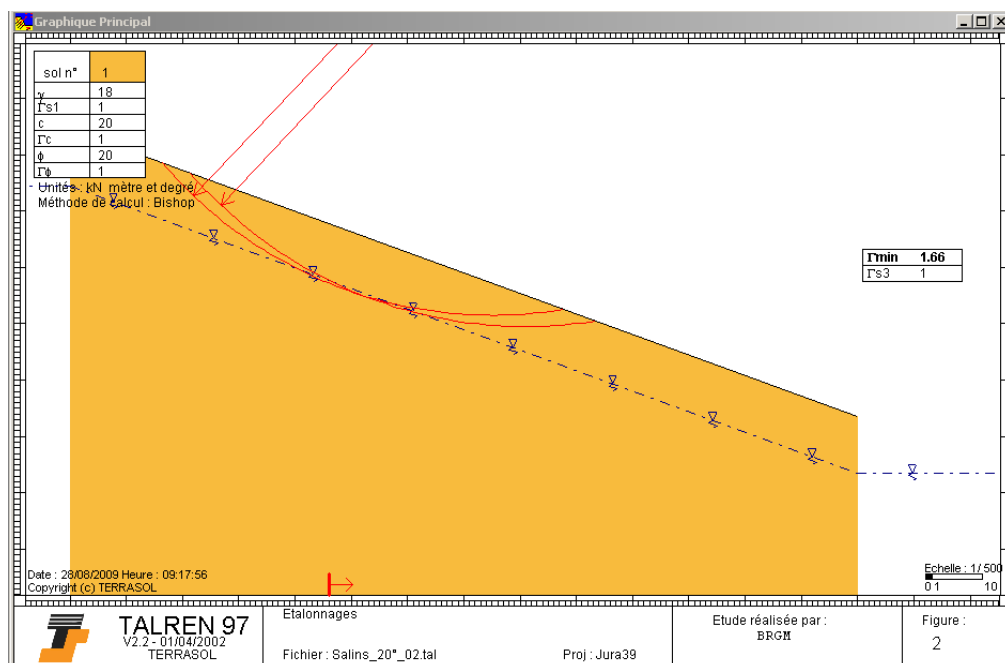


figure 100 : Carte ALICE® de l'aléa (probabilité $FS < 1$)

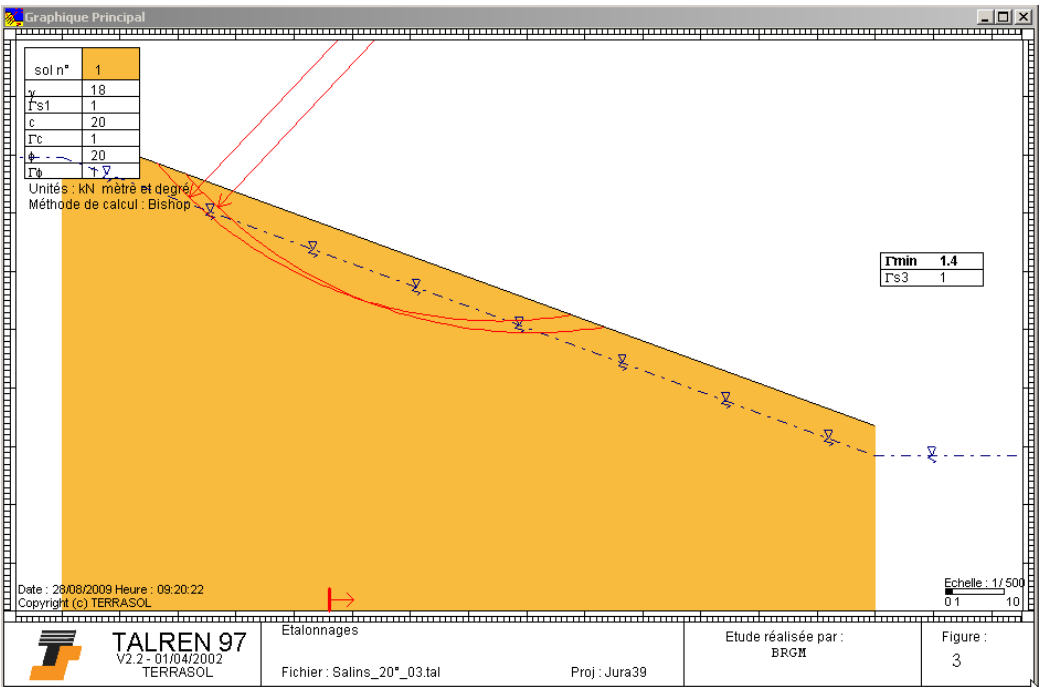
Annexe 7 – Zone pilote du Jura : Etalonnage des caractéristiques géotechniques des sols à l'aide du logiciel TALREN



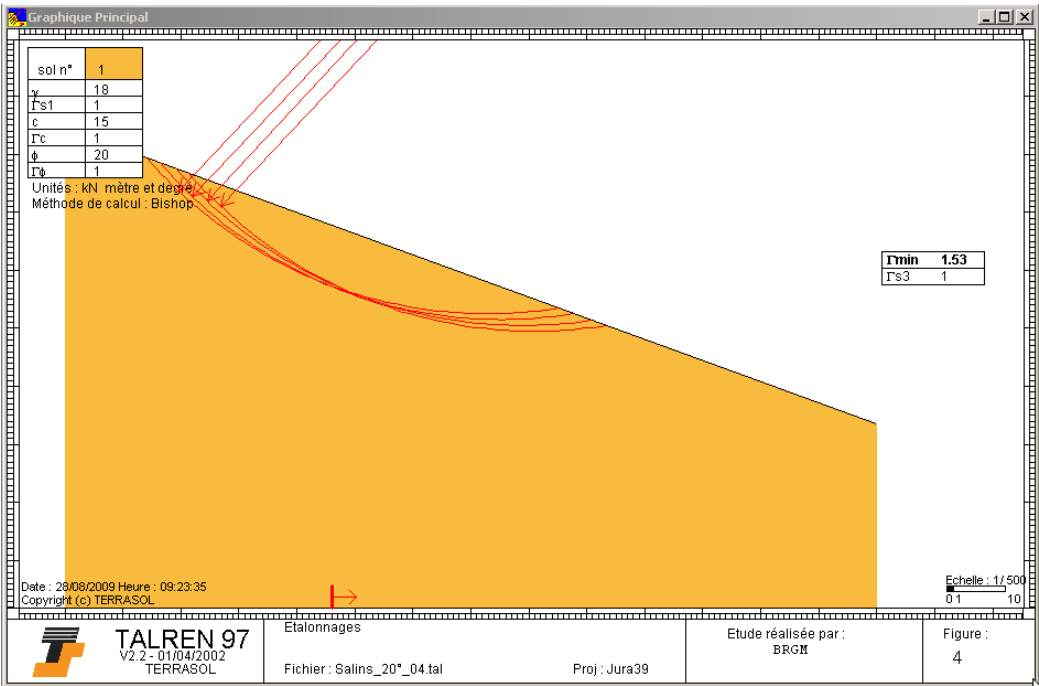
Pente 20° sans nappe_ $\phi = 20^\circ$ $c = 20$ kPa



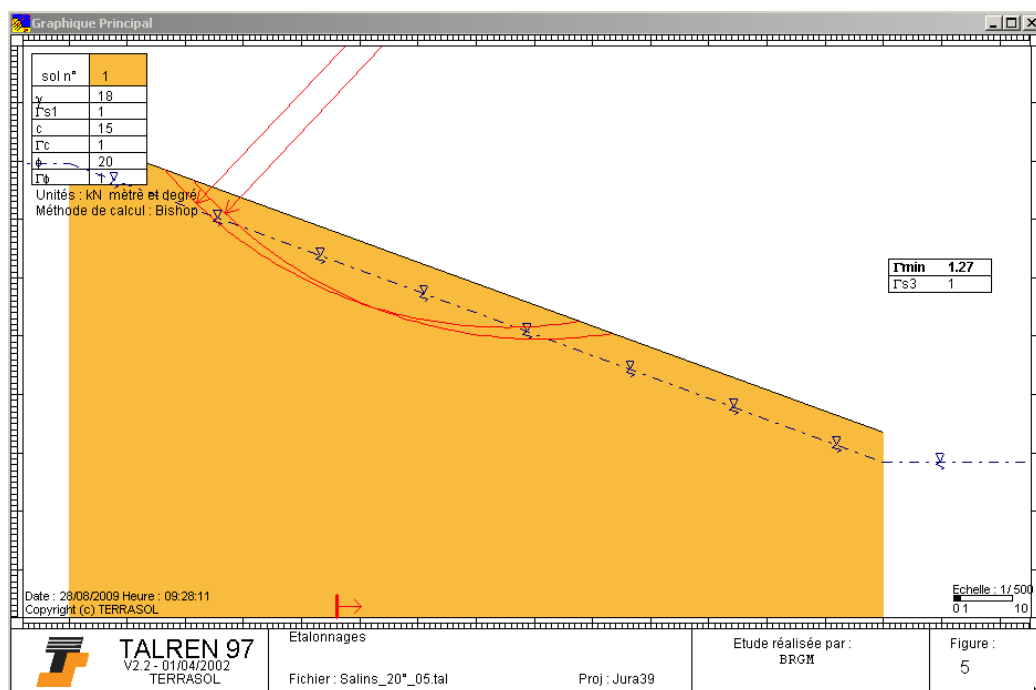
Pente 20° avec nappe à 10 m_ $\phi = 20^\circ$ $c = 20$ kPa



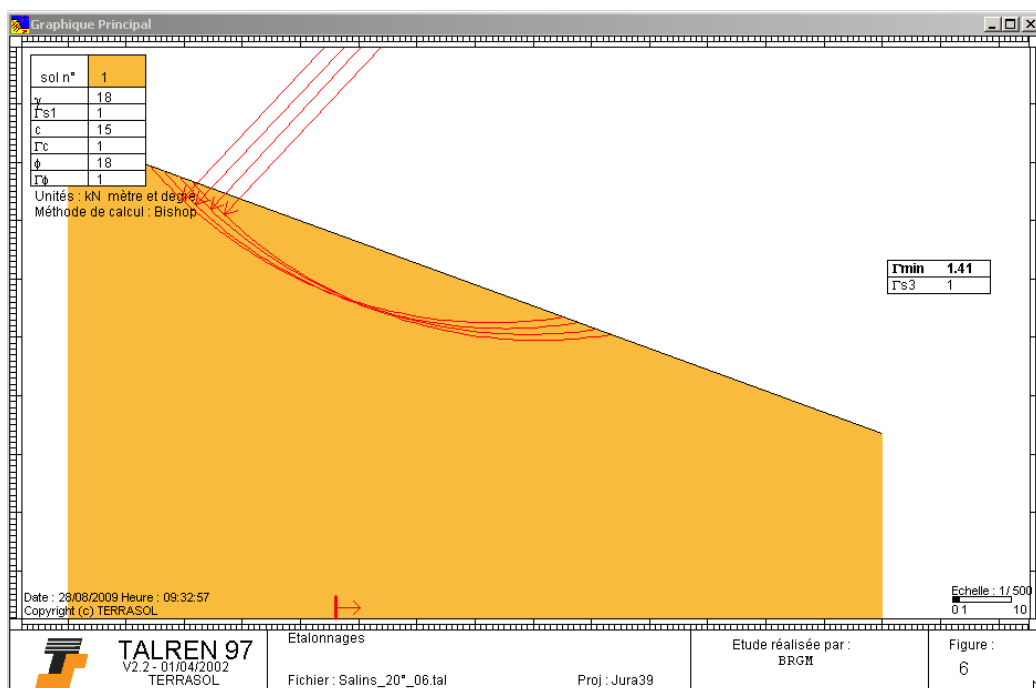
Pente 20° avec nappe à 5 m $\phi = 20^\circ$ $c = 20$ kPa



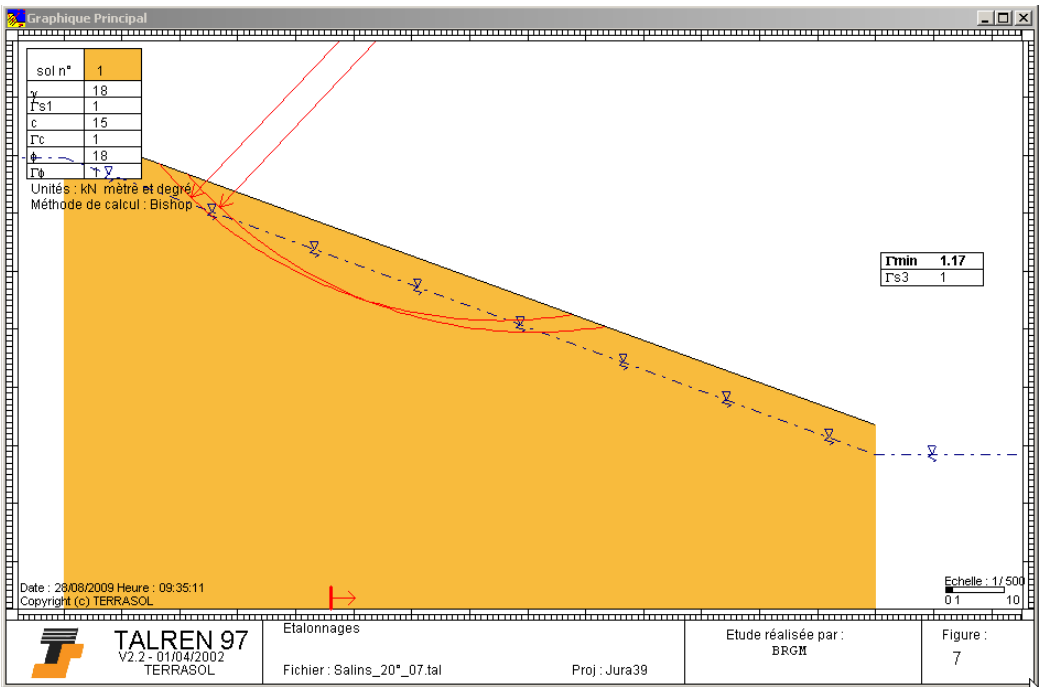
Pente 20° sans nappe $\phi = 20^\circ$ $c = 15$ kPa



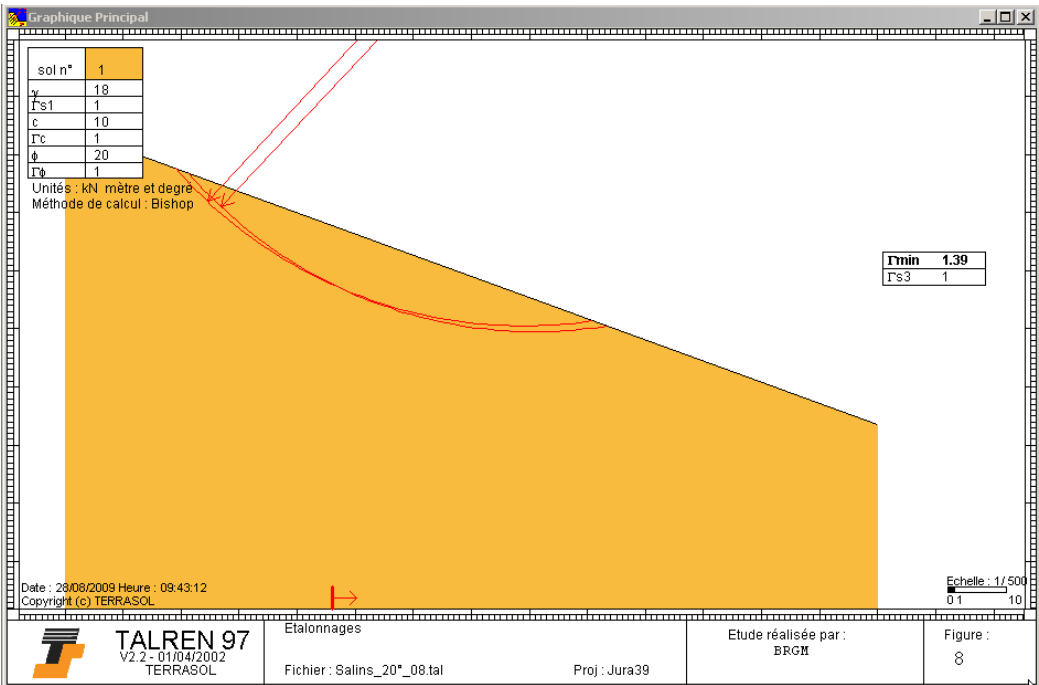
Pente 20° nappe à 5 m $\phi = 20^\circ$ c = 15 kPa



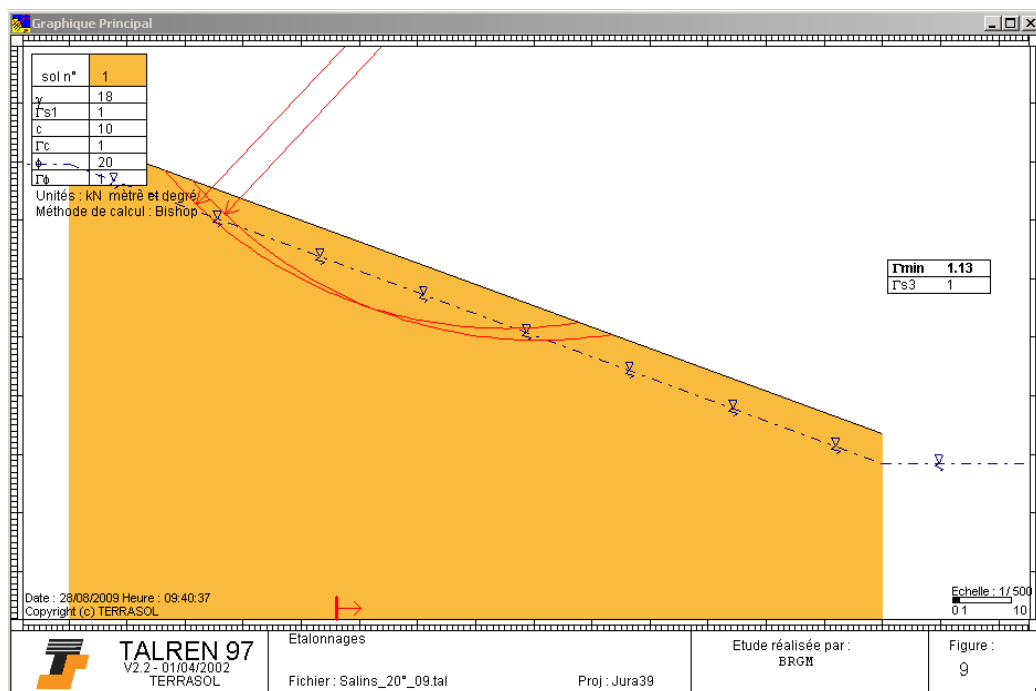
Pente 20° sans nappe $\phi = 18^\circ$ c = 15 kPa



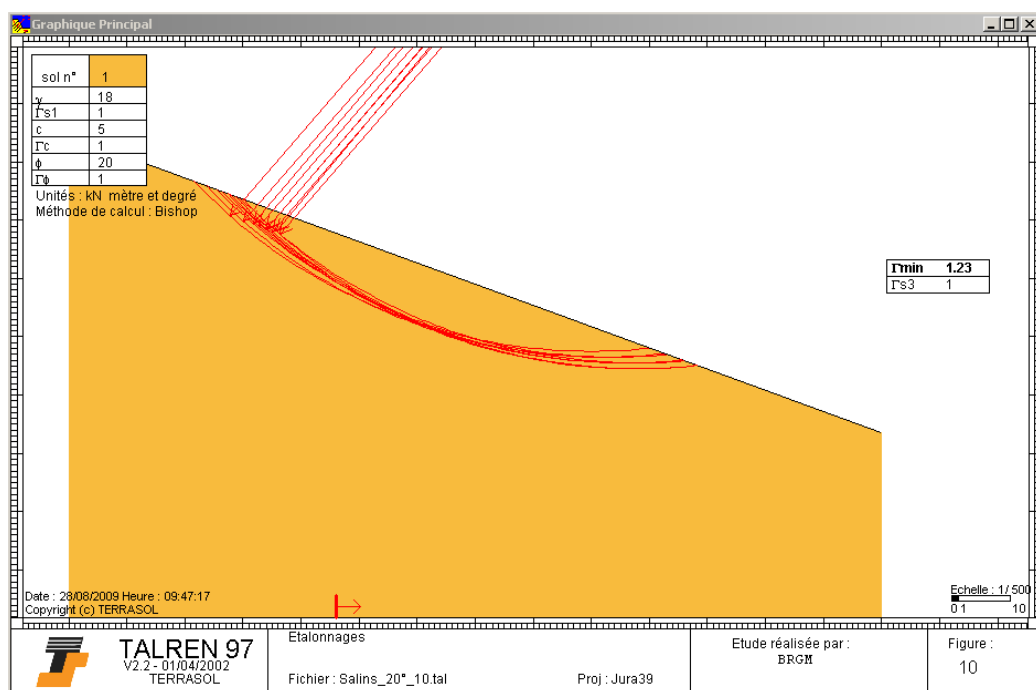
Pente 20° nappe à 5 m ϕ = 18° c = 15 kPa



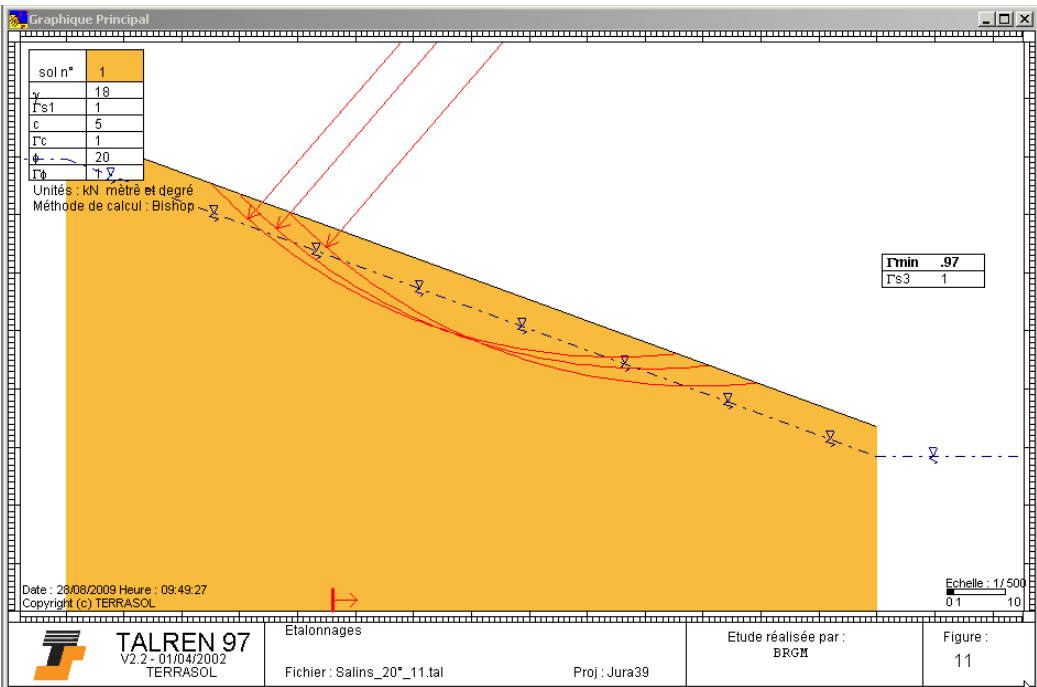
Pente 20° sans nappe ϕ = 20° c = 10 kPa



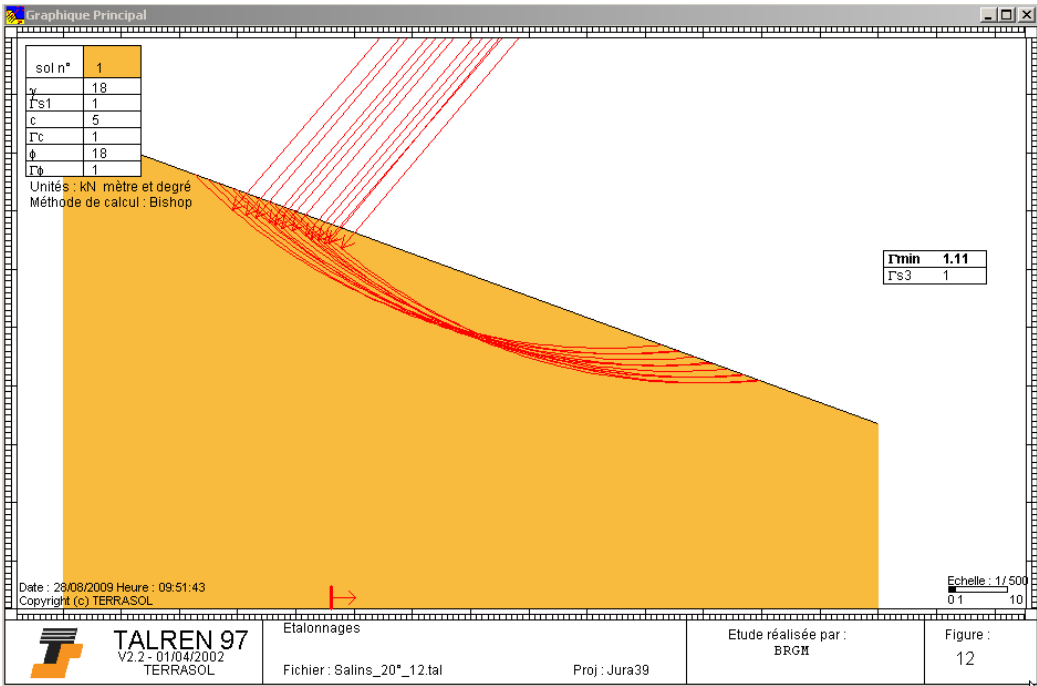
Pente 20° nappe à 5 m_φ = 20° c = 10 kPa



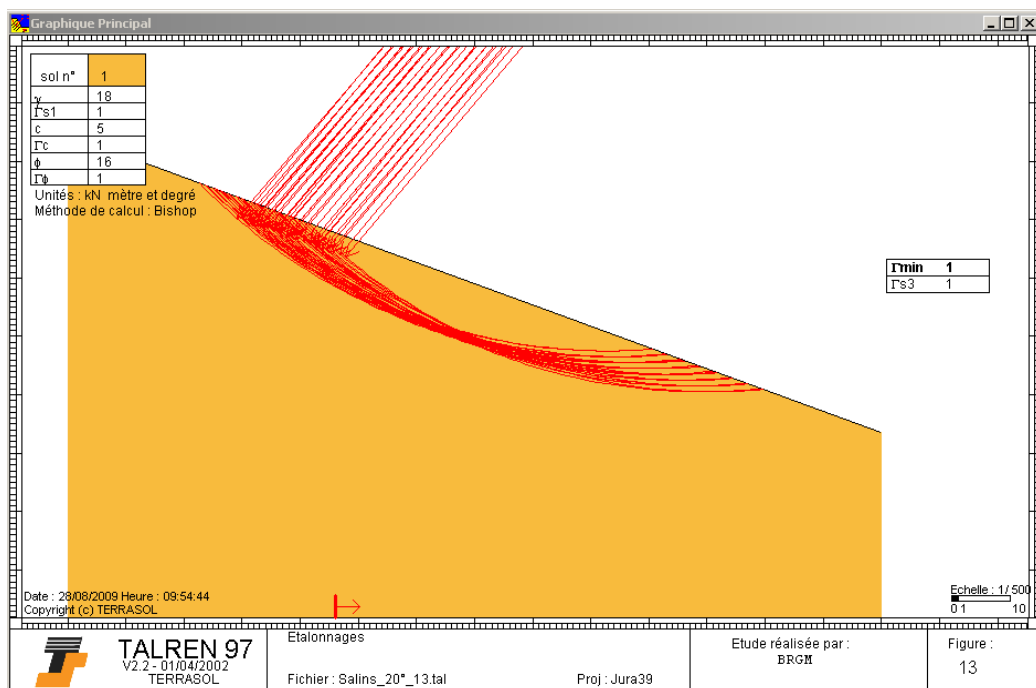
Pente 20° sans nappe_φ = 20° c = 5 kPa



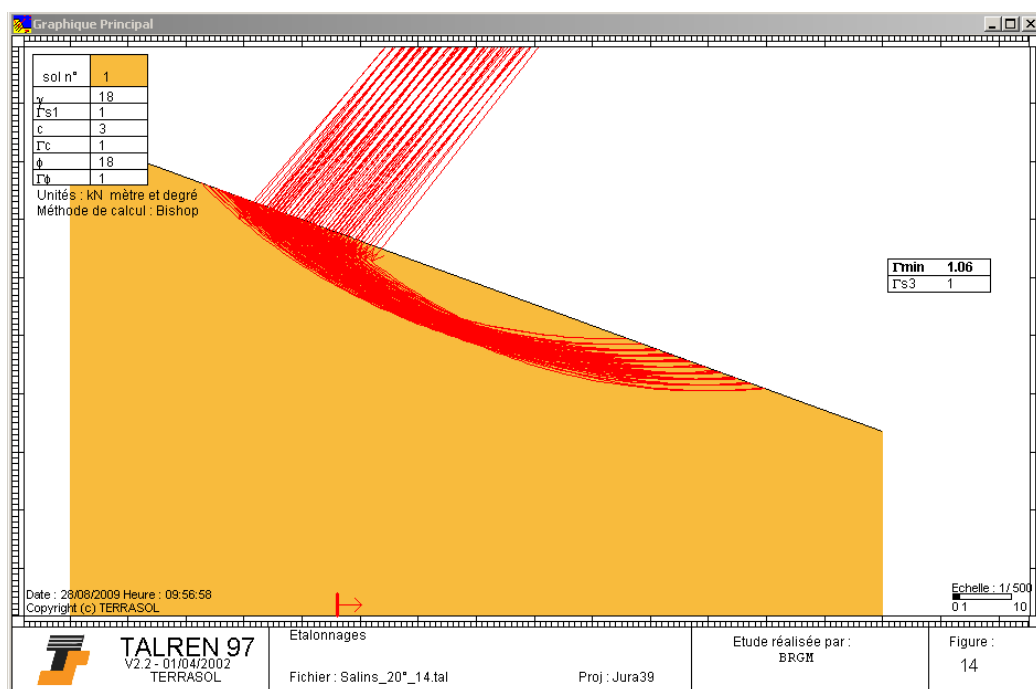
Pente 20° nappe à 5 m_φ = 20° c = 5 kPa



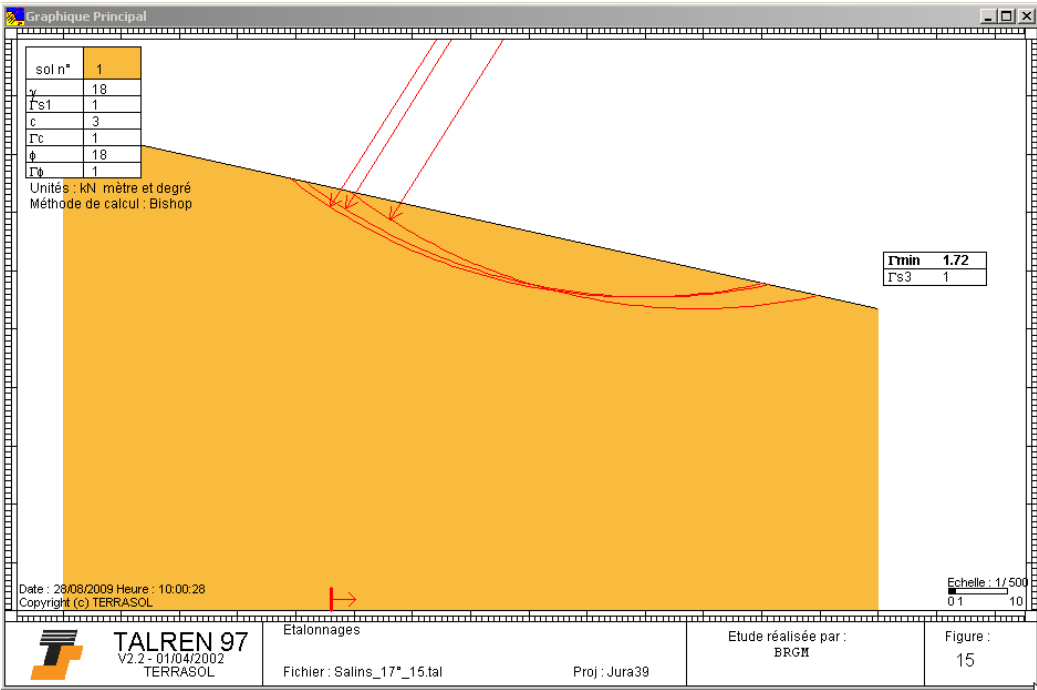
Pente 20° sans nappe_φ = 18° c = 5 kPa



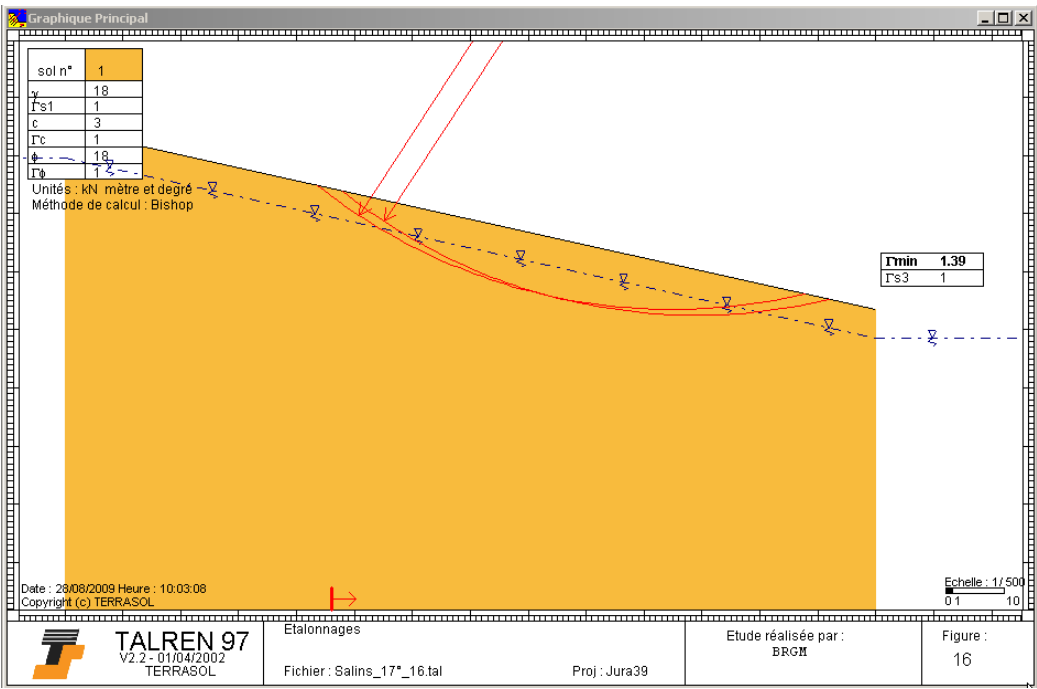
Pente 20° sans nappe $\phi = 16^\circ$ $c = 5$ kPa



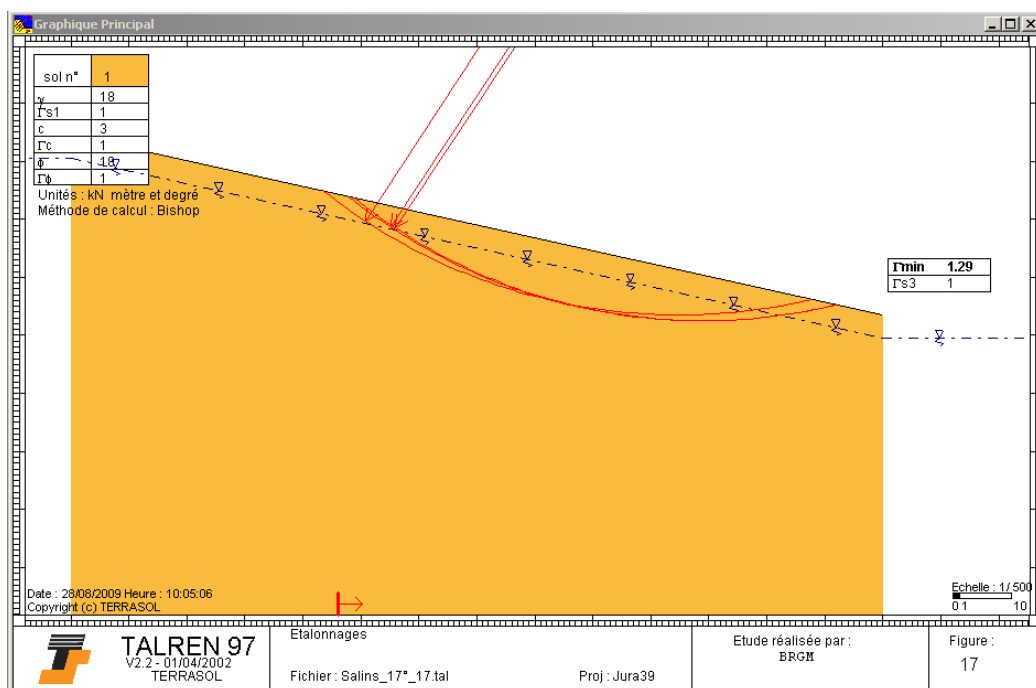
Pente 20° sans nappe $\phi = 18^\circ$ $c = 3$ kPa



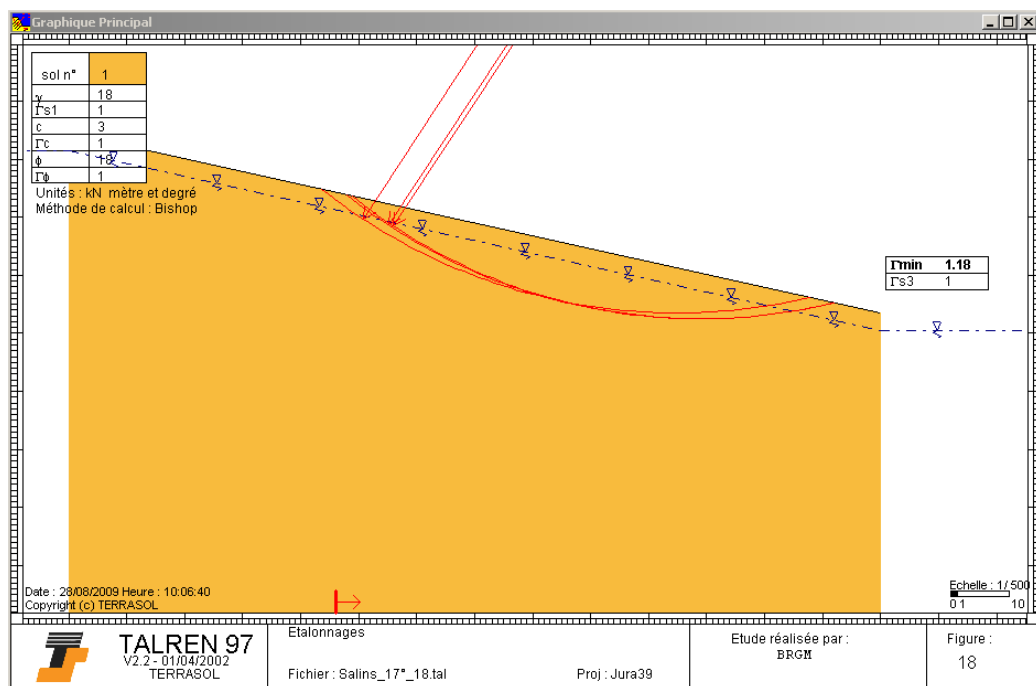
Pente 17° sans nappe_ $\phi = 18^\circ$ c = 3 kPa



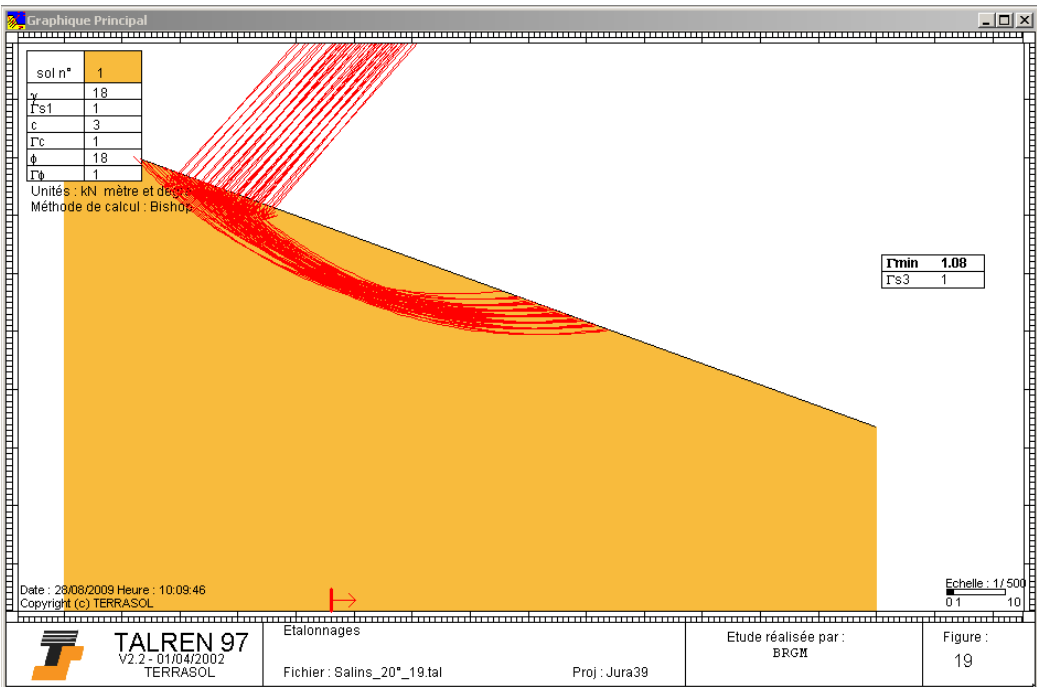
Pente 17° nappe à 5 m_ $\phi = 18^\circ$ c = 3 kPa



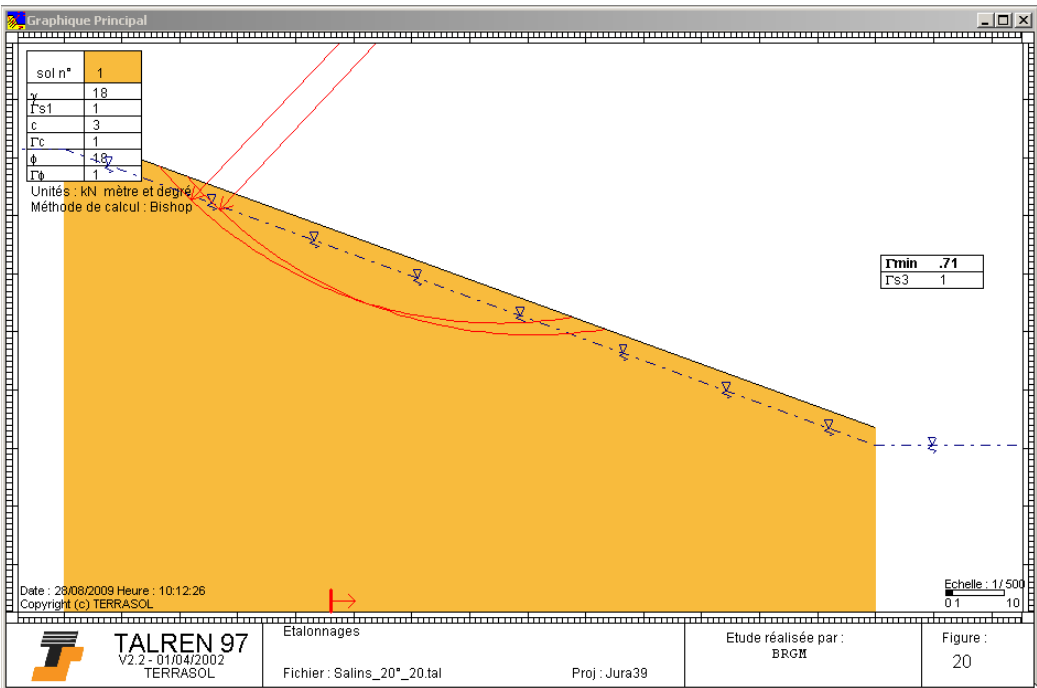
Pente 17° nappe à 4 m_ø = 18° c = 3 kPa



Pente 17° nappe à 3 m_ø = 18° c = 3 kPa



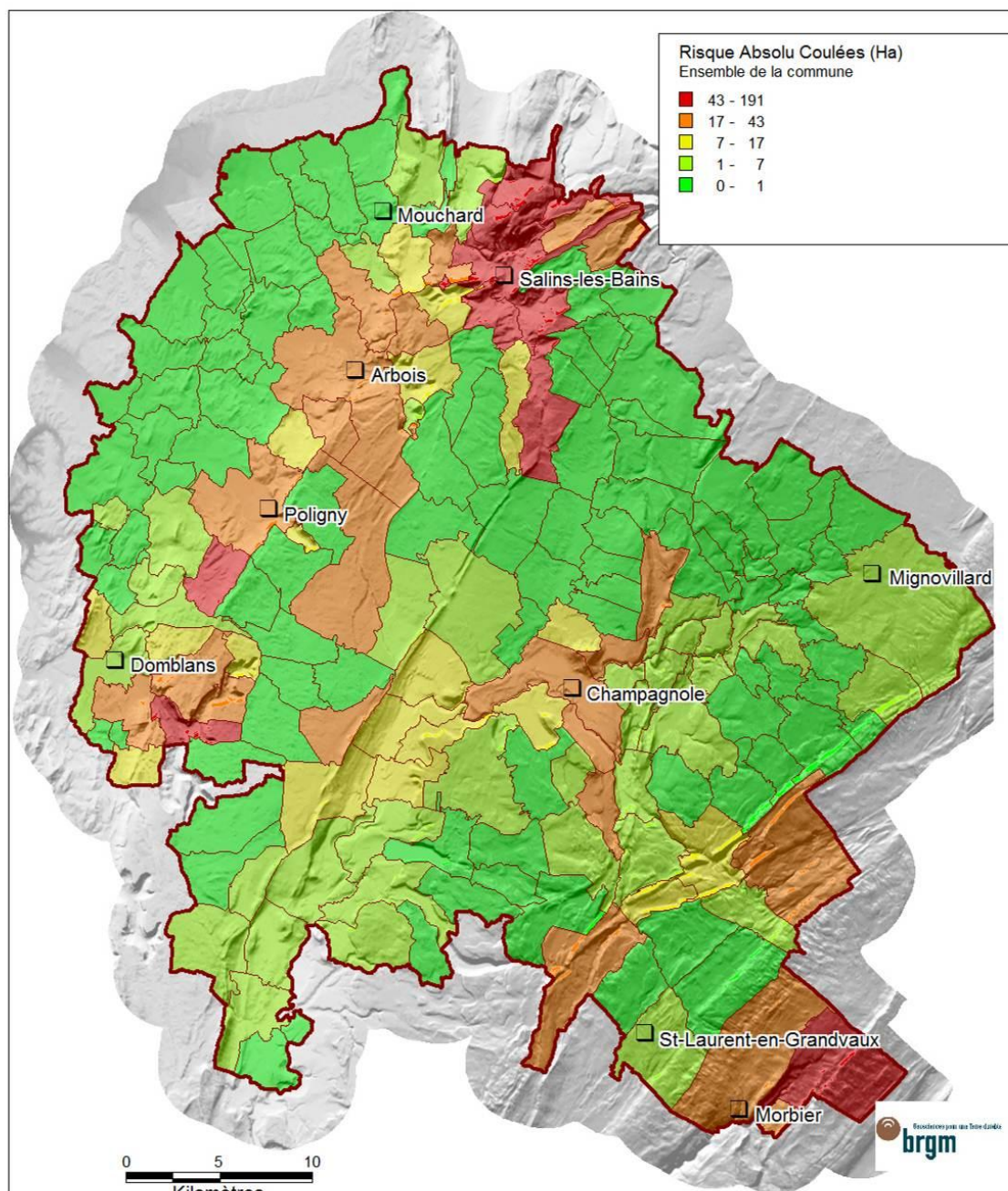
Pente 20° sans nappe $\phi = 18^\circ$ $c = 3$ kPa



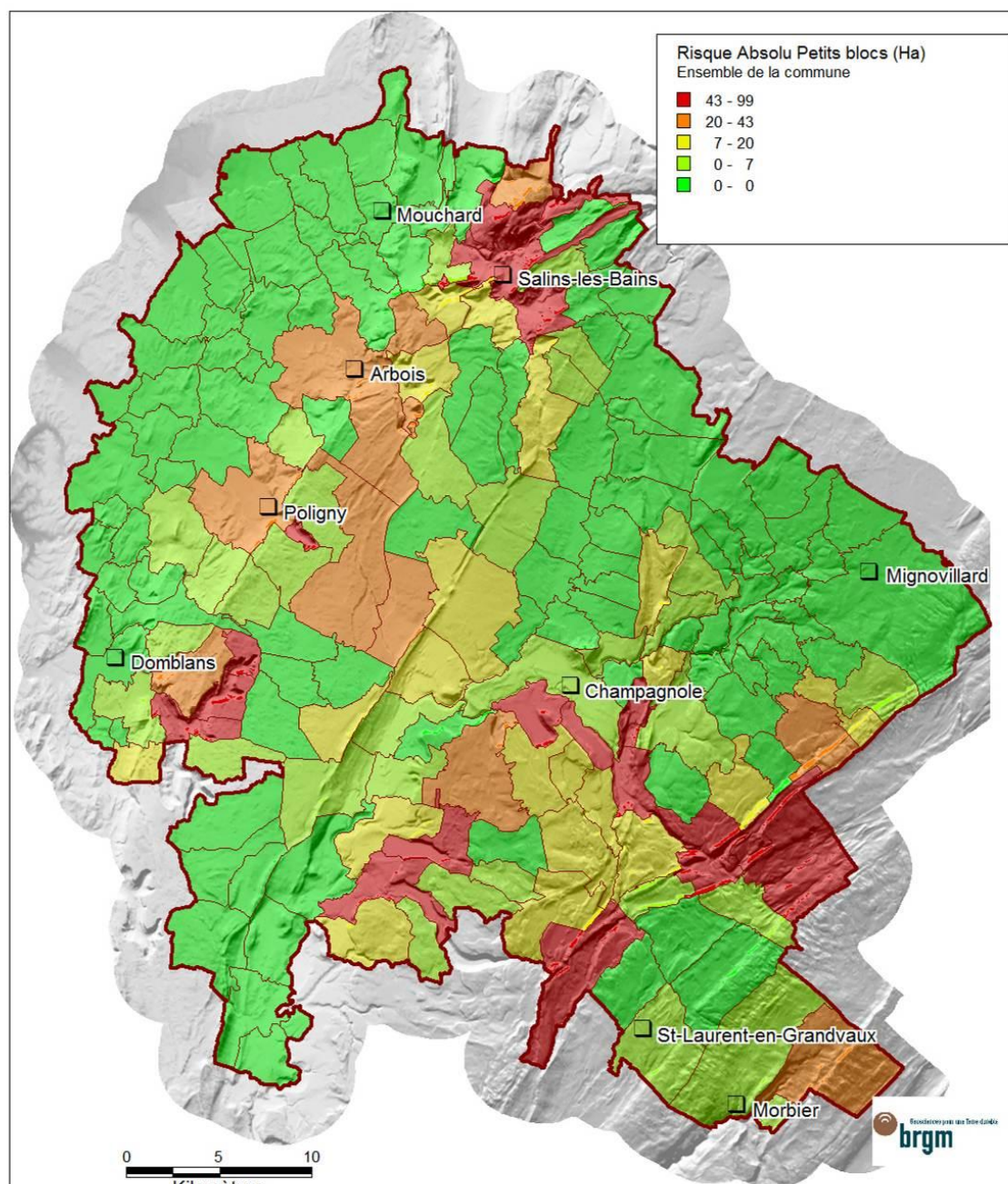
Pente 20° nappe à 3 m $\phi = 18^\circ$ $c = 3$ kPa

Annexe 8 – Zone pilote du Jura – Cartes de risque

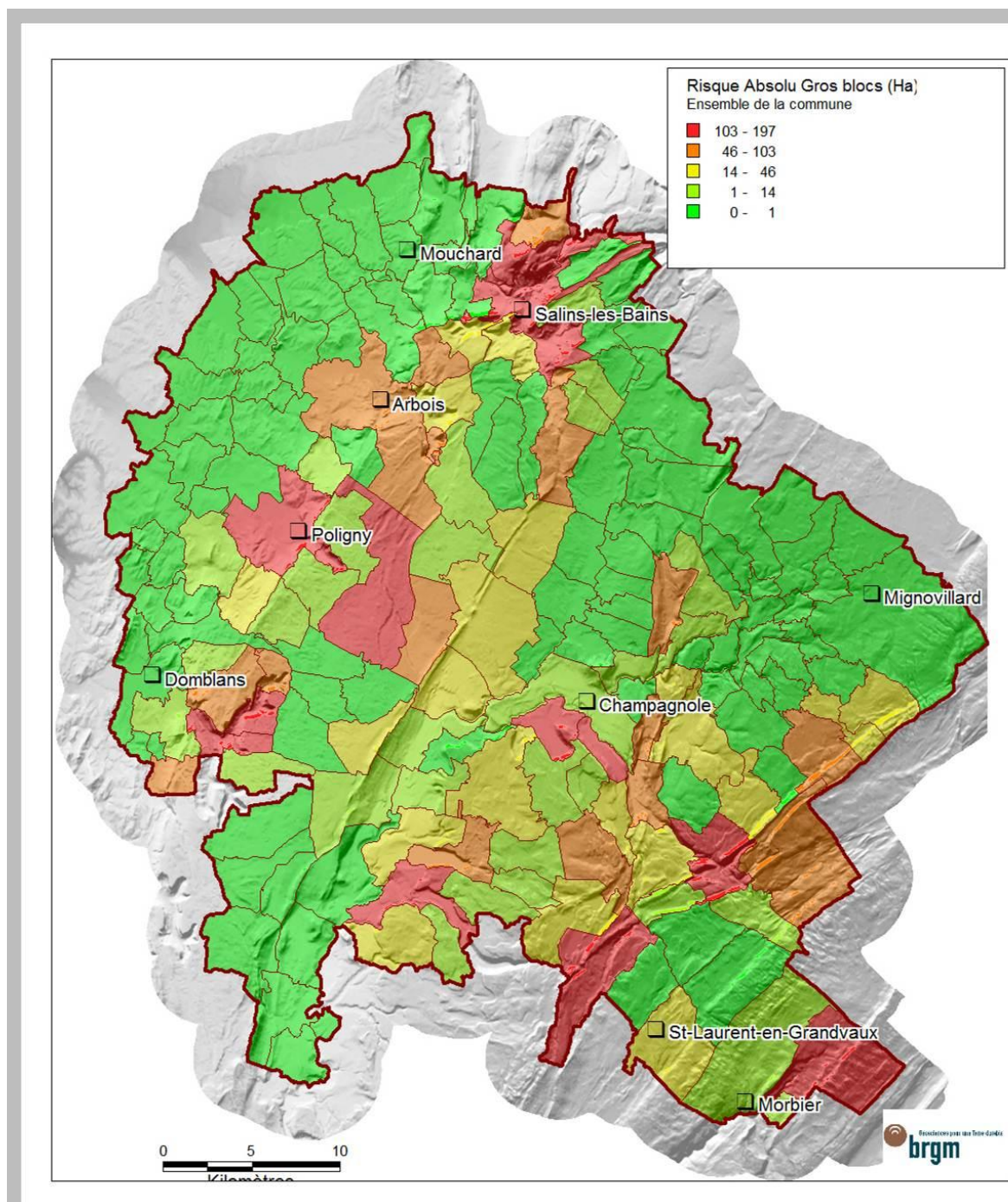
1 Carte de risque absolu, nombre d'hectares par commune exposés aux glissements de terrain



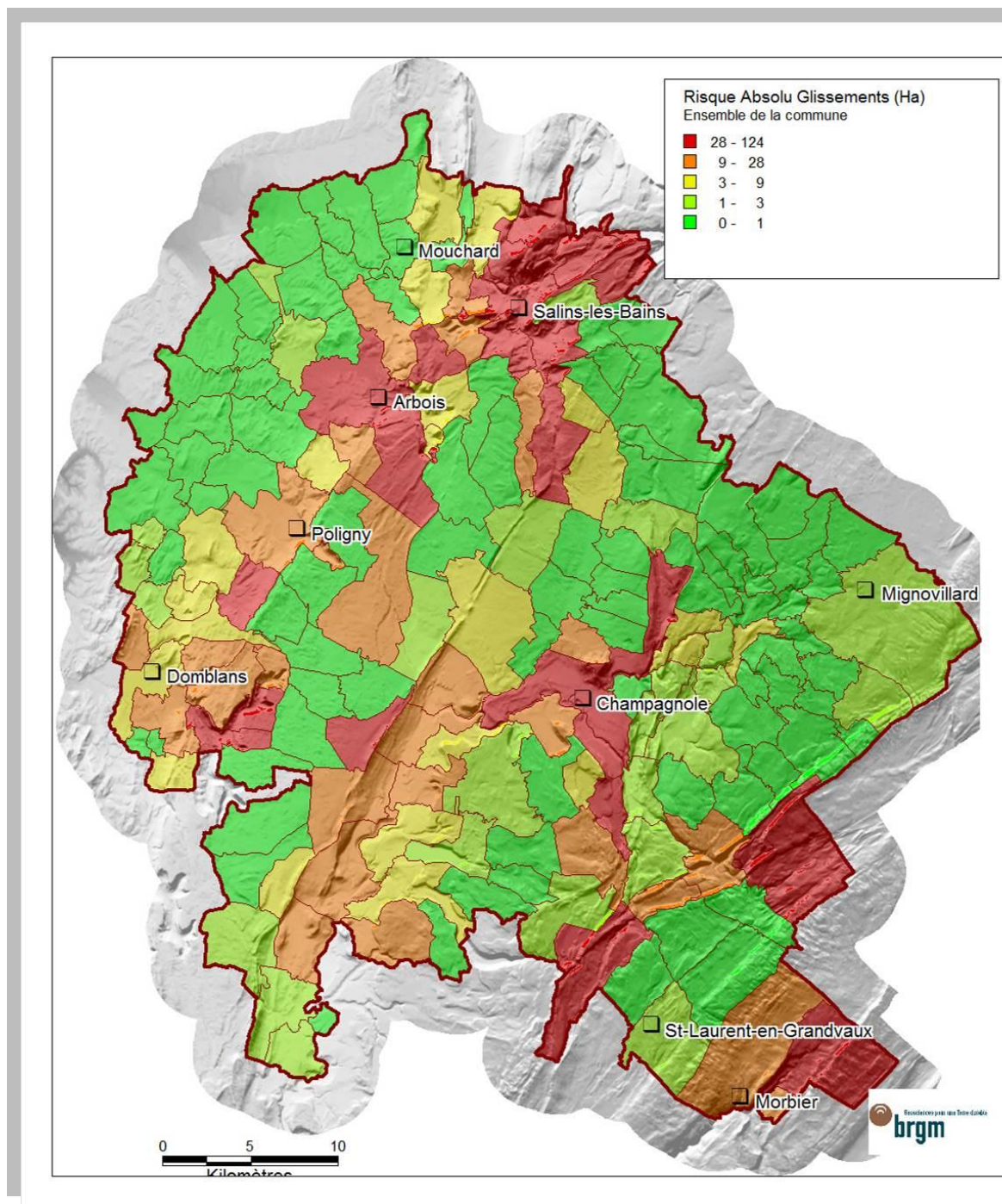
2 Carte de risque absolu, nombre d'hectares par commune exposés aux chutes de « petits » blocs



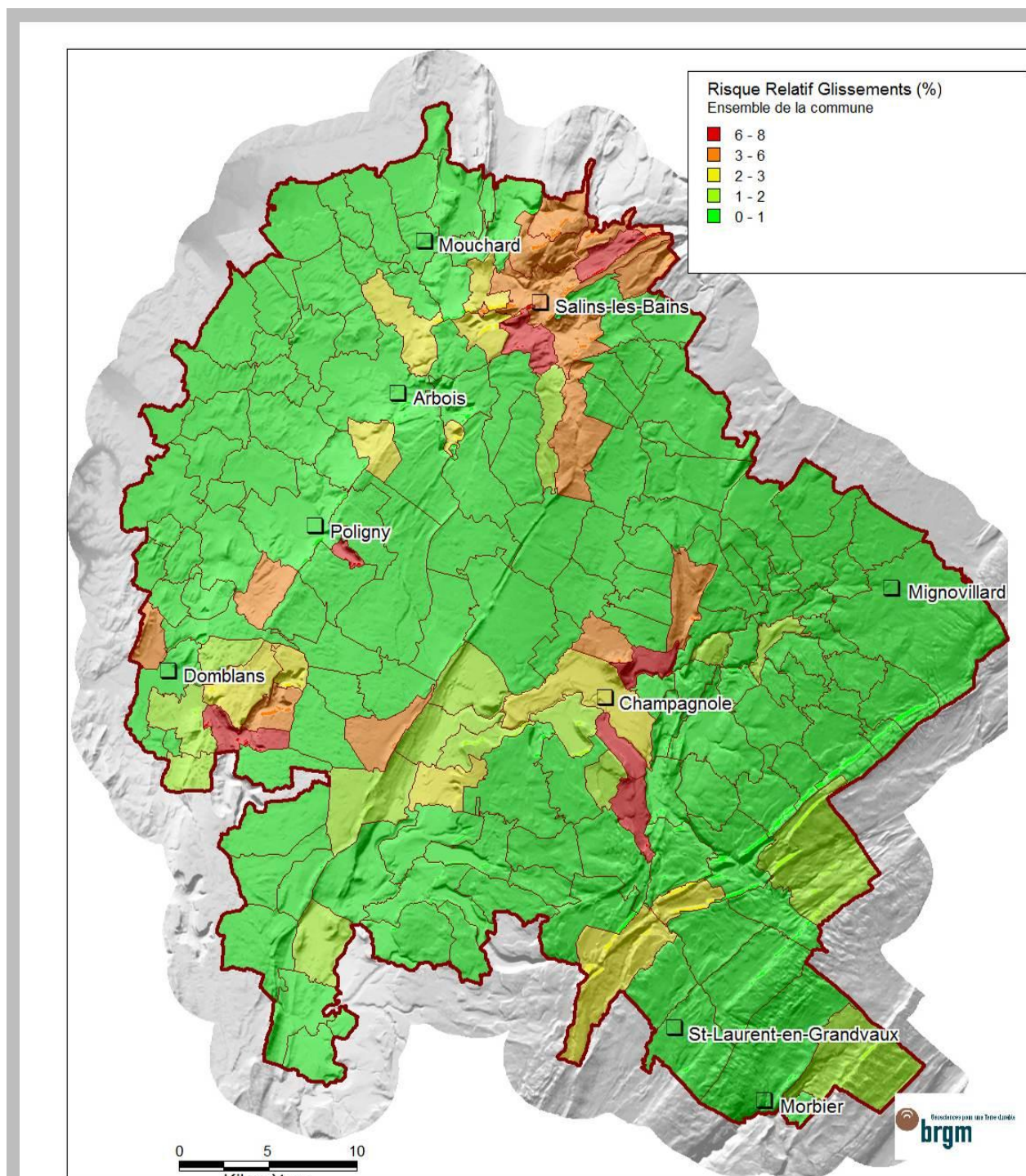
3 Carte de risque absolu, nombre d'hectares par commune exposés aux chutes de « gros » blocs



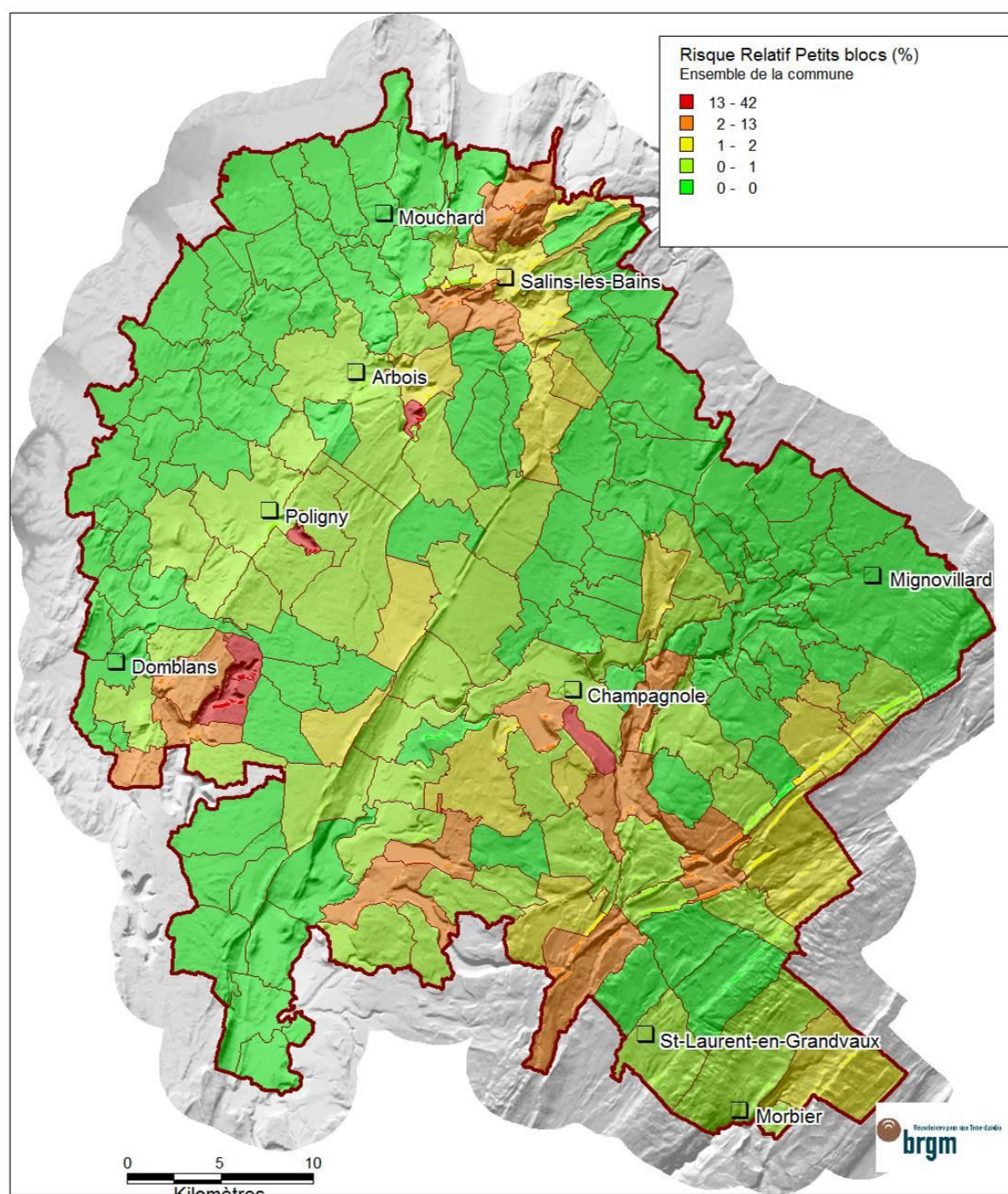
4 Carte de risque absolu, nombre d'hectares par commune exposés aux coulées de boue



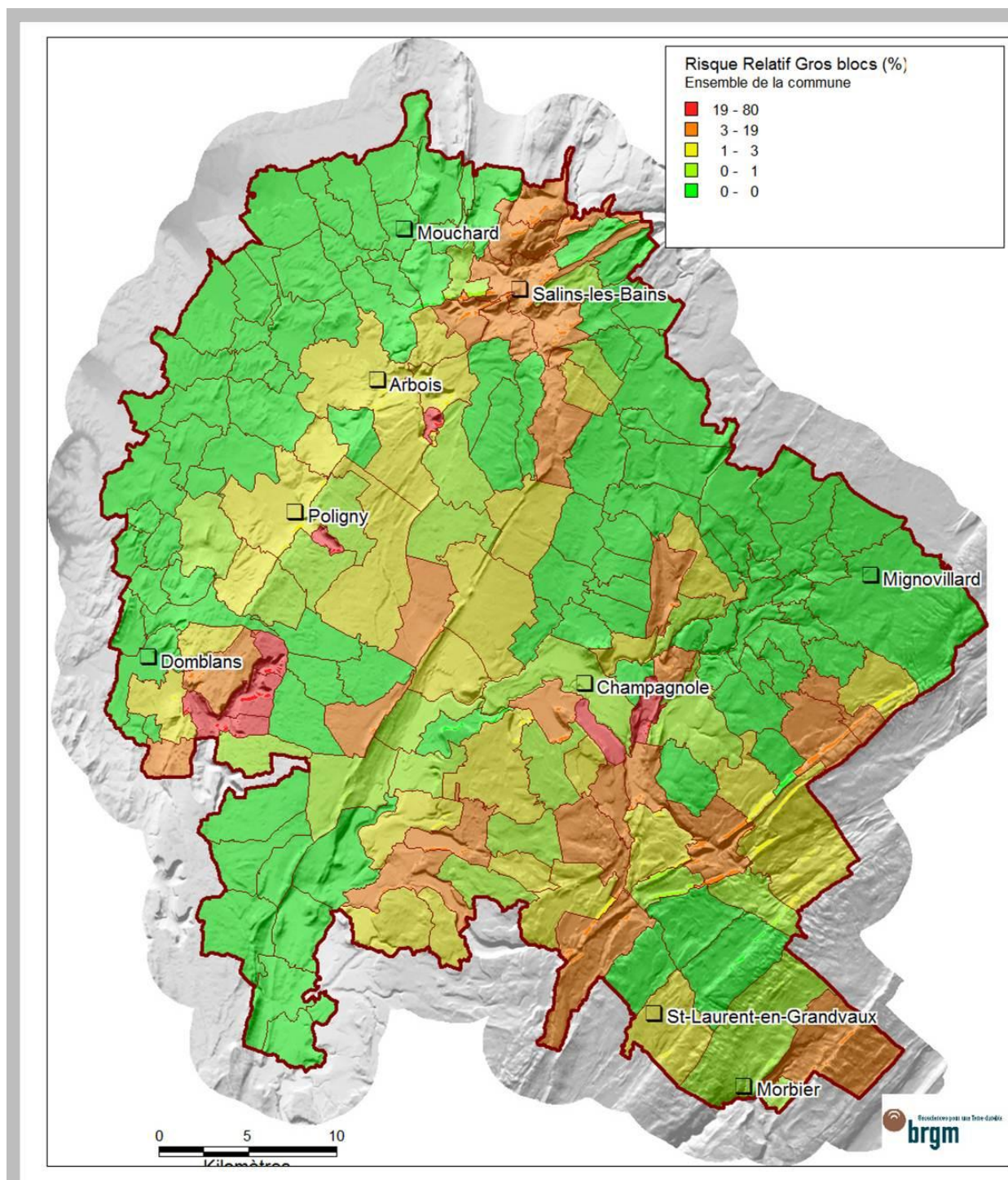
5 Carte de risque relatif, pourcentage du territoire communal exposé aux glissements de terrain



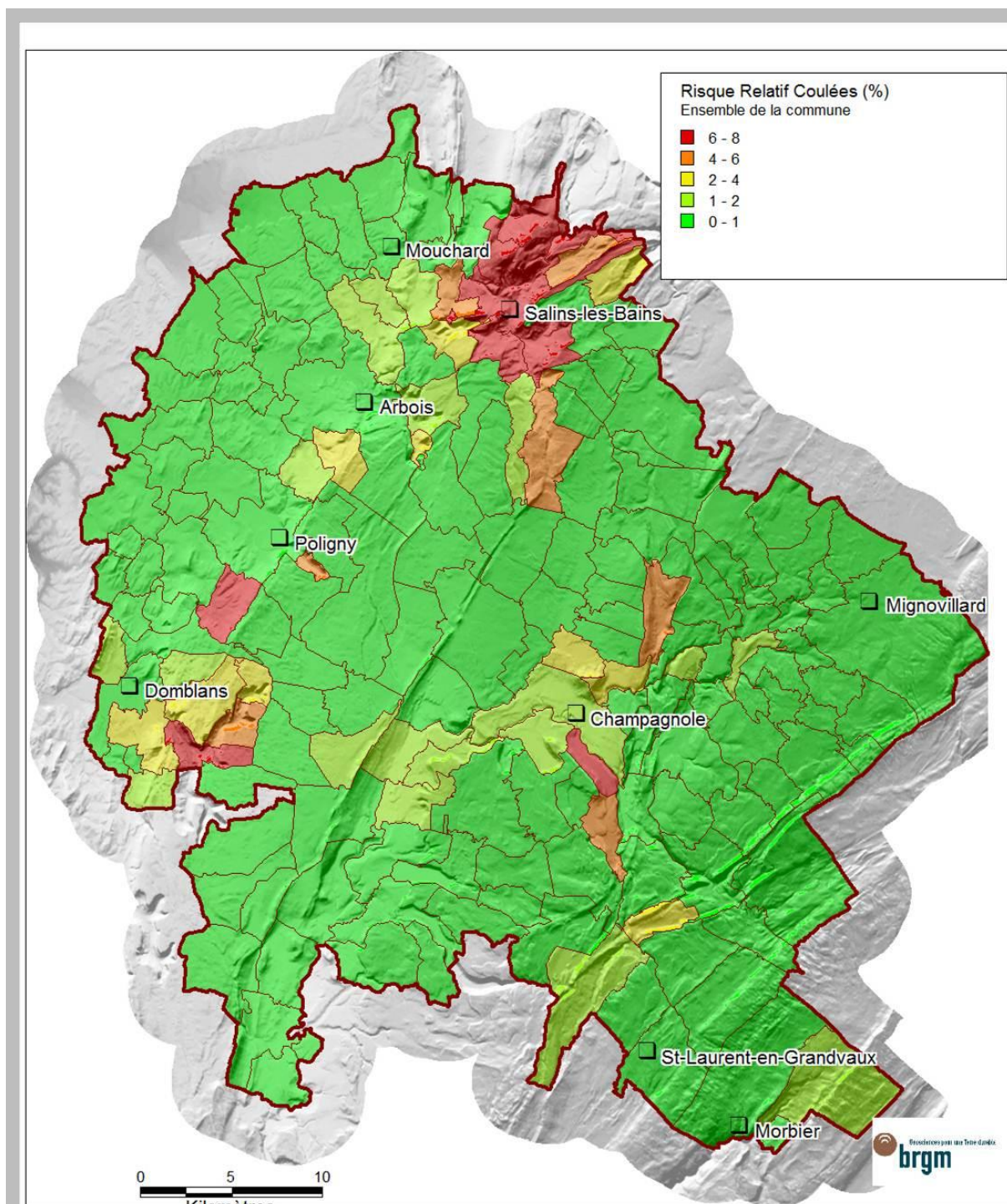
6 Carte de risque relatif, pourcentage du territoire communal exposé aux chutes de « petits » blocs



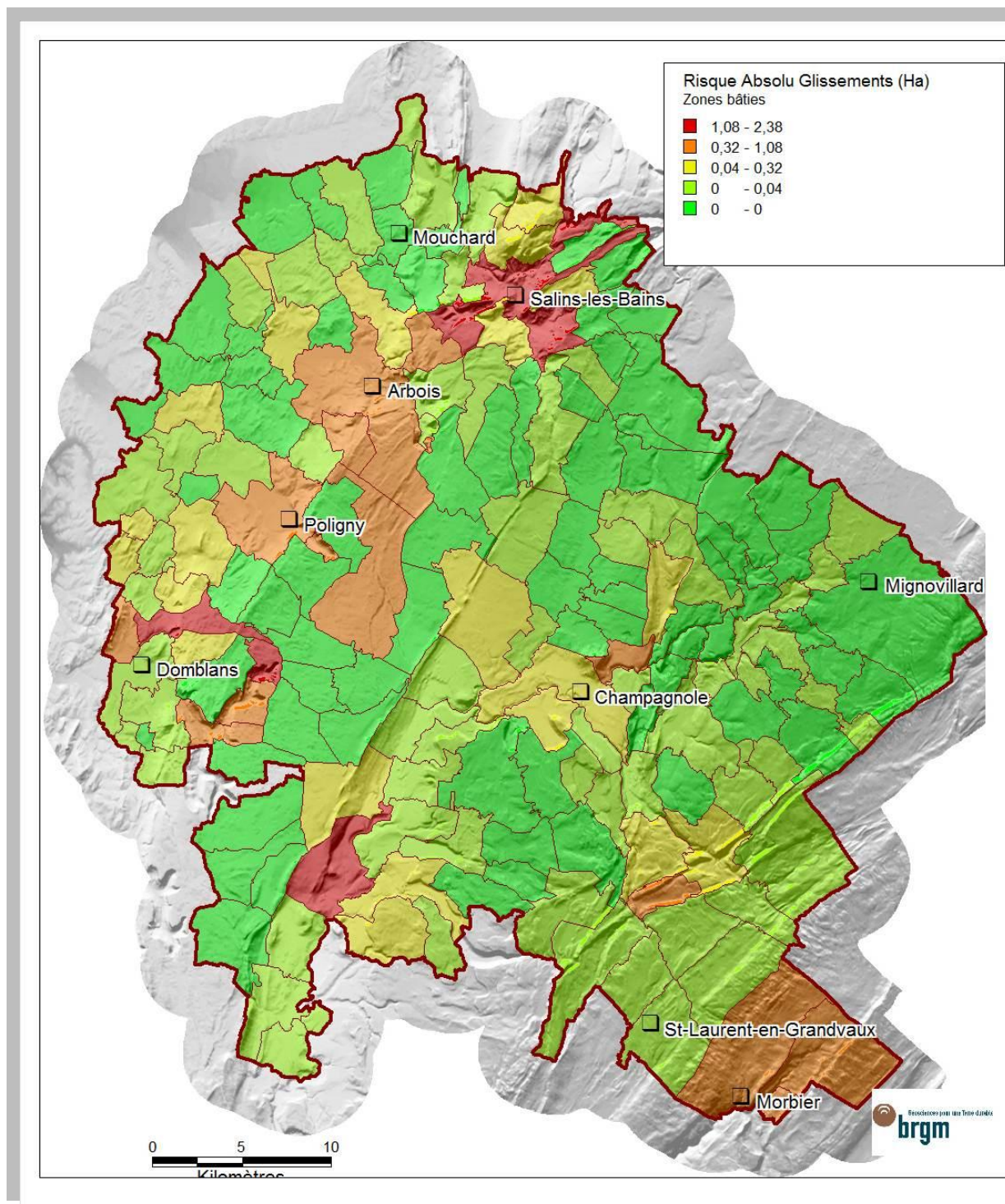
7 Carte de risque relatif, pourcentage du territoire communal exposé aux chutes de « gros » blocs



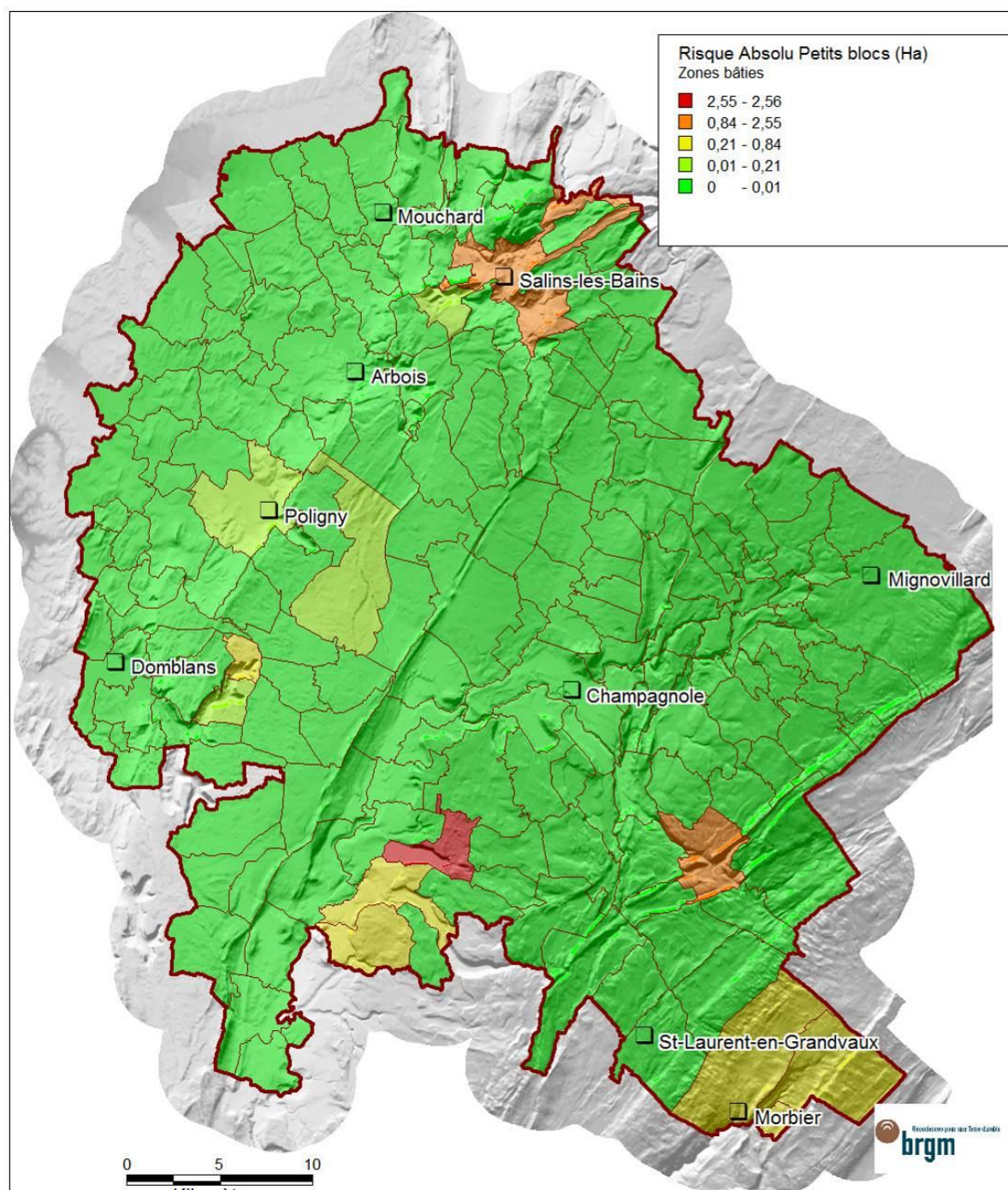
8 Carte de risque relatif, pourcentage du territoire communal exposé aux coulées de boue



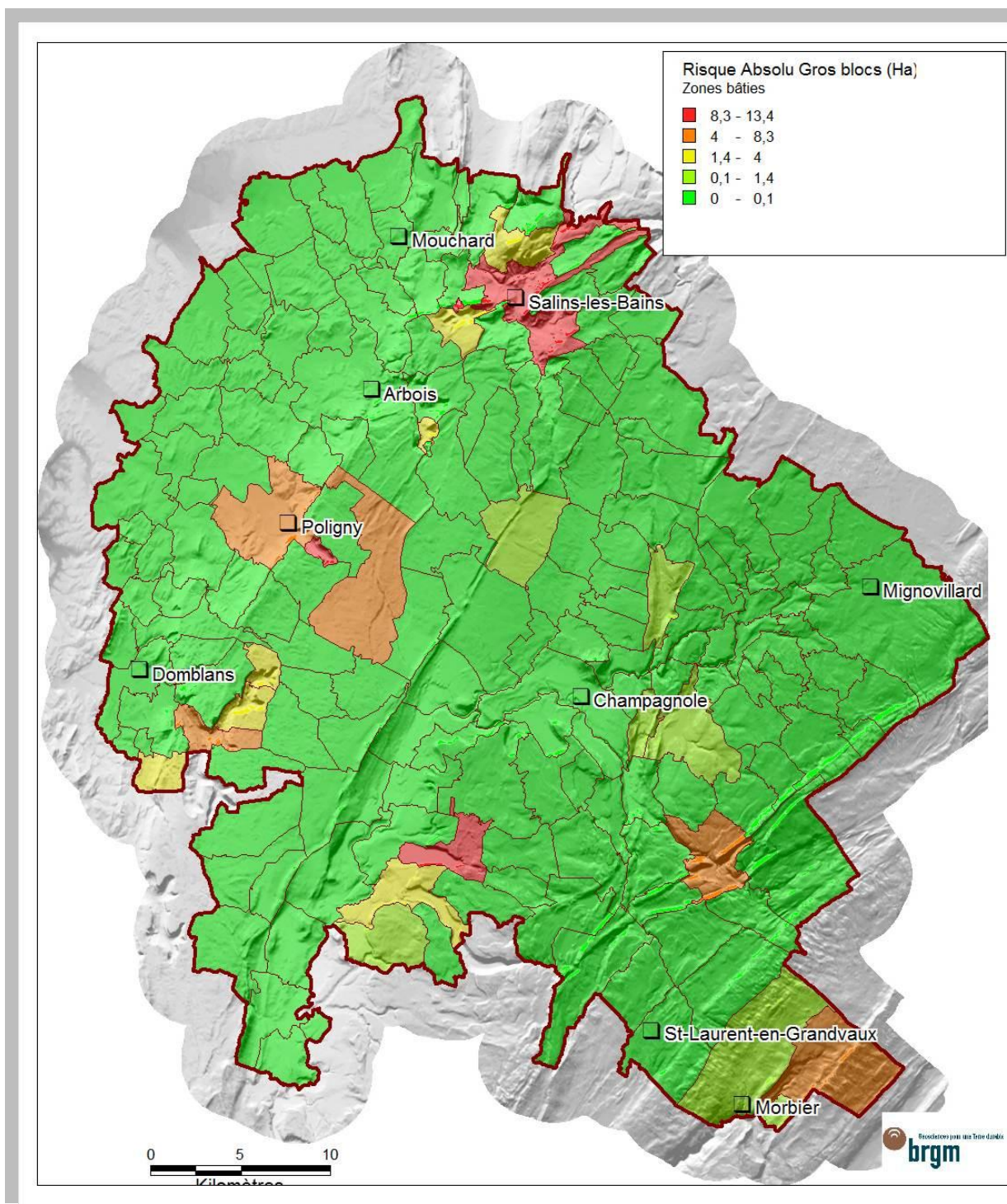
9 Carte de risque absolu, nombre d'hectares de terrain bâti par commune exposés aux glissements de terrain



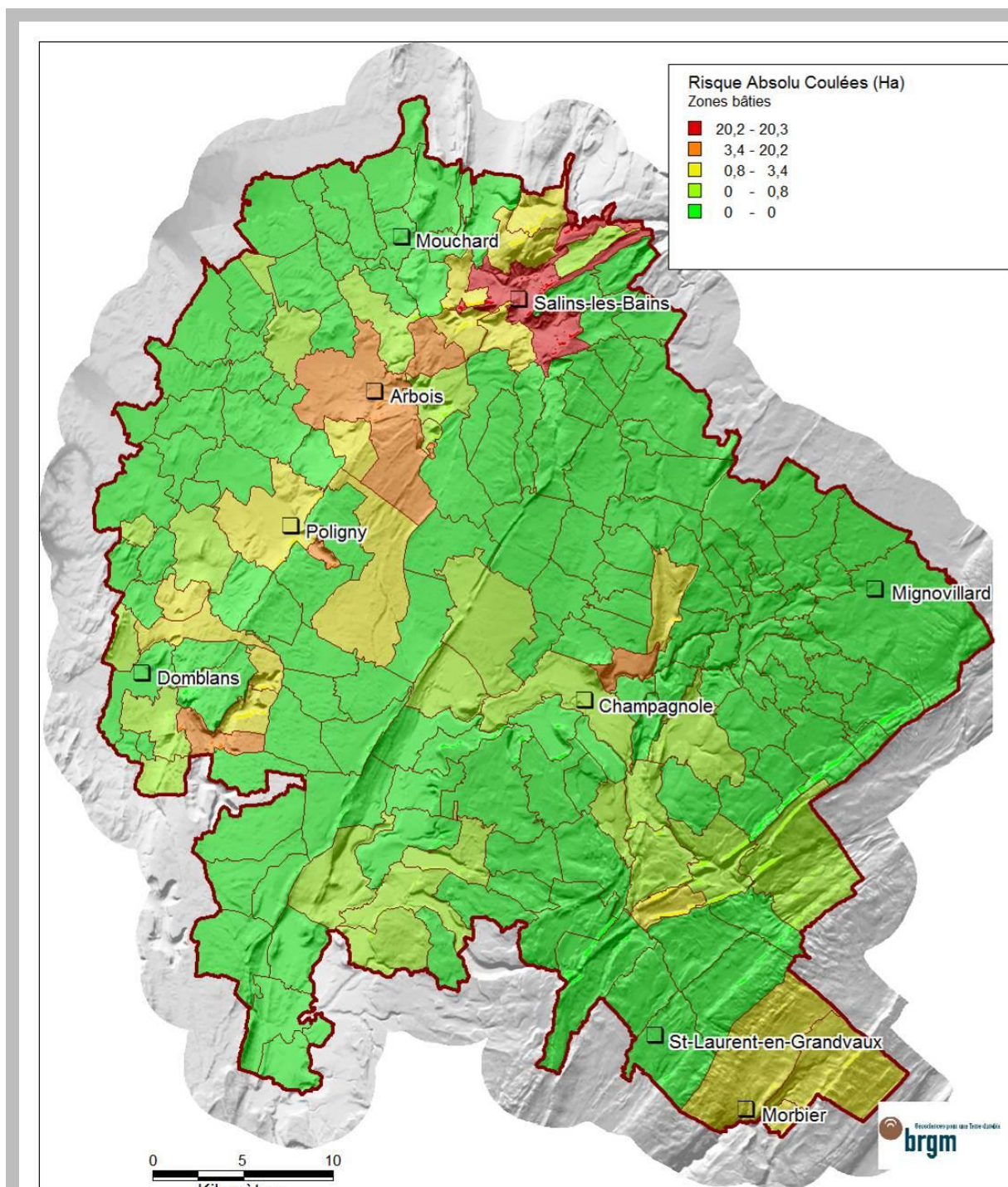
10 Carte de risque absolu, nombre d'hectares de terrain bâti par commune exposés aux chutes de « petits » blocs



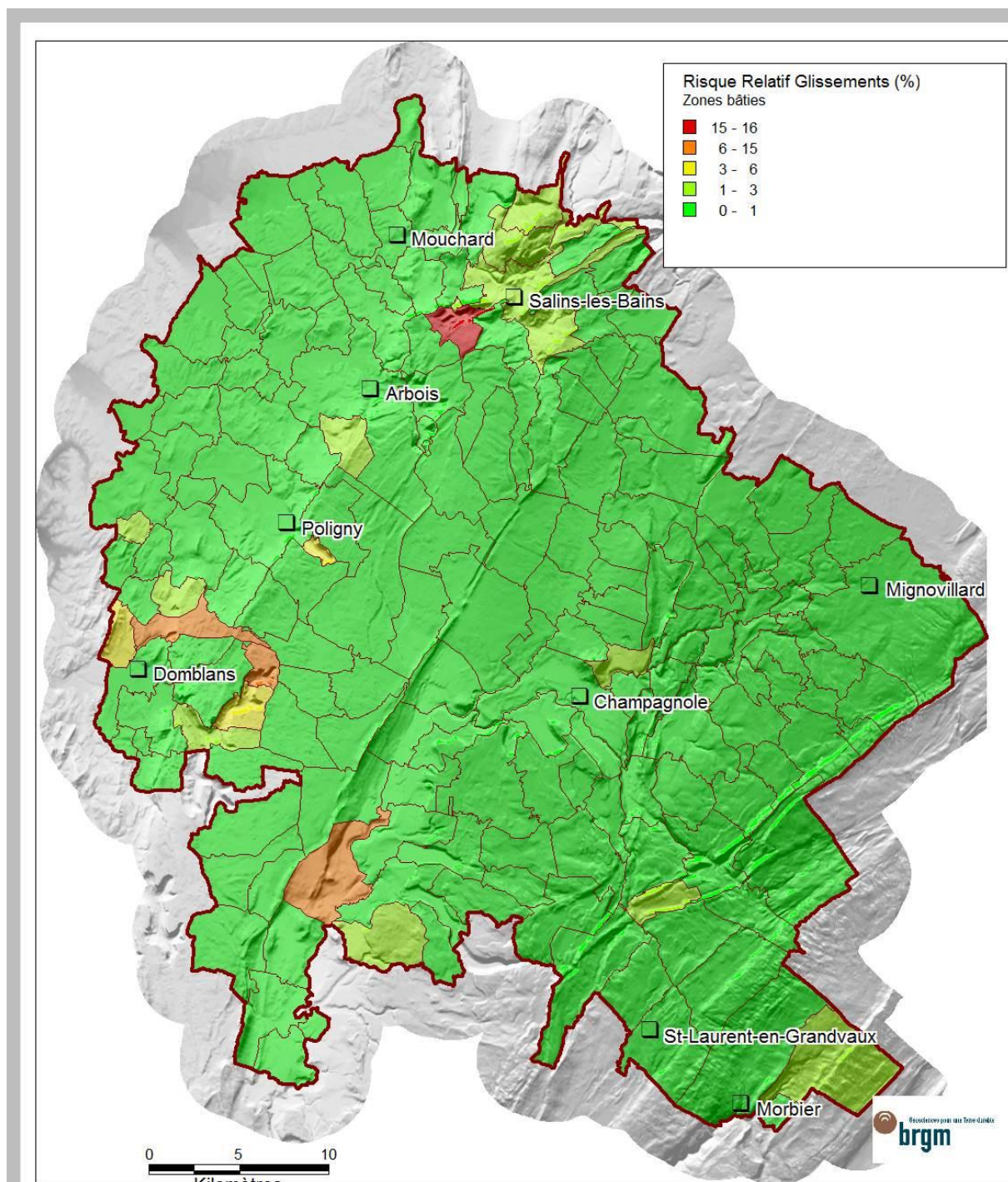
11 Carte de risque absolu, nombre d'hectares de terrain bâti par commune exposés aux chutes de « gros » blocs



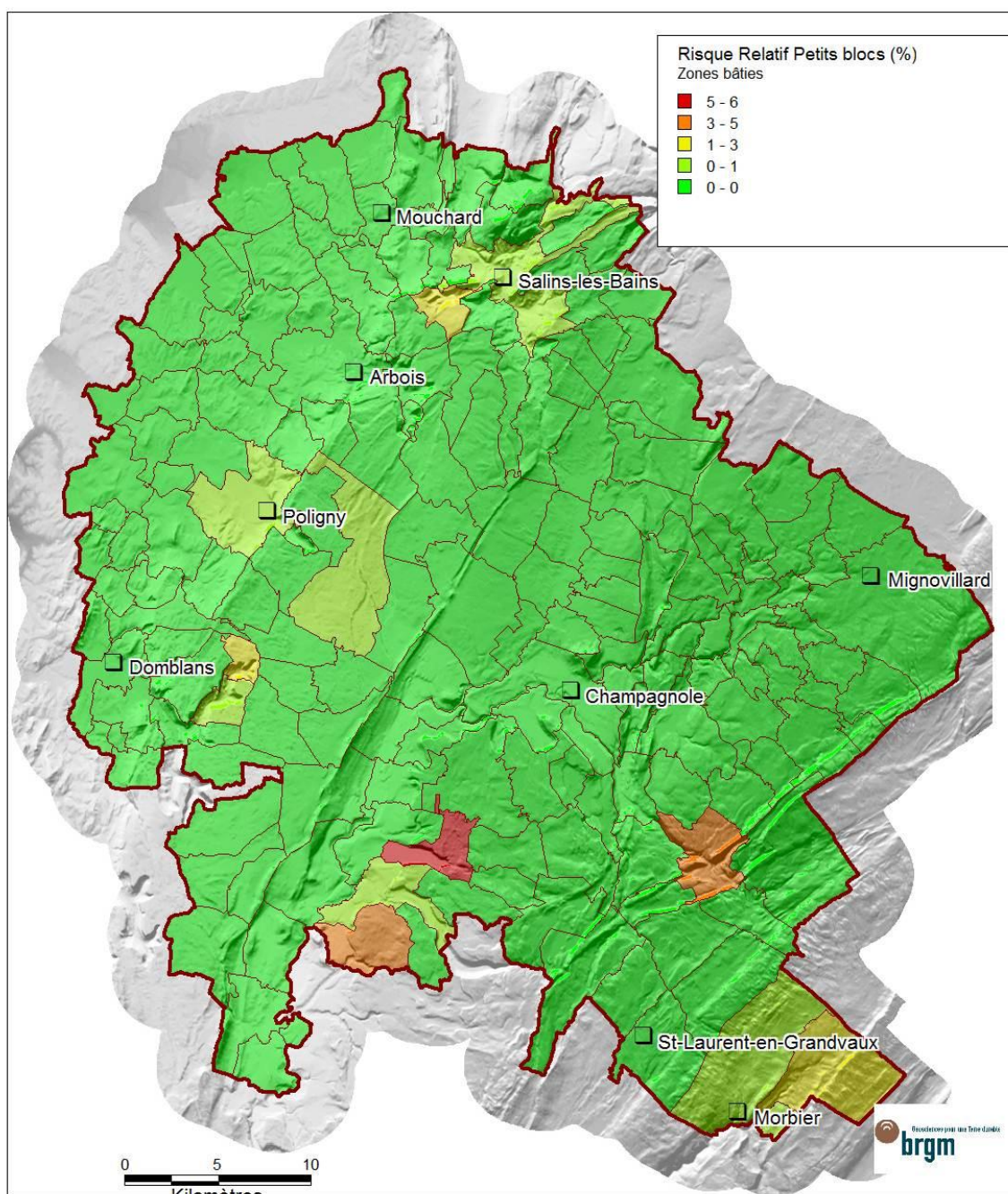
12 Carte de risque absolu, nombre d'hectares de terrain bâti par commune exposés aux coulées de boue



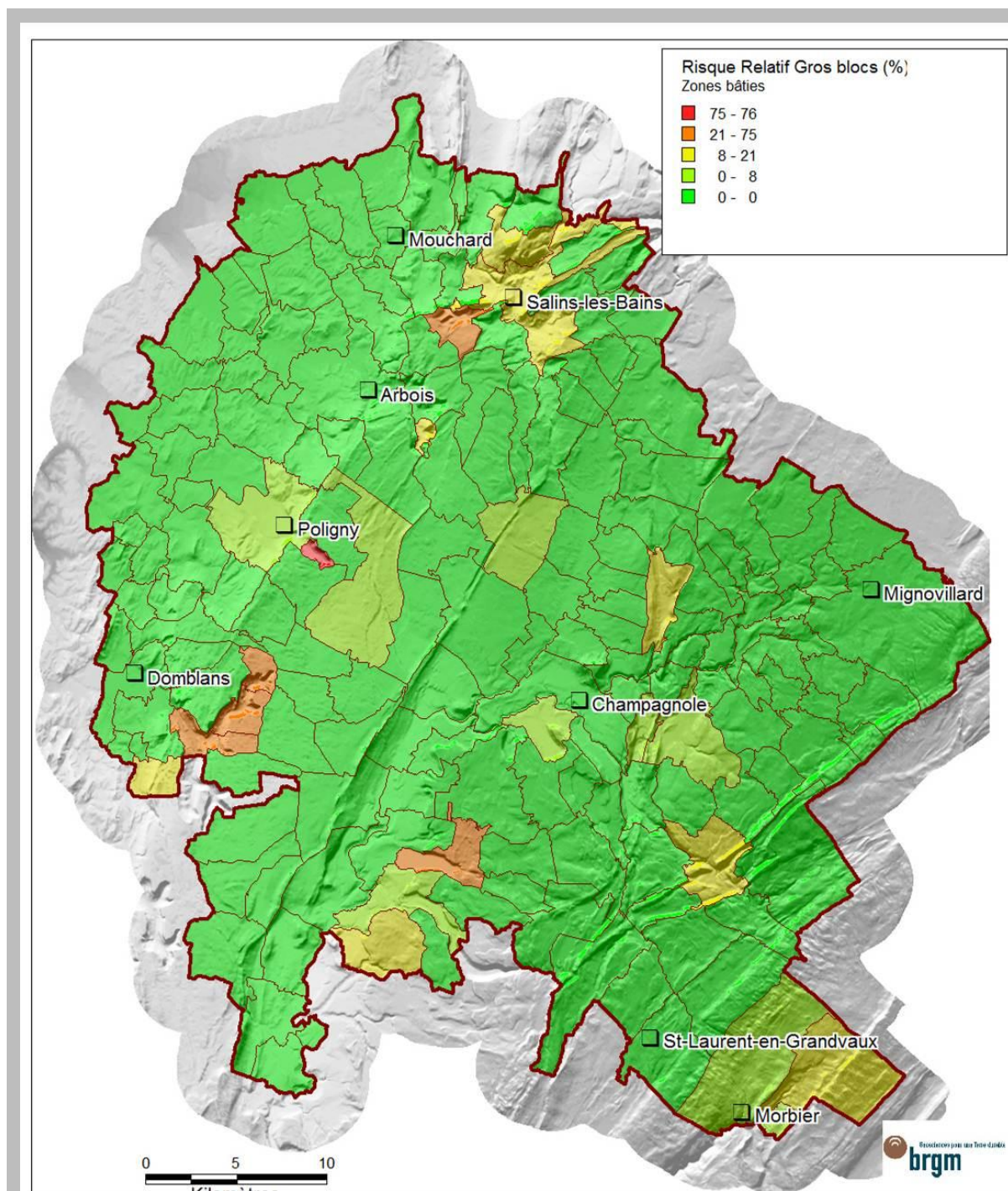
13 Carte de risque relatif, pourcentage de terrain bâti par commune exposés aux glissements de terrain



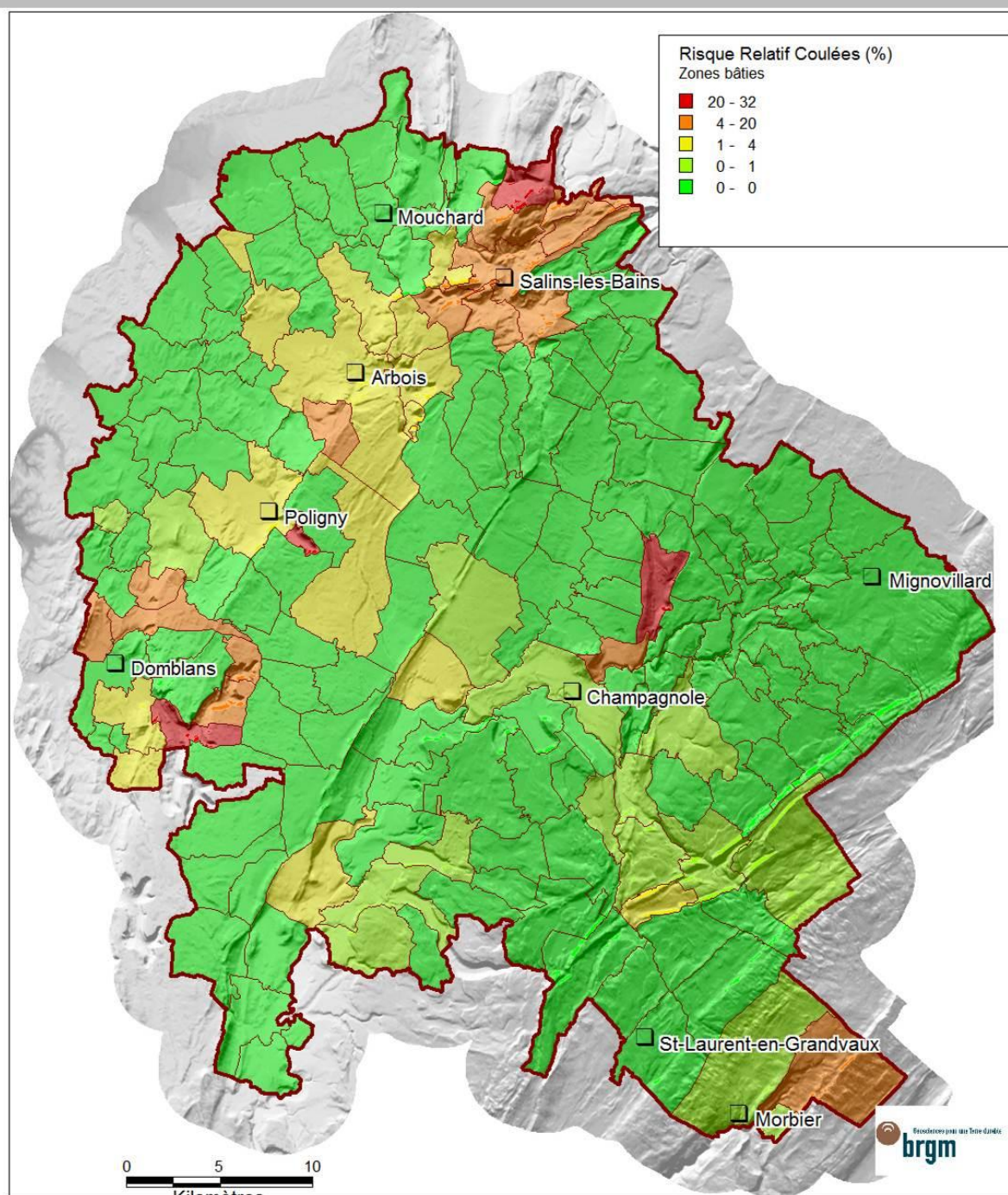
14 Carte de risque relatif, pourcentage de terrain bâti par commune exposés aux chutes de « petits » blocs



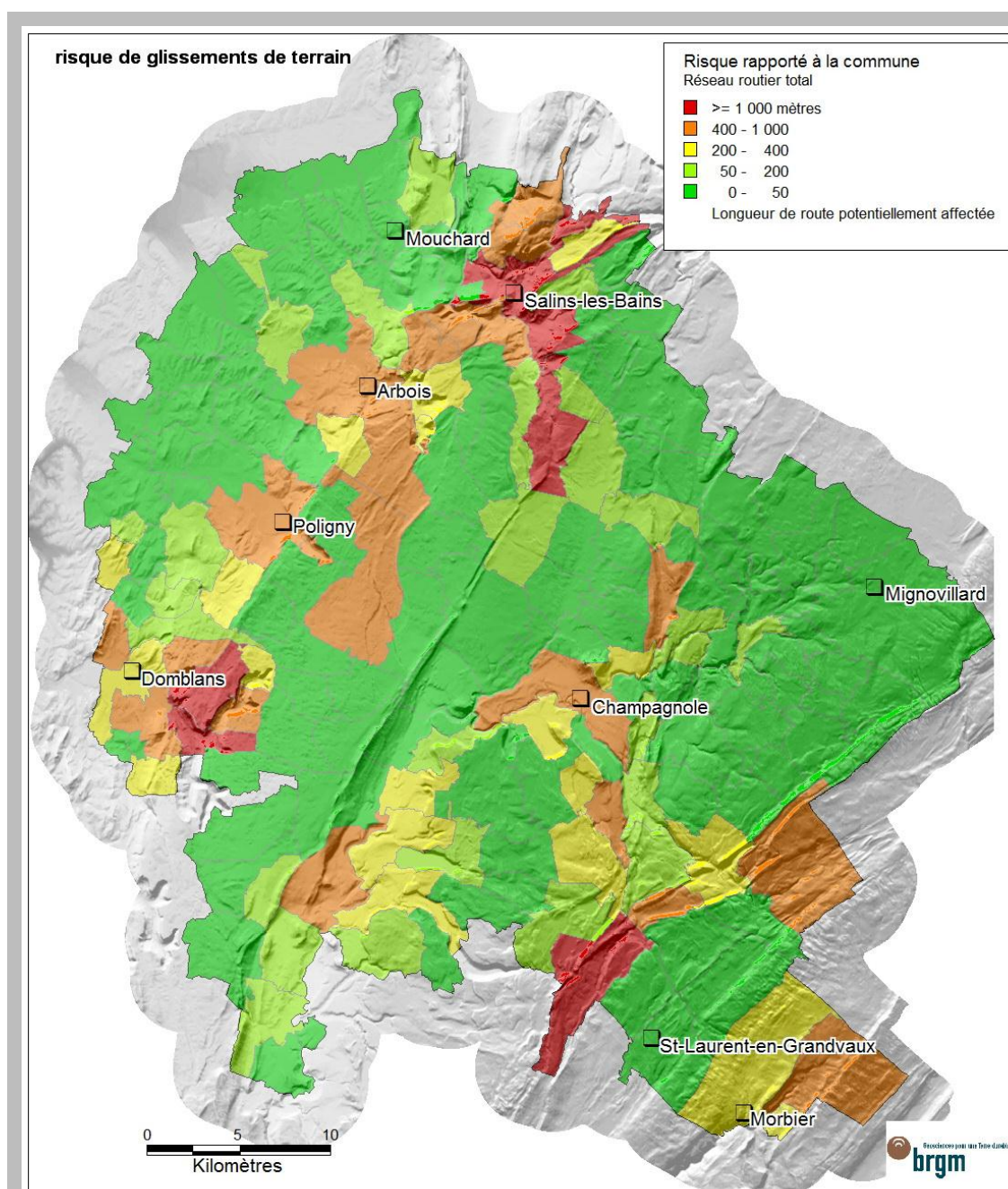
15 Carte de risque relatif, pourcentage de terrain bâti par commune exposés aux chutes de « gros » blocs



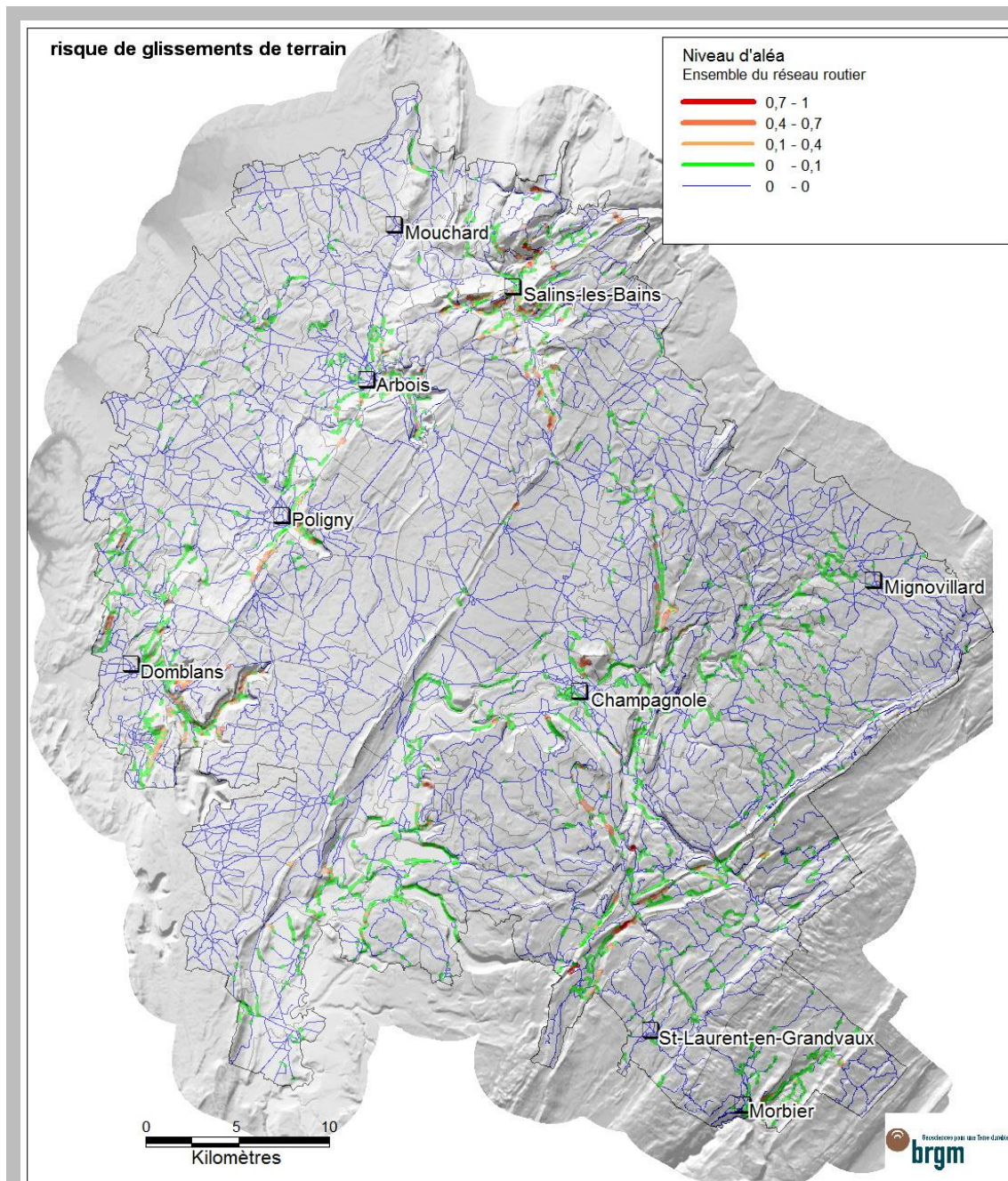
16 Carte de risque relatif, pourcentage de terrain bâti par commune exposés aux coulées de boue



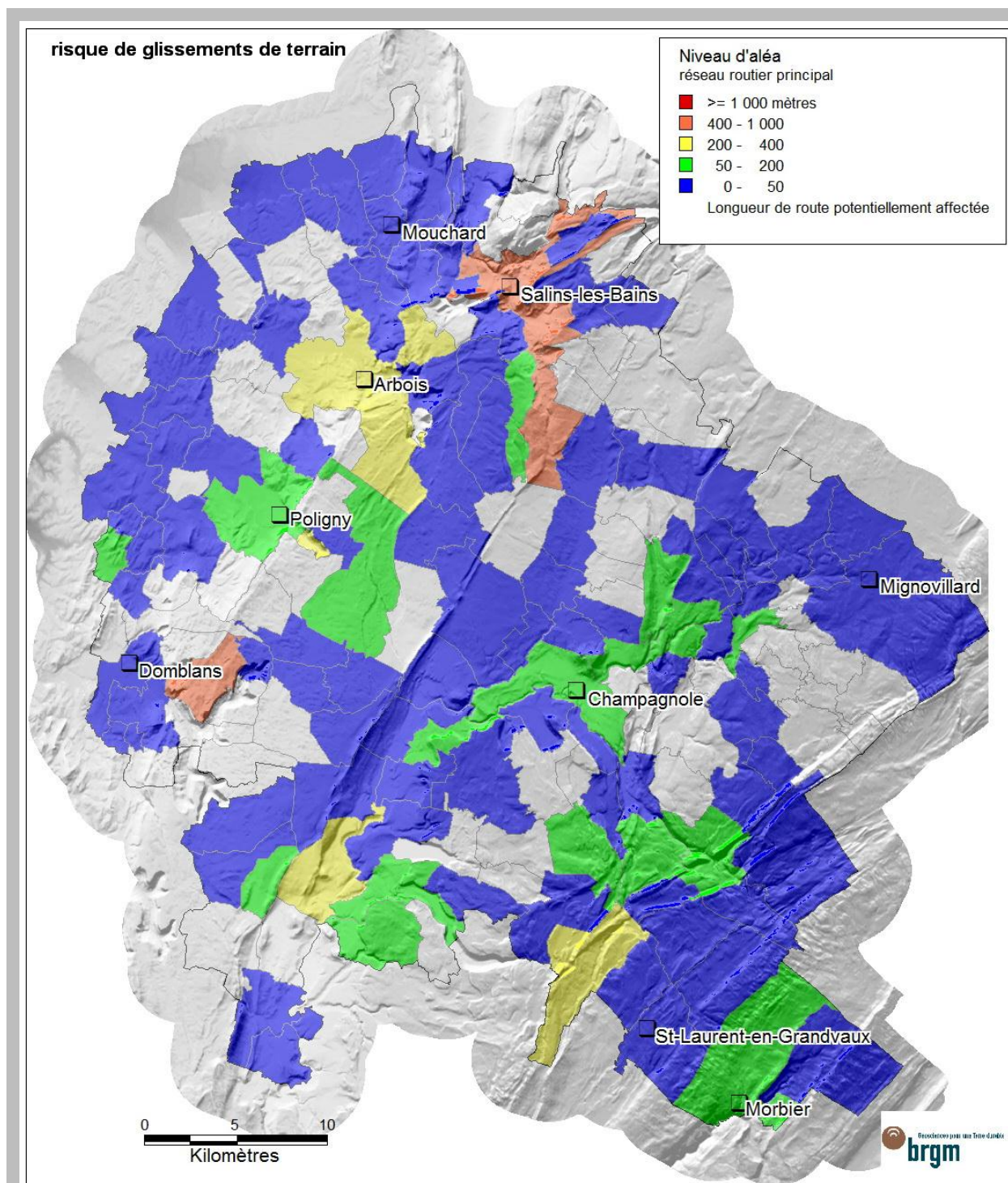
17 Carte de risque pour l'ensemble du réseau routier : longueur de kilomètres par commune susceptibles d'être affectée par des glissements de terrain



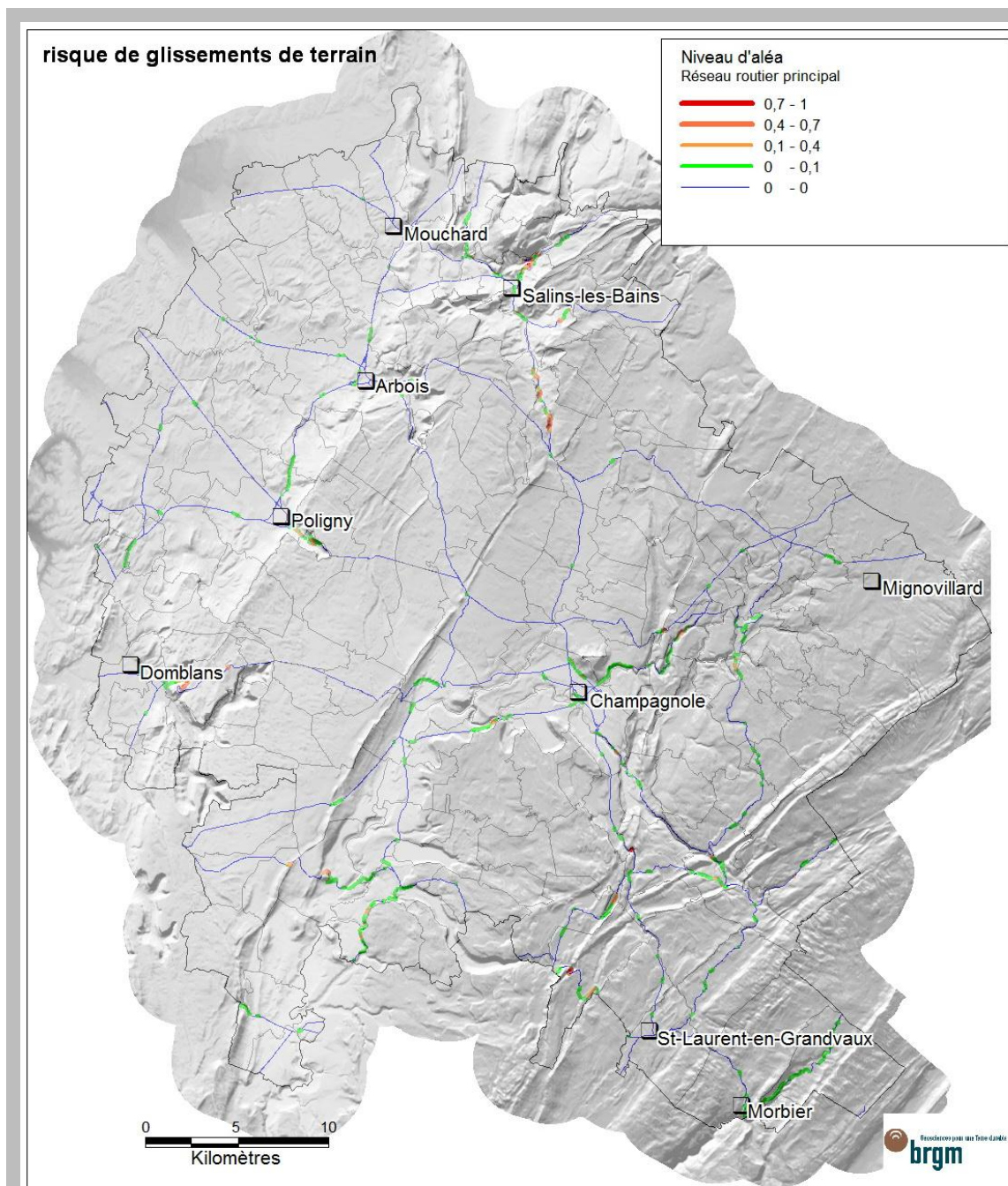
18 Carte de risque pour l'ensemble du réseau routier : réseau routier susceptible d'être affecté par des glissements de terrain et niveau d'aléa correspondant



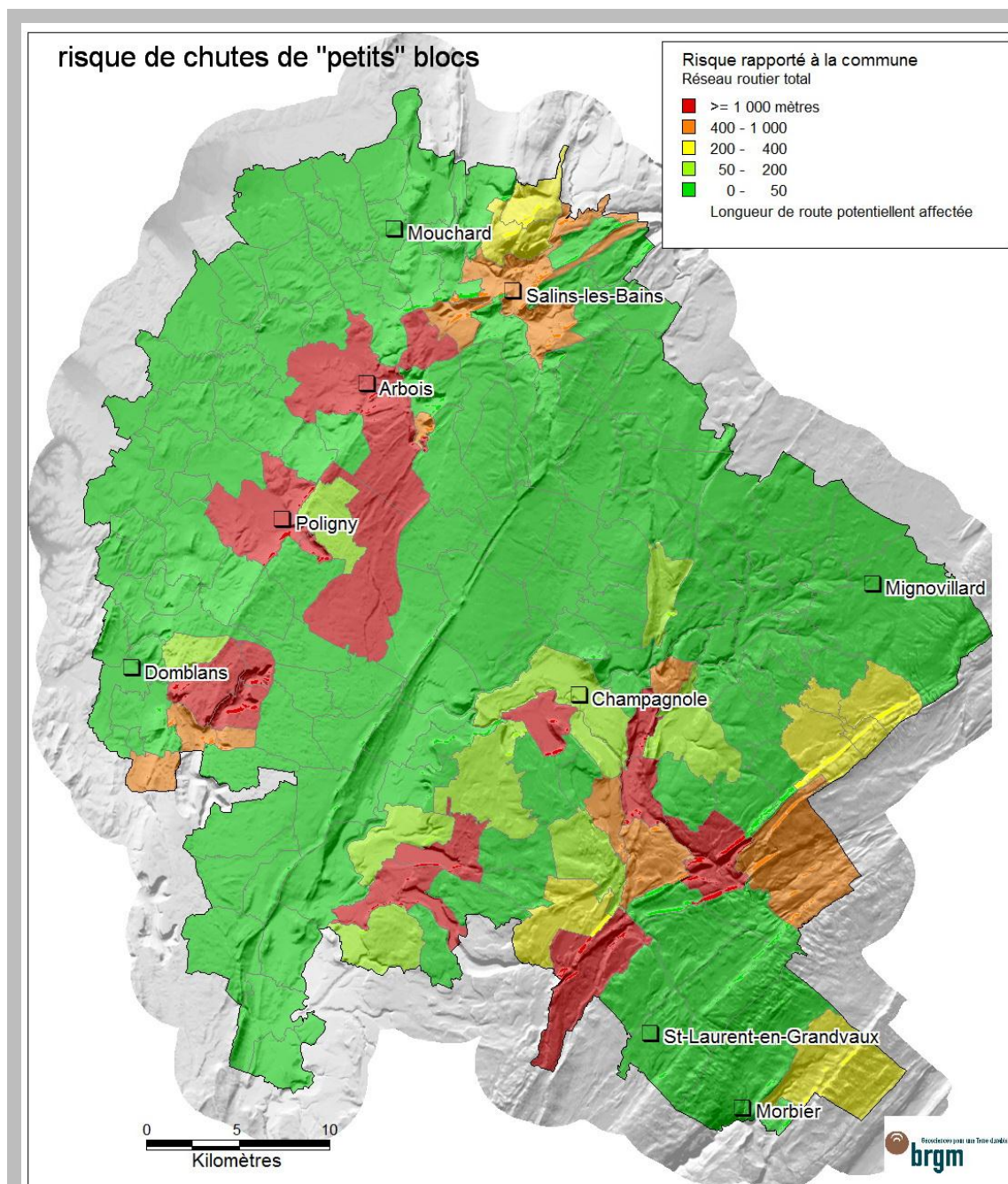
19 Carte de risque pour les principales voies routières : longueur en kilomètre, par commune, susceptible d'être affectée par des glissements de terrain



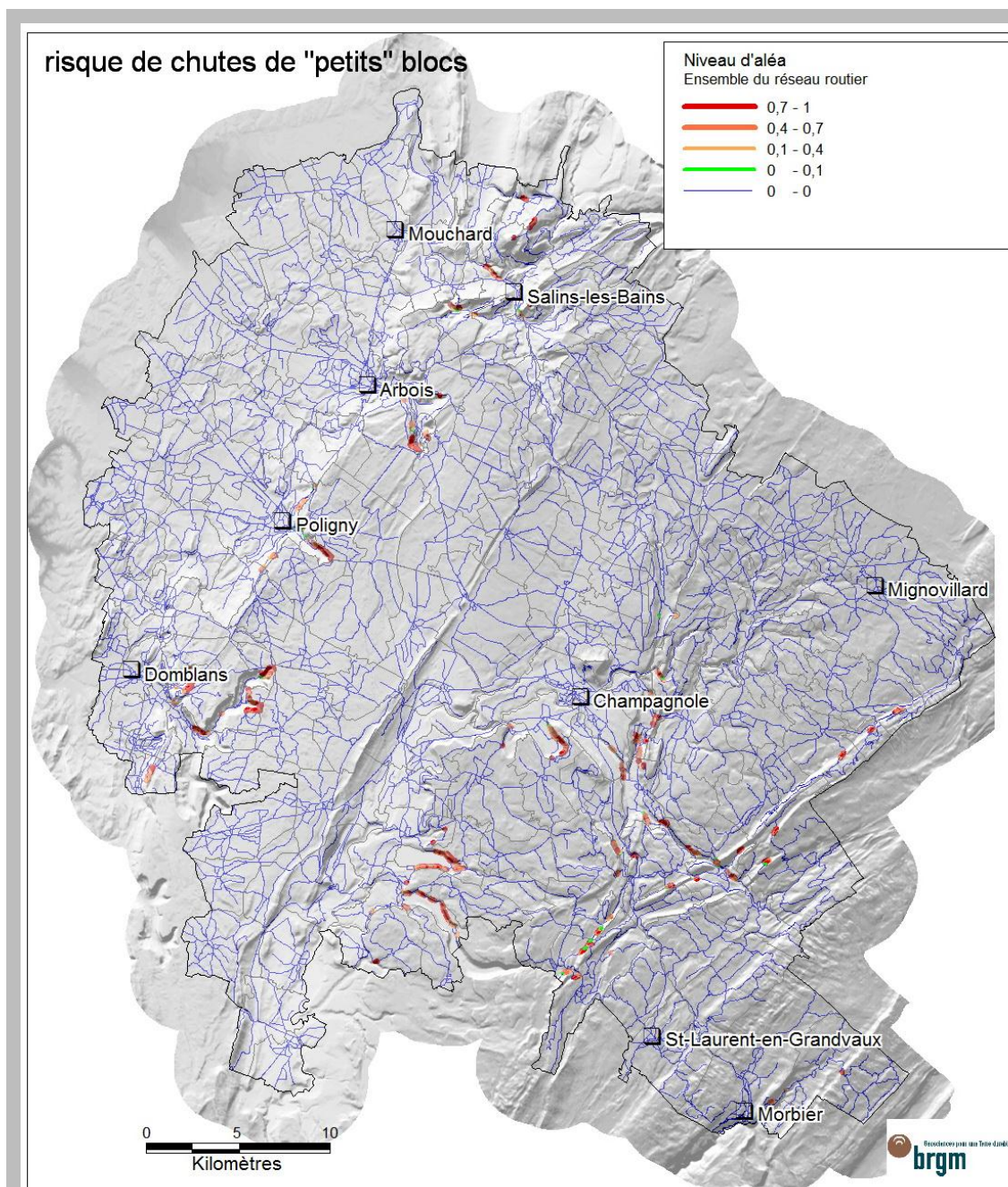
20 Carte de risque pour les principales voies routières : réseau routier susceptible d'être affecté par des glissements de terrain et niveau d'aléa correspondant



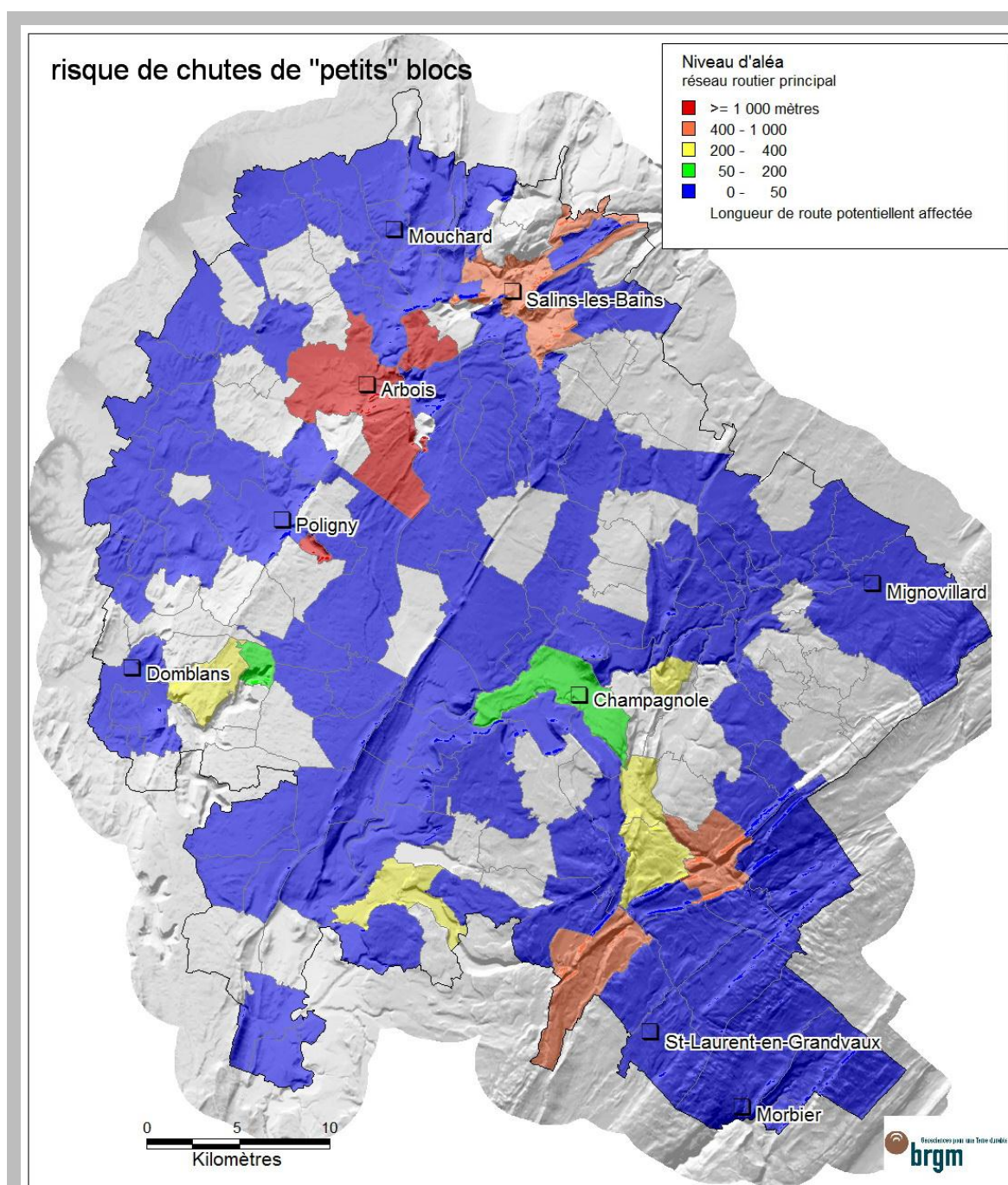
21 Carte de risque pour l'ensemble du réseau routier : longueur en kilomètre, par commune, susceptible d'être affectée par des chutes de « petits » blocs



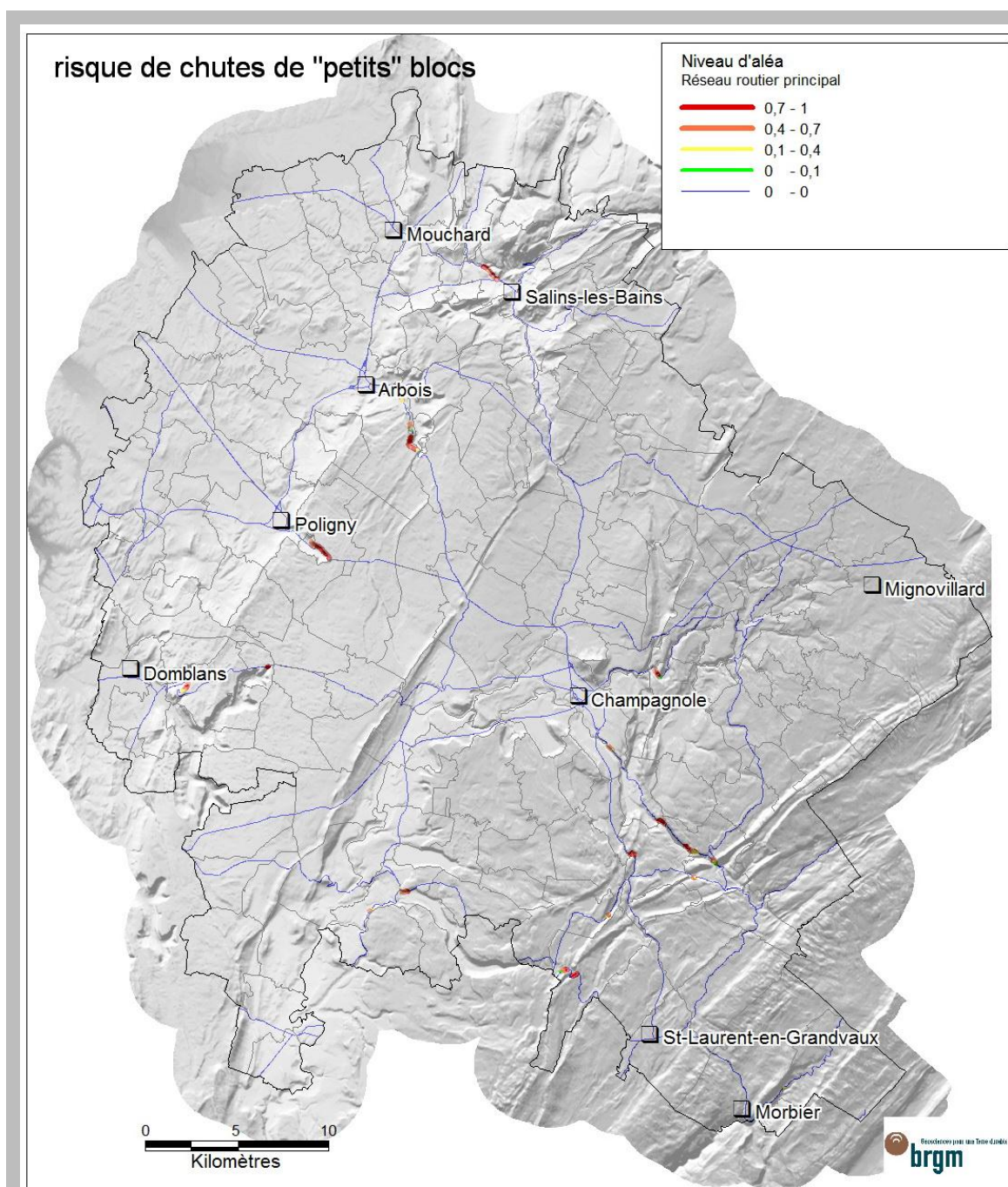
22 Carte de risque pour l'ensemble du réseau routier : réseau routier susceptible d'être affecté par des chutes de « petits » blocs et niveau d'aléa correspondant



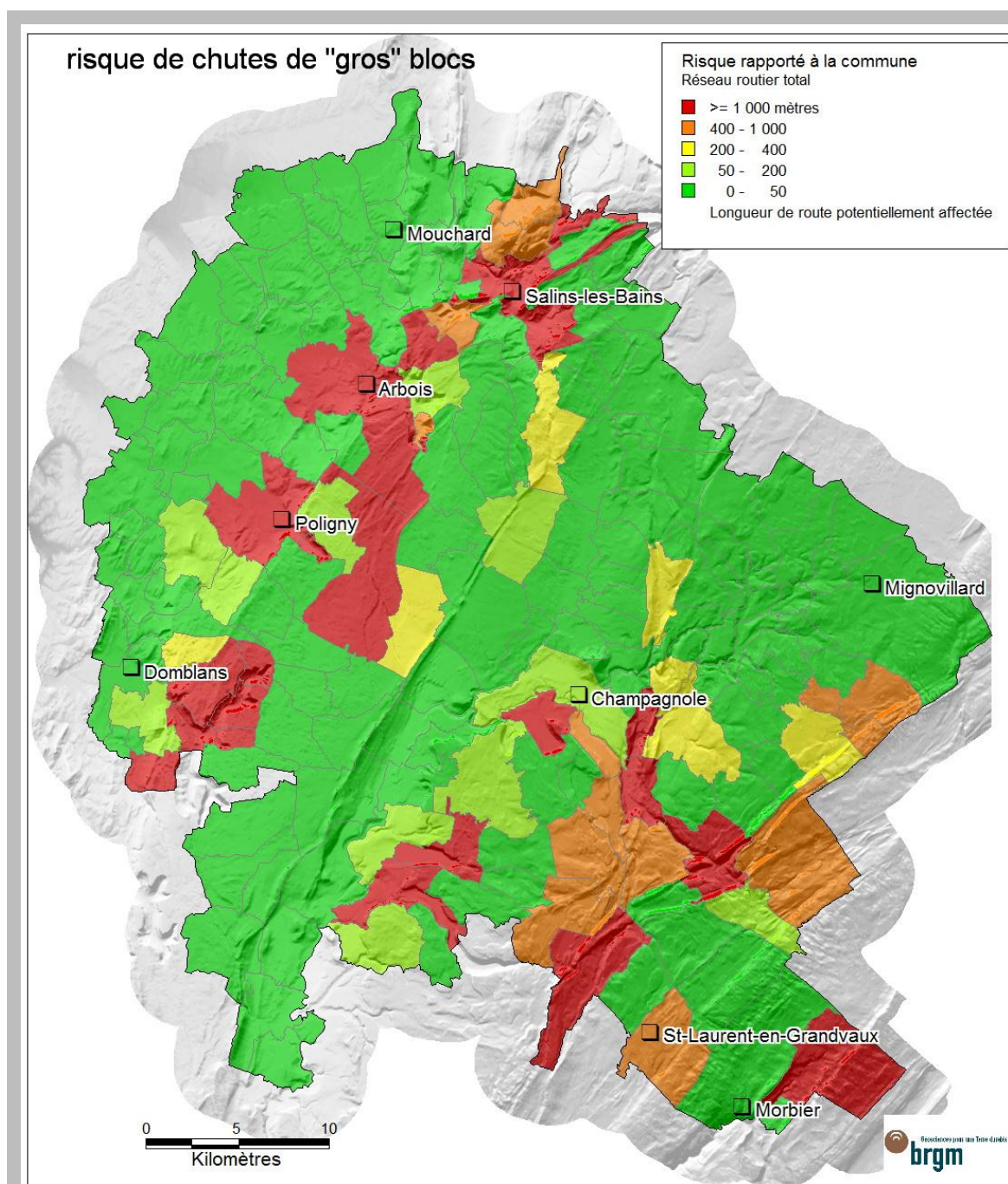
23 Carte de risque pour les principales voies de routières : longueur en kilomètre, par commune, susceptibles d'être affectée par des chutes de « petits » blocs



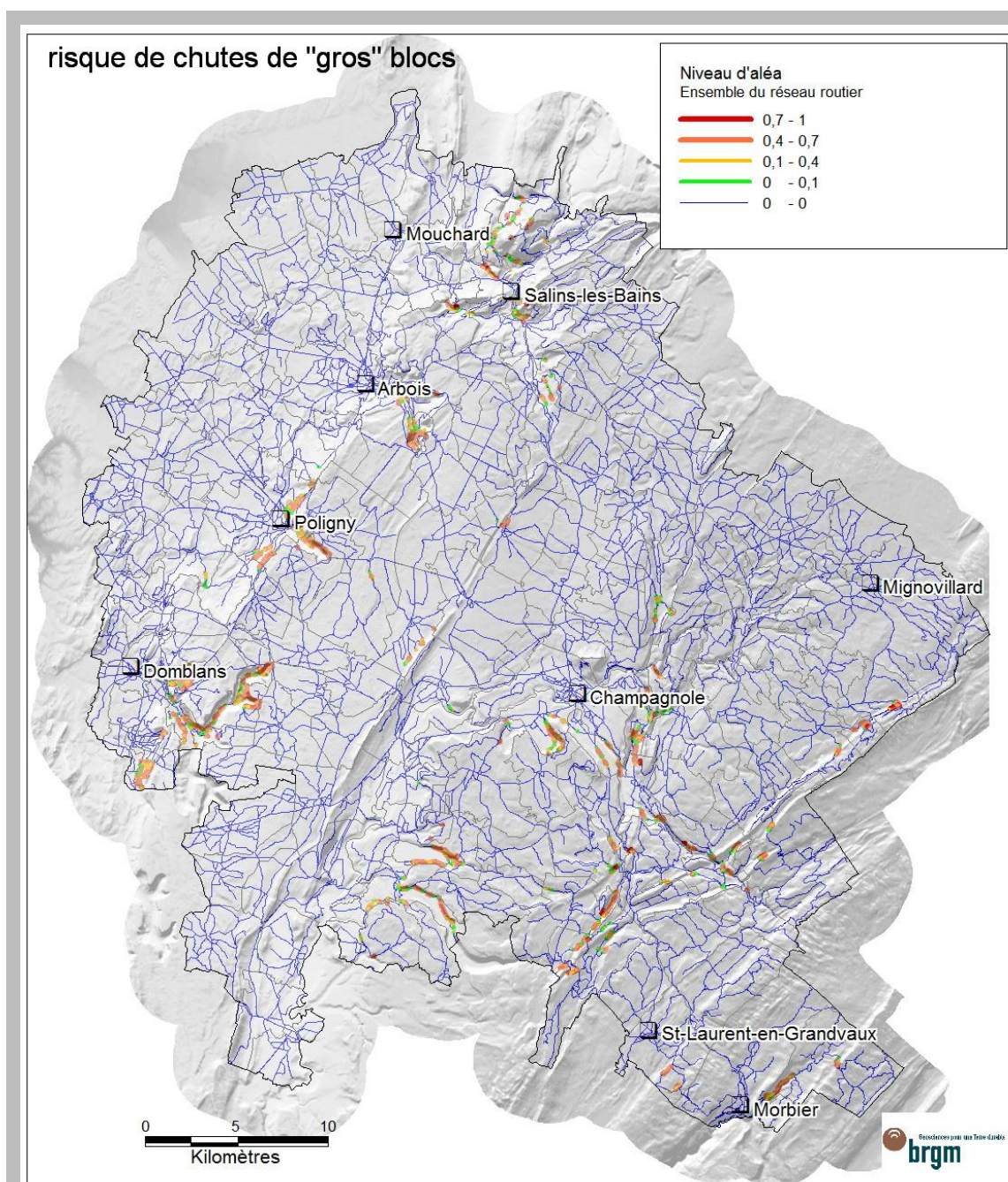
24 Carte de risque pour les principales voies routières : réseau routier susceptible d'être affecté par des chutes de « petits » blocs et niveau d'aléa correspondant



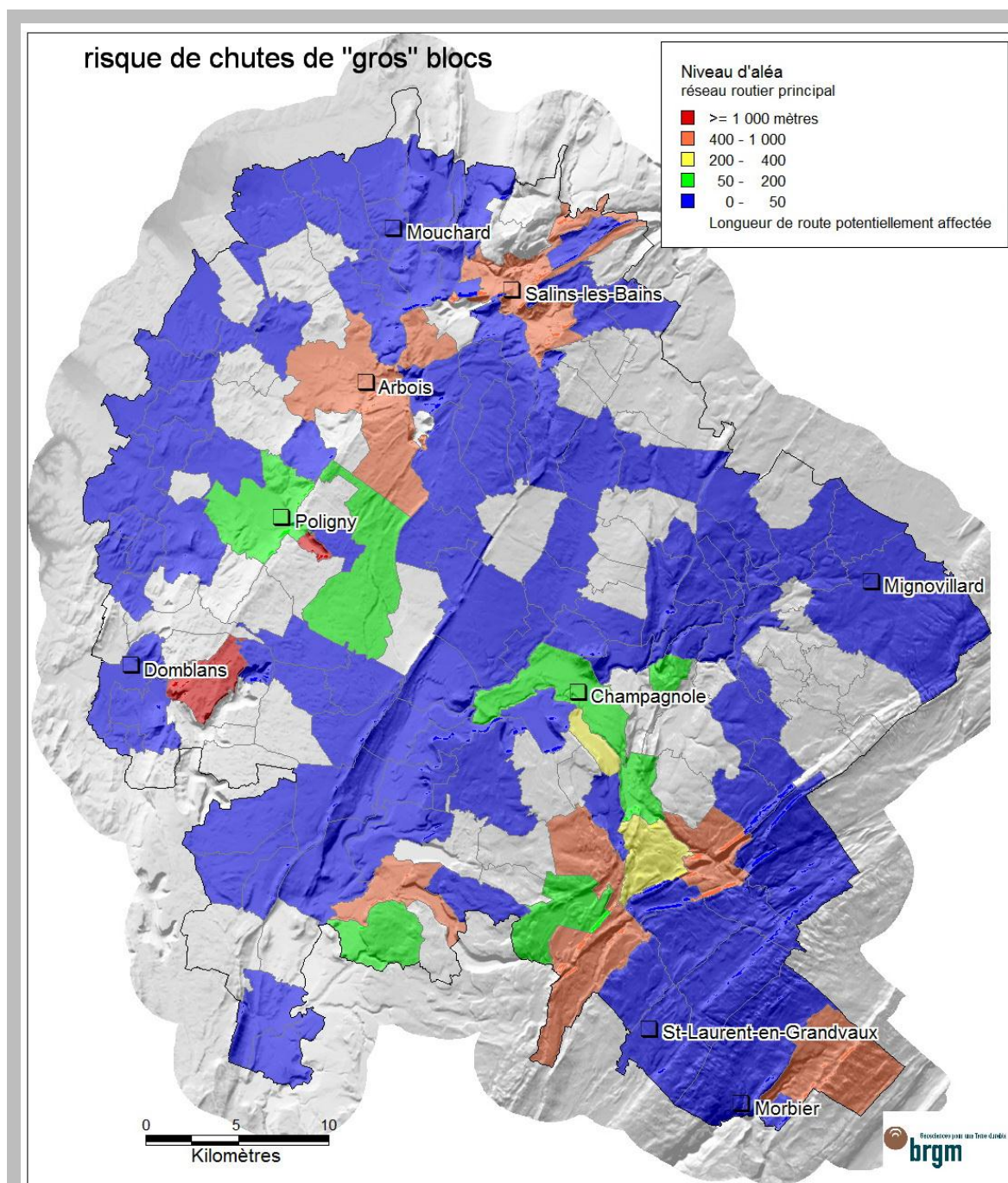
25 Carte de risque pour l'ensemble du réseau routier, longueur en kilomètre, par commune, susceptibles d'être affectée par des chutes de « gros » blocs



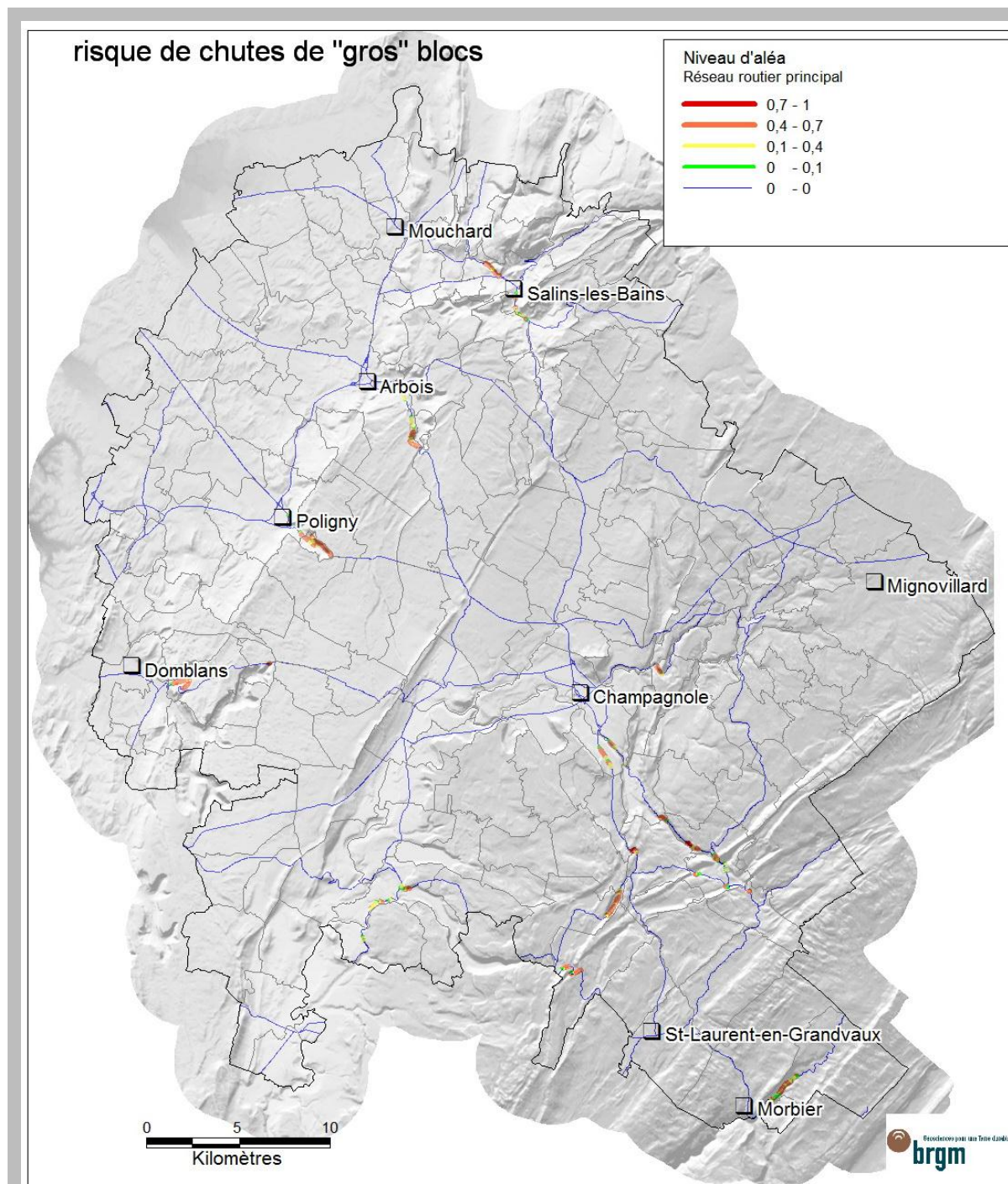
26 Carte de risque pour l'ensemble du réseau routier : réseau routier susceptible d'être affecté par des chutes de « gros » blocs et niveau d'aléa correspondant



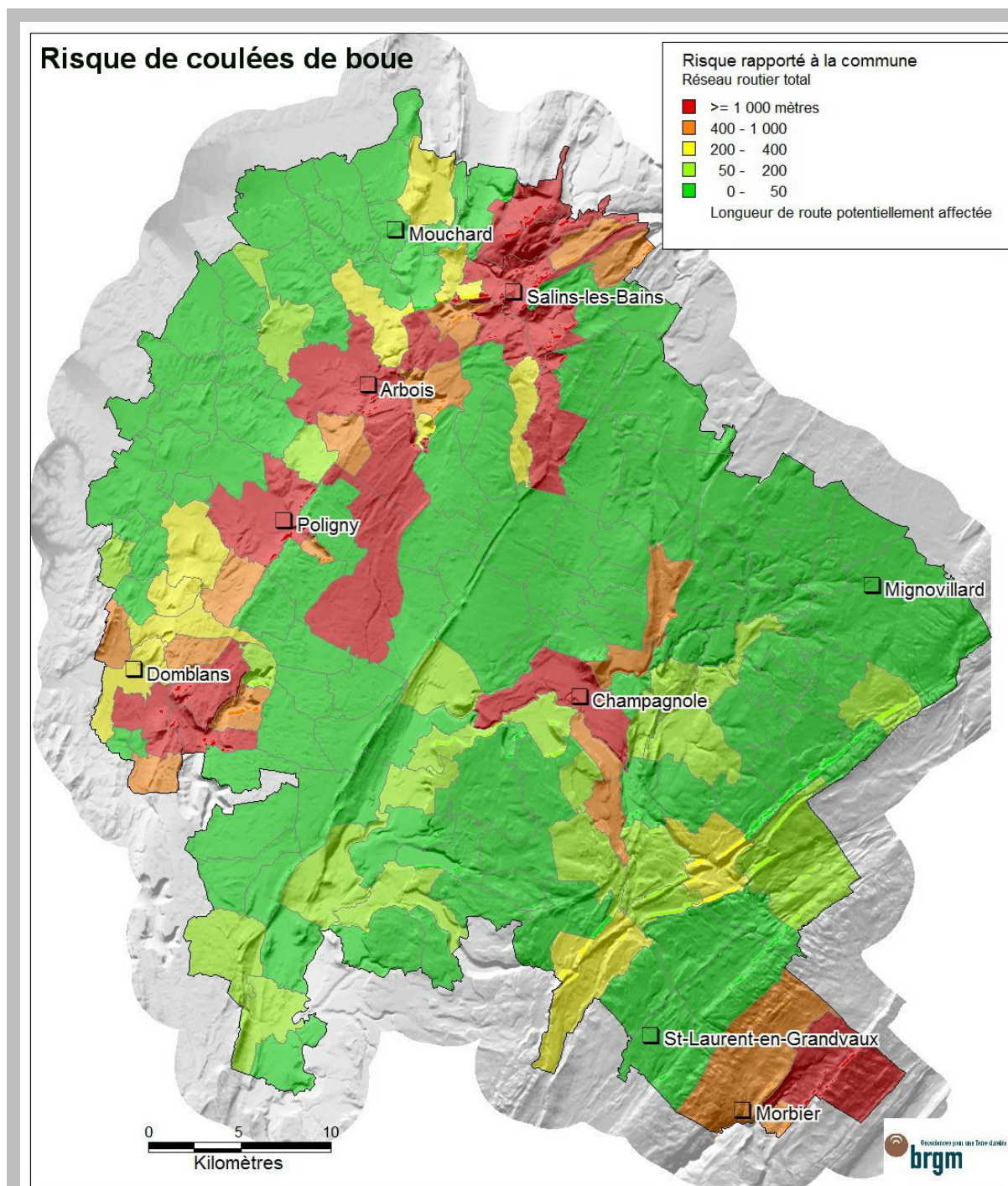
27 Carte de risque pour les principales voies routières : longueur en kilomètre, par commune, susceptible d'être affectée par des chutes de « gros » blocs



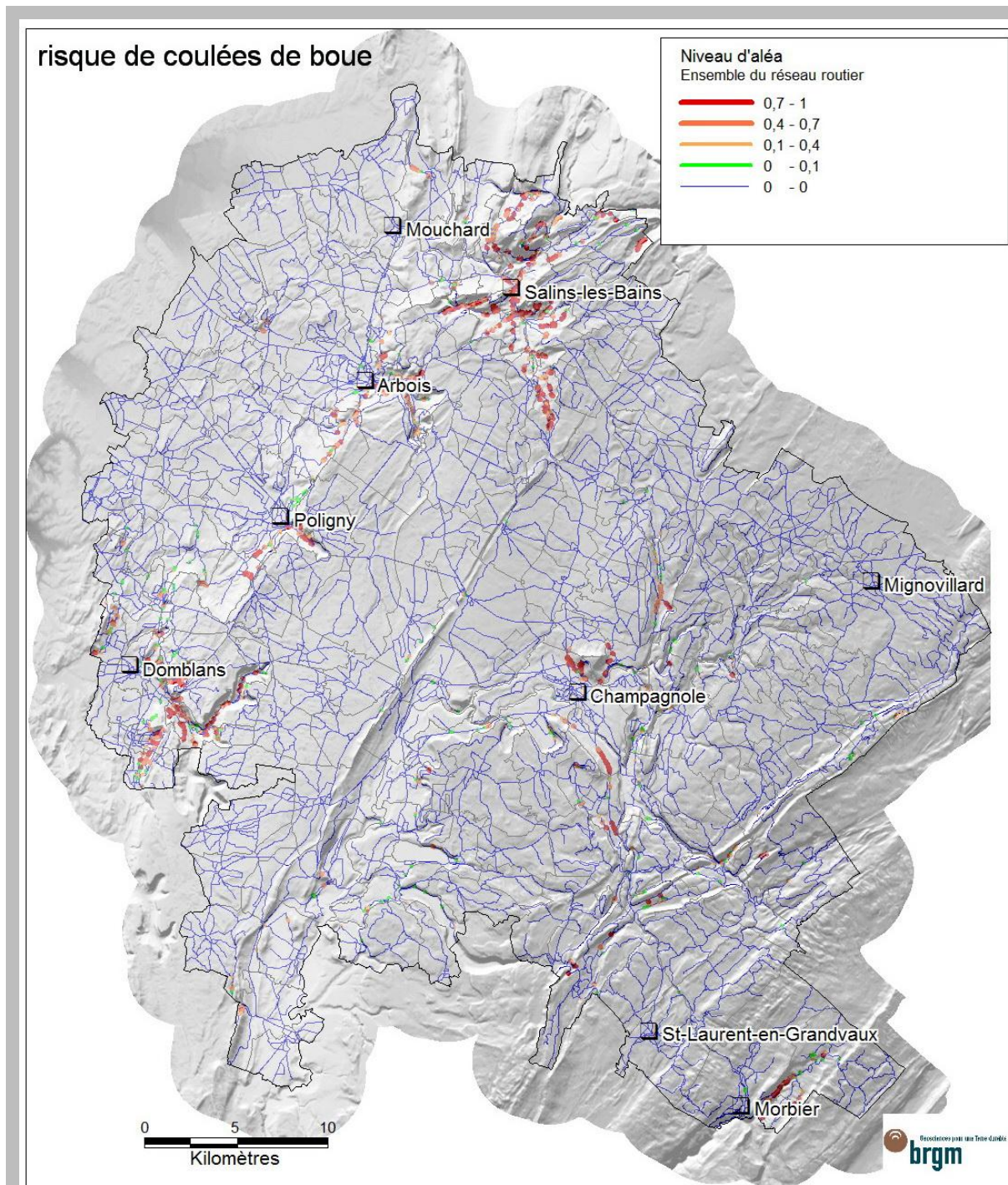
28 Carte de risque pour les principales voies routières : réseau routier susceptible d'être affecté par des chutes de « gros » blocs et niveau d'aléa correspondant



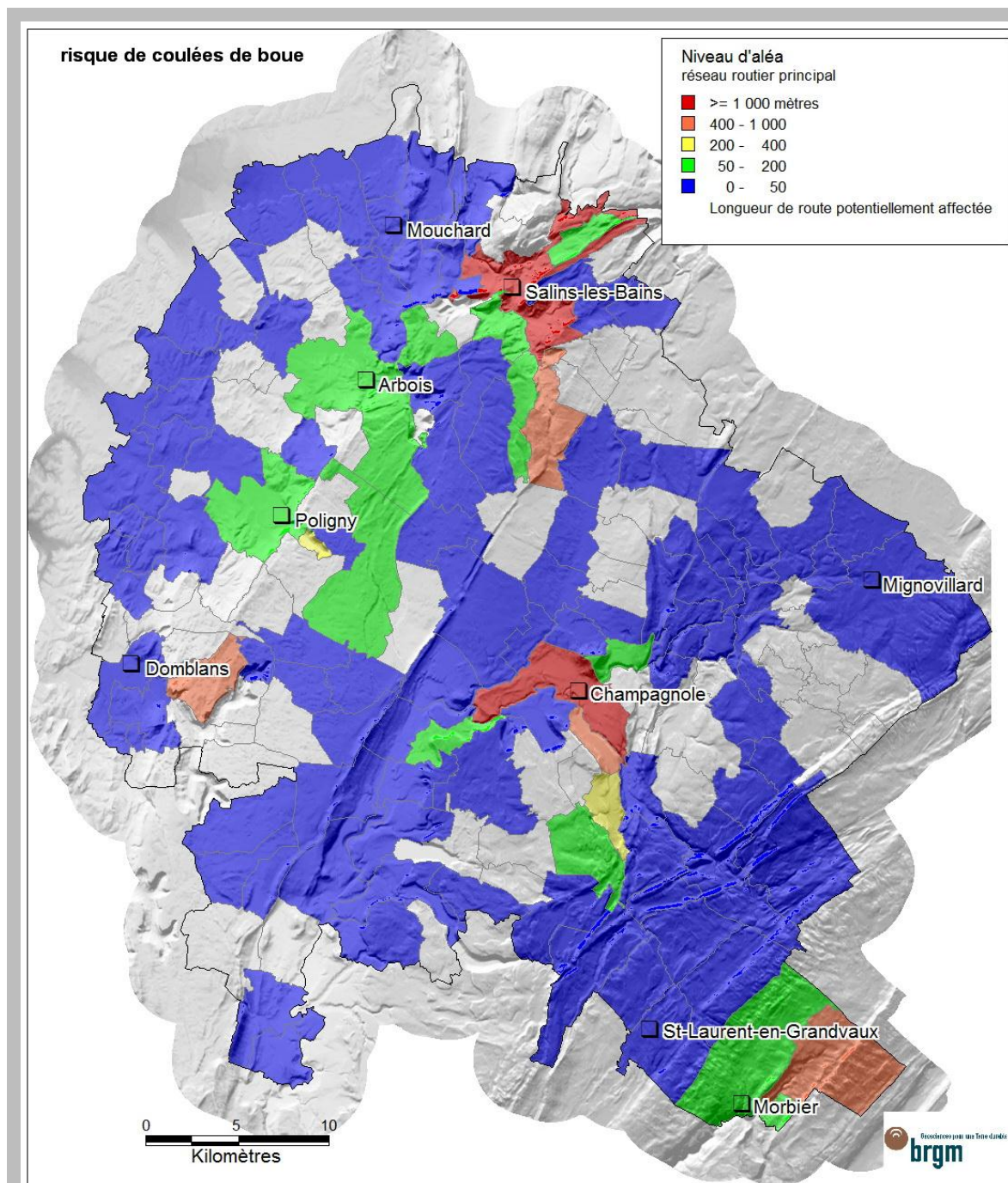
29 Carte de risque pour l'ensemble du réseau : longueur en kilomètre, par commune, susceptible d'être affectée par des coulées de boue



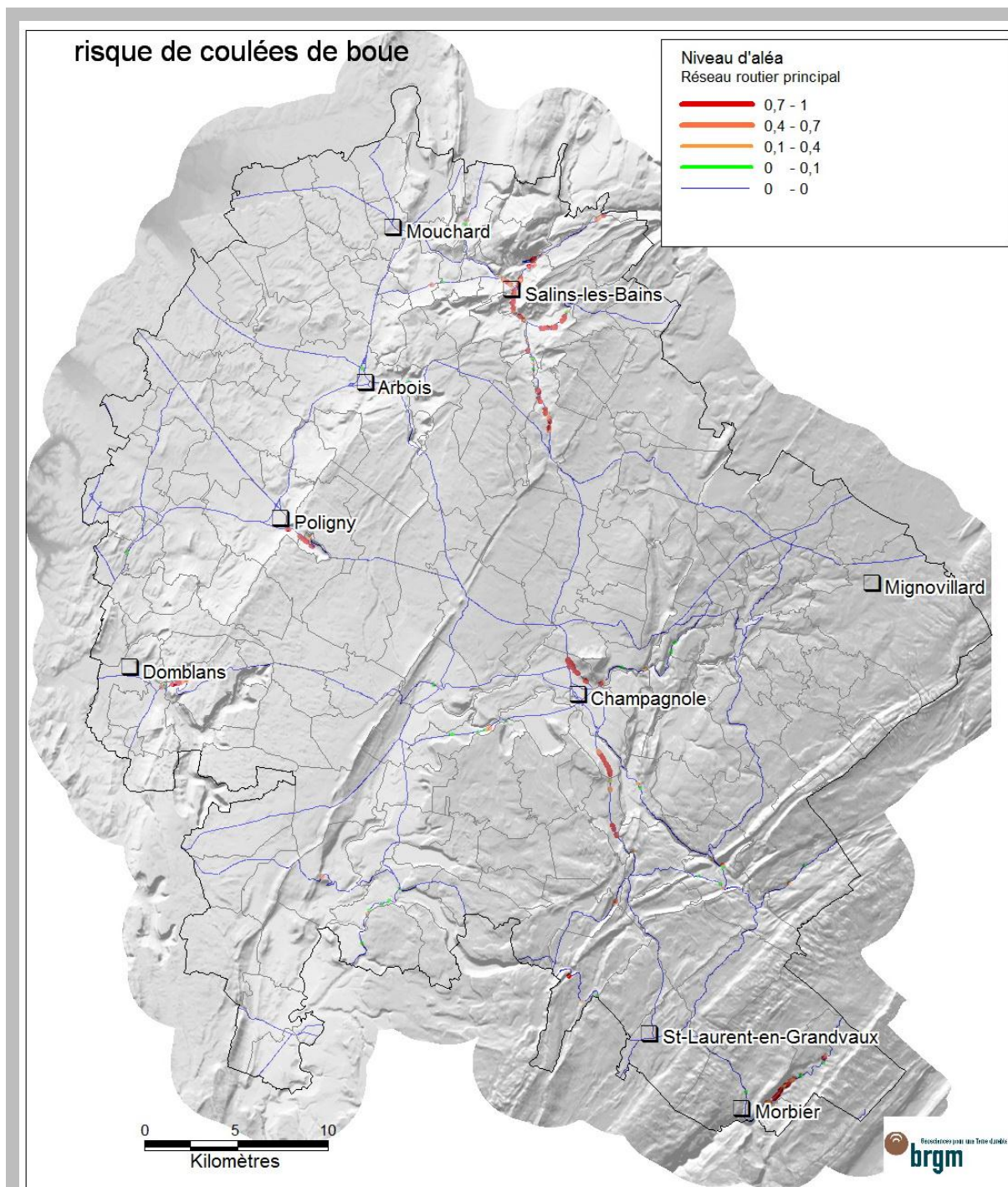
30 Carte de risque pour l'ensemble du réseau routier : réseau routier susceptible d'être affecté par des coulées de boue et niveau d'aléa correspondant



31 Carte de risque pour les principales voies routières : longueur en kilomètre, par commune, susceptible d'être affectée par des coulées de boue



32 Carte de risque pour les principales voies routières : réseau routier susceptible d'être affecté par des coulées de boue et niveau d'aléa correspondant





Centre scientifique et technique
Service Risques Naturels
3, avenue Claude-Guillemain

BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34