



Direction Départementale
Des Territoires de l'Ain
Unité Prévention des Risques
Service urbanisme et risques
23 rue Bourgmayer – CS 90410
01012 Bourg-en-Bresse cedex

Plan de Prévention des Risques Naturels



Juin 2018

Commune de Serrières-de-Briord

Etude et cartographie des aléas - Rapport technique -

Cliché page de garde :
Rocher de la Cra – Dent de Chateland (2018)

Etabli par :



Service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) de la Savoie
 Office National des Forêts
 42 Quai Charles Roissard
 73026 Chambéry Cedex
 Tel : 04.79.69.96.05
 Mail : rtm.chambery@onf.fr

Date du dernier enregistrement	Désignation du document	Numéro de devis	Nombre de pages
14/06/2018	<i>Rapport technique - Etude et cartographie des aléas – commune de Serrières-de-Briord</i>	D07-37	61

	Nom Prénom	Fonction
Auteurs	Pierre Dupire	Ingénieur géologue
	David Etcheverry	Ingénieur hydraulicien
Relu et validé	Yannick Robert	Réfèrent « zonage aléa »

Suivi des versions :

Version	Date	Observations
V0	17/05/2018	Consultation commune
V1	14/06/2018	Version restitution

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES	3
I PREAMBULE	4
I.1 Objet.....	4
I.2 Méthodologie	4
II CONTEXTE PHYSIQUE DE LA COMMUNE	5
II.1 Contexte topographique et morphologique.....	5
II.2 Contexte géologique.....	6
II.3 Contextes hydrographique, hydrologique et hydrogéologique	7
II.4 Conséquence sur les risques naturels	7
III ALEAS CHUTES DE BLOCS	9
III.1 Définition.....	9
III.2 Historique et données disponibles.....	9
III.3 Traitements préalables	10
III.4 Observations de terrain	11
III.5 Ouvrage de protection.....	15
III.6 Modélisations trajectographiques	16
III.7 Qualification de l'aléa	17
IV ALEAS GLISSEMENT DE TERRAIN	21
IV.1 Définition.....	21
IV.2 Historique et données disponibles.....	21
IV.3 Traitements préalables	21
IV.4 Observations de terrain	22
IV.5 Qualification de l'aléa	23
V ALEAS CRUES TORRENTIELLES	25
V.1 Définition.....	25
V.2 Historique et données disponibles.....	25
V.3 Observations de terrain : le ruisseau de la Perna.....	25
V.4 Analyse hydrologique	32
V.5 Modélisation hydraulique.....	37
V.6 Qualification de l'aléa	41
VI ALEAS DE RUISSELLEMENT	47
VI.1 Définition.....	47
VI.2 Méthodologie appliquée	47
VI.3 Historique et données disponibles.....	47
VI.4 Traitements préalables	47
VI.5 Observations de terrain	48
VI.6 Qualification de l'aléa	49
VII SYNTHÈSE DES ÉVÉNEMENTS HISTORIQUES	51
VIII ANNEXES	53
VIII.1 Annexe 1 : Méthode MEZAP	53
VIII.2 Annexe 2 : Description du modèle Rockyfor3D	55
VIII.3 Annexe 3 : description du logiciel HEC-RAS.....	59

I Préambule

I.1 Objet

La présente étude est réalisée pour le compte de la Direction Départementale des Territoires de l'Ain, dans le cadre de l'élaboration des cartes des aléas de mouvements de terrain et crues torrentielles pour la réalisation des Plans de Préventions des Risques Naturels (PPRN).

Le présent rapport a pour objet de garder une traçabilité des investigations entreprises durant la phase de recueil des données et d'établissement de la carte des aléas.

I.2 Méthodologie

La mission est basée selon les guides en vigueur (guide méthodologique PPRN risque mouvement de terrain, guide méthodologique PPRN risque inondation, et nouveau guide PPRN général de décembre 2016), ainsi que les nouveaux documents en cours de validation DGPR (guide PPR crue torrentielle, actualisation du guide PPR, guide MEZAP, etc.).

Le présent rapport reprend les différentes étapes réalisées :

- 1) Travail d'exploitation des données disponibles : il permet d'aboutir à une synthèse des phénomènes historiques sous forme d'un tableau associé à une carte informative des phénomènes historiques annexée au dossier. Ce travail est un préalable indispensable à toute élaboration de zonage des risques naturels. Il permet en effet de disposer des informations sur l'intensité des phénomènes, leur fréquence, l'étendue et l'atteinte de l'aléa. Cette donnée permet donc de qualifier l'aléa sur des zones où les phénomènes sont avérés et de transposer ce zonage sur d'autres secteurs qui présentent des configurations similaires.

Dans le cadre de cette phase, une réunion de travail a été organisée afin de rassembler toutes les connaissances de terrain sur l'historique des phénomènes naturels connus sur la commune. Elle s'est tenue le 12 février 2018 en mairie de Serrières-de-Briord en présence de Daniel BEGUET (maire), Jean-Claude MONTEYREMAR (adjoint) et Pierre DUPIRE (ONF-RTM). Par ailleurs, le technicien forestier local de l'ONF, Jean-Michel MERIAUX a été consulté pour sa connaissance du territoire.
- 2) Traitements préalables sur SIG : ils permettent d'orienter l'expert dans son zonage en démontrant des susceptibilités aux phénomènes.
- 3) Observations de terrain : décrites et illustrées dans ce rapport, elles apportent une expertise complémentaire par approche dite « géomorphologique ». Le travail de terrain consiste à repérer des indices, voire des traces de phénomènes, dans le but d'identifier des terrains disposant de prédispositions à la survenance des aléas étudiés. Ce travail permet d'argumenter sur le choix des scénarios de références.
- 4) Modélisation numérique des phénomènes : l'analyse géomorphologique présentée au point précédent reste relativement empirique. Le recours à la modélisation (simulation numériques des phénomènes) apporte des éléments quantitatifs complémentaires par approche scientifique. Le présent rapport aborde les différentes étapes de construction des modèles et l'analyse critique des résultats.
- 5) Application des grilles de qualification des aléas par type de phénomène : ces grilles sont détaillées dans le présent rapport.

II Contexte physique de la commune

II.1 Contexte topographique et morphologique

La commune de Serrières-de-Briord s'étend sur 8,03 km². Le territoire s'étage entre 200 m au niveau du Rhône et 621 m au niveau du plateau dominant le Rocher de la Cra.

Il est délimité à l'Ouest par le Rhône, et à l'Est par les falaises de Seyssel et du rocher de la Cra. La rivière la Perna, dont le bourg est implanté au débouché des gorges, découpe ces massifs en deux entités distinctes.

L'orientation générale des entités géographiques est Nord-Ouest / Sud-Est.

La carte suivante permet de donner une relation entre les pentes observées et l'occupation du sol. Les parties urbanisées et les zones agricoles sont relativement plates (<10°) et se retrouvent majoritairement dans la plaine du Rhône.

Les inclinaisons supérieures à 45° correspondent à des falaises qui sont des zones de dépôts de blocs et de pierres potentielles. Les portions de versant pentées aux alentours de 35° correspondent à des éboulis qui sont relativement boisés.

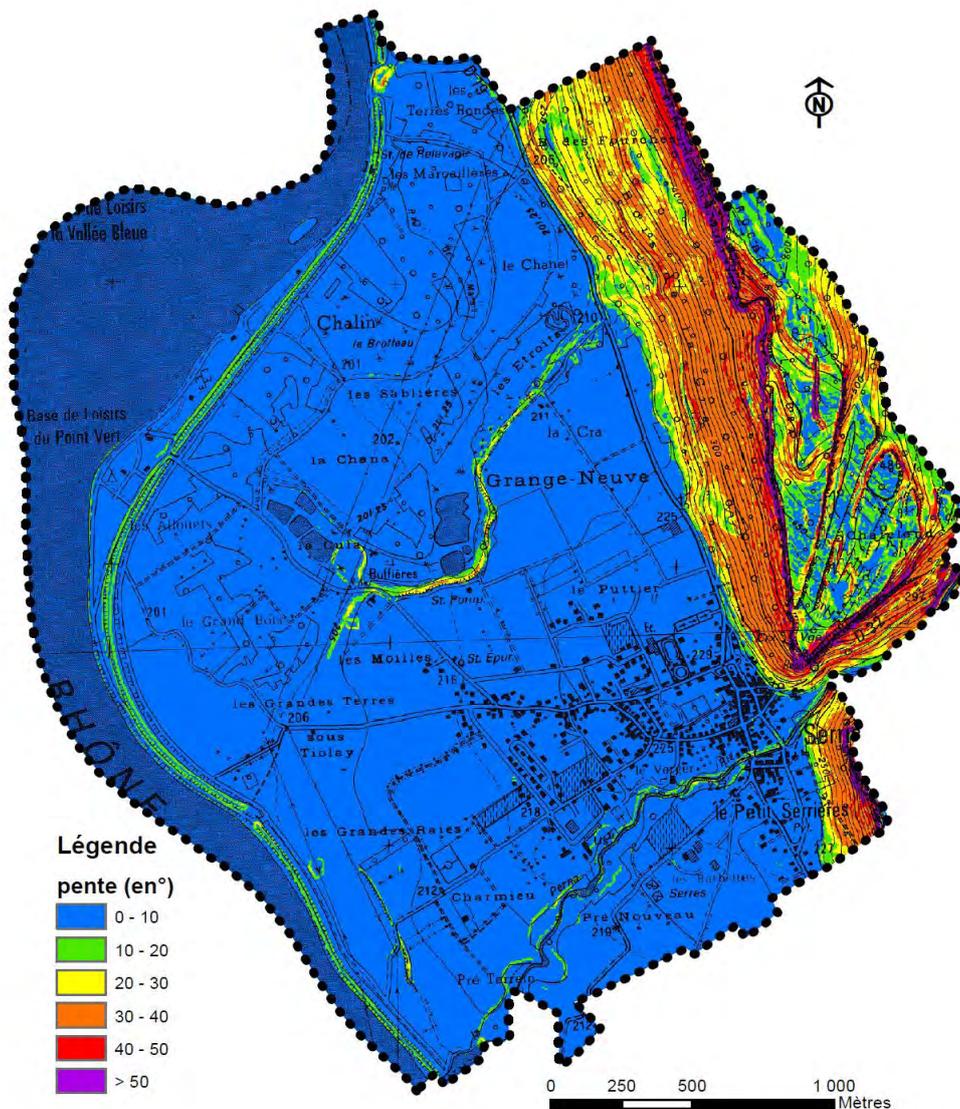


Figure 1 : carte des pentes

II.2 Contexte géologique

La commune se localise dans l'unité géographique dite du « Bas Bugey » qui fait partie du Jura méridional, correspondant à la zone plissée du Jura externe.

Il se caractérise par un faisceau de plis avec des anticlinaux en relief et des synclinaux en creux. Ce sont des structures resserrées, souvent tronquées par des accidents de même direction qui créent une ligne de relief.

Les barres rocheuses dominant la totalité du territoire communal sont constituées de formations secondaires d'origine sédimentaire et datées du Jurassique moyen.

La rivière la Perna, dont le bourg est implanté au débouché des gorges, découpe la zone d'étude en deux entités distinctes:

- en rive droite (partie nord de la zone d'étude), la falaise des rochers de la Cra constituée de calcaires datés du Bajocien, elle se présente sous la forme d'une barre sub-v verticale de hauteur très variable (de 30 m jusqu'à un maximum de 120 m environ) et continue jusqu'à l'extrémité Nord de la commune.
- en rive gauche (partie sud de la zone d'étude), la falaise de Seyssel représentée par des calcaires argilo-ferrugineux à oolithes datées du Bathoniéin ; elle possède une hauteur de l'ordre de 70 m à 80 m.

Les séries calcaires ont donné naissance au cours du temps à des éboulis, qui recouvrent aujourd'hui la partie basse des versants. Ces matériaux sont recouverts jusqu'en pied de falaise d'une végétation relativement dense.

La plaine du Rhône est tapissée d'alluvions d'origine fluviale post-würmiennes et récentes. Ces formations sont composées d'éléments caractérisés par une granulométrie particulièrement étendue.

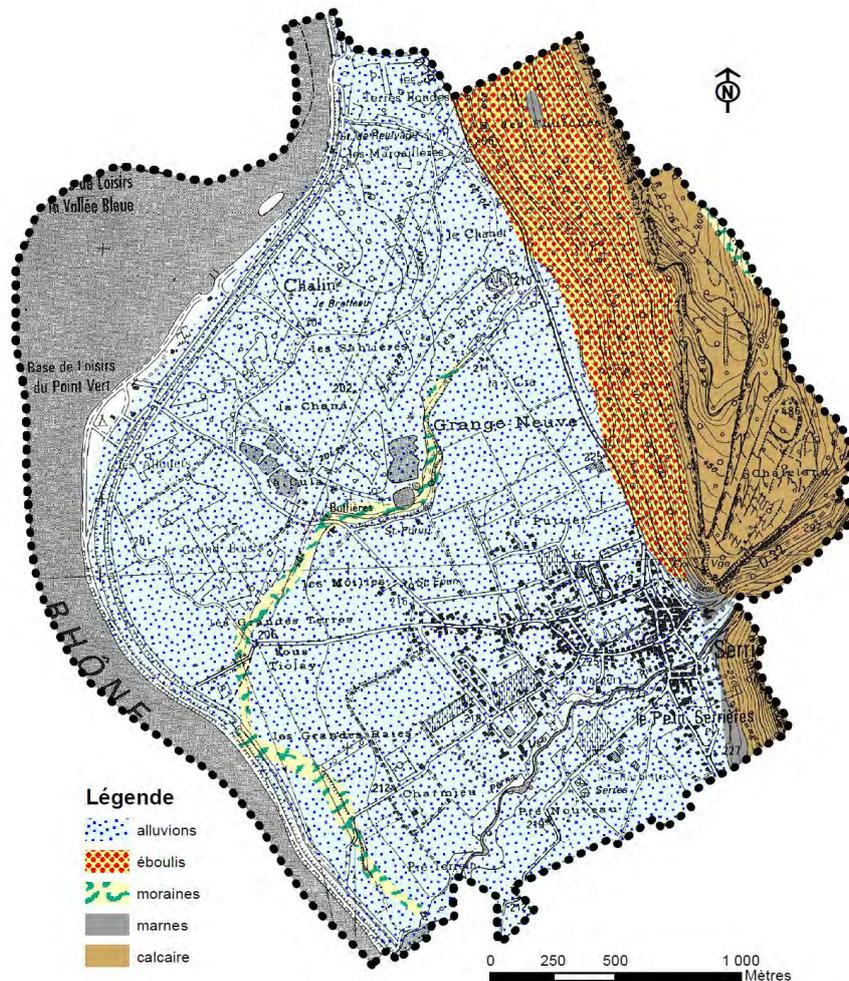


Figure 2 : carte géologique simplifiée

II.3 Contextes hydrographique, hydrologique et hydrogéologique

NB : le contexte hydrologique sera abordé plus en détail au paragraphe dédié aux crues torrentielles.

Le Rhône n'est pas abordé dans le dossier présent.

En dehors du Rhône, La Perna constitue la principale unité hydrographique de la commune. La description du cours d'eau sera détaillée plus tard.

Tout le versant du Bois du Cra fait l'objet d'écoulements directement infiltrés dans l'éboulis qui donnent des zones humides en pied de versant.

Les dépôts alluvionnaires peuvent drainer des circulations d'eau au contact entre les passées drainantes grossières (blocs galets) et les passées plus fines intercalaires. La concentration de plusieurs de ces cheminements d'eau peut constituer parfois un réservoir aquifère notamment en ce qui concerne les ravins qui se « perdent » en pied de versant. La plaine fluvio-lacustre du Rhône en est un parfait exemple avec une diversité de zones mouilleuses.

Plusieurs sources sont mentionnées dans la « *BDtopo* » de l'IGN. Elles sont situées principalement au toit des marnes oxfordiennes. En revanche il est difficile de différencier leur origine et de définir leur bassin d'alimentation.

Le secteur d'étude est connu pour sa particularité karstique qui engendre inévitablement des écoulements souterrains difficiles à appréhender en l'absence d'étude spécifique.

II.4 Conséquence sur les risques naturels

II.4.1 Concernant les glissements

Les formations géologiques ont été regroupées en fonction de leur faciès et de leur comportement géomécanique probable en vue de leur associer un critère de susceptibilité au glissement de terrain.

Ainsi :

- Les alluvions sont des formations frottantes peu sensibles. Les glissements de terrain y sont très peu probables compte tenue des pentes très faible et de la nature graveleuse des matériaux ;
- Les formations de versant telles que les éboulis ou éboulements sont généralement très frottantes et leur mode de dépôt les placent toujours en deçà de leur pente d'équilibre naturelle. Les glissements de terrain naturels sont possibles mais peu probable, par contre, leur pente souvent forte les expose à des déclenchements anthropiques ;
- Les barres de calcaires connaissent pas ou peu de glissement sauf lorsqu'ils affectent la couche de colluvions généralement peu épaisse recouvrant localement le substratum calcaire.

II.4.2 Concernant les chutes de blocs

Les zones situées sur des pentes supérieures à 45° sont vraisemblablement des zones de départ potentielles. Celles comprises entre 35 et 45° peuvent être à l'origine de remise en mouvement de matériaux déjà éboulés.

La structure du massif rocheux, la présence de plusieurs plans de discontinuités et leurs orientations constituent des paramètres prépondérants de prédisposition naturelle aux instabilités. Le phénomène de gélifraction représente le principal facteur d'évolution des séries calcaires constituant les falaises. En effet, dans une région caractérisée par des saisons hivernales relativement vigoureuses, l'alternance des cycles gel/dégel se développant dans les fissures de la roche, contribue fortement à l'érosion du massif par fragmentation. Ce phénomène, renforcé par les pressions hydrostatiques dues à la pluviométrie qui se

développent au contact des surfaces de discontinuité, conduit à une évolution relativement lente des falaises. Indépendamment de cette vitesse, ce processus d'altération est cependant inexorable. Il se traduit progressivement par le découpage d'écailles ou de prismes rocheux dont le volume est variable, mais peut être très important.

Suite à cette phase d'évolution plus ou moins longue, correspondant donc à une ouverture des surfaces de discontinuité et qui conduit l'élément rocheux à un état d'équilibre limite, on observe une accélération qui mène rapidement à la rupture. La rapidité de cette phase terminale avant la chute de l'édifice instable, explique que ce type de phénomène naturel soit difficilement prévisible.

II.4.3 Concernant les phénomènes hydrauliques

Différents processus interviennent dans la formation des crues torrentielles : l'augmentation des débits (hauteur et vitesse des eaux) mais également le transport solide. Cette alimentation se fait par charriage des matériaux présents dans le lit et sur les berges. Ces transports solides peuvent également être alimentés par des arbres, bois morts et flottants en tout genre.

Les terrains sensibles à l'érosion sont donc particulièrement propices au développement de crues torrentielles.

Des terrains sont localement sensibles à l'érosion et peuvent engendrer du charriage en crue. La composante topographique joue alors un rôle important : des replats peuvent par exemple jouer un rôle de stockage et/ou de régulation du transport solide. Par ailleurs, de par l'important couvert forestier des versants et des berges, la probabilité de transport de bois en crue est forte et engendre des risques d'obstruction d'ouvrages de franchissement (ponts, buses, dalots,...) par embâcles.

La composante solide (matériaux et flottants) sera considérée dans l'analyse des risques de chaque secteur concerné par un aléa ruissellement ou crue torrentielle.

Sur le secteur d'étude, les problématiques de transport solide prépondérant sera lié aux flottants et au risque d'embâcles. Des problèmes d'engravement seront également localement observés mais souvent là où des problèmes liés à des embâcles sont déjà existants (entrée d'ouvrage, lit à faibles gabarit avec berges végétalisées,...). Un engravement derrière embâcles favorisera d'autant plus les débordements.

III Aléas chutes de blocs

III.1 Définition

Chute d'éléments rocheux d'un volume unitaire compris entre quelques décimètres et quelques mètres cubes. Le volume total mobilisé lors d'un épisode donné est limité à quelques centaines de mètres cubes. Au-delà de ces volumes on parle d'éboulement. Il s'agit de phénomènes très rapides à forte cinétique.

III.2 Historique et données disponibles

Sources d'informations consultées :

- CETE, 1980, Etude spécifiques des risques d'éboulement rocheux et des mesures de protection concernant deux zones de falaise.
- CETE, 1996, Risque d'éboulement rocheux sur les habitations de la rue du pont.
- DDE/Alp'Géorisques, 2001, Plan de Prévention des Risques Naturels « mouvements de terrain ».
- IMSRN, 2012, Etude diagnostique vis-à-vis des chutes de blocs au droit d'un surplomb rocheux – RD32-PR1+100.
- IMSRN, 2012 Etude de sécurisation contre les chutes de blocs au droit du couloir du Belvédère, RD32-PR0+500.
- Commune de Serrières-de-Briord. Réunion de travail du 12/02/2018.

Evènements historiques :

Secteur	Date	Observation(s)	Source(s)
Rocher du Cra – sortie Nord du Bourg	1930 - 1940	Plusieurs blocs, dont la zone de départ se situe au Nord de la dent de Chateland, chutent et l'un d'eux, après plusieurs rebonds, atteint une maison située au-delà de la RD19. Cette habitation est la dernière avant la sortie Nord du bourg. Le bloc cause des dégâts importants à la construction sans faire de dommage corporel.	PPR 2001 Commune
Seyssel	1930 - 1940	Plusieurs éléments rocheux se détachent de la falaise de Seyssel et leur trajectoire atteint des terrains (à l'époque occupés par des vignes) situés entre la rue du Pont et le chemin du petit Serrières (propriété actuelle VIDON).	PPR 2001 Commune
Rocher du Cra	année 1950	Un bloc (au moins), détaché du rocher du Cra, s'est arrêté quelques mètres au-delà de la RD19, dans un terrain proche du cimetière.	PPR 2001 Commune
Seyssel	17/03/1967	En fin de journée (21h-22h), un prisme rocheux se détache de la falaise de Seyssel, en partie haute de la paroi, et dévale le versant. Deux blocs, dont le poids du plus gros a été estimé à environ 13 tonnes, terminent leur chute dans la propriété de Mme Mithivier, à quelques mètres l'un de l'autre et à une dizaine de mètres de l'habitation, après semble-t-il, avoir été déviés par un arbre. Un troisième bloc, de taille légèrement inférieure, a emprunté une trajectoire sensiblement différente et s'est arrêté à une trentaine de mètres de là, et à une dizaine de mètres seulement de la Perna.	PPR 2001 Commune
Nord de la commune - RD19	vers 1990	Plusieurs éléments se seraient détachés de la paroi, au Nord de la commune. Les plus importants auraient atteint le pied du versant au niveau du "Rocher du Gros Carre". Aucun dommage autre qu'à la végétation n'est à déplorer.	PPR 2001 Commune
Rocher du Cra	vers 1995	Un bloc, de 2 tonnes environ, issu de la paroi dominant la RD32, est stoppé par la chaussée, sans faire de dommage matériel ni humain.	PPR 2001 Commune
Seyssel	2014	Un bloc d'un mètre cube dépasse le chemin au Sud du merlon	Commune
Rocher du Cra	régulièrement	Des pierres et des blocs, dont la dimension reste relativement réduite, se détachent de façon fréquente de la falaise en rive droite de la Perna, et terminent le plus souvent leur chute sur la RD32. C'est notamment le cas vers le réservoir	PPR 2001 Commune

Tableau 1: historique des phénomènes de chutes de blocs

III.3 Traitements préalables

Il est admis qu'une pente supérieure à 45° est constituée d'un substratum rocheux (les sols meubles ne tenant pas sur de telles pentes). Par conséquent toute pente supérieure à 45° est potentiellement composée d'affleurements rocheux pouvant libérer des blocs.

Un premier traitement a donc consisté à mettre en avant les portions de versants disposant de telles pentes (cf. carte ci-contre). Ces secteurs sont potentiellement des zones de départ de blocs qui peuvent être masqués par la végétation par exemple. Ce travail permet, en outre, de localiser des petits affleurements masqués par la végétation qui auraient pu ne pas être aperçu en phase de reconnaissance de terrain.

Les zones de départs ont ensuite été intégrées dans un traitement automatisé à l'aide d'un logiciel de modélisation de chutes de blocs : Rollfree® (développé par l'IRSTEA).

Cette carte a servi d'aide à la décision pour l'expert. Elle est basée sur un traitement numérique automatisé projetant une surface à pente constante, depuis les points en sommets de falaise jusqu'à l'intersection de cette surface virtuelle avec la surface topographique en pied de versant.

Usuellement, l'extension maximale des chutes de blocs ne dépasse pas une pente, mesurée depuis le sommet de falaise, de 30° .

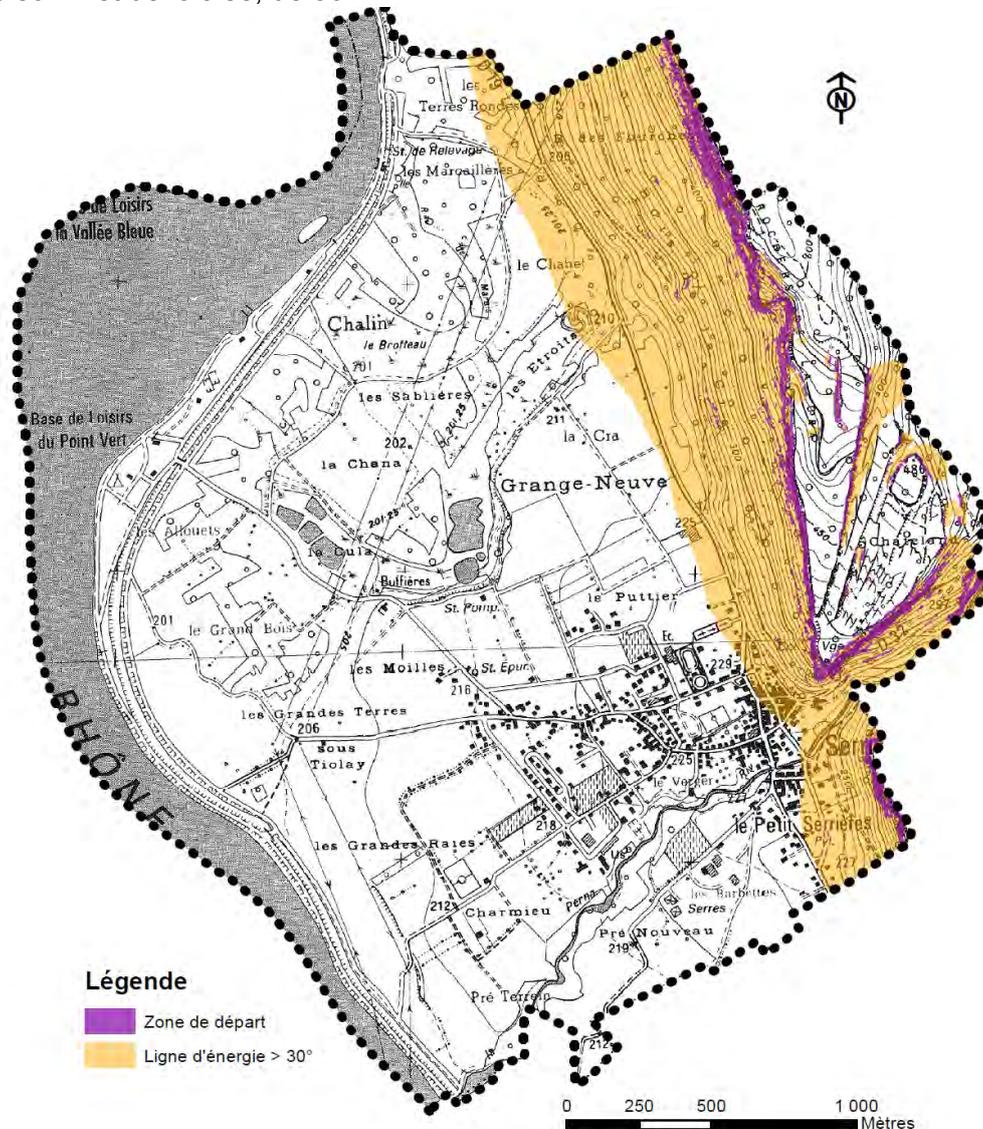


Figure 3 : Carte des zones d'atteintes potentielles de chutes de blocs

La présente carte montre une zone d'enjeux urbanisés importante pouvant être affectée par les chutes de blocs. Cette dernière sera traitée par une modélisation trajectographique.

III.4 Observations de terrain

Remarque : les observations de terrain ont été réalisées à distance. Le présent marché ne prévoyait pas de reconnaissances en techniques alpines.

III.4.1 2.2.1 Aperçu structural

Les séries calcaires jurassiques présentent une stratification subhorizontale. Par ailleurs, deux familles différentes de fractures affectent le massif rocheux et sont à l'origine de sa structure actuelle. Ces accidents, observés à l'échelle locale, sont conformes aux accidents tectoniques majeurs affectant la chaîne jurassienne :

- fractures principales orientées sensiblement N-NW / S-SE ;
- fractures secondaires orientées sensiblement NE / SW.

Ces plans de discontinuités d'origine tectonique, combinées à la stratification des calcaires, sont directement à l'origine du découpage du massif en compartiments de tailles et de formes diverses, lui conférant un caractère relativement désorganisé.

III.4.2 Secteur de Seyssel

On peut distinguer, du Nord au Sud, deux zones:

- sur 200 m environ, une paroi d'une quarantaine de mètres de hauteur environ composée de deux "bancs" bien individualisés par une vire ; la zone de départ des blocs éboulés lors de l'événement du 17/03/1967, nettement visible aujourd'hui encore, appartient à cette barre calcaire.
- sur 150 m environ, la falaise qui présente une hauteur sensiblement identique, se situe à une altitude légèrement supérieure. L'examen détaillé de cette zone met en évidence l'existence de plusieurs compartiments ou écaillés rocheux prédécoupés par la fracturation et caractérisés par une stabilité relativement précaire.



Figure 4 : vue d'ensemble des deux zones de la falaise de Seyssel

Sur ces parois se distinguent plusieurs compartiments très massifs allant d'une centaine de mètres cubes jusqu'à des milliers de m³. Ceux-ci sont sous-cavés et disposent de fractures ouvertes visibles à distance. Leurs mobilisations ne semblent pas imminentes à l'échelle centennale. Le découpage rocheux de ces derniers donnerait après fractionnement lors de la chute, vraisemblablement des blocs de plusieurs mètres cubes.

Notons la présence de blocs anciennement éboulés (environ 1 à 3 m³) dont l'équilibre paraît précaire puisque ces derniers reposent simplement sur une vire.

Par ailleurs, la chute de pierres et de petits blocs isolés (jusqu'à un volume de l'ordre d'1/2m³) sur l'ensemble de la falaise de Seyssel, est très élevée à court terme. On distingue en effet de nombreuses pierres surplombantes ainsi que des écaillages par altération de la surface de la falaise. Dans leur très grande majorité, ces blocs éboulés sont très rapidement stoppés au pied de la barre rocheuse ou dans les premiers mètres du couvert végétal.



Figure 5 : blocs éboulés posés sur la vire et petites masses instables

III.4.3 Secteur du rocher de la Cra

Cette paroi rocheuse se situe dans les 2/3 Nord de la commune. Des éboulis, présents sur la quasi-totalité du versant, témoignent de l'activité passée de la falaise. Au Sud de la barre rocheuse, s'observe la Dent de Chateland, séparée d'une dizaine de mètres de la falaise proprement dite par un couloir. Sa hauteur du côté aval est de 30 mètres. Au sommet, elle présente une largeur d'environ 7 m pour une longueur de 20 m. L'examen détaillé de cet ensemble réalisé par le CETE en 1980 montre que son évolution se traduit par un très lent mouvement de dislocation en direction de l'Ouest. Le risque d'éboulement en masse apparaît ainsi faible à long terme, tout du moins à l'échelle centennale.

Toutefois, de nombreuses instabilités sont visibles au droit de cette dent :

- sur la face Ouest de la Dent, la présence de masses rocheuses de quelques m³, décollées par l'arrière par des fractures. La chute de blocs jusqu'à 0,5 m³ issus de ces masses semble présenter une probabilité relativement élevée à moyen terme
- dans la partie inférieure de la Dent, l'existence de surplombs et de zones soucavées à l'origine de chutes régulières de pierres et petits blocs [a], dues à un phénomène d'éboulement régressif par altération différentielle des niveaux plus gélifs de la base. Les blocs les plus importants susceptibles de se détacher ne semblent pas devoir dépasser un volume voisin de 0,5 m³

- sur la dent elle-même, la présence de plusieurs compartiments importants pré-découpés par la fracturation. Le risque d'éboulement de ces éléments rocheux semble relativement limité à moyen terme. Par contre, des blocs de volume jusqu'à 0,5 m³ paraissent pouvoir se détacher de ces compartiments à court terme.
- le soubassement de la Dent de Chateland, Cette partie est caractérisée par l'existence de plusieurs compartiments en surplomb. Le plus important d'entre eux présente un volume approximatif de 300 m³ [b]. Il est entièrement découpé par des fractures ouvertes de grande extension, et se caractérise à la base par un soucavage de plusieurs mètres. Ce dernier progresse par altération régressive de la base. Ce compartiment, dont le mécanisme d'évolution tend à le faire basculer vers l'Ouest, est en équilibre instable et présente un risque d'éboulement élevé à court terme.

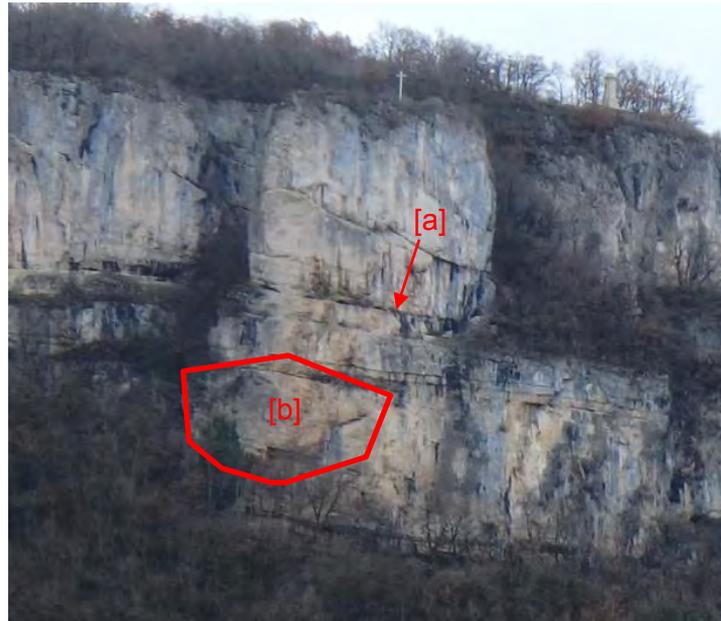


Figure 6 : instabilités sur la Dent de Chateland

La falaise située en arrière de la Dent de Chateland : Elle est constituée d'une barre rocheuse de 30 m à 50 m de hauteur.

- Au Nord, plusieurs zones soucavées sont observables, notamment à une centaine de mètres où plusieurs éléments de quelques m³ apparaissent en équilibre instable. Ils présentent par conséquent une probabilité de mise en mouvement relativement élevée à plus ou moins court terme. Toute cette partie de la falaise est par ailleurs susceptible de générer, de façon relativement fréquente au regard des éboulis présents dans le versant, la chute d'éléments isolés. La taille de ces derniers, de façon générale, devrait rester inférieure à 0,5 m³, avec une zone d'épandage de ce fait relativement peu étendue.



Figure 7 : masses instables au Nord de la Dent

- Au Sud de la Dent, de nombreux surplombs sont observables. Le réseau de fractures découpe des éléments dont le volume peut atteindre au maximum plusieurs dizaines de m³. La probabilité d'éboulement en masse de ces éléments est variable mais peut être imminente pour certains. Par ailleurs, la chute de blocs isolés de 100 l à 1 m³ présente une probabilité élevée à court ou moyen terme. Cette falaise arrière présente ainsi des risques globalement assez importants de manifestation du phénomène étudié.



Figure 8 : masses instables au Sud de la Dent

Au Nord de l'intersection RD32/RD19, la falaise n'a pas fait l'objet d'un examen détaillé. Toutefois, son observation depuis le pied du versant met en évidence la présence de plusieurs compartiments prédécoupés et de zones en surplomb (selon les mêmes familles de discontinuités observées aux alentours de la Dent). De nombreuses cicatrices sont par ailleurs nettement identifiables dans la paroi (patine jaunâtre sur la falaise). De nombreux blocs sont également visibles dans la pente, certains ayant atteint le pied de versant. Ceux-ci peuvent dépasser les 10 m³ pour les plus gros.



Figure 9 : falaise au Nord de la commune

III.5 Ouvrage de protection

Il existe un ouvrage de type merlon pare-bloc sur le secteur de Seyssel dans le quartier du Petit Serrières. Celui-ci a été réalisé sous maîtrise d'ouvrage de particuliers dans les années 1990. Il est organisé en deux parties :

- partie Nord : merlon à parement amont raidi en pneusols sur 2,5 à 3 m de hauteur, sur 30 m de longueur avec une fosse de 3 m.
- partie Sud : merlon en déblai-remblai à 1/1 de 3 à 3,5 m de hauteur, sur 40 m de longueur avec une fosse de 4 m.

Les deux merlons sont joints, toutefois à leur jonction se distingue une échancrure où la hauteur n'est plus que d'1m70 environ.

L'ouvrage n'est pas entretenu, les remblais s'affaissent et la végétation est abondante. Par ailleurs, cet ouvrage n'a pas fait l'objet d'un dimensionnement fonctionnel et il est manifestement sous dimensionné au regard de l'aléa en amont.



Figure 10 : à gauche : merlon Nord, à droite : merlon Sud

III.6 Modélisations trajectographiques

III.6.1 Périmètre modélisé

Les zones modélisées se localisent à l'aplomb des secteurs urbanisés ce qui correspond dans le cas présent à la moitié Sud de la commune (tout ce qui se situe au Sud de l'entreprise Serrières-Viti-Agri).

III.6.2 Description du modèle

Les calculs trajectographiques ont été réalisés avec le logiciel Rockyfor3D[®] développé par Ecorisq (association Franco-Suisse : IRSTEa et l'EPFL). Ceux-ci considèrent les trajectoires possibles des blocs selon les 3 dimensions (X, Y, Z).

Pour plus d'informations sur le logiciel et ses caractéristiques techniques : <http://www.ecorisq.org> (voir aussi la description du modèle en annexe 2). Ce modèle permet :

- d'une part, comme l'ensemble des modèles, de donner des valeurs quantitatives sur les propagations des blocs : probabilité d'atteinte, hauteur de passage, énergie cinétique, etc. ;
- d'autre part, de considérer les effets de talweg (chenalisation des blocs dans les dépressions topographiques) grâce à son application 3D.

III.6.3 Acquisition topographique

Le MNT (Modèle Numérique de Terrain) utilisé est construit à partir d'un relevé lidar de l'IGN de 2014. La donnée brute a été traitée par le département ONF-RDI à l'aide de l'outil Lastools. La précision des dalles utilisées est de 1m.

III.6.4 Données d'entrées au modèle

Les paramètres utiles au fonctionnement du modèle sont les hypothèses de départ (volume, forme, densité rocheuse) et les types de sols (compacité, rugosité). Ces valeurs sont renseignées sur SIG et « injectée » au logiciel RF3D.

Chaque type de sol est défini par 9 critères de détermination (voir annexe 2 pour plus de détails) : dimensions du bloc selon ses trois axes ($d1$, $d2$, $d3$), densité du bloc ($rocdensity$), la forme type du bloc ($blshape$), le type de sol ($soiltype$), la rugosité de surface selon le pourcentage de probabilité ($rg10$ / $rg20$ / $rg70$).

Les hypothèses de départ retenues correspondent à un bloc de 10 m³ sur les deux falaises. Ce type de bloc est connu dans l'historique, les reconnaissances du CETE avaient également mis en évidence des masses de ce volume pouvant se décrocher. Pour chaque pixel de 1 m identifié comme zone de départ, il a été lancé 1000 blocs.

Remarque : conformément à la position de la DDT, le bâti est considéré dans les modélisations. Cette démarche permet de prendre en compte l'urbanisation sans l'effacer puisque les habitations sont des obstacles topographiques bels et bien présents à l'instant T de la cartographie. Toutefois, ces obstacles peuvent être détruits ou très affectés selon l'ampleur de l'événement. Il convient donc de les considérer aussi comme franchissables. Par conséquent, pour prendre en compte ces deux paramètres opposés, il a été appliqué une rugosité augmentée sur chaque emplacement de maison.

III.6.5 Résultats

Les illustrations suivantes correspondent aux nombres de blocs ayant traversé chaque cellule (ou pixel). Elles permettent de constater l'étendue du phénomène et de mettre en évidence les trajectoires préférentielles.

Les cartes de probabilité d'atteinte et des énergies issues des modélisations sont abordées dans la qualification des aléas.

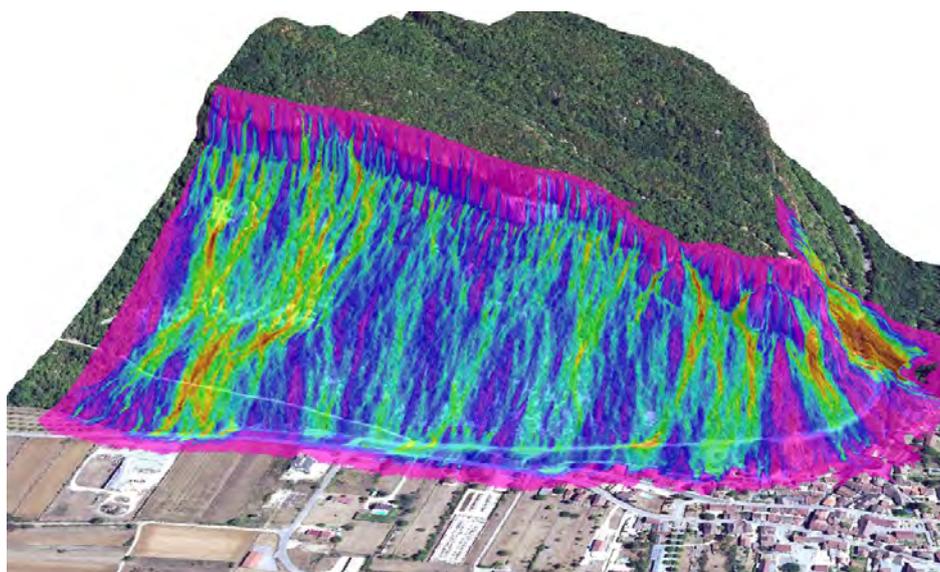


Figure 11: carte des modélisations RF3D du Rocher de la Cra

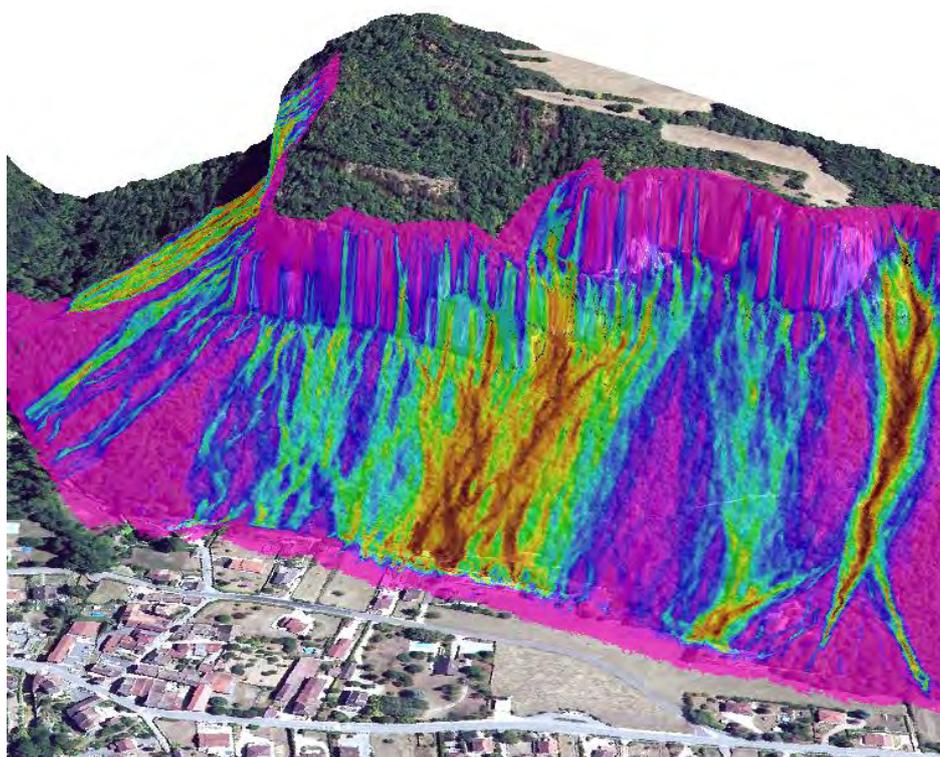


Figure 12: carte des modélisations RF3D de la falaise de Seyssel

III.7 Qualification de l'aléa

La carte suivante montre le traitement appliqué par type de secteur.

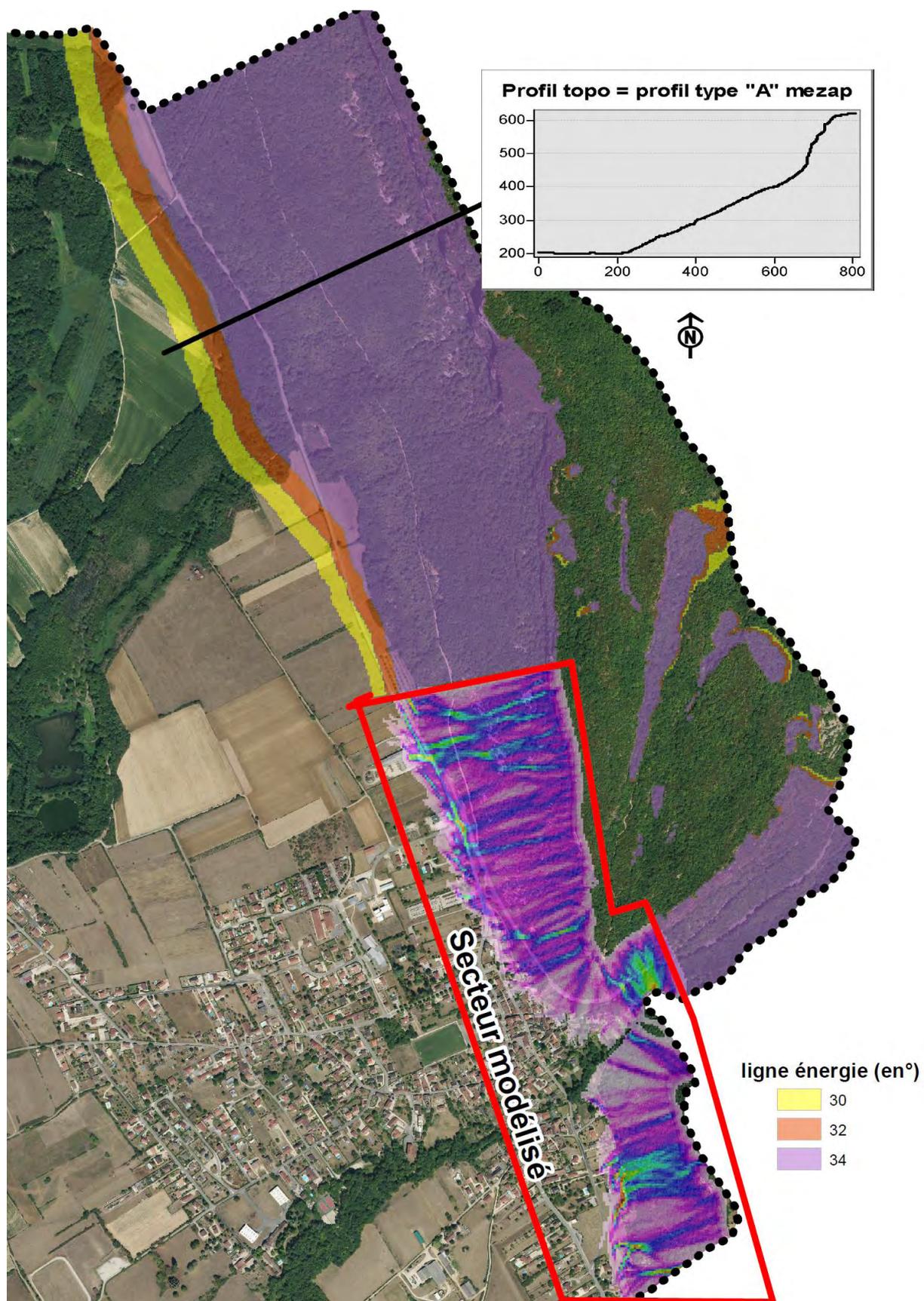


Figure 13 : Traitement appliqué aux phénomènes chutes de blocs

III.7.1 Zones « hors enjeux urbanisés »

Conformément au guide méthodologique en vigueur, les zones « hors enjeux urbanisés » et à enjeux isolés, sont traitées par application du guide MEZAP¹.

Cette méthode empirique consiste à croiser l'intensité avec la probabilité d'occurrence qui est elle-même issue d'une matrice interceptant la probabilité d'atteinte avec l'activité.

		Intensité				Eboulement de grande ampleur
		V≤0,25 m ³	0,25<V≤1 m ³	1<V≤10 m ³	V>10 m ³	
		Faible	Modérée	Elevée	Très élevée	
Probabilité d'occurrence	Faible	Faible (P1)	Moyen (P2)	Fort (P3)	Fort (P3)	Très fort (P3)
	Modérée	Faible (P1)	Moyen (P2)	Fort (P3)	Fort (P3)	Très fort (P3)
	Elevée	Moyen (P2)	Fort (P3)	Fort (P3)	Très fort (P3)	Très fort (P3)
	Très élevée	Fort (P3)	Fort (P3)	Très fort (P3)	Très fort (P3)	Très fort (P3)

Tableau 2: grille de qualification des aléas chutes de blocs en zone non urbanisée

L'intensité est observée sur le terrain (blocométrie). La probabilité d'atteinte est modélisée via le logiciel Rollfree (développement IRSTEA) et validée sur le terrain par mesures aléatoires au clisimètre. L'activité est appréhendée par l'analyse de l'historique et l'observation de blocs éboulés sur le terrain. Le détail de la méthode est donné en annexe 1.

Ce traitement est appliqué à la partie Nord de la commune (au Nord de l'entreprise Serrières-Viti-Agri)

a) Intensité

Avec la présence de blocs anciennement éboulés dont le volume oscille entre 1 et 10 m³, l'intensité est considérée comme élevée à très élevée.

b) Activité

Deux paramètres permettent ici de donner une activité forte : la multitude de blocs éboulés dans le versant (visible jusqu'en pied de pente), et les très nombreuses cicatrices observables sur la paroi rocheuse (patine jaunâtre) qui correspondent à des zones de dépôts assez récentes.

c) Probabilité d'atteinte

Le profil topographique de la zone en question correspond au profil A défini par MEZAP (cf. annexe 1). Les probabilités d'atteintes sont donc faibles pour une ligne d'énergie de 30°, moyennes à 32° et fortes à 34°. La carte du paragraphe III.3 servira donc de référence pour les zones naturelles.

d) Aléa brut résultant

Le croisement donne un aléa fort jusqu'en pied de versant du fait d'une intensité élevée qui prend le pas sur les autres paramètres.

¹ MEZAP : MEthode de Zonage de l'Aléa chutes de Pierres (guide de référence en matière de cartographie des aléas chutes de blocs pour les cartographies d'urbanisme type PPR)

III.7.2 Zones d'enjeux

Les zones d'enjeux ayant fait l'objet de modélisations disposent d'un croisement similaire mais moins empirique (appuyé sur des données quantitatives numériques).

Intensité		Probabilité d'atteinte		
Forte	> 300 kJ	Fort (P3)	Fort (P3)	Fort (P3)
Moyenne	30 kJ < I < 300 kJ	Fort (P3)	Moyen (P2)	Moyen (P2)
Faible	< 30 kJ	Moyen (P2)	Moyen (P2)	Faible (P1)
		Forte	Moyenne	Faible

Tableau 3 : grille de qualification des aléas chutes de blocs en zone urbanisée

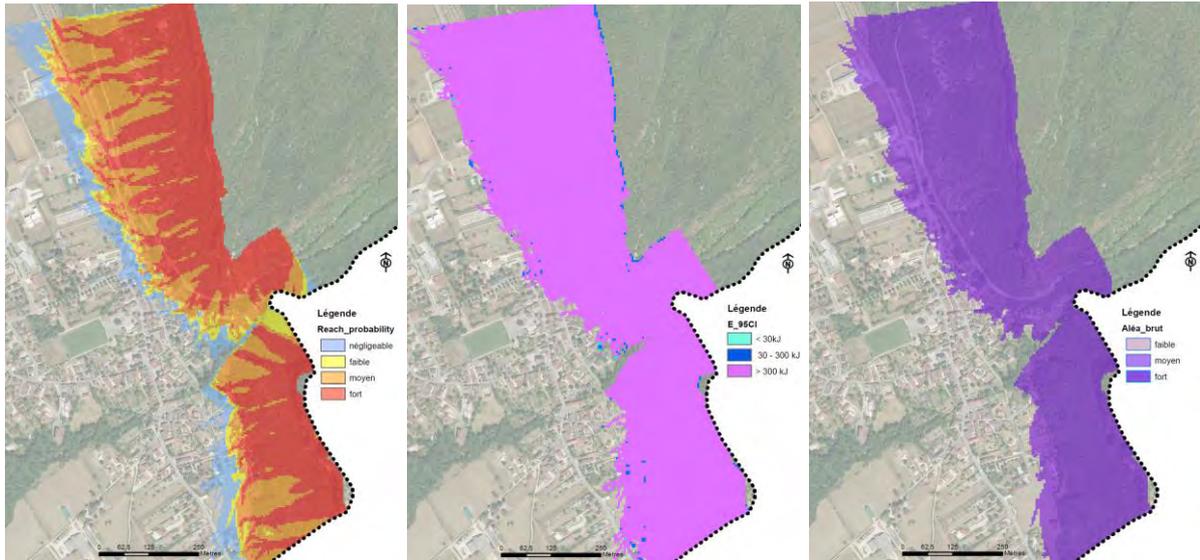


Figure 14 : Croisement probabilité d'atteinte avec intensité et aléa brut résultant

III.7.3 Aléas résultants

L'utilisation des deux méthodes (MEZAP en zone naturelle et modélisations trajectographiques en zone urbaine) s'accordent à donner un aléa unique : un aléa fort.

Ce classement provient de l'intensité potentielle du phénomène. En effet, les falaises peuvent produire des éboulements de plusieurs mètres cubes. L'historique corrobore d'ailleurs assez bien ce constat. Les diverses études des parois rocheuses listées au §III.2 évoquent également des compartiments rocheux volumineux pouvant se décrocher.

S'ajoute à ces aléas de départ une configuration topographique marquée par de grandes parois très verticales dont les hauteurs sont importantes et une zone de propagation finalement assez peu étendue avant les premiers enjeux. Les blocs arrivent donc en pied de versant avec une vitesse élevée et donc une énergie forte pouvant être destructrice.

Notons des différences notoires entre le présent zonage et celui du précédent PPR notamment en termes d'étendue et de degrés d'aléa.

- Sur l'étendue, le présent zonage est basé sur une modélisation 3D reconnue comme plus fidèle à la réalité. Les habitations ont été considérées comme obstacles topographiques conformément aux attentes de la DDT. Il en demeure un zonage souvent plus restreint.
- Concernant le degré d'aléa : il s'avère globalement plus sécuritaire. Cela tient en partie du fait que dans les PPR antérieurs, l'aléa se basait sur la probabilité d'atteinte. Les méthodologies de qualification ont changé depuis : il est aussi considéré l'intensité du phénomène. Or les modélisations sont sans appel : avec une énergie supérieure à 300 kJ, l'intensité (mesurée par les éventuels dégâts au bâti) est forcément forte.

IV Aléas glissement de terrain

IV.1 Définition

Mouvement d'une masse de terrain meuble d'épaisseur variable le long d'une surface de rupture.

L'ampleur du mouvement, sa vitesse et le volume de matériaux mobilisés sont éminemment variables : glissement affectant un versant sur plusieurs mètres (voire plusieurs dizaines de mètres) d'épaisseur, coulée boueuse, fluage d'une pellicule superficielle.

IV.2 Historique et données disponibles

Sources d'informations consultées :

- Commune de Serrières-de-Briord. Réunion de travail du 12/02/2018.

Evènements historiques :

Aucun évènement n'est signalé sur le territoire

IV.3 Traitements préalables

Les glissements de terrain sont, en grande partie, conditionnés par la nature géologique des sols, la présence d'eau et la pente.

Sur cette base, une grille de susceptibilités des terrains aux glissements de terrain a été établie sur la base de cas observés et de pratiques courantes. Le croisement est effectué sous SIG des cartes de pentes (cf §. II.1), géologique (cf. §II.2) et hydrologique (cf. § VI.3) sur le même principe que les cartographies à grande échelle du BRGM. Les résultats ont ensuite été adaptés et confrontés à la « réalité terrain ».

Géologie	Conditions hydriques	Pente (en °)					
		0 à 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50	> 50
Alluvions	drainées	-	-	-	potentielle	-	-
	humides	-	-	potentielle	potentielle	-	-
Formations de versant (éboulis)	drainées	-	-	potentielle	forte	-	-
	humides	-	potentielle	forte	forte	-	-
Quaternaire argileux (moraine, colluvions, limon)	drainées	-	potentielle	potentielle	forte	forte	-
	humides	potentielle	potentielle	forte	forte	forte	-
Marno-calcaire	drainées	-	-	potentielle	forte	forte	-
	humides	-	potentielle	forte	forte	forte	-
Calcaire	drainées	-	-	potentielle	potentielle	forte	-
	humides	-	potentielle	potentielle	forte	forte	-

Tableau 4 : prédisposition des terrains aux glissements

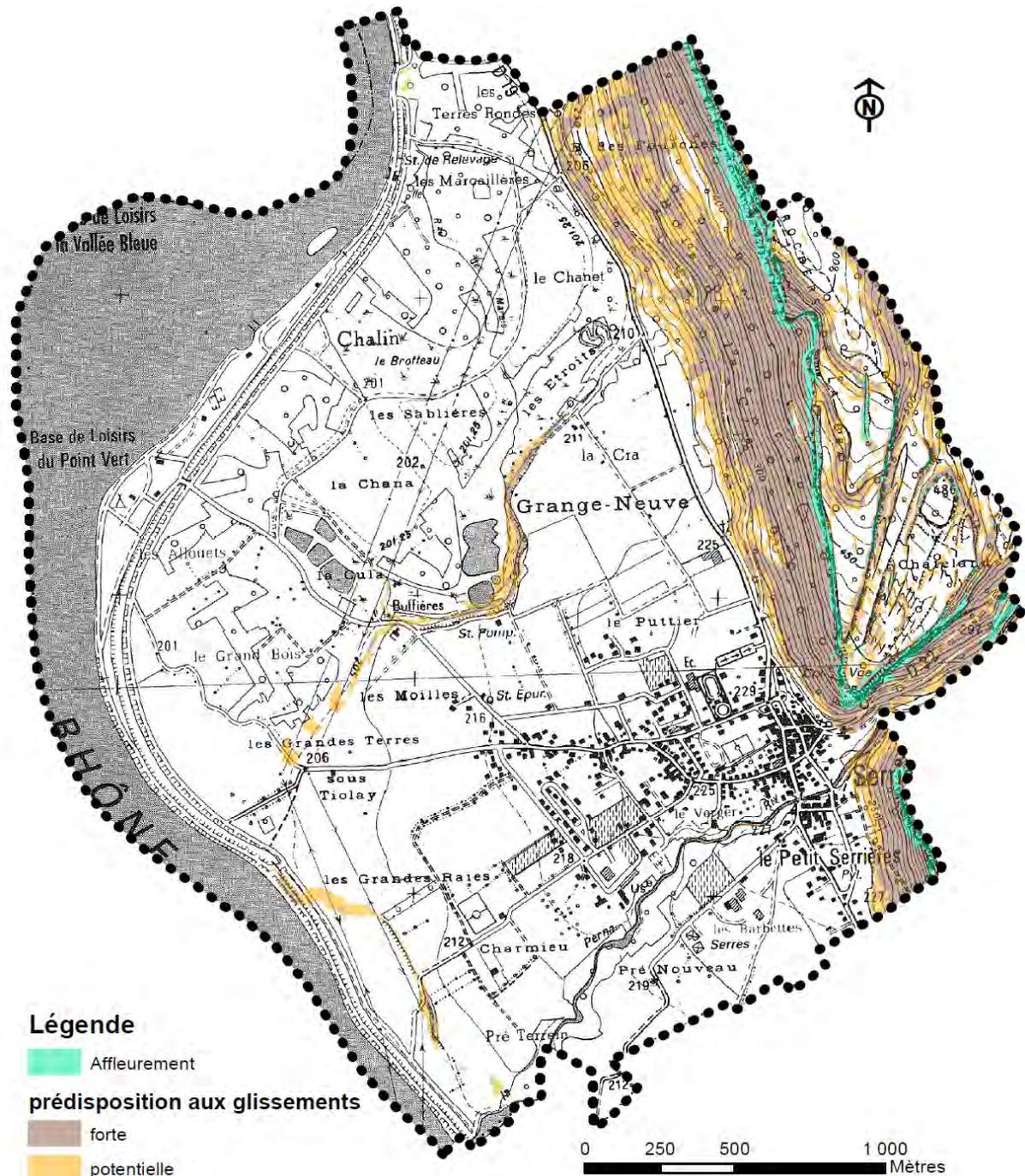


Figure 15 : carte de susceptibilités aux glissements de terrain

IV.4 Observations de terrain

Aucun glissement n'a été observé, en revanche plusieurs anciennes petites « carrières » (zone d'extraction de matériaux) sont visibles et permettent de distinguer la nature du sol. On y distingue des matériaux d'éboulis qui ne présentent pas de prédisposition géomécaniques aux glissements. Ceux-ci sont toutefois recouverts par une couche altération pouvant atteindre 1 m d'épaisseur. Cette dernière peut donner lieu à des glissements superficiels et localisés un peu partout sur le versant, notamment lorsque les sols sont saturés en eau. Or il est à noter que l'ensemble du versant reçoit les eaux provenant de la falaise. Les zones mouilleuses visibles en pied de versant au Nord de la commune corroborent ce constat.



Figure 16 : Ancienne « carrière » en bordure de la RD32

IV.5 Qualification de l'aléa

IV.5.1 Grille appliquée

Le niveau d'aléa est qualifié à partir de la détermination de la probabilité d'occurrence et de l'intensité.

La probabilité d'occurrence est définie par le tableau suivant :

Probabilité d'occurrence	Description
Forte	Glissement actif avec traces de mouvements récents, ou Glissement ancien, ou Glissement potentiel (sans indice), avec facteur hydrologique aggravant reconnu, en situation équivalente à celle d'un glissement constaté, avec une pente supérieure à celle de ce glissement ou à la pente limite de déclenchement dans le même contexte estimée par le chargé d'étude en fonction de son expérience.
Moyenne	Glissement potentiel (sans indice) avec absence de facteur hydrologique aggravant reconnu, en situation équivalente à celle d'un glissement constaté, avec une pente supérieure à celle de ce glissement ou à la pente limite de déclenchement dans le même contexte estimée par le chargé d'étude en fonction de son expérience, ou Glissement potentiel (sans indice), avec facteur hydrologique aggravant reconnu, en situation équivalente à celle d'un glissement constaté, avec une pente légèrement inférieure à celle de ce glissement ou à la pente limite de déclenchement dans le même contexte estimée par le chargé d'étude en fonction de son expérience.
Faible	Glissement potentiel (sans indice), sans facteur hydrologique aggravant reconnu, en situation équivalente à celle d'un glissement constaté, avec une pente légèrement inférieure à celle de ce glissement ou à la pente limite de déclenchement dans le même contexte estimée par le chargé d'étude en fonction de son expérience.

Tableau 5 : Probabilité d'occurrence glissement de terrain selon guide PPR montagne

L'intensité est par ailleurs établie selon la logique suivante :

Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
Dommages limités, non structurels, sur un bâti standard	Dommages structurels au bâti standard. Pas de dommages au bâti adapté à l'aléa	Destruction du bâti standard. Dommages structurels au bâti adapté à l'aléa moyen.	Destruction du bâti adapté à l'aléa moyen (phénomènes de grande ampleur).

Tableau 6 : Intensité glissement de terrain selon guide PPR montagne

La qualification de l'aléa est obtenue par application du tableau suivant :

Intensité Probabilité d'occurrence	Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
Faible	Faible (G1)	Moyen (G2)	Fort (G3)	Fort (G3)
Moyenne	Moyen (G2)	Fort (G3)	Fort (G3)	Fort (G3)
Forte	Moyen (G2)	Fort (G3)	Fort (G3)	Fort (G3)

Tableau 7 : Aléa glissement de terrain selon guide PPR montagne

IV.5.2 Aléas résultants

Les pentes situées en aval des falaises jusqu'en pied de versant sont potentiellement soumises aux glissements. Il existe des facteurs un contexte hydrologique aggravant (sources) et la pente est relativement marquée (entre 20 et 40°). Ces conditions leurs confèrent une probabilité d'occurrence moyenne.

L'intensité est faible du fait de phénomènes très ponctuels et superficiels (épaisseur inférieure à 1 m).

L'aléa est donc considéré comme moyen sur l'ensemble des versants situés sous les falaises.

V Aléas crues torrentielles

V.1 Définition

Crue d'un cours d'eau généralement sur une pente assez marquée, à caractère brutal, qui s'accompagne fréquemment d'un important transport de matériaux, de forte érosion des berges et de divagation possible du lit sur le cône torrentiel. Cas également des parties de cours d'eau de pente moyenne dans la continuité des tronçons à forte pente lorsque le transport solide reste important et que les phénomènes d'érosion ou de divagation sont comparables à ceux des torrents.

V.2 Historique et données disponibles

Sources d'informations consultées :

- Site web : <http://www.meteo01.fr/articles.php?lng=&pg=2268>
- Commune de Serrières-de-Briord. Réunion de travail du 12/02/2018.

Evènements historiques :

Secteur	Date	Observation(s)	Source(s)
Village	2 au 3 octobre 1888	La rivière a débordé et a emporté un pont et des maisons. Le Pont sur la Perna est démantelé. La rivière est sortie de son lit et a rempli le village. La scierie fut entièrement détruite, plusieurs maisons fortement endommagées. Tous les magasins depuis le pont jusqu'à la place publique ont été submergés.	Web
Village	Année 1950	Un arbre au niveau du pont a formé un embâcle. La rivière est sortie de son lit et l'eau s'écoulait sur la rue devant la mairie	Commune

Tableau 8: historique des phénomènes crues torrentielles

Remarques :

La commune signale que la rivière de la Perna s'écoulait anciennement selon un tracé différent d'aujourd'hui. Elle fut canalisée vers la fin du XIX^{ème} – début XX^{ème} siècle afin d'aboutir à sa configuration actuelle. Le lit entre les deux ponts a également fait l'objet de travaux (seuils et radier) qui dateraient, selon la commune, d'après 1950.

La commune signale également que le cours d'eau s'est creusé avec le temps, notamment sur sa partie après la traversée du Bourg.

V.3 Observations de terrain : le ruisseau de la Perna

V.3.1 Le bassin versant de la Perna

Le ruisseau de la Perna draine un vaste bassin versant de 36,6 km² qui s'étend sur les territoires communaux de Bénonces, Ordonnaz, Seillonaz et Lompnas. Il débouche, sur son cône de déjection sur la commune de Serrières de Briord et la traverse sur toute sa plaine pour confluer avec le Rhône.

Si l'on peut considérer que la Perna est issue de la confluence de deux grands affluents, les ruisseaux d'Arodin et de Tréfond, le réseau hydrographique apparaît dense sur l'ensemble du bassin versant avec de nombreuses combes et petits talwegs.

Le bassin de réception est partagé entre un vaste et dense couvert forestier et des terrains enherbés et construits sur lesquels s'établissent les chefs-lieux et hameaux des différentes communes préalablement citées.



Figure 17 : Bassin versant de la Perna : vaste couvert forestier et chef-lieu de Bénonces au second plan

Le lit du ruisseau traverse une alternance de terrains morainiques et calcaires qui peut fournir des matériaux solides au torrent, alors remobilisés sous forme de charriage.

A différents points d'arrêt sur le bassin versant, le cours d'eau est toujours apparu pavé, ce qui limite considérablement la remobilisation des matériaux constituant le fond du lit. Les apports sont alors essentiellement issus des berges. La photo suivante illustre des matériaux fins récemment charriés par la Perna et un ancien atterrissement avec des matériaux plus grossiers vraisemblablement déposés lors d'une forte crue.



Figure 18 : Dépôts de matériaux charriés en amont du pont entre Bénonces et Seillonaz

L'analyse du profil en long montre, au droit des enjeux, une pente globalement régulière depuis un tronçon de l'ordre de 800 m en amont et se prolongeant à l'aval (pente de l'ordre de 1,8 %). La capacité de charriage de la Perna, à débit fixé, reste alors quasi-constante sur la traversée des enjeux. Aussi, aucune évolution significative du profil en long durant une crue n'est attendue.

En revanche, des dépôts ou érosion locale peuvent néanmoins être observées à la faveur d'élargissement du lit ou de contraction, ou encore en amont d'embâcles pouvant se former durant la crue.

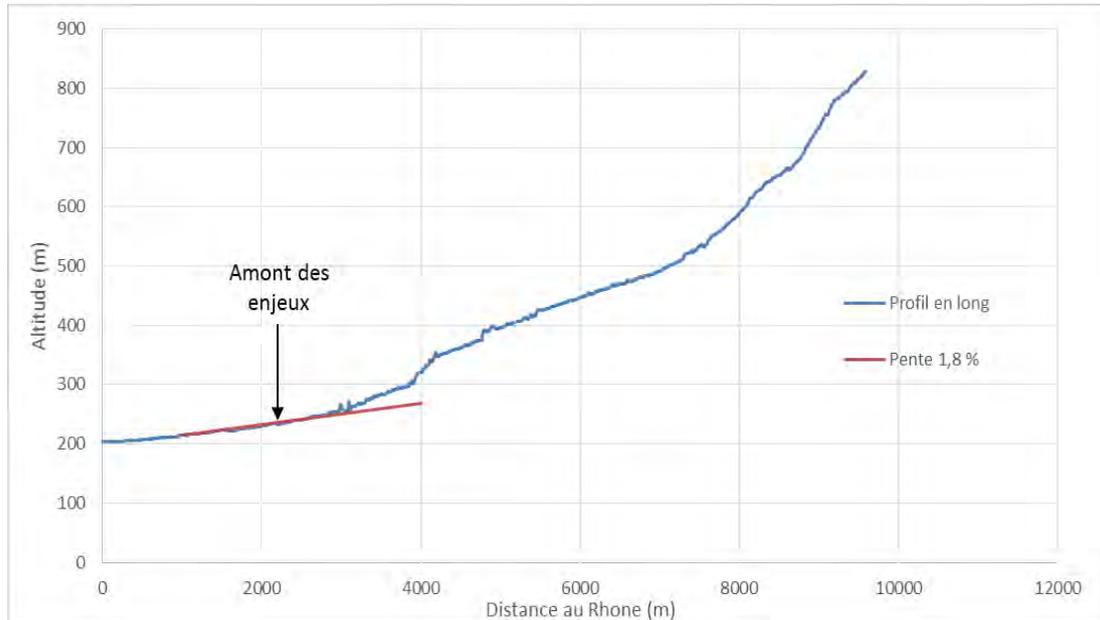


Figure 19 : Profil en long du ruisseau

Le transport probable de bois et flottants (couvert forestier du bassin versant et des berges, génère des risques d'obstruction d'ouvrages de franchissement. L'historique des crues fait d'ailleurs état de débordements dus à un embâcle au niveau d'un pont.

La considération des embâcles dans le scénario de référence sera évoquée par la suite.

V.3.2 Traversée de la commune de Serrières de Briord

Description et analyse géomorphologique

Jusqu'au débouché à Serrières de Briord, le lit de la Perna est encaissé. Ce n'est qu'à l'amont immédiat du pont communal (pont amont) que le lit majeur présente deux terrasses (une par rive, où la Perna pourrait s'étendre). Toutefois, la topographie limiterait les débordements et la route départementale, jouant le rôle de digue, recentre les écoulements sous le pont communal et empêche toute divagation dans le chef-lieu, hors scénario avec obstruction du pont communal.



Figure 20 : Lit mineur et majeur en amont des enjeux



Figure 21 : Le pont communal amont

A l'aval du pont communal, le lit est rectiligne.



Figure 22 : Lit chenalisé entre les deux ponts : vue depuis le pont de la RD vers l'amont à gauche, vue depuis le pont communal vers l'aval à droite

Cette configuration serait le résultat d'importants travaux réalisés en deux étapes :

- Chenalisation de la Perna dans la traversée de Serrières de Briord. Avant ces travaux, la Perna méandrait et s'écoulait notamment au travers du lotissement en rive droite.

La date exacte de ces travaux n'est pas connue. Après analyse de différentes cartes, ils dateraient du milieu du XIX^{ème} siècle (la commune semblait les situer un peu plus tardivement). En effet :

- i. Le cadastre napoléonien (1812), issu des archives départementales numériques de l'Ain, indique un tracé méandrant dans l'actuel chef-lieu de Serrières de Briord.
- ii. La carte de l'Etat-Major (1866) semble indiquer un lit rectiligne sur la traversée de la commune, il est vraisemblable que la chenalisation eut déjà été opérée.
- iii. La première photo aérienne disponible date de 1939 et montre un lit sensiblement identique à l'actuel.

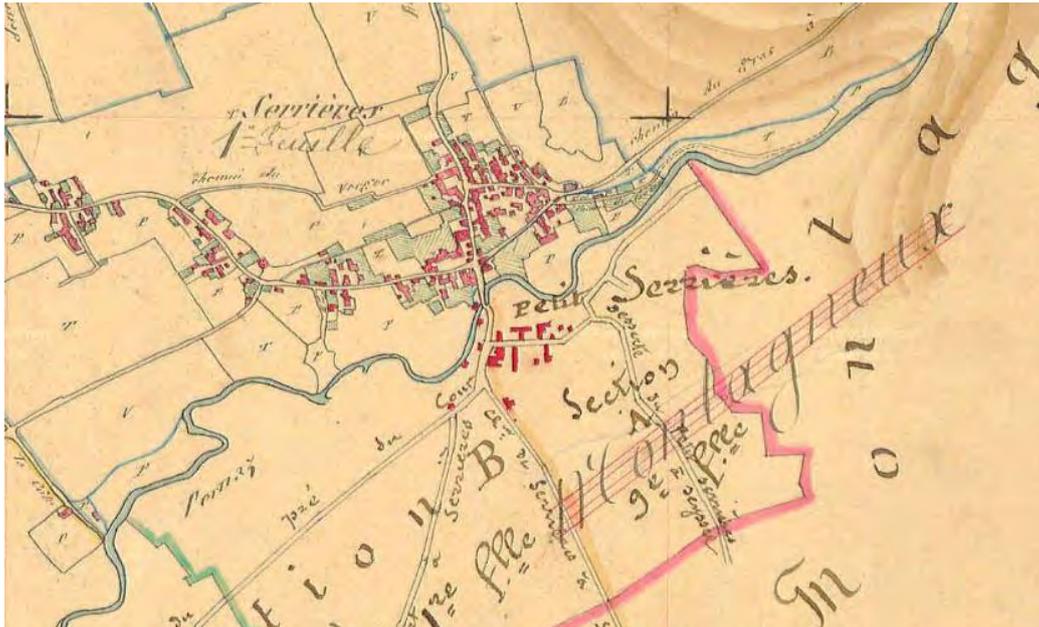


Figure 23 : Cadastre napoléonien - source : archives départementales de l'Ain



Figure 24 : Carte de l'Etat-Major (1866) – source : IGN

- Amélioration des conditions d'écoulements avec mise en œuvre d'un radier et de seuils. Selon la commune, ces travaux auraient été réalisés après 1950. Cela semble confirmer par comparaison d'anciennes photos aériennes. Entre 1956 (photo de gauche) et 1971 (photo de droite), le recalibrage semble s'être prolongé vers l'aval avec création de seuils. Aussi, la capacité du pont aval a vraisemblablement été améliorée.



Figure 25 : Comparaison des photos aériennes de 1956 et 1971

Evaluation de la probabilité d'obstruction de pont par embâcles

Dans l'état du bassin versant et des berges, le transport de flottants en crue centennale reste très probable.

Pour les deux crues majeures connues sur la Perna, l'obstruction de ponts par embâcles (au moins partielle) lors des événements est avérée et probablement la principale raison des débordements.

Les deux crues connues ont eu lieu après le recalibrage du lit, de façon certaine pour celle de 1950 et très vraisemblablement pour celle de 1888 (incertitude sur la date des travaux de recalibrage). Néanmoins, depuis la dernière crue majeure de 1950, les conditions d'écoulements ont été améliorées dans le chenal et sous le pont aval. Aussi, les scénarios d'obstruction ne se sont pas produits dans l'état actuel du lit de la Perna.

Pour un épisode estimé d'occurrence centennale, une obstruction totale d'ouvrage n'est pas jugée probable mais **l'obstruction partielle d'un des deux ponts ne peut pas être écartée avec certitude** :

- Le pont amont, qui a la capacité hydraulique la plus importante, pourrait être partiellement obstrué par un très gros embâcle compte tenu de sa situation d'ouvrage le plus en amont et également du faciès du lit en amont, naturel et sans accélération des écoulements sous l'ouvrage.
- Le pont aval avec sa voute et une sous poutre imposante peut facilement être accroché par des embâcles. L'accélération des écoulements sur le radier est à contrario favorable.



Figure 26 : Pont amont et lit en amont



Figure 27 : Pont aval et lit en amont

Compte tenu des dimensions des ouvrages, les scénarios d'obstruction partielle retenus pour la qualification de l'aléa considèreront une fenêtre libre d'écoulement, en pied d'ouvrage, de 1,5 m de hauteur pour le pont amont (cadre) et de 1 m pour le pont aval (voute).

V.3.3 A l'aval de Serrières de Briord

A l'aval de la traversée de Serrières de Briord, la Perna retrouve un cours naturel. Sur un premier tronçon, le cours d'eau est sujet à incision et érosion de berge comme l'illustrent les deux photos suivantes avec, à gauche, un seuil mis en œuvre pour fixer le fond du lit et bloquer l'incision ou encore, à droite, des gabions de protection de berges basculés dans le lit. Cette tendance à l'incision a été signalée par la commune. Sur une deuxième partie de son cours naturel, l'incision est moins marquée.



Figure 28 : Seuil fixant le lit (à gauche) - gabions basculés (à droite)

V.4 Analyse hydrologique

V.4.1 Préambule : incertitudes sur l'estimation des débits de crue

L'analyse hydrologique a pour objectif de quantifier le débit liquide d'une crue de période de retour centennale. Elle est menée à partir de méthodes classiquement utilisées en hydrologie. Les incertitudes de ces estimations sont nombreuses sur des bassins versants non jaugés (choix des pluies de références, choix du ou des modèles d'estimation, incertitudes des différents modèles utilisés, choix des paramètres pour chaque modèle,...).

Dans un contexte karstique comme celui du secteur d'étude, s'ajoute une autre source majeure d'incertitude : l'influence du karst sur les débits des cours d'eau.

Ces phénomènes karstiques sont encore mal connus. Les cavités souterraines peuvent influencer à la baisse les débits d'étiage et jouer un rôle de régulation pour crues courantes. A l'inverse, pour des scénarios plus rares, la saturation du réseau karstique pourrait augmenter les débits (allongement de la durée de crue et des débits de pointe. Par ailleurs, lorsque les zones souterraines drainées se situent sur les bassins versants des ruisseaux considérés, elles ont tendance à diminuer les débits de surface (rôle d'écrêtement de la crue : pointe de crue atténuée mais crue de durée plus étendue. En revanche, dans les cas où des cavités souterraines sont extérieures au bassin versant topographique « de surface », elles constituent une source d'apport supplémentaire et ont donc tendance à augmenter les débits.

Aussi, compte tenu des incertitudes propres aux méthodes hydrologiques classiques, et à l'effet du karst difficilement quantifiable et encore mal connu, les débits de référence présentés sont à considérer avec précaution.

V.4.2 Pluviométrie

Les données de pluie sont issues de la thèse de Djerboua, (2001, *Prédétermination des Pluies et Crues Extrêmes dans les Alpes franco-italiennes Préviation Quantitative des Pluies Journalières par la méthode des analogues (thèse de doctorat). Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble France.*

Les postes pluviométriques exploités sont localisés sur la carte ci-dessous. Les données au pas de temps journaliers sont nombreuses sur la région. Les données de pluies sur des durées plus courtes sont plus dispersées géographiquement.

Données de pluie journalière :

Aucun poste pluviométrique n'est présent sur le bassin versant de la Perna mais des postes restent très proches. Une analyse de la répartition spatiale des pluies centennales journalières

(Pj100) est présentée sur la figure suivante. Le même exercice a été réalisé pour des pluies journalières de période de retour décennale.

Ces analyses conduisent à retenir les cumuls journaliers de référence suivants :

P_{j10} (mm)	P_{j100} (mm)
80	120

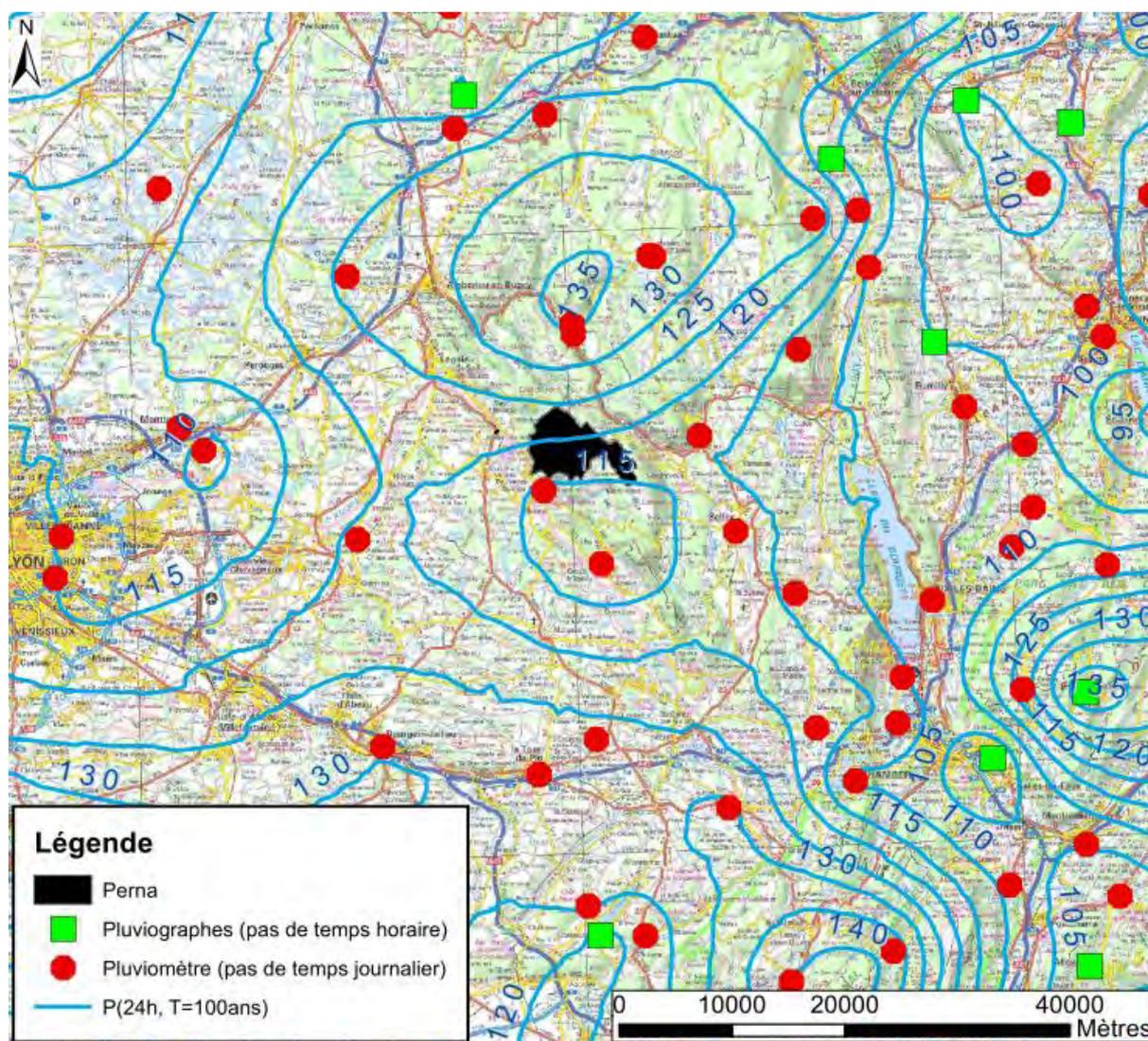


Figure 29 : Répartition spatiale des pluies journalières centennales

Données de pluie à des pas de temps inférieurs (jusqu'à 1h) :

Comme écrit précédemment et représenté en vert sur la carte précédente, les données de pluies à l'échelle horaire sont plus rares.

Il est considéré que les pluies à pas de temps inférieur à 24h suivent une loi dite de Montana qui s'écrit $P = a \cdot d^{1-b}$, avec d la durée de l'événement pluvieux (h).

Le graphique suivant présente les données aux postes les plus proches et présente la courbe retenue.

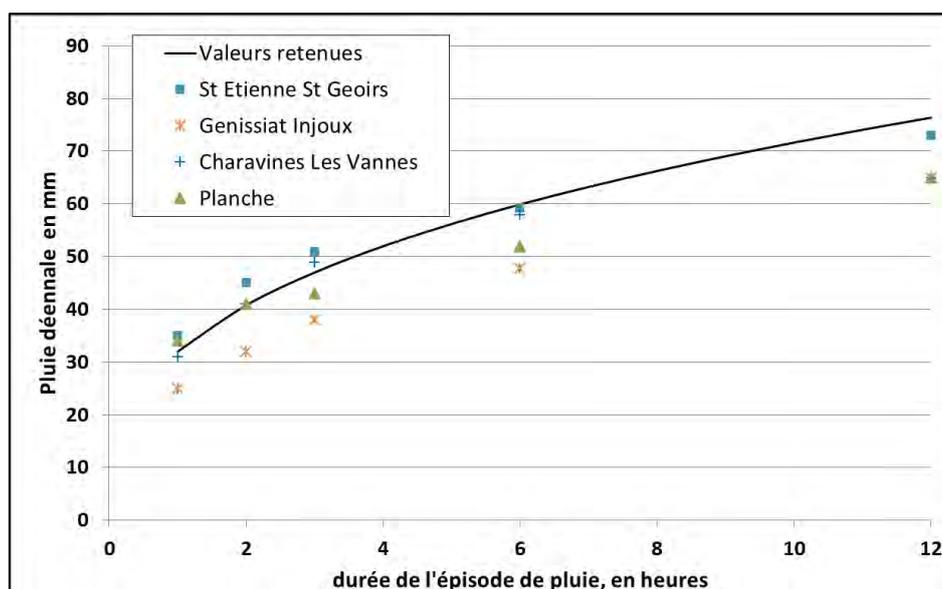


Figure 30 : Ajustement de la loi de Montana

Les paramètres associés à cette courbe, permettant d'estimer une pluie décennale sur une durée entre 1 et 12 h sont les suivants :

- $a_{10} = 32$
- $b_{10} = 0,65$

Pour une période de retour centennale, on retient de la même façon :

- $a_{100} = 45$
- $b_{100} = 0,65$

V.4.3 Variables représentatives du temps de transfert

Le temps de concentration du bassin versant est estimé à partir de différentes méthodes empiriques.

Méthode	Temps de concentration (h)
Kirpich	1,59
Sogreah	2,36
Turraza	3,36
Giandotti	2,58
Izzard Meunier (BV végétalisé)	5,46

En considérant les domaines de validité de chaque formule et les retours d'expérience sur chacune d'elle (tendance à sur ou sous-estimer), on retient l'encadrement probable suivant :

$$2 \text{ h} < t_c < 5 \text{ h (valeur probable : 3,5 h)}$$

V.4.4 Détermination du débit de référence décennal

Application de différentes formulations statistiques

Le bassin versant de la Perna n'est pas jaugé. L'application de différentes méthodes d'estimation permet d'approcher un débit de référence décennal.

Méthode	Qi10 (m ³ /s)
Régressions multiples (Mathys et Peteuil, 2010) [paramètres : surface drainée]	21,6
Régressions multiples (Mathys et Peteuil, 2010) [paramètres : surface drainée et pluviométrie]	39,5
SOCOSE	19,7
Crupedix	17,8
SCS simplifiée	inadaptée
Méthode rationnelle (Cr=0.15)	21,6

La large gamme des résultats souligne la grande incertitude liée à ce type d'estimation.

Transposition de bassins versants jaugés (Banque Hydro) :

Le ruisseau du Furans est équipé de deux stations de mesures de débits pour lesquelles les données sont disponibles sur la Banque Hydro. Son bassin versant reste peu éloigné et présente une géologie très proche. Les stations sont les suivantes :

- Le Furans à Pugieu au pont de Martinet :
 - o Exploitée de 1966 à 1983 - référence V1454310
 - o Exploitée de 1984 à 2018 - référence V1454320
- Le Furans à Arbignieu [Pont de Peyzieu] - référence V1464310

Plus éloigné au Nord, mais dans un contexte géologique semblable, le ruisseau du Suran est également équipé de station hydrométrique exploitable dans un contexte comme celui de la Perna :

- Le Suran à Germagnat – référence V2814050

Stations	Surface du bassin versant (km ²)	Débit décennal instantané (m ³ /s)	Débit pseudo spécifique (m ³ /s/km ^{1,6})
Le Furans à Pugieu entre 1966 et 1983	58	25	0,97
Le Furans à Pugieu entre 1984 et 2018	58	18	0,69
Le Furans à Arbignieu	160	37	0,63
Le Suran à Germagnat	193	62	0,92

Aussi, un débit pseudo-spécifique de 0,7 à 1 m³/s/km^{1,6} est estimé représentatif de ces bassins versants et transposable au ruisseau de la Perna. En considérant sécuritairement une valeur de 1 m³/s/km^{1,6}, le débit décennal de la Perna serait de l'ordre de 18 m³/s.

Synthèse

Par confrontation des différents résultats, on retient un débit décennal de la Perna :

$$Q_{10} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$$

V.4.5 Détermination du débit de référence centennal

Compte tenu des grandes incertitudes de estimations de débit de référence sur un bassin versant non jaugé, le débit centennal est estimé par application d'une méthode QdF (Débit durée fréquence) qui s'écrit sous la forme $Q_i(T) = a_{T,R} \cdot Q_i(T = 10)$

Galéa et Prudhomme, 1994, propose trois modèles régionaux. Par exploitation des données de la Banque Hydro aux stations présentées, on estime des ratios Q_{20}/Q_{10} de 1,1 et Q_{50}/Q_{10} de 1,3, ce qui se rapproche du modèle régional dit de Vandanesse, pour lequel l'estimation du débit centennal s'écrit :

$$Q_{100} = 1,762 \cdot Q_{10}.$$

Aussi, le débit centennal du ruisseau de la Perna est estimé à :

$$Q_{100} = 35 \text{ m}^3/\text{s}$$

V.4.6 Hydrogramme d'une crue centennale

Pour une simulation en régime transitoire, la détermination d'un hydrogramme de crue est indispensable. Une fois de plus, sur un bassin versant non jaugé, l'exercice est délicat d'autant plus que les formes d'hydrogrammes peuvent varier d'un évènement à l'autre.

L'objectif est alors de déterminer un hydrogramme type. La démarche proposée consiste à appliquer la méthode empirique proposée par Lavabre (1997), pour laquelle les paramètres à caler et retenus sont les suivants :

- Débit de pointe centennal : 35 m³/s, comme estimé précédemment
- Temps de montée : 6 heures, soit sensiblement proche de 1,5. t_c
- Coefficient de forme : 2,2. Cette valeur est ajustée afin que le volume de l'hydrogramme corresponde au volume d'eau ruisselé en considérant un coefficient de ruissellement centennal de 0,3 et une pluie journalière centennale. Ce choix semble sécuritaire compte tenu du boisement du bassin versant et permet ainsi de considérer une importante saturation des terrains avant l'évènement.

Cette méthode aboutit à un hydrogramme de crue assez long.

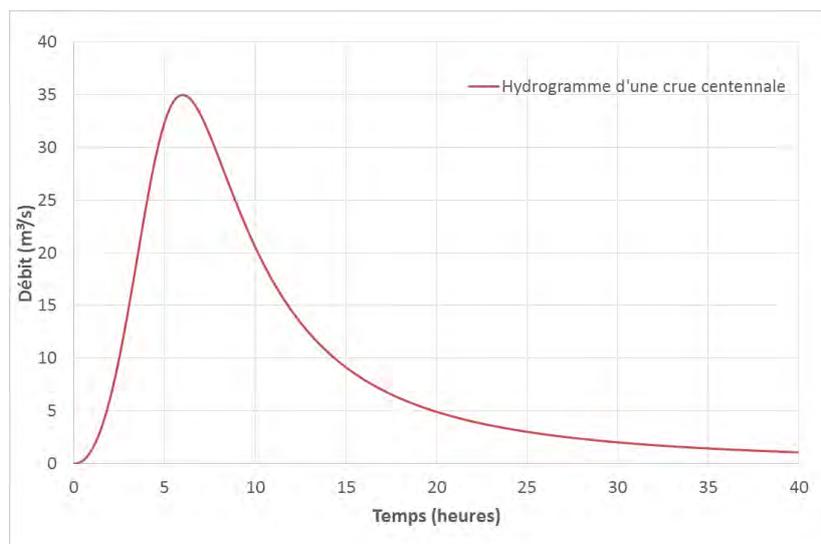


Figure 31 : Hydrogramme retenue pour une crue centennale sur la Perna

V.4.7 Scénario de référence

L'évènement de référence retenu est une crue centennale atteignant un débit de pointe de 35 m³/s, selon l'hydrogramme défini au paragraphe précédent.

Pour cet évènement, l'obstruction partielle par embâcle d'un des deux ouvrages a été estimée probable.

L'aléa retenu sera à chaque endroit le plus pessimiste des deux scénarios considérant soit l'obstruction partielle du pont amont, soit l'obstruction partielle du pont aval. Il sera qualifié après modélisation numérique suivie d'une phase de validation/ajustement par expertise de terrain.

Pour rappel, il a été arbitrairement considéré au paragraphe V.3.2 que l'obstruction partielle laisserait une fenêtre libre d'écoulement, en pied d'ouvrage, de 1,5 m de hauteur pour le pont amont (cadre) et de 1 m pour le pont aval (voute).

V.5 Modélisation hydraulique

V.5.1 Recours à la modélisation

Le recours à la modélisation hydraulique a été un outil d'aide à la décision dans la qualification de l'aléa au niveau de la traversée de Serrières de Briord par la Perna. Les résultats ont ensuite été validés/ajustés par une analyse de terrain.

La modélisation hydraulique a été réalisée à l'aide du logiciel HECRAS, élaboré par l'US Army Corps of Engineers. Le logiciel ainsi que la méthodologie déployée sont présentées en annexe 3.

V.5.2 Données topographiques

La topographie utilisée combine un relevé de profils in situ via un géomètre expert et un MNT.

Le MNT (Modèle Numérique de Terrain) utilisé est construit à partir d'un relevé lidar de l'IGN de 2014. La donnée brute a été traitée par le département ONF-RDI à l'aide de l'outil Lastools. La précision des dalles utilisées est de 1m.

La précision du MNT est globalement très satisfaisante en lit majeur. En revanche, le MNT issu du lidar au pas de 1 m ne permet pas une bonne représentation du lit mineur pour différentes raisons, les deux principales étant :

- L'insuffisance du nombre de points liés à un couvert végétal souvent dense (ripisylve),
- La précision en plan (1m) insuffisante au vu de l'étroitesse du lit mineur (quelques mètres seulement).

Aussi, sur les tronçons à enjeux modélisés, les profils en travers levés par un géomètre expert ont permis une correction du lit mineur, et parfois du proche lit majeur, afin d'aboutir à une meilleure représentativité du terrain naturel sur les secteurs où se concentrent les écoulements et donc déterminants dans l'analyse de l'aléa torrentiel.

Par ailleurs, les levés topographiques ont également concernés les ouvrages de franchissement afin d'intégrer leur géométrie au modèle.

Dans le cas du ruisseau de la Perna, 14 profils en travers ont été levés. Ils sont localisés sur la figure suivante.



Figure 32 : Profils en travers levés par un géomètre expert

D'autre part, sur le MNT préalablement cité, le bâti a été effacé de façon grossière. Nous l'avons réintégré par surélévation du MNT d'une hauteur arbitraire de 4 mètres sur l'emprise des bâtiments tel qu'elle est définie dans la BD Bâti de l'IGN.

La figure suivante illustre l'amélioration du MNT après reconstruction du lit mineur à partir des levés topographiques et ajout du bâti :

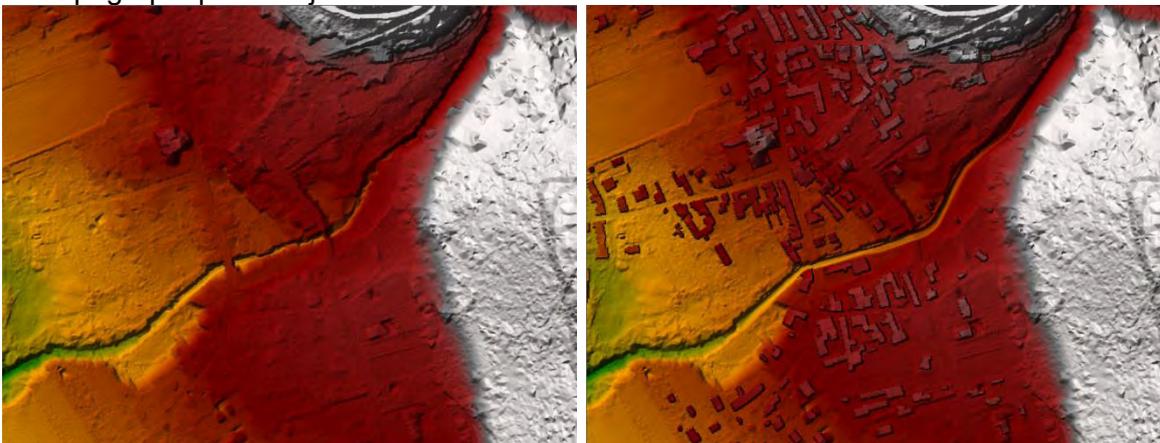


Figure 33 : Amélioration des données topographiques

V.5.3 Description du modèle

Le modèle a été construit en 2D sur la base des données topographiques présentées au paragraphe précédent.

L'emprise du modèle a débuté en amont des premiers enjeux, environ 250 mètres en amont du pont communal amont, et s'est étendue jusqu'à proximité de la confluence avec le Rhône. Le modèle est considéré « soigné » uniquement sur le tronçon couvert par les profils en travers, soit de 225 m en amont du pont communal, jusqu'à 225 m en aval du pont de la RD19. A l'aval de ce tronçon et jusqu'au Rhône, la modélisation est réalisée sur les données brutes du MNT. Les résultats ont été un outil d'aide à la décision sur un secteur naturel hors zone d'enjeux où la qualification de l'aléa est réalisée par analyse géomorphologique de terrain.

A noter qu'un premier modèle en 1D a été également construit sur le tronçon couvert par les profils en travers. Il a permis une première approche des conditions d'écoulements et notamment une analyse de la capacité hydraulique des ouvrages de franchissement où un calcul 1D est au moins tout aussi pertinent (car plus de possibilité sur le logiciel HECRAS en 1D dans la construction des ponts). Le calcul en 1D a alors été réalisé en régime permanent pour le débit de pointe de la crue de référence.

V.5.4 Données d'entrées et paramètres du modèle

Débits injectés :

Sur un modèle à deux dimensions, seul un calcul en régime transitoire est possible. L'hydrogramme de crue injecté dans le modèle est celui défini dans l'analyse hydrologique.

Conditions aux limites :

Les conditions aux limites considérées correspondent aux hauteurs normales en sortie aval du modèle.

Coefficient de frottement :

Les coefficients de Manning retenus sont :

- $n=0.04$ en lit mineur et lit majeur,
- $n=0.02$ en zone urbaine (routes et habitations) au niveau du chef-lieu de Serrières de Briord

V.5.5 Résultats

Simulation sans obstruction des ponts – modèles 1D et 2D

Le calcul de ligne d'eau à l'aide d'un modèle 1D, pour un scénario en eau claire et sans flottants, montre que :

- Le chenal d'écoulement a une capacité hydraulique suffisante, hormis de léger débordement en lit majeur en rive droite en amont du pont communal, sans menace sur le bâti.
- Le pont amont (pont cadre sous route communale) a une capacité hydraulique suffisante avec une revanche confortable,
- Le pont voute aval a une capacité hydraulique suffisante sans revanche. La ligne d'eau passe sous l'ouvrage, mais la ligne de charge accroche la sous poutre. Ainsi, le moindre obstacle ou la moindre perturbation peut suffire à entraîner la mise en charge de l'ouvrage.

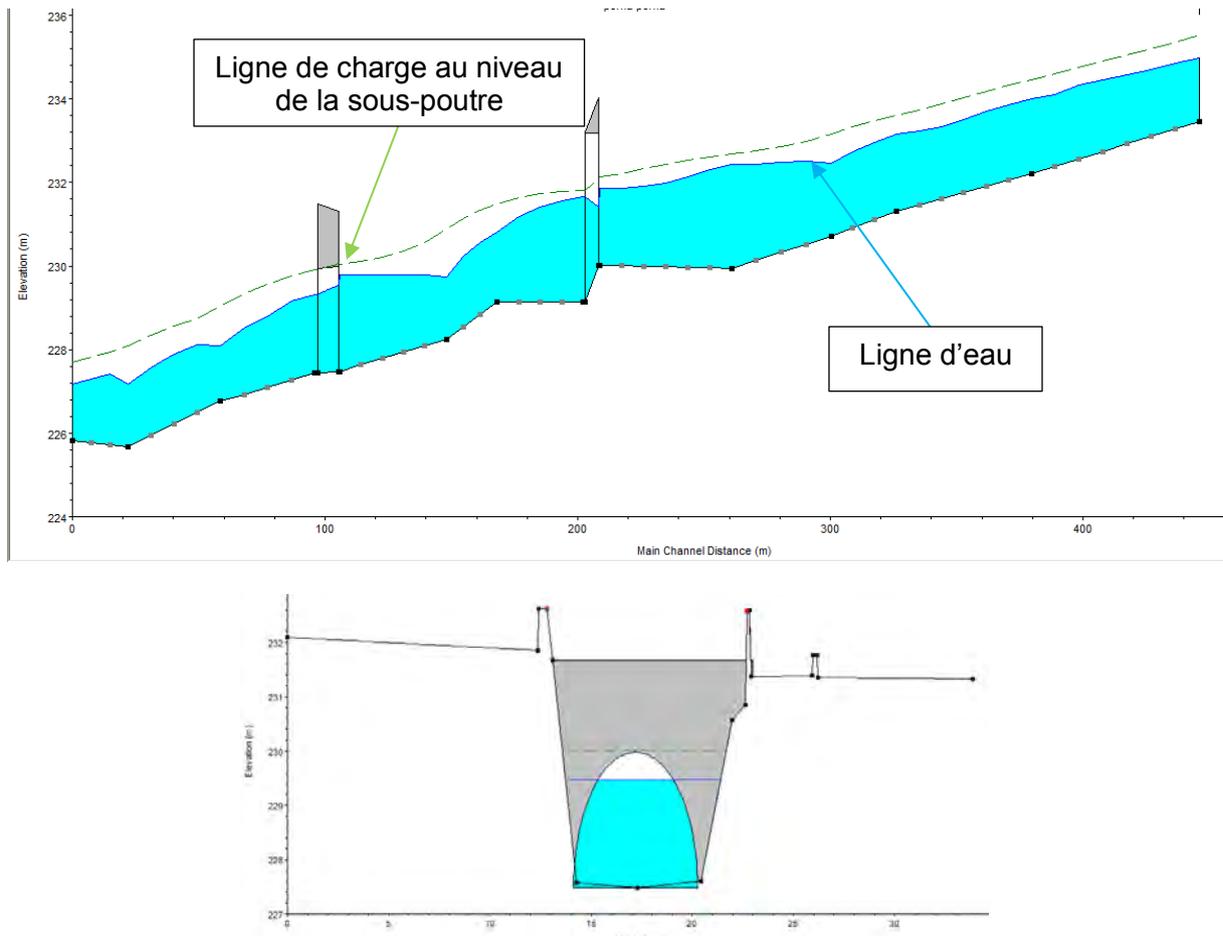


Figure 34 : Calcul de ligne d'eau sur la Perna et profil au niveau du pont aval – modèle 1D

Un modèle 2D a permis une représentation de ces conditions d'écoulement sans embâcles. Pour rappel, il ne s'agit pas du scénario de référence. Il confirme que les débordements en amont du pont communal n'atteignent pas le bâti. La route communale joue un rôle de digue et limite l'emprise des débordements.

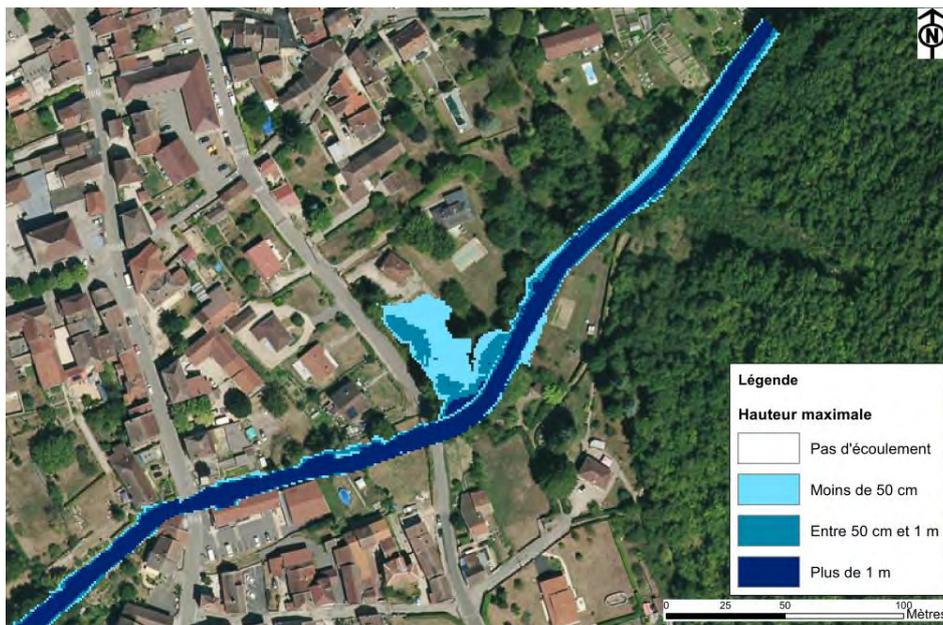


Figure 35 : Hauteur d'eau maximale pour un scénario sans obstruction des ponts

Résultats pour le scénario de référence

Pour rappel, deux crues possibles sont modélisées pour qualifier l'aléa de référence. Elles prennent successivement en compte l'obstruction partielle d'un des deux ouvrages avec une section hydraulique restante de 1,5 m de haut pour l'ouvrage amont et de 1 m pour l'ouvrage aval, et ce sur toute la largeur de l'ouvrage partiellement obstrué.

Les résultats du modèle exploités dans le cadre de la quantification de l'aléa sont :

- La carte des hauteurs maximales,
- La carte des vitesses maximales,

Les cartes des hauteurs et vitesses sont présentées au paragraphe suivant.

V.6 Qualification de l'aléa

V.6.1 Zones d'enjeux

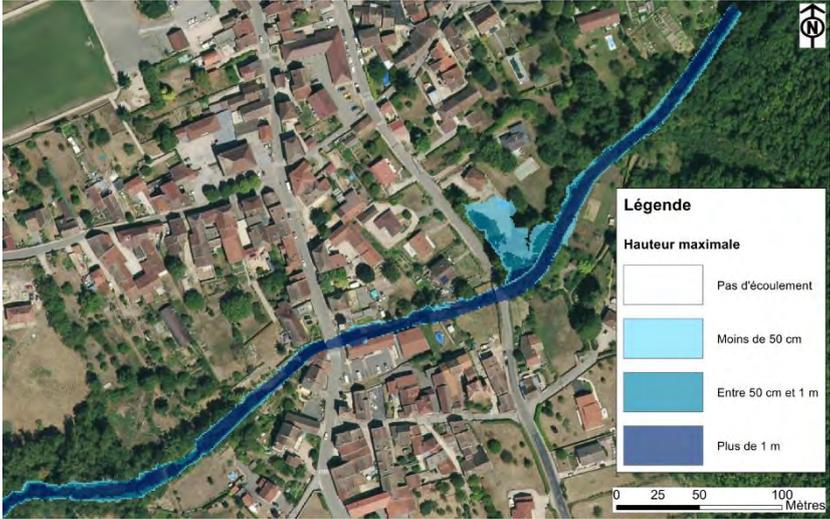
Croisement hauteur/vitesse à partir des résultats du modèle :

Pour les zones modélisées, la qualification de l'aléa est réalisée par analyse des couples hauteurs/vitesses et a été confirmée ou ajustée lors de la visite de terrain post-modélisation.

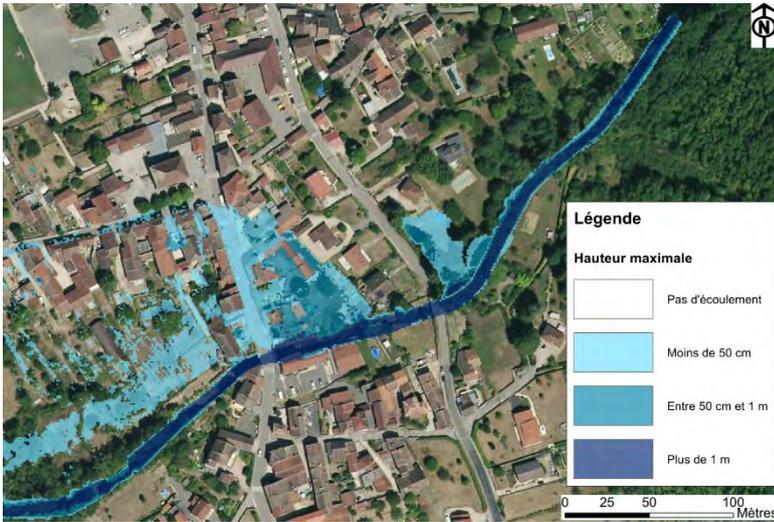
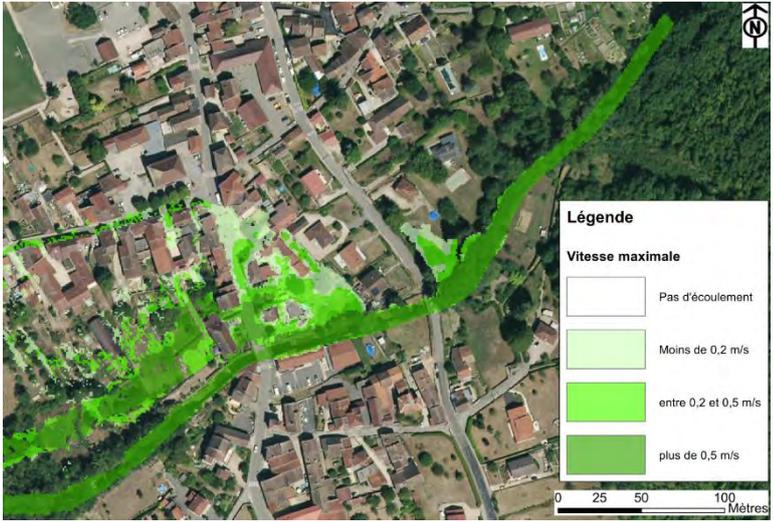
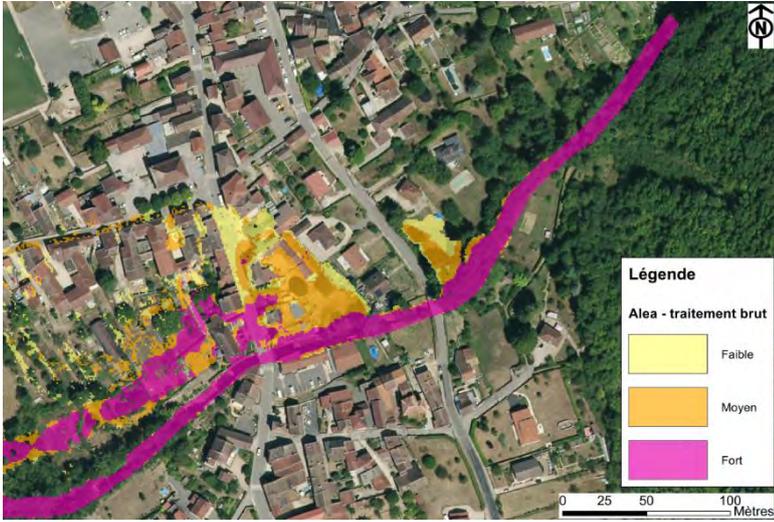
		Vitesse		
		< 0,2 m/s	0,2 < V < 0,5 m/s	> 0,5 m/s
hauteur	< 0,5 m	Faible (T1)	Moyen (T2)	Fort (T3)
	0,5 < H < 1 m	Moyen (T2)	Moyen (T2)	Fort (T3)
	> 1 m	Fort (T3)	Fort (T3)	Fort (T3)

Tableau 9 : grille de qualification des aléas de crue torrentielle en zone urbanisée

Scénario du pont amont partiellement obstrué (fenêtre d'écoulement de 1,5 m en pied d'ouvrage)

Eléments d'analyse	Carte
<p>Hauteur d'eau maximale (asynchrone)</p>	
<p>Vitesse maximale (asynchrone)</p>	
<p>Aléa, traitement brut (avant validation/ajustement par analyse de terrain)</p>	

Scénario du pont aval partiellement obstrué (fenêtre d'écoulement de 1 m de hauteur en pied d'ouvrage)

Eléments d'analyse	Carte
<p>Hauteur d'eau maximale (asynchrone)</p>	
<p>Vitesse maximale (asynchrone)</p>	
<p>Aléa, traitement brut (avant validation/ajustement par analyse de terrain)</p>	

Confirmation / ajustement sur le terrain :

La cartographie « brute » de l'aléa issue des résultats du modèle a fait l'objet d'importants ajustements dans la zone densément urbanisée. Ces ajustements sont nécessaires au regard du rôle des aménagements urbains dont la précision ne peut être représentée par un MNT issu d'un LIDAR au pas de 1 m.

Enfin, le modèle a été un outil d'aide à la décision dans une qualification d'aléa essentiellement basée sur une expertise géomorphologique et topologique.

Les deux photos ci-dessous illustrent la densité des aménagements susceptibles de fortement influencer les zones inondées (muret, trottoir,...).



Figure 36 : Densité des aménagements urbains influençant les conditions d'écoulements

Les principaux ajustements ont été :

- l'ajustement de la limite de la zone d'aléa moyen en rive droite entre les deux ponts selon les aménagements urbains et privés,
- l'ajout de zone d'aléa moyen en rive gauche en amont du pont communal. Le modèle n'indique pas de débordements en lit majeur. En revanche, ils pourraient être observés en cas d'embâcles ou de basculements d'arbres déviant le flux principal des écoulements.

V.6.2 Zones « hors enjeux urbanisés »

Sur les zones naturelles et agricoles, l'aléa est qualifié par analyse hydro-géomorphologique de terrain, sans modélisation numérique. Elle est basée selon la grille de qualification des aléas basée de guide PPR crue torrentielle. Le principe étant que le niveau d'aléa est basé sur un croisement entre niveau d'intensité et probabilité d'atteinte, défini dans les tableaux ci-après.

Critère d'intensité	Niveaux d'intensité retenus		
	Fort	Moyen	Faible
Ordre de grandeur des paramètres hydrauliques	La brutalité des débordements ne rend pas possible un déplacement hors de la zone exposée ou jusqu'à une zone refuge. La hauteur d'écoulement ou d'engravement dépasse 1 m. Les affouillements verticaux ont une profondeur supérieure à 1 m. La taille des plus gros sédiments transportés excède 50 cm.	La brutalité des débordements rend pas possible un déplacement hors de la zone exposée ou jusqu'à une zone refuge. La hauteur d'écoulement ou d'engravement reste inférieure à 1 m. Les affouillements verticaux ont une profondeur qui ne dépasse pas 1 m. La taille des plus gros sédiments transportés n'atteint pas 50 cm.	Les phénomènes sont progressifs et laissent la possibilité d'anticiper pour quitter la zone menacée ou rejoindre une zone refuge La hauteur d'écoulement ou d'engravement reste inférieure à 0,5 m. Les affouillements verticaux ont une profondeur qui ne dépasse pas 0,5 m. La taille des plus gros sédiments transportés n'atteint pas 10 cm.
Flottants	Les risques d'impact par des flottants de grande taille sont importants	Les risques d'impact par des flottants de grande taille sont modérés.	Les flottants sont de petite taille et ne peuvent pas endommager une façade de maison.
Effets prévisibles sur les enjeux	Espace naturels et agricoles	Des phénomènes d'engravement ou d'érosion de grande ampleur sont prévisibles à cause des divagations du lit du torrent. Ils conduisent à de profonds remaniements des terrains exposés.	Les écoulements prévisibles sont de faible hauteur. Les dépôts peuvent être boueux mais sans matériaux de plus de 10 cm. Les affouillements prévisibles sont faibles.
	Bâtiments	Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement et les matériaux charriés peuvent détruire les bâtiments exposés. La ruine des constructions peut notamment intervenir sur les façades ou par sapement des fondations (les angles des bâtiments étant particulièrement menacés d'affouillement en raison des survitesses induites par la concentration des écoulements).	Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement et les matériaux charriés peuvent endommager gravement les façades non renforcées mais sont insuffisantes pour endommager les façades renforcées. Les affouillements prévisibles ne sont pas assez profonds pour entraîner la ruine des constructions normalement fondées.
	Infrastructures et ouvrages	Les ponts peuvent être engravés, submergés ou emportés. Les routes ou les équipements (pylônes, captages, etc.) faisant obstacle aux divagations du torrent peuvent être détruites ou ensevelies par les dépôts. Les voies de communication sont impraticables du fait de la perte du tracé. De longs travaux de déblaiement et remise en service sont nécessaires.	Les dégâts aux infrastructures, aux ouvrages et aux équipements (pylône, captage, etc.) restent modérés et leur remise en service peut être rapide.

Tableau 10: tableau d'intensité crue torrentielle

La probabilité d'atteinte est définie de la manière suivante :

Probabilité d'atteinte	Signification
Forte	Compte tenu de sa situation, la parcelle est atteinte presque à chaque fois que survient l'événement de référence, ou plus souvent.
Moyenne	La parcelle bénéficie d'une situation moins défavorable que ci-dessus vis-à-vis des débordements prévisibles, ce qui la conduit à être nettement moins souvent affectée.
Faible	La submersion de la parcelle reste possible pour au moins l'un des scénarios de référence, mais nécessite la concomitance de plusieurs facteurs aggravants

Tableau 11: tableau de probabilité d'atteinte crue torrentielle

La qualification du niveau d'aléa est ensuite faite sur la base du tableau suivant :

		Intensité		
		Faible	Moyenne	Forte
Probabilité d'atteinte	Faible	Faible (T1)	Moyen (T2)	Fort (T3)
	Moyen	Faible (T1)	Moyen (T2)	Fort (T3)
	Fort	Moyen (T2)	Fort (T3)	Fort (T3)

Tableau 12: grille de qualification des aléas de crue torrentielle en zone non urbanisée

V.6.3 Aléas résultants

Les principaux points sont les suivants :

- A l'amont du pont communal, des débordements en lit majeur sont attendus pour le scénario de référence. L'obstruction partielle du pont par embâcles les favorise d'autant plus. Le lit majeur est alors exposé à aléa décroissant en s'éloignant de l'axe du lit (fort, moyen puis faible) traduisant cet étalement de la lame d'eau. Aucun bâtiment n'est concerné.
- Dans le chef-lieu, autour du pont de la RD 19 :
 - o Les propriétés en rive droite à l'aval immédiat du pont, ainsi que la RD 19, sont exposés à un aléa fort compte tenu de la surverse attendue en cas d'obstruction partielle de l'ouvrage de franchissement.
 - o Plusieurs propriétés en rive droite entre les deux ponts sont exposées à un aléa moyen. Les débordements sont dus à une montée du niveau d'eau dans la Perna suite l'obstruction partielle par embâcles.
 - o Le carrefour devant la mairie ainsi qu'une partie de la rue est concernée par un aléa moyen. Au-delà, le long de la rue du centre, puis sur celle de la Pernaz, les débordements sont classés en aléa faible car une partie peut être partiellement reprise par le réseau pluvial.
 - o Directement en aval du franchissement de la RD19, en rive droite, un axe d'écoulement est considéré en aléa faible en cas de franchissement des habitations en bordure de route.
- A l'aval, dans la partie naturelle :
 - o Une zone en rive droite sur le secteur des tennis et du boulodrome est exposée à un aléa moyen. Des débordements sont estimés possible depuis l'extrados rive droit d'un méandre.
 - o A l'exception d'un premier tronçon où le lit paraît incisé, la zone d'aléa fort englobe l'ensemble de la bande active du ruisseau où pourraient se produire des divagations.

VI Aléas de ruissellement

VI.1 Définition

Ecoulement et divagation des eaux météoriques en dehors du réseau hydrographique suite à de fortes précipitations. Ce phénomène peut provoquer l'apparition d'érosions localisées (ravinement).

VI.2 Méthodologie appliquée

La méthodologie déployée pour la cartographie de l'aléa ruissellement a été la suivante :

- Collecte d'informations et de connaissances de phénomènes auprès des communes
- Traitement automatisé sur SIG afin de mettre en évidence les axes de ruissellements potentiels
- Reconnaissance de terrains :
 - o Confirmation des axes de ruissellements connus de la commune
 - o Vérification de terrain pour confirmer ou infirmer les axes de ruissellements issus du prétraitement pouvant déboucher sur des secteurs d'enjeux ;
 - o Parcours de toutes les zones urbanisées pour identifier d'éventuels autres axes de ruissellement naturels.
- Zonage de l'aléa pour chaque axe de ruissellement

La connaissance de terrains recueillie (réunion de travail, témoignages de riverains) permet d'avoir une connaissance des phénomènes passés sur quelques décennies. La cartographie de l'aléa dans le cadre de l'élaboration du PPR est réalisée, **à dire d'expert, pour un phénomène de période de retour estimée centennale.**

Sur le territoire du Bas Bugey, nombreux axes de ruissellement sont, au moins pour partie, alimentés par des phénomènes karstiques, encore mal connus. Aussi, une incertitude importante de l'évaluation de l'aléa de référence est liée à la difficulté d'appréhender les débits potentiels pouvant être issus de ces résurgences karstiques, pour une période de retour centennale.

VI.3 Historique et données disponibles

Sources d'informations consultées :

- Commune de Serrières-de-Briord. Réunion de travail du 12/02/2018.

Evènements historiques :

Aucun évènement n'est signalé sur le territoire

VI.4 Traitements préalables

Un traitement numérique a été effectué via les outils « Hydrologie » de Arcgis qui permettent de modéliser la circulation d'eau à travers une surface. Le principe utilise le modèle numérique de terrain comme entrée (ici le RGE 5m de l'IGN) à partir duquel il est d'abord construit une direction des flux qui définit le sens dans lequel l'eau s'écoule sur chaque cellule du MNT. Cette donnée est ensuite traitée en accumulation de flux pour calculer le nombre de cellules en montée qui s'écoulent à un emplacement.

Le résultat de ce travail donne une carte des écoulements préférentiels notamment des flux de ruissellement.

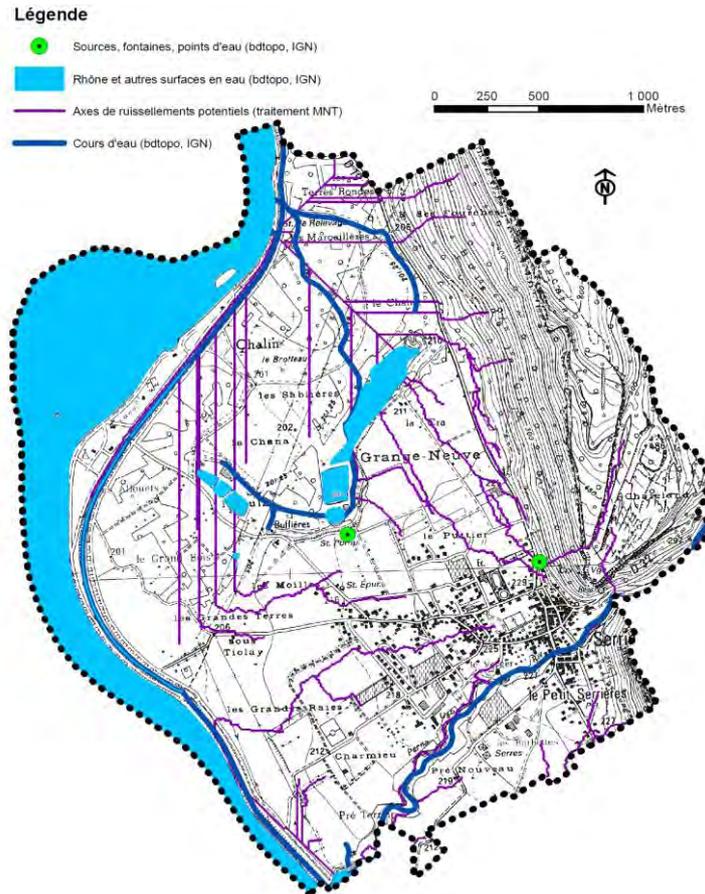


Figure 37 : Carte des écoulements préférentiels

Remarque : la restitution est assez fidèle à la réalité du terrain dans les zones relativement encaissées, en revanche le traitement s'avère très hasardeux sur les zones de plaine et dans les secteurs où la nature du sol est perméable (alluvion, éboulis, etc.). Ces dernières ont donc été travaillées par analyse du terrain et de l'historique.

VI.5 Observations de terrain

VI.5.1 Absence d'axe de ruissellement naturel

Aucun axe de ruissellement naturel n'a été repéré sur le terrain. Seules des zones mouilleuses existent mais celles-ci sont alimentées via des processus d'écoulements souterrain, remontées de nappes et ruissellements très diffus.

VI.5.2 Canal au niveau du chef-lieu

En revanche, un petit canal d'écoulement traverse le chef-lieu. Les eaux proviennent d'un captage sur la Perna. Ce canal est à ciel ouvert sur une petite partie de la traversée et alimente le lavoir au cœur du chef-lieu. Il est ensuite à nouveau enterré.

Sur sa partie à ciel ouvert, de petits ouvrages de franchissement le traverse. Ce canal est par ailleurs sujet à accumulation de tufs compte tenu de la teneur calcaire des écoulements issus de massif calcaire. Aussi, des débordements sont possibles, soit en cas d'obstacle à l'écoulement dans le canal (d'origine anthropique), soit d'accumulation de tufs et de manque d'entretien.

Il est néanmoins probable que ce canal puisse être régulé au niveau de l'alimentation en eau, ce qui limite les risques de débordements avec une action humaine possible en cas de problème.

Cet « axe d'écoulement » est traité comme axe de ruissellement, bien que légèrement en marge de phénomènes vraiment naturels.



Figure 38 : Canal et cours en point bas pouvant être inondée en cas de débordements

VI.6 Qualification de l'aléa

VI.6.1 Grille de qualification

Les aléas de ruissellement sont qualifiés selon la grille suivante :

Aléa	Indice	Critères
Fort	V3	<ul style="list-style-type: none"> Versant en proie à l'érosion généralisée (bad-lands). Exemples : <ul style="list-style-type: none"> - Présence de ravines dans un versant déboisé - Griffes d'érosion avec absence de végétation - Effritement d'une roche schisteuse dans une pente faible - Affleurement sableux ou marneux formant des combes Axes de concentration des eaux de ruissellement, hors torrent Zones d'accumulation des eaux (point bas) : hauteur d'eau supérieure à 1 m
Moyen	V2	<ul style="list-style-type: none"> Zone d'érosion localisée Exemples : <ul style="list-style-type: none"> - Griffes d'érosion avec présence de végétation clairsemée - Ecoulement important d'eau boueuse, suite à une résurgence temporaire Débouchés des combes en V3 (continuité jusqu'à un exutoire) Zones d'accumulation des eaux (point bas) : hauteur d'eau entre 50 cm et 1m
Faible	V1	<ul style="list-style-type: none"> Versant à formation potentielle de ravine Ecoulement d'eau non concentrée, plus ou moins boueuse, sans transport de matériaux grossiers sur les versants et particulièrement en pied de versant.

Tableau 13 : grille de qualification des aléas de ruissellement

VI.6.2 Aléas résultants

Concernant le canal, de possibles débordements sur voirie et dans les cours devant des bâtiments en contrebas sont possibles en cas d'obstruction, même partielle de petits franchissements.

Au vu des faibles débits du canal, la lame d'eau débordante sera de faible hauteur et la dynamique de débordement resterait très faible. Les zones concernées par de possibles débordements sont toutes classées en aléa faible de ruissellement.

VII Synthèse des événements historiques

Le tableau suivant synthétise les phénomènes historiques connus de la commune. Ils sont classés chronologiquement et associés à un code (N° Carte) qui renvoie vers l'étiquette de localisation sur la carte des phénomènes historiques jointe au dossier. Le détail des informations est présenté dans les paragraphes précédents.

Secteur	Phénomène	Date	Observation	Source(s)	N° Carte
Village	Crue torrentielle	2 au 3 octobre 1888	La rivière a débordé et a emporté un pont et des maisons. Le Pont sur la Pernaz est démantelé. La rivière est sortie de son lit et a rempli le village. La scierie fut entièrement détruite, plusieurs maisons fortement endommagées. Tous les magasins depuis le pont jusqu'à la place publique ont été submergés.	Web	1
Village	Chutes de blocs	1910	Chute de bloc au niveau du Rocher du Cra	ONF	2
Village	Crue torrentielle	Année 1950	Un arbre au niveau du pont a formé un embâcle. La rivière est sortie de son lit et l'eau s'écoulait sur la rue devant la mairie	Commune	3
Rocher du Cra – sortie Nord du Bourg	Chutes de blocs	1930 - 1940	Plusieurs blocs, dont la zone de départ se situe au Nord de la dent de Chateland, chutent et l'un d'eux, après plusieurs rebonds, atteint une maison située au-delà de la RD19. Cette habitation est la dernière avant la sortie Nord du bourg. Le bloc cause des dégâts importants à la construction sans faire de dommage corporel.	PPR 2001 Commune	4
Seyssel	Chutes de blocs	1930 - 1940	Plusieurs éléments rocheux se détachent de la falaise de Seyssel et leur trajectoire atteint des terrains (à l'époque occupés par des vignes) situés entre la rue du Pont et le chemin du petit Serrières (propriété actuelle VIDON).	PPR 2001 Commune	5
Rocher du Cra	Chutes de blocs	année 1950	Un bloc (au moins), détaché du rocher du Cra, s'est arrêté quelques mètres au-delà de la RD19, dans un terrain proche du cimetière.	PPR 2001 Commune	6
Seyssel	Chutes de blocs	17/03/1967	En fin de journée (21h-22h), un prisme rocheux se détache de la falaise de Seyssel, en partie haute de la paroi, et dévale le versant. Deux blocs, dont le poids du plus gros a été estimé à environ 13 tonnes, terminent leur chute dans la propriété de Mme Mithivier, à quelques mètres l'un de l'autre et à une dizaine de mètres de l'habitation, après semble-t-il, avoir été déviés par un arbre. Un troisième bloc, de taille légèrement inférieure, a emprunté une trajectoire sensiblement différente et s'est arrêté à une trentaine de mètres de là, et à une dizaine de mètres seulement de la Perna.	PPR 2001 Commune	7
Nord de la commune - RD19	Chutes de blocs	vers 1990	Plusieurs éléments se seraient détachés de la paroi, au Nord de la commune. Les plus importants auraient atteint le pied du versant au niveau du "Rocher du Gros Carre". Aucun dommage autre qu'à la végétation n'est à déplorer.	PPR 2001 Commune	8

Secteur	Phénomène	Date	Observation	Source(s)	N° Carte
Rocher du Cra	Chutes de blocs	vers 1995	Un bloc, de 2 tonnes environ, issu de la paroi dominant la RD32, est stoppé par la chaussée, sans faire de dommage matériel ni humain.	PPR 2001 Commune	9
Seysse	Chutes de blocs	2014	Un bloc d'un mètre cube dépasse le chemin au Sud du merlon	Commune	10
Rocher du Cra	Chutes de blocs	régulièrement	Des pierres et des blocs, dont la dimension reste relativement réduite, se détachent de façon fréquente de la falaise en rive droite de la Perna, et terminent le plus souvent leur chute sur la RD32. C'est notamment le cas vers le réservoir	PPR 2001 Commune	11

Tableau 14 : synthèse des phénomènes historiques

VIII Annexes

VIII.1 Annexe 1 : Méthode MEZAP

Cette méthode empirique consiste à croiser l'intensité avec la probabilité d'occurrence qui est elle-même issue d'une matrice interceptant la probabilité d'atteinte avec l'activité.

L'intensité est observée sur le terrain (blocométrie).

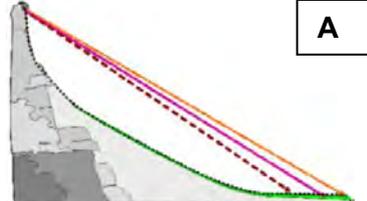
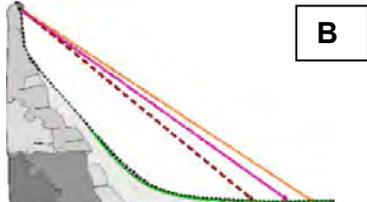
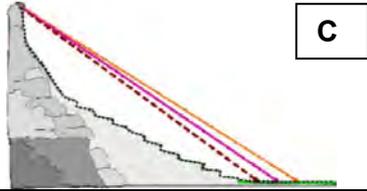
a) Intensité

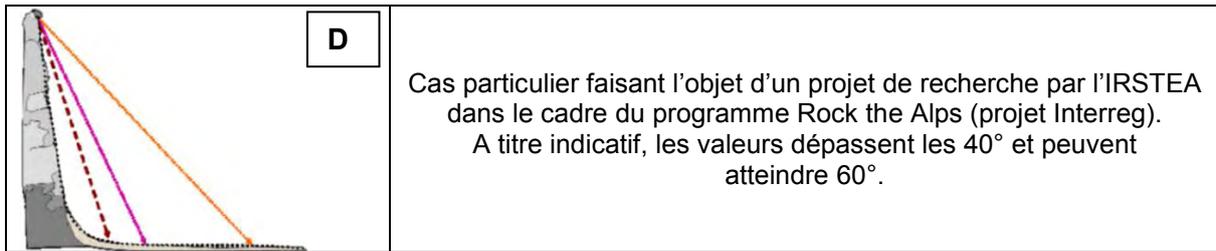
L'intensité se définit par le volume du bloc de l'aléa de référence. Le niveau d'intensité est fonction des dommages au bâti. Logiquement il devrait donc être fonction de l'énergie à l'impact mais suite aux nombreuses expériences de relevés in-situ, c'est le volume des éléments attendus à l'échelle centennale qui préside à la caractérisation de l'intensité

Niveaux d'intensité	Description	Dommages
Faible	$< 0,25 \text{ m}^3$	Peu ou pas de dommage au gros œuvre, perturbation des activités humaines.
Modérée	$0,25 \text{ m}^3 < V < 1 \text{ m}^3$	Dommage au gros œuvre sans ruine. Intégrité structurelle sollicitée.
Elevée	$1 \text{ m}^3 < V < 10 \text{ m}^3$	Dommage important au gros œuvre. Ruine probable. Intégrité structurelle remise en cause.
Très élevée	$> 10 \text{ m}^3$	Destruction du gros œuvre. Ruine certaine. Perte de toute intégrité structurelle

b) Probabilités d'atteinte

La probabilité d'atteinte est déterminée par des plages d'angles de lignes d'énergie. Ces plages peuvent varier en fonction de la topographie du site.

Type de profil topographique	Probabilité d'atteinte (angle de ligne d'énergie) <i>Valeurs indicatives à adapter par l'expert en fonction du terrain</i>		
	Fort	Moyen	Faible
 A	34°	32°	30°
 B	38°	35°	33°
 C	36°	34°	32°



c) L'activité

La probabilité de départ des blocs en falaise est très difficile à déterminer. Elle peut s'estimer à partir des traces de départ visibles et du nombre des blocs observés dans la pente, ce qui sera appréhendé lors des reconnaissances de terrain. Les critères utilisés pourront également être liés à l'activité passée de la zone de départ.

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

d) Probabilité d'occurrence

La probabilité d'occurrence est qualifiée en utilisant la matrice ci-dessous pour croiser la probabilité d'atteinte en un point et la probabilité de départ qualifiée par l'indice d'activité.

		Probabilité d'atteinte			
		Faible	Moyen	Fort	Très Fort
Indice d'activité	Faible	Faible	Modérée	Elevée	Très Elevée
	Moyen	Modérée	Modérée	Elevée	Très Elevée
	Fort	Modérée	Elevée	Elevée	Très Elevée

e) Aléa résultant

L'aléa est obtenu par croisement de la probabilité d'occurrence et de l'intensité par le biais d'une matrice :

		Intensité				Eboulement de grande ampleur
		V ≤ 0,25 m ³	0,25 < V ≤ 1 m ³	1 < V ≤ 10 m ³	V > 10 m ³	
		Faible	Modérée	Elevée	Très élevée	
Probabilité d'occurrence	Faible	Faible (P1)	Moyen (P2)	Fort (P3)	Fort (P3)	Très fort (P3)
	Modérée	Faible (P1)	Moyen (P2)	Fort (P3)	Fort (P3)	Très fort (P3)
	Elevée	Moyen (P2)	Fort (P3)	Fort (P3)	Très fort (P3)	Très fort (P3)
	Très élevée	Fort (P3)	Fort (P3)	Très fort (P3)	Très fort (P3)	Très fort (P3)

VIII.2 Annexe 2 : Description du modèle Rockyfor3D

Outils

Les calculs trajectographiques 3D sont réalisés avec le logiciel Rockyfor3D ® développé par Ecorisq (association Franco-Suisse : IRSTEA et EPFL).

Les éléments considérés dans le calcul sont définis ci-après (extrait de la notice), détails sur le logiciel et ses calculs sur : <http://www.ecorisq.org/>.

Forme du bloc

Cette forme de bloc définit la façon dont 1) le volume du bloc (et donc sa masse) et 2) le moment d'inertie sont calculés sur la base de trois diamètres de blocs définis d_1 , d_2 et d_3 . Afin de calculer la position du bloc, le rebond sur la surface de la pente, Rockyfor3D emploie toujours une forme circulaire pouvant présenter 2 diamètres différents : 1) le plus petit des diamètres d_1 , d_2 et d_3 définis et 2) un diamètre plus grand, qui est la moyenne des deux plus grands diamètres de d_1 , d_2 et d_3 . Ce dernier permet de calculer la perte d'énergie lors des impacts sur le sol, c'est-à-dire le rapport entre la rugosité de surface et le rayon du plus grand périmètre du bloc (voir également l'équation 7).

Chute libre parabolique

La chute libre parabolique se calcule au moyen d'un algorithme standard pour un mouvement parabolique uniformément accéléré dans l'air. Ce calcul permet de déterminer la position et la vitesse à l'intersection au moyen d'une topographie en 3D représentée par le Modèle Numérique de Terrain (MNT). Ainsi, Rockyfor3D simule une trajectoire en 3D en calculant l'évolution de sa position le long des axes x , y et z . Ici, l'axe des x correspond à la direction est-ouest, l'axe des y à la direction nord-sud, et l'axe des z à sa position verticale.

Rebond sur la surface de la pente

La vitesse après un rebond sur la surface de la pente, aussi appelé bounce, se calcule principalement avec 10 algorithmes. Une première étape importante est la conversion de la vitesse d'arrivée dans le plan horizontal xy (V_{hor}) et de celle dans le plan vertical z (V_{vert}) en une vitesse d'arrivée normale V_n et tangentielle V_t (par rapport à la pente locale) (voir fig. ci-contre).

Ensuite, la profondeur de pénétration du bloc sur le lieu de l'impact est calculée d'après les travaux de Pichler et al. 2005 : Les paramètres d'entrée nécessaires à cet algorithme sont les suivants :

- Le coefficient de restitution normal (R_n)
- Le diamètre du projectile (d en m)
- La masse du projectile ($RockMass$ en kg)
- La vitesse d'impact du projectile (V en m/s)

Les constantes utilisées sont :

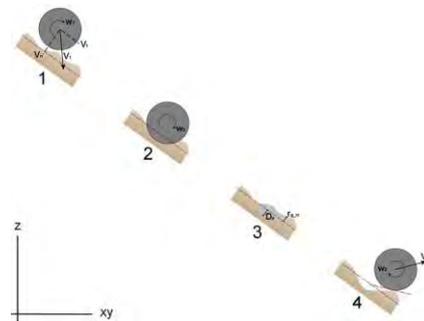
- $k = 1.207$ (constante représentant la forme sphérique du bloc)
- $B = 1.2$ (paramètre de compressibilité du matériau touché ; varie peu pour les différents matériaux)

Les principales fonctions de profondeur de pénétration (D_p) sont les suivantes :

$$\frac{D_p}{d} = \frac{2}{\pi} N \ln \left[\frac{1 + I_e / N}{1 + k\pi / 4N} \right] + k \text{ pour } \frac{D_p}{d} > k \quad (1)$$

$$\frac{D_p}{d} = \sqrt{\frac{1 + k\pi / 4N}{1 + I_e / N}} \frac{4k}{\pi} I_e \text{ pour } \frac{D_p}{d} \leq k \quad (2)$$

où,



$$I_e = \frac{RockMass * V^2}{R_i * d^3} \quad (3)$$

(RockMass et V désignent respectivement la masse (kg) et la vitesse (m/s) du bloc)

où R_i est la résistance à l'indentation du matériel impacté (en MPa) et calculé avec la formule,

$$R_i = 55 * 10^9 * R_n^7 \quad (4)$$

Cette fonction donne des valeurs entre 1 - 5 MPa pour de sols fins et de 200 - 250 MPa pour la roche mère.

$$N = \frac{RockMass}{\rho_{soil} * d^3 * B * 0.5} \quad (5)$$

où ρ_{soil} est la densité du matériel impacté (en kg/m³) et calculé avec la formule,

$$\rho_{soil} = 1200 * \ln(R_n) + 3300 \quad (6)$$

Cette fonction donne des valeurs entre 1500 kg/m³ pour des sols fins et de 2500 kg/m³ pour la roche mère.

Dans Rockyfor3D, la profondeur de pénétration D_p ne peut être supérieure au rayon du bloc et la valeur maximale absolue est de 1 m. Une fois la profondeur de pénétration calculée, il est possible de lancer le calcul de la vitesse du bloc après le rebond.

Dans ce but, le coefficient de restitution tangentiel (R_t , voir Chau et al. 2002) constitue un paramètre important. Dorren et al. (2004) ont démontré que cette valeur R_t est déterminée par la composition et la dimension du matériau recouvrant la surface et par le rayon du bloc en chute, étant donné que pour des blocs de plus grandes dimensions, la rugosité de surface effective est moins importante que pour les blocs de petites dimensions (voir Kirkby et Statham 1975; Dorren 2003), et analogue au principe du coefficient de variation de pente utilisé par exemple par Pfeiffer et Bowen (1989), Spang et Krauter (2001) et Dorren et al. (2004). Par conséquent, Dorren et al. (2006) ont proposé l'algorithme suivant pour calculer le R_t :

$$R_t = \frac{1}{1 + ((MOH + D_p) / R)} \quad (7)$$

où MOH est la hauteur d'obstacle représentative à la surface de la pente (m), D_p est la profondeur de pénétration (m) et R est le rayon du bloc en chute (m).

Tous les spécialistes savent qu'il n'est pas possible de mesurer le MOH en détail et à chaque endroit sur une pente active de chutes de pierres. Etant donné qu'il est possible de réaliser une carte de polygones présentant les diamètres moyens du matériau recouvrant la surface classée par différentes classes de diamètres, la valeur de R_t devrait être déduite d'une telle carte. Nous avons choisi de cartographier trois classes de MOH représentant la hauteur moyenne des obstacles rencontrés par un bloc lors de 70%, 20%, et 10% des rebonds dans un polygone cartographié. Ensuite, l'algorithme de rebond de Rockyfor3D choisit le MOH sur la base des trois classes de couverture dans le polygone en utilisant un nombre aléatoire. Ainsi, les valeurs données par les trois classes de probabilité R_{g70} , R_{g20} et R_{g10} représentent les valeurs utilisées respectivement dans 70%, 20% et 10% des calculs de rebonds.

La valeur R_t ainsi obtenue est utilisée pour calculer la composante de vitesse tangentielle du bloc après le rebond (V_{t2}) d'après Pfeiffer et Bowen (1989) :

$$V_{t2} = \sqrt{\frac{R^2 * (I * V_{rot1}^2 + RockMass * V_{n1}^2) * R_t}{I + RockMass * R^2}} \quad (8)$$

où V_{t1} est la composante de vitesse tangentielle du bloc avant le rebond, V_{rot1} est la vitesse rotationnelle avant le rebond et I est le moment d'inertie de la forme de bloc définie.

Avant le calcul réel de V_{t2} , le modèle opère une variation aléatoire de la valeur calculée de R_t de +/- 10% afin de représenter la variance de la rugosité de surface observée dans la nature. Il en va de même pour le coefficient normal de restitution (R_n), utilisé pour calculer la composante de vitesse normale du bloc après le rebond V_{n2} d'après Pfeiffer et Bowen (1989) :

$$V_{n2} = \frac{-V_{n1} * R_n}{1 + (abs(V_{n1})/9)^2} \quad (9)$$

où V_{n1} est la composante de vitesse normale du bloc avant le rebond. Le facteur $(abs(V_{n1})/9)^2$ ajuste la diminution du coefficient normal de restitution au fur et à mesure que la vitesse d'impact augmente. Ce facteur représente une transition, à partir d'un rebond plus élastique à de faibles vitesses normales vers un rebond beaucoup moins élastique provoqué par une fracturation croissante du bloc et une formation de cratères à la surface de la pente, à des vitesses normales plus élevées (Habib 1976). Ainsi, le modèle tient indirectement compte de l'effet de l'angle d'impact sur la nature du rebond (voir Wu 1984).

La vitesse rotationnelle après le rebond V_{rot2} se calcule comme suit :

$$V_{rot2} = \min \left[\frac{V_{t2}}{R}; V_{rot1} + \frac{(V_{t1} - V_{t2}) * 2}{5 * R} \right] \quad (10)$$

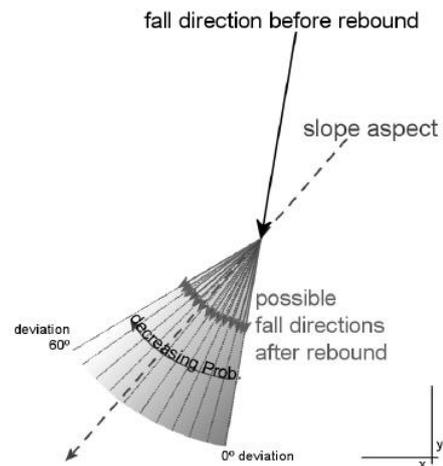
Tout comme dans Pfeiffer et Bowen (1989), l'angle de la pente sur le lieu du rebond est uniformément diminué de façon aléatoire lors de chaque rebond. Cependant, la réduction maximale de l'angle de pente est fixée à 4°. Le roulement est représenté par une séquence de rebonds sur une faible distance, la distance entre deux rebonds est égale au rayon du projectile et avec une valeur minimale fixée à 0.2 m. Ces deux dernières conditions ne sont utilisées que pour des pentes entre 0° et 30°.

Calcul de la direction de chute

Changement de direction du à un rebond sur la surface de la pente

Initialement, c'est l'orientation de la cellule source qui détermine la direction de chute du bloc simulé. Ensuite, la direction du projectile change en raison de rebonds sur la surface de la pente ou d'impacts contre des arbres. L'angle de déviation après un rebond sur la surface de la pente est déterminé par la topographie, par la direction de chute du bloc avant le rebond et par sa vitesse.

Lors de chaque rebond, le modèle permet au bloc de dévier de sa direction antérieure au rebond vers la direction de l'orientation de la cellule raster dans laquelle il rebondit (fig. ci-contre).



L'orientation de la pente est la direction vers l'aval du taux maximum de changement de valeur à partir de chaque cellule d'un raster vers les quatre cellules voisines (les 2 cellules au-dessus et en-dessous et les 2 cellules à gauche et à droite). Ainsi, l'orientation représente la direction de pente la plus raide dans chaque cellule et se calcule d'après Zevenbergen et Thorne (1987). Enfin, la déviation du bloc par rapport à sa direction de chute avant le rebond vers l'orientation de la pente dans la cellule raster est déterminé par un chiffre aléatoire et par la vitesse du bloc (voir tableau 3).

Le chiffre aléatoire définit si la déviation du bloc par rapport à sa direction d'origine est comprise entre 0 et 5°, ou entre 5° et 10°, 10° et 15°, 15° et 20°, ..., 50° - 55°. Tous ces cas de figure s'accompagnent de probabilités d'occurrence prédéfinies et déterminées par la vitesse du bloc avant le rebond comme présenté dans le tableau 3.

Tableau 3 : Probabilités (en %) de gammes d'angles de déviation après le rebond utilisées par Rockyfor3D pour trois classes de vitesse.

Angles de déviation (°)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55
$V < 10$ m/s	49	15	9	6	5	4	3	3	3	2	2
$10 \leq V < 15$ m/s	53	14	8	6	4	4	3	3	2	2	2
$V \geq 15$ m/s	46	16	10	7	5	4	4	3	3	2	0

Les valeurs du tableau 3 reposent sur des analyses statistiques de trajectoires de chutes de blocs et de vitesses observées lors des expériences présentées dans Dorren et al. (2006). Si le déplacement du bloc est ascendant dans le modèle, les gammes de déviation décrites ci-dessus sont autorisées dans les deux directions latérales à la direction avant le rebond. Si le bloc entre dans un trou (une petite dépression) dans le modèle numérique de terrain (MNT), la direction avant et après le rebond reste inchangée.

Paramètres de sols

Les paramètres de sols ont été digitalisés au moyen de traitements sur SIG après analyse du terrain. Les valeurs renseignés correspondent aux rugosités des terrains et leurs compacités. Afin d'être ajustées aux calages du logiciel, ces valeurs ont été définies conformément à la notice téléchargeable sur : <http://www.ecorisq.org/>.

Tableau 2 : les types de sols utilisés par Rockyfor3D et les valeurs R_n correspondantes

Soiltype (type de sol)	Description générale	Valeur moyenne de	Gamme de variation de R_n
0	rivière, marécage, matériau dans lequel le bloc peut pénétrer complètement	0	0
1	sol fin (profondeur > 100 cm)	0.23	0.21 - 0.25
2	sol fin (profondeur < 100 cm), et/ou sol de vallée composé de sables et graviers	0.28	0.25 - 0.31
3	piste forestière, éboulis fin ($\varnothing < \sim 10$ cm), sol moyennement compacté avec des petites pierres	0.33	0.30 - 0.36
4	éboulis grossier – talus ($\varnothing > \sim 10$ cm), sol compacté avec présence de pierres	0.38	0.34 - 0.42
5	roche mère avec couvert fin de matériau altéré ou de sol	0.43	0.39 - 0.47
6	roche mère	0.53	0.48 - 0.58
7	Route goudronnée (asphalte)	0.35	0.32 – 0.39

VIII.3 Annexe 3 : description du logiciel HEC-RAS

VIII.3.1 Présentation générale du logiciel

La modélisation hydraulique est réalisée à l'aide du logiciel HEC-RAS développé l'US Army Corp of Engineers. Ce logiciel permet la modélisation 1D, 2D et couplée 1D/2D de crues de rivières telles que celles du secteur d'étude.

Il s'agit d'un logiciel très largement utilisé de par le monde et bénéficiant vraisemblablement de la plus grande communauté d'utilisateurs. Son utilisation est approuvée aux Etats-Unis par la FEMA (Federal Emergency Management Agency)² dans le cadre d'une utilisation pour la production de cartes de zones inondées. Le seul logiciel européen intégré à la liste des logiciels autorisés est le logiciel danois MIKE FLOOD. Son utilisation universelle est due à sa performance, à ses nombreuses mises à jour, à sa facilité d'utilisation et à sa gratuité.

Le logiciel permet d'évaluer les niveaux et paramètres caractéristiques (côtes et hauteur d'eau, débit, vitesses) des écoulements selon le régime hydraulique (débit d'entrée, conditions aux limites,...).

VIII.3.2 Principes de calculs et fonctions principales

Le logiciel HECRAS résout les équations complètes de Saint-Venant ou approximation par l'équation de l'onde diffusive (non recommandée en contexte torrentiel).

Lorsque l'écoulement est permanent et unidimensionnel, le logiciel ne permet pas de simuler la propagation d'une crue et son laminage par une succession de zones de stockage appelées « casiers ».

Lorsque l'écoulement est varié, le logiciel utilise différentes méthodes selon que l'écoulement soit :

- graduellement varié : ce sont les écoulements pour lesquels les caractéristiques du canal (pente, section) varient graduellement le long de celui-ci. Les pertes de charge sont de deux sortes : les pertes par frottements (évaluées par le coefficient de Manning) et les pertes dues au rétrécissement ou à l'élargissement du lit (évaluées par des coefficients de contraction et d'expansion). Le logiciel applique l'équation de Bernoulli généralisée.
- rapidement varié : celui-ci se produit lors du passage du régime torrentiel au régime fluvial : changement de la pente du chenal, obstacle (pont, barrage...), confluence. Différentes équations peuvent être utilisées suivant le cas :
 - le théorème d'Euler pour une application très générale,
 - des équations empiriques, pour certains cas particuliers (écoulement à travers un orifice ou sur un seuil), qui permettent de prendre en compte la mise en charge ou le déversement, le régime pouvant alors être dénoyé (écoulement critique) ou noyé (écoulement fluvial).

A noter que dans un canal suffisamment long avec pente, section, rugosité et débit constants, le régime uniforme finit par s'établir ; le régime devient varié en présence

² Cf. <https://www.fema.gov/hydraulic-numerical-models-meeting-minimum-requirement-national-flood-insurance-program>

d'une singularité – rétrécissement, élargissement, seuil... – qui provoque alors une modification de la surface libre.

Le calcul s'effectue par itération en partant de l'aval ou de l'amont de la section considérée selon que le régime d'écoulement soit fluvial ou torrentiel. Le logiciel calcule automatiquement une hauteur d'eau critique dès que le calcul n'aboutit pas en fluvial ou que le régime torrentiel est imposé par l'utilisateur.

Enfin, grâce à une interface de saisie conviviale, l'utilisateur peut facilement et précisément modéliser l'état actuel du cours d'eau (géométrie et ouvrages le franchissant) et les différents scénarios d'aménagement.

VIII.3.3 Domaines d'applications et limites

Les domaines d'applications du logiciel HECRAS sont divers et variés :

- Cartographie de zones inondables,
- Calcul de l'incidence hydraulique d'aménagements fluviaux divers,
- Dimensionnement de canaux, ouvrages hydrauliques...
- Modélisation de rupture de barrage ou de digues
- ...

Tout outil de modélisation hydraulique actuel n'est peu ou pas adapté à la modélisation d'écoulement torrentiel caractérisé par des fortes pentes et/ou une charge solide de fond importante (avec possible évolution de géométrie du lit durant l'évènement). Le logiciel HECRAS n'échappe pas à la règle.

VIII.3.4 Utilisation dans le cadre de l'étude et résultats

Modalités d'exploitations

Le recours à la modélisation numérique s'est inscrit dans la logique d'expertise suivante :

- Investigations préalables suivant l'objet de l'étude : recueil de données existantes (données topographiques, hydrologie) ; identification des crues historiques et définition des scénarios de référence ;
- Levés topographiques complémentaires (profils en travers, ouvrages...) ;
- Construction du modèle :
 - Amélioration des données topographiques du MNT « brut » issu du LIDAR dans le lit mineur, à partir des levés topographiques complémentaires : cette opération a été réalisée à l'aide du module ArcGeoRAS de ArcGIS et de l'outil SIG intégré au logiciel HECRAS (RASMapper).
 - Saisie de la structure du modèle sur HECRAS
- Calage du modèle (si données disponibles) et/ou tests de sensibilité
- Simulation de la crue de référence

Après modélisation, les résultats de la modélisation ont fait l'objet d'une phase de validation/ajustement par expertise géomorphologique de terrain et par confrontation à l'historique des crues. Cette phase est indispensable dans le cadre de la qualification de l'aléa et d'autant plus en l'absence fréquente de données de calage sur le secteur d'étude.

La modélisation apparaît donc comme un outil d'aide à la décision dans la qualification de l'aléa qui est validée par analyse géomorphologique.

Type de modèle

Les modèles numériques hydrauliques ont été construits en 2D.

Le travail d'amélioration du MNT à partir de levé de profil en travers 1D dans le lit mineur par un géomètre permet une nette amélioration de la représentativité des conditions d'écoulement dans le cours d'eau. Il est apparu essentiel sur le secteur d'étude où les lits mineurs sont capables de contenir une grande partie du débit de crue.

Aussi, le modèle 2D construit permettait d'approcher la robustesse d'un modèle 1D dans le lit mineur tout en offrant la possibilité d'analyser des écoulements 2D dans les zones d'étalement (plaine et milieu urbain), pour lesquels l'avantage du recours à la 2D est indéniable.

Par ailleurs, sur certains cas, un premier modèle 1D a permis un calcul de ligne d'eau pour notamment analyser la capacité hydraulique des ponts. Le logiciel HECRAS offre en effet beaucoup plus de possibilité de construction d'ouvrages en 1D qu'en 2D avec des calculs semblant plus robustes.

Enfin, il est important de rappeler que les incertitudes d'un modèle numérique sont nombreuses : choix du débit de référence sur bassins versants non jaugés et de l'hydrogramme de crue, approximation de la représentativité de la topographie (construction d'un maillage en 2D, implantation de profils en travers en 1D,...), choix des paramètres hydrauliques (coefficient de contraction, rugosité,...). **Aussi, la phase de validation par expertise géomorphologique et topologique du terrain est essentielle. Elle peut conduire à des ajustements des zones inondées.**

Résultats

Le modèle calcule la cote d'eau et la vitesse au niveau de chaque maille à chaque pas de temps. Ces résultats sont exploitables à l'aide de l'outil RASMapper.

Dans le cadre de l'étude, les résultats présentés seront :

- Une carte des hauteurs maximales (asynchrones : la hauteur maximale en chaque maille n'étant pas atteinte au même instant de la crue)
- Une carte des vitesses maximales (asynchrones)