



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 Villebois

Etude et cartographie des aléas - Rapport technique -

Cliché page de garde :

Vue depuis le pied de versant des demoiselles de la montagne de Cuny

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
13/06/2018	<i>Rapport technique - Etude et cartographie des aléas – commune de Villebois</i>	D07-37	65

	Nom Prénom	Fonction
Auteurs	Pierre Dupire	Ingénieur géologue
	David Etcheverry	Ingénieur hydraulicien
Relu et validé	David Binet	Chef du service RTM de la Savoie

Suivi des versions :

Version	Date	Observations
V0	24/05/2018	Envoi consultation commune
V1	13/06/2018	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	8
III ALEAS CHUTES DE BLOCS	10
III.1 Définition.....	10
III.2 Historique et données disponibles.....	10
III.3 Traitements préalables	10
III.4 Observations de terrain	11
III.5 Modélisations trajectographiques	16
III.6 Qualification de l'aléa	18
IV ALEAS GLISSEMENT DE TERRAIN	22
IV.1 Définition.....	22
IV.2 Historique et données disponibles.....	22
IV.3 Traitements préalables	22
IV.4 Observations de terrain	23
IV.5 Qualification de l'aléa	25
V ALEAS CRUES TORRENTIELLES	27
V.1 Définition.....	27
V.2 Historique et données disponibles.....	27
V.3 Observations de terrain : le ruisseau du Rhéby.....	27
V.4 Analyse hydrologique	36
V.5 Modélisations hydrauliques.....	41
V.6 Qualification de l'aléa	43
VI ALEAS DE RUISSELLEMENT	48
VI.1 Définition.....	48
VI.2 Méthodologie appliquée	48
VI.3 Historique et données disponibles.....	48
VI.4 Traitements préalables	49
VI.5 Observations de terrain	50
VI.6 Qualification de l'aléa	54
VII SYNTHÈSE DES ÉVÉNEMENTS HISTORIQUES	56
VIII ANNEXES	57
VIII.1 Annexe 1 : Méthode MEZAP	57
VIII.2 Annexe 2 : Description du modèle Rockyfor3D	59
VIII.3 Annexe 3 : description du logiciel HEC-RAS.....	63

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 méthodologique 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 26 février 2018 en mairie de Villebois en présence de M. LONGATE (Maire), MM. MERNIN et LAMBERT (élus), M. PONCON (technicien forestier ONF) et M. ETCHEVERRY (ONF-RTM).

- 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 Villebois s'étend sur 14,46 km². Le territoire s'étage entre 195 m au niveau du Rhône et 960 m au niveau du lieu-dit de La Roche au Nord-Est.

Il est délimité au Sud-Ouest par le Rhône, et par une succession de chainons montagneux du Jura à l'Est (Montagne de Cuny et Montagne de Chasse). Ces reliefs sont entaillés selon une direction Est-Ouest par le Rhéby dont le village de Bouis s'est implanté sur le débouché.

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 et plus marginalement en fond de vallée dans la zone vallonnée de l'Est.

Les inclinaisons supérieures à 45° correspondent à des falaises qui sont des zones de départ potentiel de blocs et de pierres. Les portions de versant pentées aux alentours de 35° correspondent à des éboulis qui sont relativement boisés ou ponctuellement exploités en vignes.

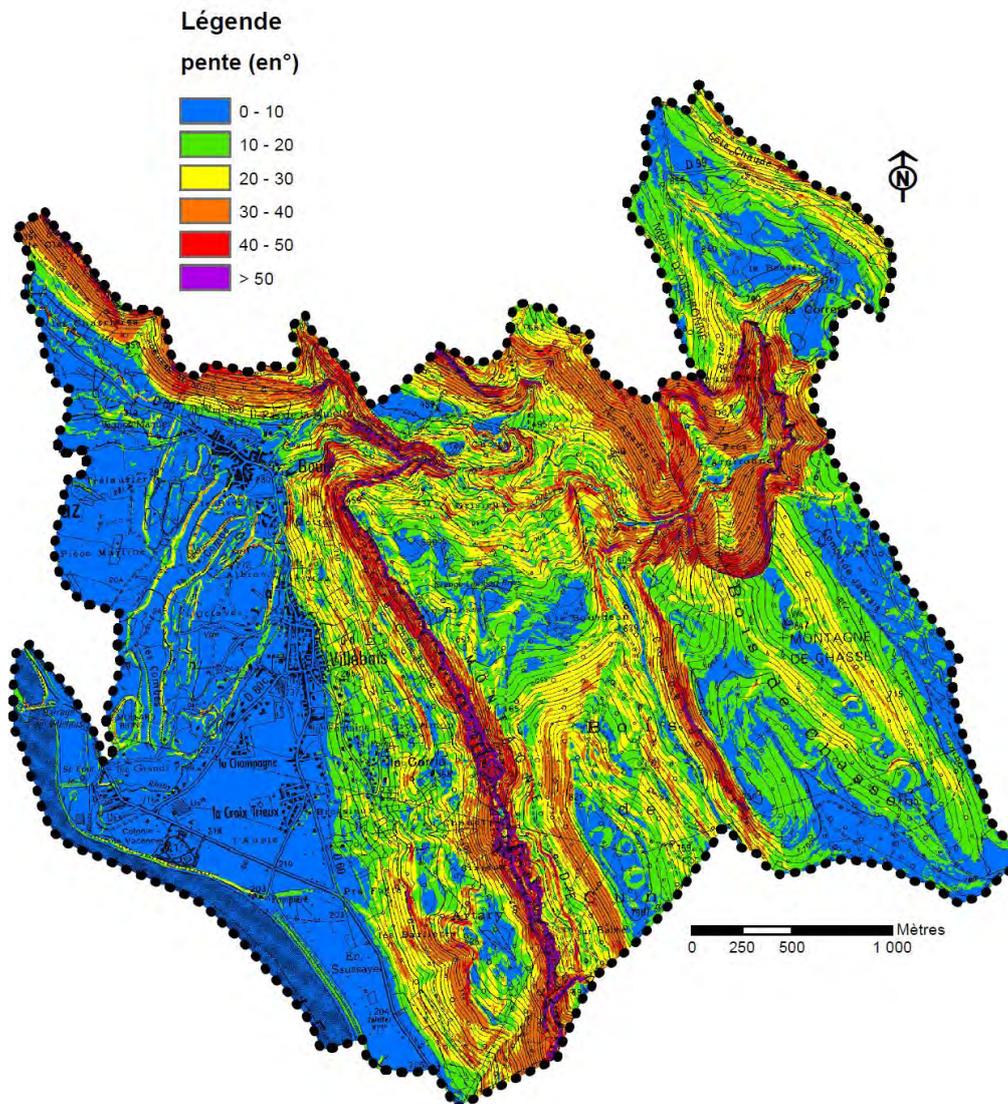


Figure 1 : carte des pentes

II.2 Contexte géologique

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

Cette unité 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. Le substratum du territoire communal est constitué de formations secondaires d'origine sédimentaire et datées du Jurassique moyen.

Les falaises dominant les zones urbanisées de la commune sont constituées de calcaires datés du Bajocien sous la forme d'une barre sub-verticale de hauteur très variable (jusqu'à 150 m environ). Des « demoiselles » se sont créées dans ces couches à la faveur des alternances de calcaires et de formations plus marneuses qui se sont érodées en forme de colonnes. Ces strates sont dominées par des calcaires du Bathonien et des formations plus marneuses de l'Oxfordien formant la montagne de Cuny.

La montagne de Chasse, et son prolongement vers le Nord, se composent également de calcaires du Bajocien mais ceux-ci sont plus massifs et compacts.

Notons au Nord-Ouest de la commune sur les reliefs adoucis, la présence du fameux « choin » de Villebois (calcaire gris et compact qui a longuement été exploité pour la construction de nombreux édifices en France et même à l'étranger). Les vestiges de ces carrières sont encore visibles aujourd'hui.

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.

Par ailleurs, le versant Ouest de la montagne de Cuny a connu des glissements d'ampleur.

La zone de La Tuffière/Les Choux/Le Bourgeon est recouverte par une couche de matériaux morainiques.

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.

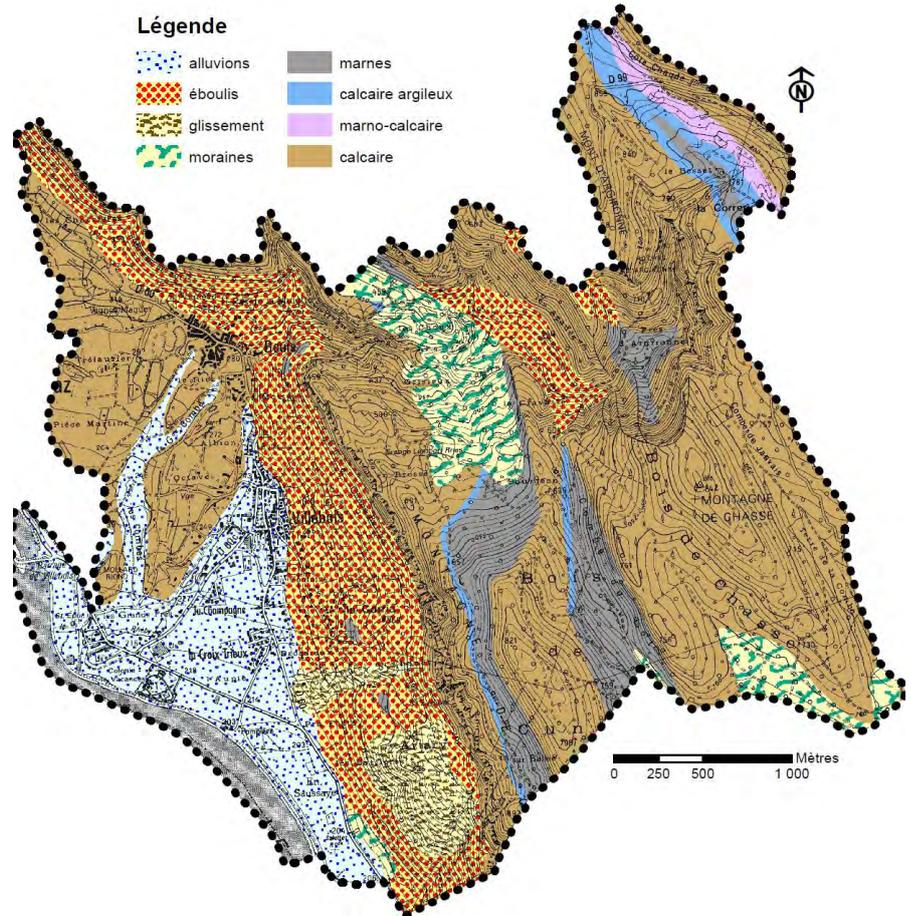


Figure 2 : carte géologique simplifiée

II.3 Contextes hydrographique, hydrologique et hydrogéologique

NB : le contexte hydrologique sera abordé plus en détail aux paragraphes dédiés aux crues torrentielles et au ruissellement.

Conformément au cahier des charges, le risque d'inondation par le Rhône n'est pas abordé dans le dossier présent.

Les zones habitées de Villebois se situent au pied du versant Ouest de la montagne de Cuny.

Sur ce versant, dominé par des falaises calcaires et au pied desquelles les terrains sont essentiellement constitués d'éboulis, surtout sous couvert forestier, l'infiltration est importante et très peu d'axes d'écoulement n'apparaissent marqués. Aussi, les zones d'enjeux sont très peu exposées à des problématiques de ruissellement liées à une concentration des eaux débouchant au pied du versant.

A l'Est de la Montagne de Cuny, le territoire communal est entièrement boisé et naturel. Il constitue le bassin de réception du ruisseau du Rhéby qui débouche au nord des zones d'enjeux et les traverse dans un axe NE-SO pour rejoindre le Rhône. Il s'agit du seul réel ruisseau sur la commune. Sa description sera abordée dans la suite du rapport.

Enfin, notons que de manière générale, le secteur d'étude est connu pour sa particularité karstique qui engendre inévitablement des écoulements souterrains difficiles à appréhender en l'absence d'investigations spécifiques.

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 tenu des pentes très faibles 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 probables, 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 potentielles de départ. 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 (dus 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 seront de manière prépondérante liées aux flottants et au risque d'embâcles. Des problèmes d'engravement seront également observés localement mais souvent là où des problèmes liés à des embâcles sont déjà existants (entrée d'ouvrage, lit à faible 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 :

- Commune de Villebois. Réunion de travail du 26/02/2018.

Evènements historiques :

Aucun évènement daté ayant atteint un enjeu n'est connu sur la commune. En revanche, plusieurs indices de terrain, sites potentiels ou avérés ont été soulignés par la commune lors de la réunion de travail.

Secteur	Date	Observation(s)	Source(s)
Trois demoiselles, à l'aplomb du hameau de Lacaria	Inconnue	Au pied des trois Demoiselles, sur une bande d'au moins 60 m de large et 150 m de long, des blocs de 10 à 15 m ³ /unité sont identifiables sur le terrain. Aucune chute de blocs n'aurait néanmoins déjà atteint le hameau de Lacaria, zone d'enjeux la plus proche	Commune
Forêt au nord du champ sous les trois demoiselles		Des blocs sont identifiables sur le terrain.	Commune
Montagne de Cuny, Sixieux sur IGN	Il y a 25-30 ans	Les blocs qui se sont propagés le plus à l'aval dateraient de 25-30 ans.	Commune
Extrémité Sud, Montagne de Cuny	Début des années 2000	Des chutes de blocs auraient détruits des arbres sur près de 7 à 8 mètres de hauteur	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 aperçus 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 constitue un premier niveau 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°.

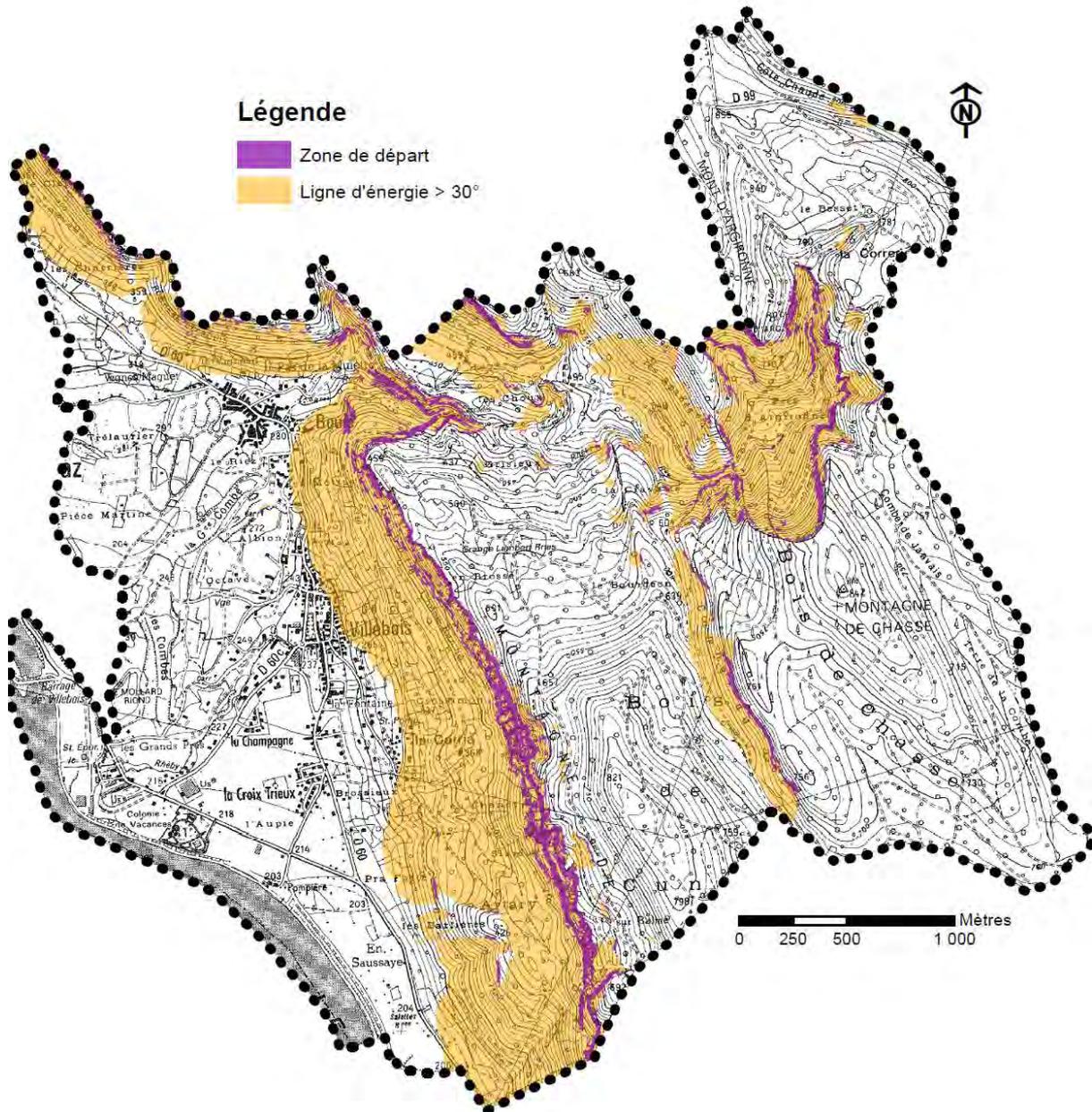


Figure 3 : Carte des zones d'atteintes potentielles de chutes de blocs

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 depuis le pied de falaise ou à distance, sans reconnaissance en techniques alpines, non prévue au marché.

Le niveau d'investigation des PPR ne permet pas de se prononcer sur la stabilité de masses très volumineuses telles que les demoiselles ou les « dents décollées » présentes sur le territoire d'étude. La survenance de tels scénarios dépasserait très amplement un phénomène centennal.

III.4.1 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 Sixieux - Artary

Le secteur Sud de la commune au niveau de la montagne de Cuny présente une paroi verticale de près de cent mètres de hauteur au pied de laquelle se localise un replat assez marqué d'environ 200 m de largeur qui correspond à un dépôt d'ancien glissement d'après la carte géologique du BRGM. La falaise est relativement déstructurée avec des volumes importants potentiellement mobilisables (plusieurs centaines de mètres cubes voire éboulement). La propagation du phénomène quel qu'il soit ne devrait pas excéder la terrasse formée par le replat.

En bordure du replat, une seconde série d'affleurements bien moins marqués (quelques dizaines de mètres cubes tout au plus) peuvent localement libérer des blocs dont le volume peut être supérieur à 1 m³.

III.4.3 Secteur En Chanot

Plus au Nord, le versant montre les vestiges d'un éboulement en masse sur le secteur d'En Chanot avec des blocs éboulés atteignant jusqu'à plus de 200 m³. Ce dépôt provient de l'effondrement d'une première barre rocheuse vraisemblablement décollée de la paroi principale, comme le laisse présumer la partie Sud encore intacte qui devait constituer son prolongement. Si l'éboulement est récent à l'échelle géologique, celui-ci semble relativement ancien puisque l'observation des photo-aériennes jusqu'en 1939 permet déjà d'observer ce dépôt à cette époque. Des blocs issus de cet éboulement sont visibles, au moins jusqu'à la cote 250 m, avec des gros blocs de plus de 100 m³.

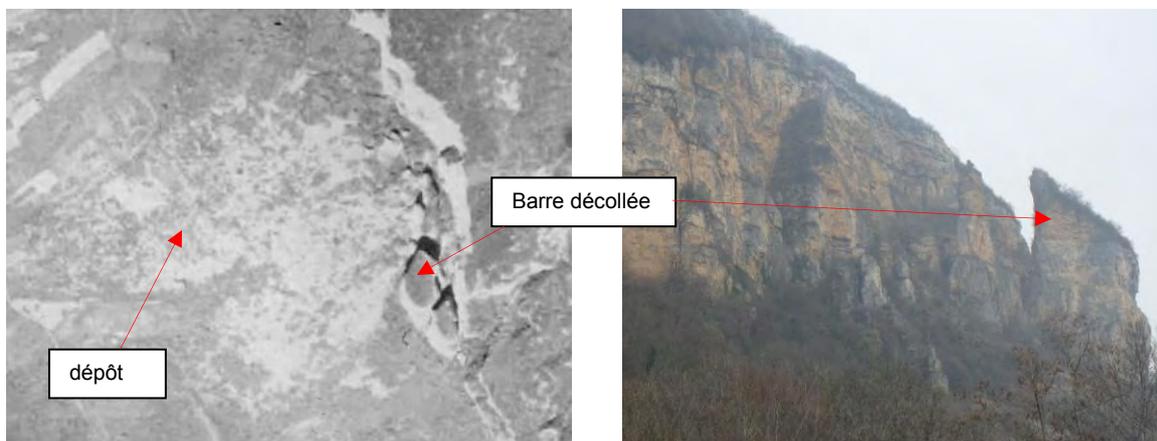


Figure 4 : extrait de la photoaérienne de 1939 (à gauche) et vue vers le Sud de la falaise à droite



Figure 5 : vue de la zone éboulée sur le secteur d'en Chanot



Figure 6 : blocs éboulés (à gauche dans le dépôt environ 300 m³), à droite à la cote 300 m au Sud de Lacaria environ 200 m³)

Aucun indice observé ne permet de considérer comme scénario de référence du PPR un effondrement en masse de ce type pour les parois décollées restantes. En revanche de nombreuses instabilités atteignant jusqu'à 100 m³ ont été relevées en paroi.

La topographie du versant étant marqué par le dépôt de l'éboulement qui a formé un véritable replat, les éventuelles propagations devraient être relativement limitées. D'autant que les matériaux éboulés donnent une rugosité importante au terrain.



Figure 7 : exemples de masses pouvant se mobiliser

III.4.4 Secteur de Lacaria

A ce niveau, la paroi principale est d'environ 100 m de hauteur avec la présence de demoiselles formant des colonnes de hauteurs sensiblement identique. Globalement le rocher est assez peu déstructuré.



Figure 8 : vue d'ensemble de la falaise au droit de Lacaria

Seule une cicatrice relativement fraîche a été identifiée et permet de définir un scénario de référence : éboulement de 100 m³ donnant des blocs unitaires de 1 m³ (2 m³ tout au plus).



Figure 9 : cicatrice déboulement constaté et matériaux éboulés

A ce niveau aussi, le versant forme un replat à mi-pente. Cette topographie est favorable à un arrêt des blocs. D'ailleurs aucun bloc n'est visible sur le versant de part et d'autre du chemin de Porte qui transite en-amont du lieu-dit de Lacaria.

III.4.5 Secteur de Le Mas – Les Mottes

Cette partie constitue l'extrémité Nord de la Montagne de Cuny. La paroi précitée dans les autres secteurs s'atténue pour atteindre une hauteur variant entre 50 et 20 m.

La falaise semble ici plus déstructurée ce qui peut engendrer une chute plus fréquente mais de matériaux moins volumineux. Ceci est corroboré par de nombreuses cicatrices (patine

jaunâtre sur la paroi). L'essentiel des matériaux s'arrêtent directement en pied de falaise ou est stoppé par la forêt du versant. Toutefois la pente ne marque pas de replat intermédiaire comme sur les autres zones. Les matériaux pourraient par conséquent atteindre le pied de versant.



Figure 10 : extrémité Nord de la montagne de Cuny

III.4.6 Secteur Bouis – Le Vigneau – Pas de la Mulette

A ce niveau l'affleurement est peu marqué (de l'ordre de 10 m de hauteur), il est parfois même masqué par la végétation et il est discontinu. Le pendage est subhorizontal voire même conforme à la pente selon le cas. La stratigraphie montre des couches peu épaisses de 50 cm tout au plus. Il en demeure une possibilité de chutes de blocs inférieurs à $0,25 \text{ m}^3$.

Peu de blocs éboulés ont été repérés sur le versant, seule la zone au-dessus du Vigneau présente quelques pierres éboulées.



Figure 11 : affleurements au droit du secteur

III.4.7 Autres secteurs

D'autres zones d'affleurements rocheux, n'intéressant pas les zones d'enjeux, ont été repérées. Citons :

- Les gorges du Rhéby qui disposent de falaises de 100 m de hauteur avec des départs de 5 m^3 possibles;
- Le versant Ouest de la Combe du Lot qui présente des affleurements peu marqués mais pouvant libérer des blocs ;
- Le secteur des Charrières qui présente un contexte similaire à celui du Vigneau.

III.5 Modélisations trajectographiques

III.5.1 Périmètre modélisé

Les zones modélisées se localisent à l'aplomb des secteurs urbanisés ce qui correspond dans le cas présent à la falaise de la montagne de Cuny de Lacaria à Bouis, et les affleurements dominant Le Vigneau et le Pas de la Mulette.

III.5.2 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.5.3 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.5.4 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 ($rg10$ / $rg20$ / $rg70$).

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.

Les hypothèses de départ retenues correspondent à un bloc de 100 m³ sur la falaise au niveau d'En Chanot, de 2 m³ en amont de Lacaria et 0,25 m³ pour les secteurs du Vigneau et du Pas de la Mulette. Ces valeurs correspondent à des masses potentiellement instables observées. Pour chaque pixel de 1 m identifié comme zone de départ, il a été lancé 1000 blocs dans la modélisation.

Remarque : Il conviendra de rester prudent avec les résultats pour les modélisations de 100 m³ car les calculs trajectographiques sont généralement peu appropriés pour de tel volume. La cohérence des résultats sera confrontée avec les observations de terrain.

III.5.5 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.

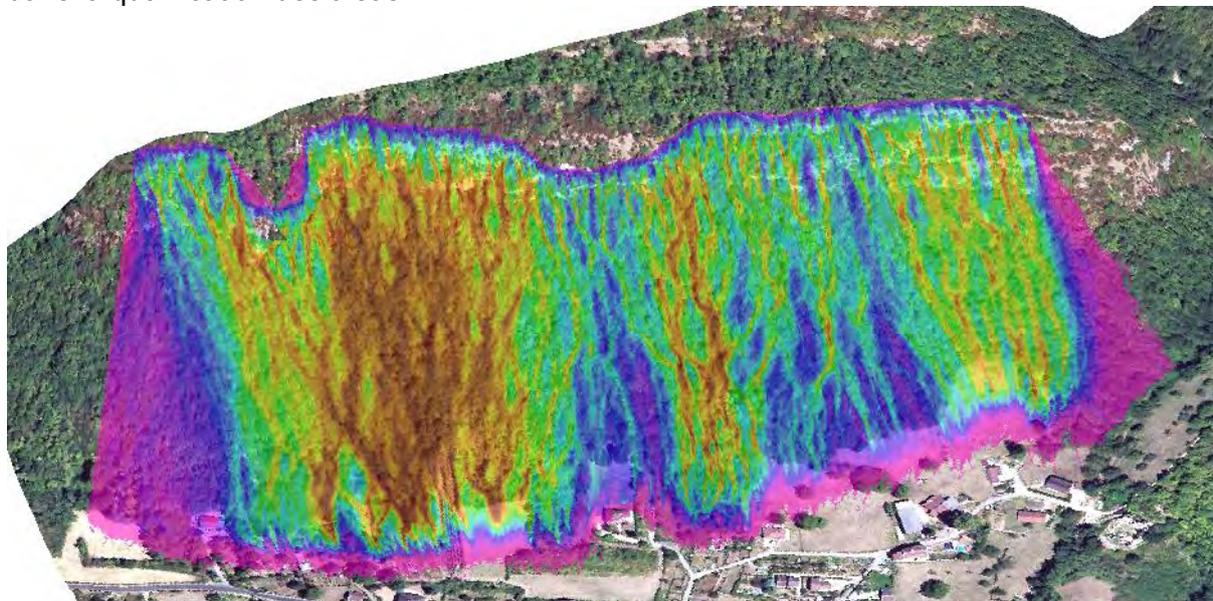


Figure 12 : carte des modélisations RF3D en amont du Vigneau et du Pas de la Mulette

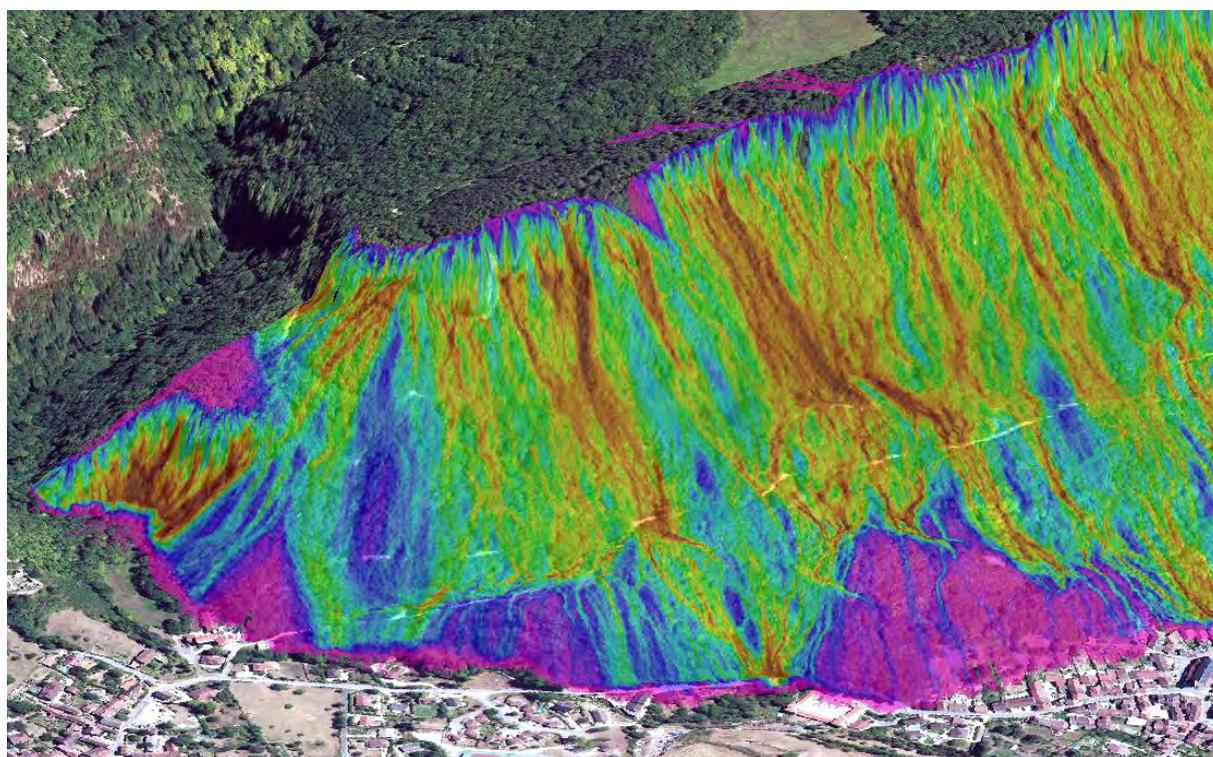


Figure 13: carte des modélisations RF3D en amont de Bouis, Les Mottes, Le Mas

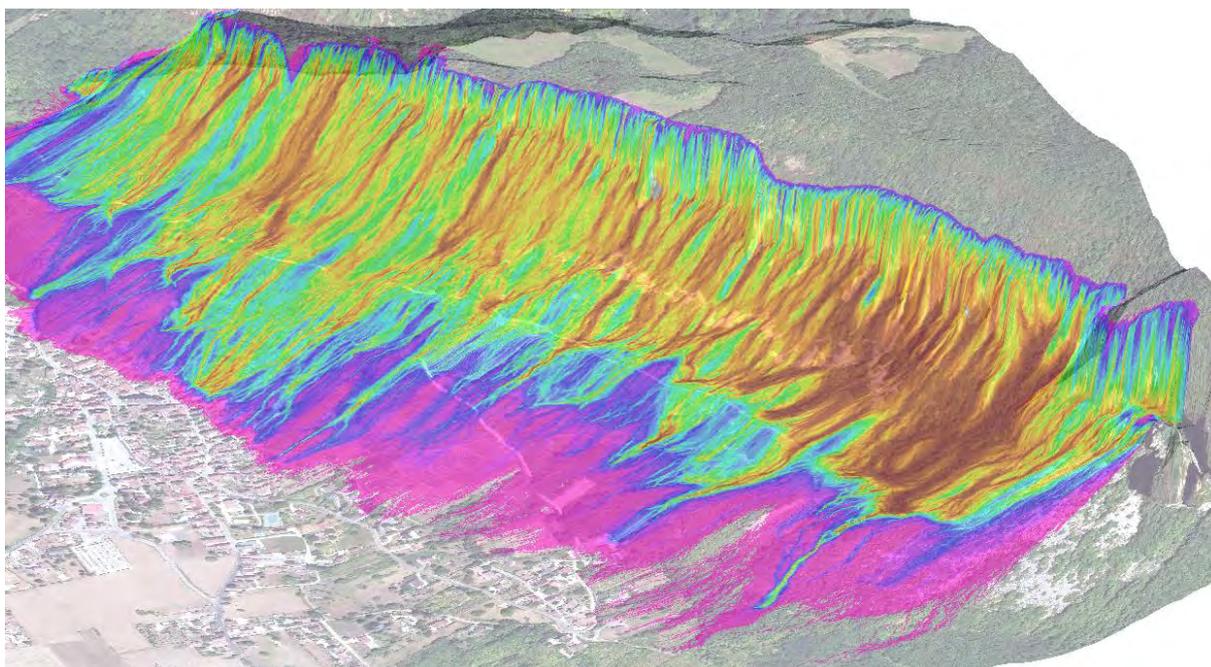


Figure 14: carte des modélisations RF3D au droit du chef-lieu, de la Fontaine et de Lacaria

III.6 Qualification de l'aléa

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

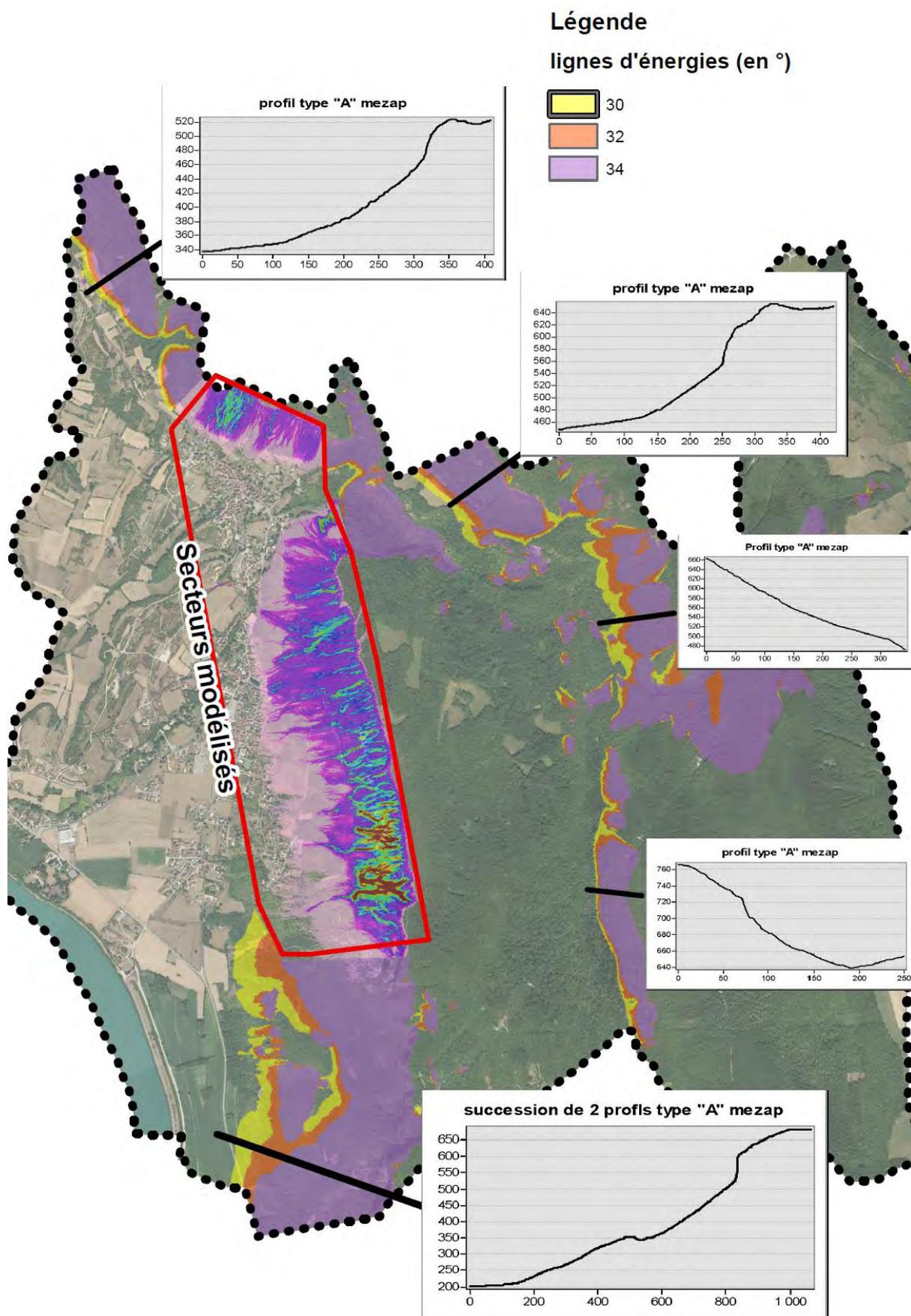


Figure 15 : Traitements appliqués en fonction du type de secteur

III.6.1 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.

	Intensité	Activité	Probabilité d'atteinte		Probabilité d'occurrence	Aléa résultant
Les Charrières	V≤0,25 m ³ Faible	Moyen	Fort	34°	Très élevée	Fort P3
			Moyenne	32°	Elevée	Fort P2
			Faible	30°	Modérée	Fort P1
Gorges du Rhéby	1<V≤10 m ³ Elevée	Fort	Fort	34°	Elevée	Fort P3
			Moyenne	32°	Elevée	Fort P3
			Faible	30°	Modérée	Fort P3
Combe du Lot	V≤0,25 m ³ Faible	Fort	Fort	34°	Très élevée	Fort P3
			Moyenne	32°	Elevée	Fort P2
			Faible	30°	Modérée	Fort P1
Artary	V> 10 m ³ voir éboulement Elevée	Fort	Fort	34°	Elevée	Fort P3
			Moyenne	32°	Elevée	Fort P3
			Faible	30°	Modérée	Fort P3

Tableau 3: croisement méthode MEZAP par secteur

III.6.2 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 4 : grille de qualification des aléas chutes de blocs en zone urbanisée

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)

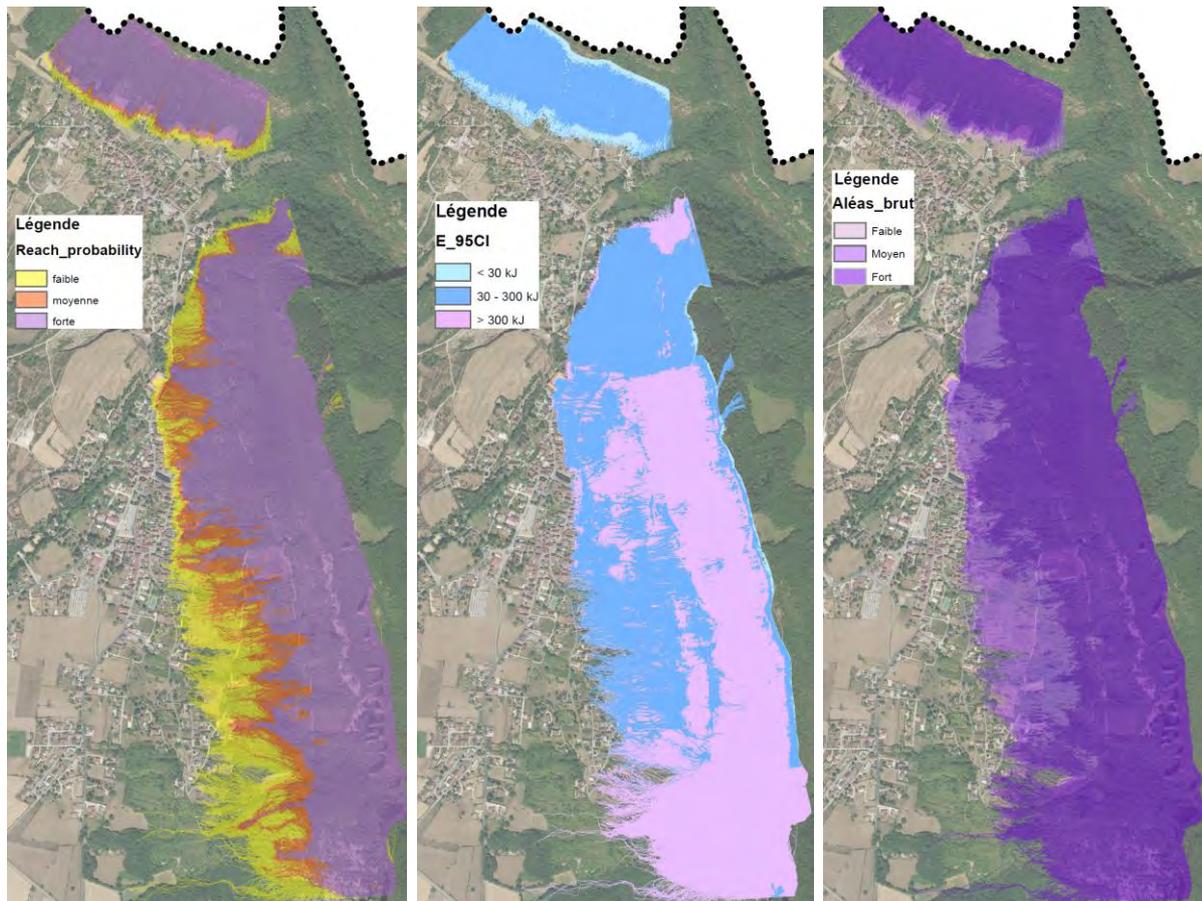


Figure 16 : Croisement probabilité d'atteinte avec intensité et aléa brut résultant

III.6.3 Aléas résultants

Concernant le versant Ouest de la montagne de Cuny, l'aléa est fort depuis les falaises jusqu'à la terrasse à mi versant sur tout le linéaire. Dans la zone d'En Chanot, ce zonage fort descend plus bas sur le versant compte tenu d'une très forte intensité due à des blocs au départ de plus de 100 m³ et des gros blocs éboulés visibles jusqu'à la cote 250m (en témoignent les vestiges d'un gros éboulement). Le zonage d'aléa fort descend également au niveau du Chef-Lieu et de Bouis car cette partie du versant ne dispose pas de terrasse à mi-pente qui limite les probabilités d'atteintes. De l'aléa moyen est attribué sur les parties sous-jacentes à la faveur de la probabilité d'atteinte et/ou des énergies développées. Cela concerne toute la partie Est du Chef-lieu et la partie haute de Lacaria.

Sur la zone de Vigneau et du Pas de la Mulette, le dégradé d'aléa fort/moyen/faible concerne essentiellement le versant proprement dit. Seule une habitation est comprise dans l'enveloppe aléa faible. Plusieurs maisons, a priori non concernées, se localisent néanmoins en limite avec ce zonage.

Dans les zones naturelles l'aléa est généralement considéré comme fort jusqu'en pied de versant du fait de l'intensité. Par exemple, les gorges du Rhéby disposent de blocs au départ supérieurs à 1 m³, et le secteur d'Artary peut connaître de véritables éboulements.

En revanche la zone de la combe du Lot et celle des Charrières ont une intensité faible. Le zonage des aléas forme de fait un dégradé de fort sur les parties hautes à faible sur les parties basses.

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 Villebois. Réunion de travail du 26/02/2018.

Evènements historiques :

Selon les témoignages recueillis le 26/02/2018 lors de la réunion de travail, aucun secteur d'enjeux ne serait sujet à un aléa glissement sur la commune. Il n'y a d'ailleurs pas d'historique répertorié sur la base de données georisques.gouv.fr.

Le seul éventuel indice signalé par la Mairie sur le territoire communal serait l'instabilité apparente des terrains avec existence de résurgences du versant rive gauche du Rhéby, vers le chemin de Porte. Il n'existe aucun enjeu habité sur ce secteur.

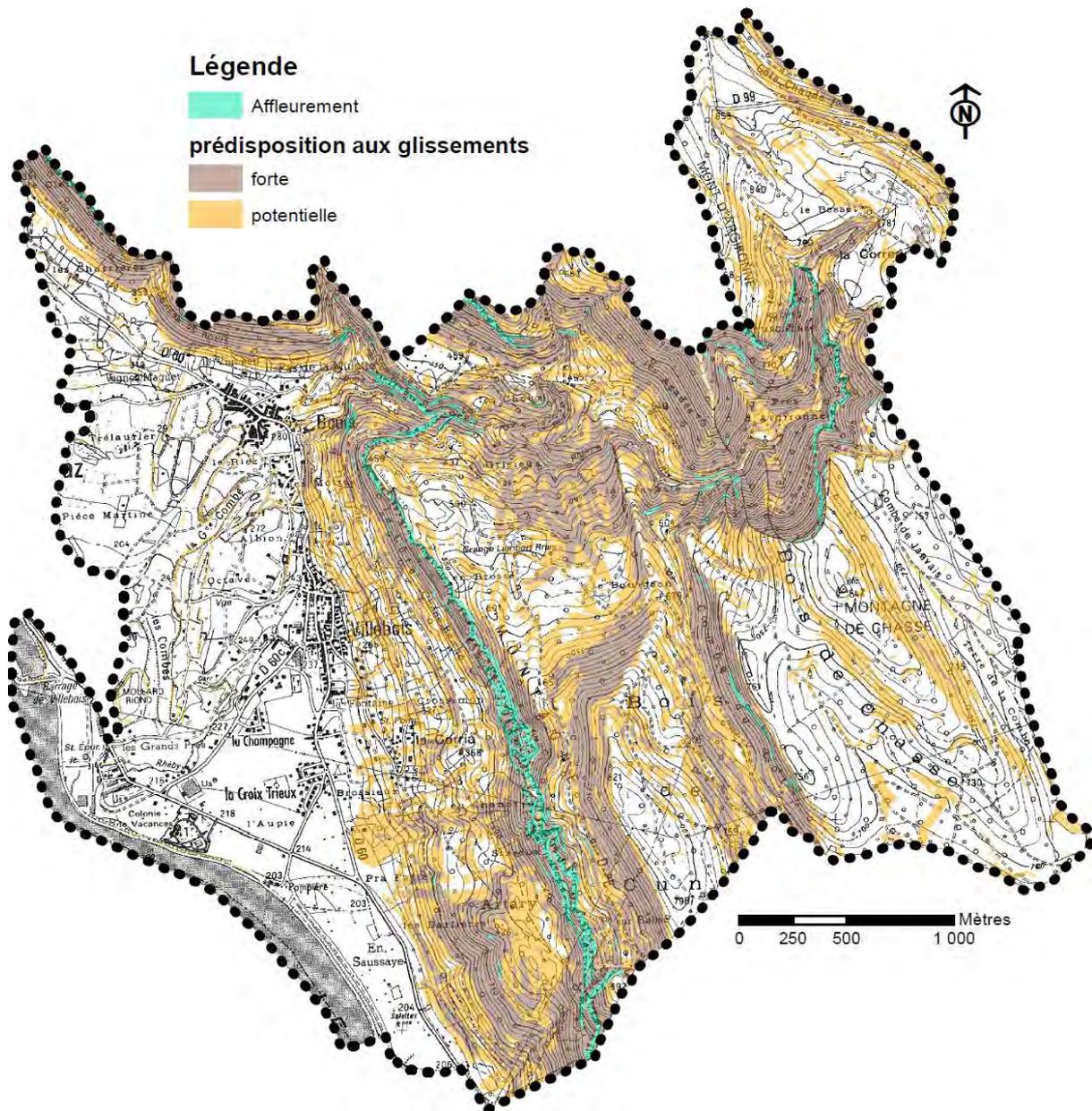
IV.3 Traitements préalables

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, glissement)	drainées	-	-	potentielle	forte	-	-
	humides	-	potentielle	forte	forte	-	-
Quaternaire argileux (moraine, colluvions, limon)	drainées	-	potentielle	potentielle	forte	forte	-
	humides	potentielle	potentielle	forte	forte	forte	-
Molasse	drainées	-	-	potentielle	forte	forte	-
	humides	-	potentielle	forte	forte	forte	-
Calcaire argileux	drainées	-	-	potentielle	forte	forte	-
	humides	-	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 5 : prédisposition des terrains aux glissements



IV.4 Observations de terrain

IV.4.1 Secteur d'Atary

Le secteur d'Atary est relativement sensible aux glissements du fait d'une pente soutenue et d'une nature des sols composée en grande partie par un glissement ancien (probablement un effondrement historique) dans lequel les matériaux sont altérés. Cette zone reçoit, qui plus est, des écoulements provenant des falaises qui s'infiltrent dans les éboulis et ressort au droit des zones sensibles.

IV.4.2 Secteur « zone urbaine de Villebois »

Le versant Ouest de la montagne de Cuny qui domine les enjeux habités de Villebois présente une pente comprise entre 20 et 30°. Bien que cette dernière soit essentiellement composée de cailloutis, ces derniers sont entremêlés à des fines argileuses issues de la frange

d'altération de surface. Aucun arrachement n'est visible, en revanche on distingue en pied de versant des indices de pressions sur les murs de soutènement (bombement) informant sur des mouvements lents.



Figure 18 : murs bombés au niveau de l'école

IV.4.3 Secteur Gorges du Rhéby

Les versants de part et d'autre des gorges du Rhéby sont relativement sensibles aux glissements. Deux types de mouvements existent ici :

- Des glissements de la couverture morainique dont les propriétés géomécaniques sont réputées comme médiocres du fait de leur teneur en argile. Cela intéresse les zones du Bourgeon, La Grange Lambert, Grisieux, Les Choux, La Grange Mignaval ; à ce niveau de nombreuses exurgences sont visibles et les terrains ont une configuration chahutée. La simple lecture de la carte IGN corrobore ce constat avec des courbes de niveaux très ondulées. Notons que le facteur « pente » joue également un rôle important ici avec une valeur moyenne de 20°.
- Des glissements superficiels de la couverture de surface, composée d'une frange d'altération qui recouvre le substratum. Cette dernière a des épaisseurs variables de quelques centimètres à plusieurs mètres. Les éboulis, pourtant réputés peu sensibles aux glissements du fait de leur frottement, sont également concernés car altérés sur une épaisseur considérable. Les pentes de ces zones favorisent aussi la déstabilisation des terrains puisqu'elle est en moyenne de 30°. Plusieurs décrochements en forêt témoignent de l'activité de ces zones. Les secteurs concernés sont Les Prés d'Argironne, Les Aranés, La Cravatte.

IV.4.4 Secteur La Roche, Côte Chaude, Le Besset, La Corrierie

Cette zone qui forme l'extrémité Nord-Est de la commune se caractérise par une vaste combe dont les versants sont en calcaires argileux ou marno-calcaires. Ces formations sont sujettes à une altération sous forme de matériaux argileux. La couverture de surface est donc sensible aux glissements sur les pentes supérieures à 20° et c'est d'autant plus le cas lorsque les sols sont gorgés d'eau.

Plusieurs indices de mouvement ont été relevés : sols bombés, terrains gras, poteaux PTT inclinés, route déformée, etc.



Figure 19 : Talus routier bombé et poteau incliné au droit de la RD99

IV.4.5 Secteur entre Les Charrières et Pas de la Mulette

Le versant dominant ces lieux-dits dispose d'un substratum dont le pendage est quasiment parallèle à la pente. L'épaisseur de la couche de surface est variable (jusqu'à plusieurs mètres en pied de versant). Cette configuration est propice à des glissements par effet « toboggan » : la couche superficielle peut glisser au contact de l'affleurement.

Aucun indice n'a été relevé mais il est possible que les éventuelles traces soient masquées par la végétation dense de ce versant.

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.

L'intensité est 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 méthodologique PPR montagne

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 7 : Probabilité d'occurrence 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 8 : Aléa glissement de terrain selon guide PPR montagne

IV.5.2 Aléas résultants

Le secteur d'Atary ainsi que les versants de part et d'autre du Rhéby sont considérés en aléa fort avec une probabilité d'occurrence élevée (glissements historique sur Atary, traces d'activité marquée sur les versants du Rhéby). L'intensité peut également être élevée au regard des vestiges de glissements visibles.

Le versant dominant les zones urbaines de Villebois est classé en aléa faible du fait de sa nature du sol lui conférant une probabilité d'occurrence faible (cailloutis, éboulis) et d'une intensité jugée également peu marquée (pas d'indice sur bâti, simples traces de bombement de mur de soutènement).

Les secteurs de La Roche, Côte Chaude, Le Besset, La Corrierie et entre Les Charrières et Pas de la Mulette sont en aléa moyen avec une probabilité d'occurrence moyenne à forte (indices visibles, nature du sol propice) mais l'intensité est faible compte tenu d'une épaisseur de sol mobilisable très limitée.

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.

Sur la commune de Villebois, le seul cours d'eau référencé et étudié dans ce chapitre est le ruisseau du Rhéby.

V.2 Historique et données disponibles

Sources d'informations consultées :

- Site web : <http://www.georisques.gouv.fr/>
- Commune de Villebois. Réunion de travail du 26/02/2018
- Enquête de terrain : lors de la phase de terrain, des témoignages de riverains ont pu être recueillis. Le cas échéant, les éléments notables sont repris dans la description des observations de terrains.

Evènements historiques :

Aucun débordement connu du ruisseau du Rhéby n'a été signalé par la commune. Seul un affluent, le Riou, aurait un historique de débordement connu. Il sera traité au chapitre concernant l'aléa ruissellement.

La commune signale toutefois des possibles désordres au niveau du lavoir des sœurs en cas de forte crue. Ce point se situe au cœur de la traversée de la zone urbanisée.

V.3 Observations de terrain : le ruisseau du Rhéby

V.3.1 Généralités sur le ruisseau

Le ruisseau du Rhéby prend sa source sous le col de Portes et draine un vaste bassin versant de 10,7 km² qui s'étend majoritairement sur les territoires communaux de Souclin et Villebois et à la marge, en limite sommitale du bassin de réception, sur Bénonces. Il débouche, sur son cône de déjection, sur la commune de Villebois et la traverse pour confluer avec le Rhône.

En amont de la traversée de Villebois, le bassin versant est totalement naturel et majoritairement sous un vaste et dense couvert forestier.

V.3.2 Problématique liée aux apports solides

Transport de matériaux solide

L'observation du lit du Rhéby sur la traversée de Villebois laisse supposer un transport solide assez faible sur ce ruisseau. Pour autant, pour un scénario centennal, un apport plus important de matériaux solides alors charriés par le ruisseau n'est pas exclu, d'autant plus que les berges du torrent ont été identifiées comme sensibles au glissement de terrain (cf. paragraphe IV.4.3).

L'analyse du profil en long montre une première rupture de pente notable plus d'un kilomètre en amont de la traversée de Villebois. En cas d'apports solides lors des crues, cette rupture de pente serait favorable au dépôt et à la régulation d'une partie des matériaux charriés.

Une deuxième rupture de pente est à noter à partir du secteur de l'école. Aussi, des dépôts pourraient se former sur le linéaire en amont de l'école.

A l'aval de l'école, la pente reste globalement régulière jusqu'au Rhône. La capacité de charriage, 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 sur ce tronçon. En revanche, des dépôts ou érosion locale peuvent être observés à la faveur d'élargissement du lit ou de contraction, ou encore de perturbations liées à des embâcles.

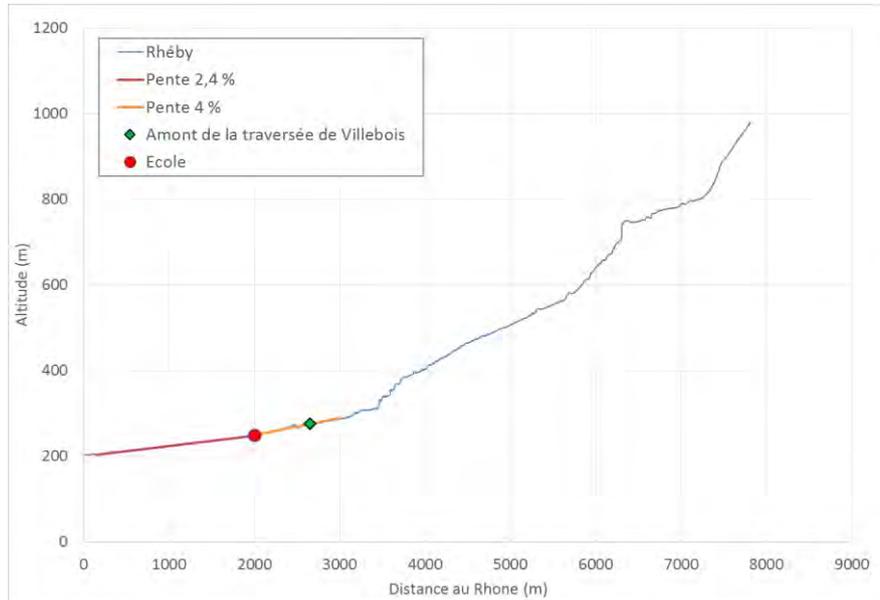


Figure 20 : Profil en long du Rhéby

Flottants :

Le bassin versant et les berges du ruisseau dans sa partie naturelle sont majoritairement sous couvert forestier. Aussi, le transport de bois et flottants en crue est très probable. Ce risque génère un risque d'obstruction d'ouvrages de franchissement qui sera considéré dans le cadre de la qualification de l'aléa.

En zone urbaine où le lit est chenalisé, la végétation observée peut également contribuer à ces apports de flottants et aux perturbations associées. A cela s'ajoute, la possibilité de remobilisation d'objets divers ou mobilier urbain.



Figure 21 : Exemple de flottants possibles : arbre au milieu du lit entre deux ponts (à gauche) - caravane au sommet de berge (à droite)

V.3.3 Partie amont de la traversée de Villebois (jusqu'à la RD60)

Au débouché dans Villebois, le Rhéby franchit trois ponts successifs. Les deux premiers présentent un risque important de débordements, notamment en cas d'embâcles. La situation encaissée du ruisseau limite l'emprise des débordements. Toutefois, un garage et une propriété en rive gauche sont exposés à cet aléa. Le troisième pont est hors d'atteinte (plus de 5 mètres de tirant d'air).



Figure 22 : Ouvrages sur le Rhéby au niveau des premiers enjeux

Le ruisseau est ensuite encaissé sur plusieurs mètres jusqu'au franchissement de la route départementale RD60. Deux passages couverts sont à noter sur ce linéaire : le premier long de quelques mètres passe au-dessus d'un bâtiment privé ; le second est long de plusieurs dizaines de mètres et permet le passage sous un champ et le franchissement de la route départementale.



Figure 23 : Linéaire encaissé



Figure 24 : Deux passages couverts sur le linéaire encaissé

Même si les deux passerelles en amont permettent l'arrêt probable des plus gros embâcles issus du bassin versant, le court linéaire encaissé entre les passerelles et ces deux ouvrages du linéaire encaissé peut réalimenter le ruisseau en flottants.

Le franchissement sous la RD 60 a un gabarit hydraulique limité. Son obstruction au moins partielle par flottants est probable. Il est vraisemblable que la mise en charge de l'ouvrage sur plusieurs mètres de haut permette, avant débordement par surverse, d'évacuer un débit centennal avant débordements, voire la rupture des embâcles par action de la pression de l'eau. Néanmoins, pour un épisode d'occurrence centennale, l'obstruction totale (même temporaire) ne peut être exclue avec certitude. Aussi, un affichage de risque de surverse, de probabilité faible, est conservé. Le cas échéant, l'eau surversant s'étend sur le champ aval et suit la route jusqu'à l'aval de l'école.



Figure 25 : Débordement possible, de probabilité faible

V.3.4 De la RD60 à l'école

Après franchissement de la route départementale, le Rhéby est encore encaissé entre des propriétés. La végétation dans le lit est importante.



Sur ce tronçon, le ruisseau est franchi par un pont. Comme en amont, son gabarit est réduit mais l'ouvrage peut être mis en charge sur plusieurs mètres. En revanche, au vu de la dégradation du parement amont du pont, la stabilité de la route en cas de mise en charge est incertaine. Les débordements rejoindraient directement le lit aval.



A l'aval, le lit est encore encaissé et présente deux terrasses en lit majeur où s'établissent des jardins privés. Du mobilier urbain (caravane, cabane,...) sont à noter au sommet des berges : cf. Figure 21.

Le Rhéby est ensuite canalisé sous l'école au travers d'un ouvrage voute au tirant d'air de 2 m. Pour un épisode centennal, la probabilité d'obstruction au moins partielle de cet ouvrage est forte. Elle est liée à la végétation sur le lit en amont immédiat, au mobilier urbain pouvant fournir des flottants, à la stabilité incertaine du pont amont et à la rupture de pente du profil en long pouvant favoriser des dépôts.

En cas d'obstruction partielle et de montée du niveau d'eau, des débordements sont possibles des deux côtés de l'école.



Figure 26 : Passage couvert sous l'école

En rive droite, les débordements contourneraient les bâtiments de l'école et retourneraient au lit du Rhéby. L'école est exposée, notamment avec une porte du côté amont.



Figure 27 : Retour au Rhéby des débordements contournant l'école par la rive droite

En rive gauche, ils suivraient la route départementale et seraient susceptibles de se déverser en différents points vers le lit mineur. Les débordements peuvent s'étendre jusqu'à un point bas de la RD 60 au niveau de la ruelle des Sœurs. Les débordements chemineraient alors entre les propriétés pour retourner au Rhéby à l'aval immédiat du lavoir des Sœurs.



Figure 28 : Direction suivie par les débordements sur la RD 60 puis au niveau de la ruelle des Sœurs.

V.3.5 Traversée densément urbaine

Sur une première partie de la traversée, le ruisseau est franchi par une succession de passerelles. La capacité des ouvrages sera vérifiée par modélisation. Quoi qu'il en soit, des flottants pourraient favoriser des débordements.

Une propriété en rive droite est estimée comme exposée. Elle est en effet plus basse que la berge et le mur en pierre constituant la berge ne peut être une garantie de protection. Hormis cette propriété, les débordements possibles au niveau de passerelle s'étendraient sur la route, déjà estimée inondable par les eaux provenant de l'amont de l'école.



Figure 29 : Succession de passerelle dans la traversée urbaine et maison en rive droite exposée

Sur le secteur du lavoir des Sœurs, outre les habitations en rive gauche inondables par les débordements issus de la RD60, en amont immédiat de la passerelle, la propriété rive gauche, qui constitue la berge du ruisseau, est considérée comme exposée au vu des ouvertures coté ruisseau, et notamment en cas d'obstruction de la passerelle.



Figure 30 : Propriété rive gauche en amont de la passerelle menant au lavoir des Sœurs.

Un peu plus en aval, le ruisseau franchit une route communale au travers d'un ouvrage au gabarit hydraulique limité. En cas de mise en charge, pouvant être favorisée par des flottants, la montée du niveau d'eau en amont pourrait atteindre des propriétés en rive gauche, notamment via un point bas au niveau de la berge (escalier dans une propriété privée).



Figure 31 : Point bas sur la berge rive gauche

A l'aval de cette traversée densément urbaine, le ruisseau s'écoule dans un lit bien marqué et de façon rectiligne jusqu'à l'approche du boudrome.

V.3.6 Secteur autour du boudrome

En amont du boudrome, le ruisseau est franchi par le chemin de la Gare. Des débordements sont possibles au niveau du pont. L'essentiel des débordements devrait retourner au lit mineur après avoir également suivi la route. La propriété en rive gauche à l'aval immédiat du pont est considérée comme exposée. En rive droite, la cour et la propriété sont également susceptibles, pour un scénario centennal, d'être atteintes par une lame d'eau diffuse.



Figure 32 : Axes principaux de débordements en flèche pleine, étendue possible en flèche pointillée

V.3.7 Plaine à l'aval

A l'aval, le Rhéby possède un lit mineur bien marqué. Pour un épisode centennal, il est susceptible de s'étendre sur différentes terrasses en lit majeur. Aucune propriété n'est exposée.



Figure 33 : Possibles divagations

A noter qu'un canal a été identifié à partir du cadastre et retrouvé à proximité de la route RD60c. Cet ouvrage a vraisemblablement été aménagé en suivant le tracé d'anciennes divagations. La carte de Cassini (1740) semble en effet indiquer un lit du Rhéby divaguant vers le Sud jusqu'au Rhône, avant que son cours soit changé : cf. carte de l'état-major (1866), semblable au tracé actuel.



Figure 34 : Ancien canal

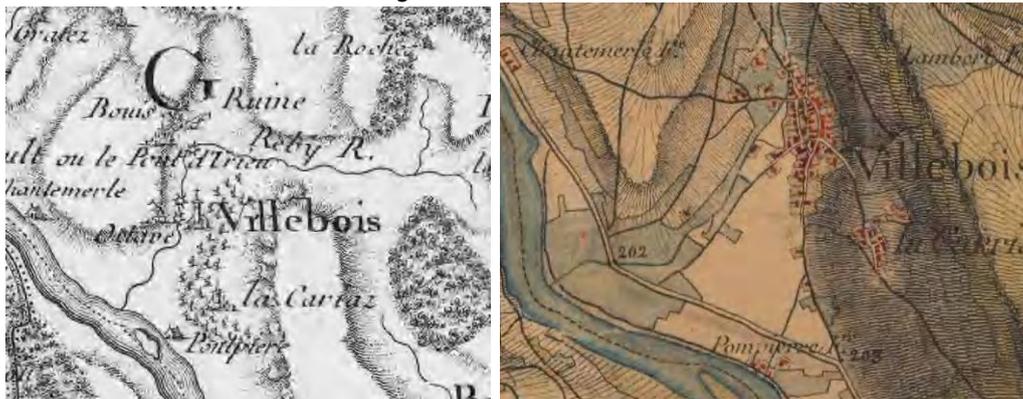


Figure 35 : Changement de lit entre 1740 (carte Cassini) et 1866 (carte Etat major)

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 du Rheby 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

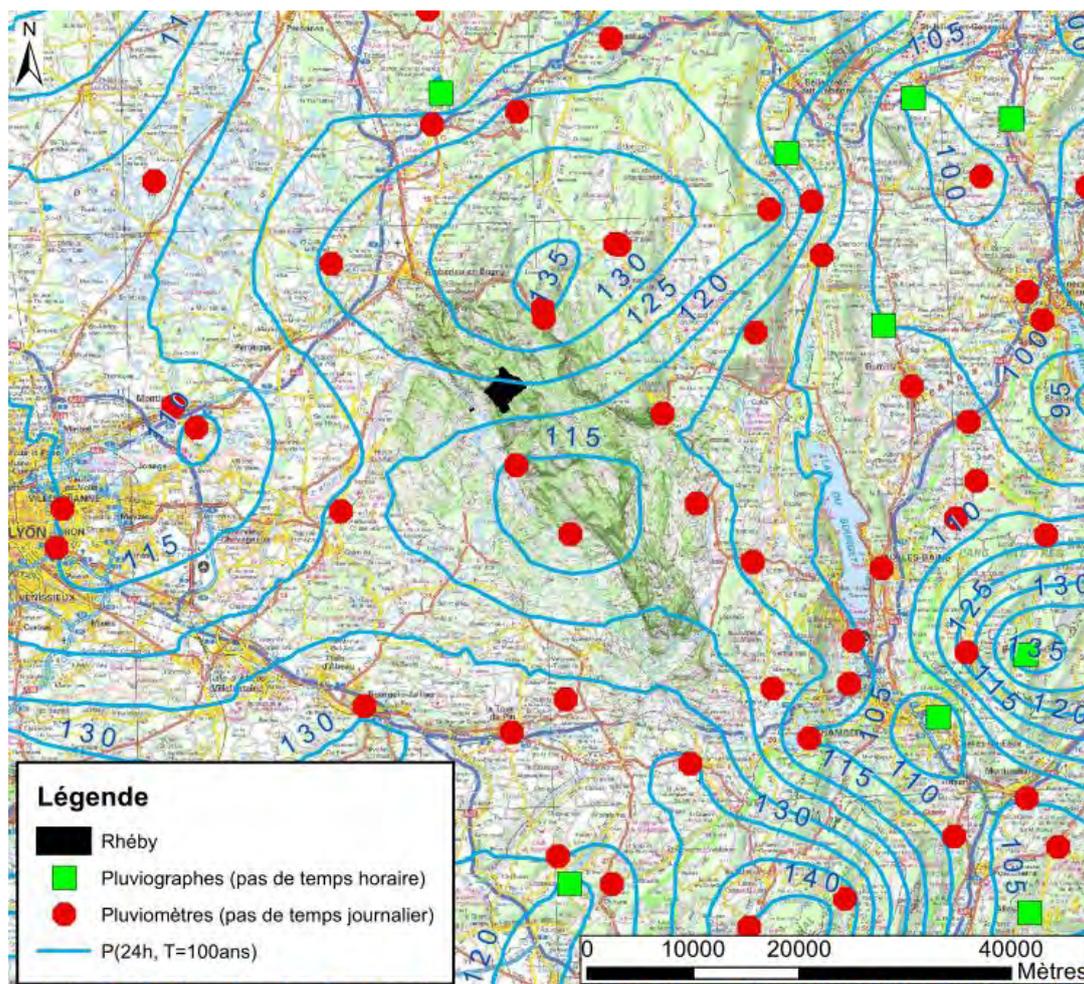


Figure 36 : Répartition spatiale des pluies journalières centennales

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.

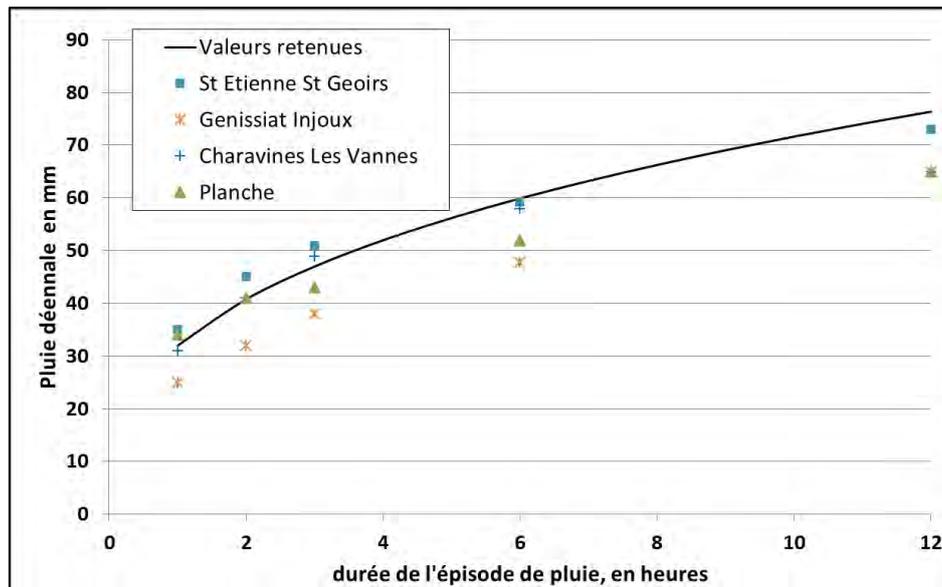


Figure 37 : Ajustement de la loi de Montana

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	0,53
Sogreah	1,10
Turraza	1,05
Giandotti	1,21
Izzard Meunier (BV végétalisé)	2,23

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 :

$$0,5 \text{ h} < t_c < 2 \text{ h (valeur probable : 1 h)}$$

V.4.4 Détermination du débit de référence décennal

Application de différentes formulations statistiques

Le bassin versant de la Brive 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]	7,7
Régressions multiples (Mathys et Peteuil, 2010) [paramètres : surface drainée et pluviométrie]	14,0
SOCOSE	8,7
Crupedix	6,7
Méthode rationnelle	7,9

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 Brive :

- 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 Rhéby. En considérant sécuritairement une valeur de 1 m³/s/km^{1,6}, le débit décennal du Rhéby serait de l'ordre de 6,7 m³/s.

Synthèse

Par confrontation des différents résultats, on retient un débit décennal du Rhéby:

$$Q_{10} = 7,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

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 du Rhéby est estimé à :

$$Q_{100} = 13,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

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 : 13,5 m³/s, comme estimé précédemment
- Temps de montée : 2,5 heures, soit sensiblement proche de 1,5. t_c
- Coefficient de forme : 2,0. 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 0,2 et une pluie journalière centennale.

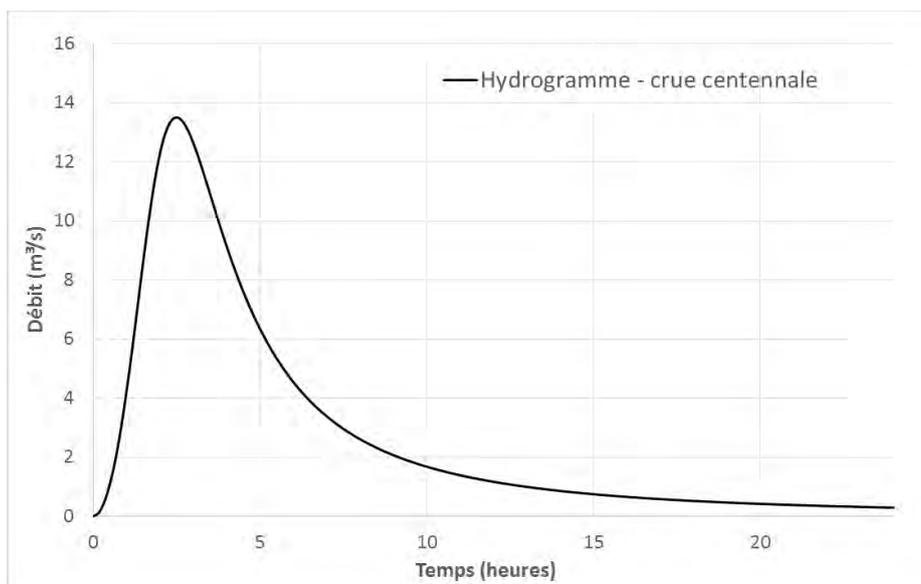


Figure 38 : Hydrogramme retenu pour une crue centennale sur le Rhéby

V.4.7 Scénario de référence

L'évènement de référence retenu est une crue centennale atteignant un débit de pointe de 13,5 m³/s, selon l'hydrogramme défini au paragraphe précédent. Le transport de flottants est très probable pour ce scénario et contribue au risque d'embâcles.

V.5 Modélisations hydrauliques

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 droit des secteurs densément urbanisés. Les résultats ont ensuite été validés/ajustés par une analyse de terrain. Sur le ruisseau du Rhéby, la zone modélisée couvre la traversée de Villebois depuis l'amont de l'école jusqu'au boulodrome.

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

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 « recherche et développement » de l'ONF 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 dans la traversée de Villebois.

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 qui sont 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 du Rhéby, 34 profils en travers ont été levés. Ils sont localisés sur la figure suivante.

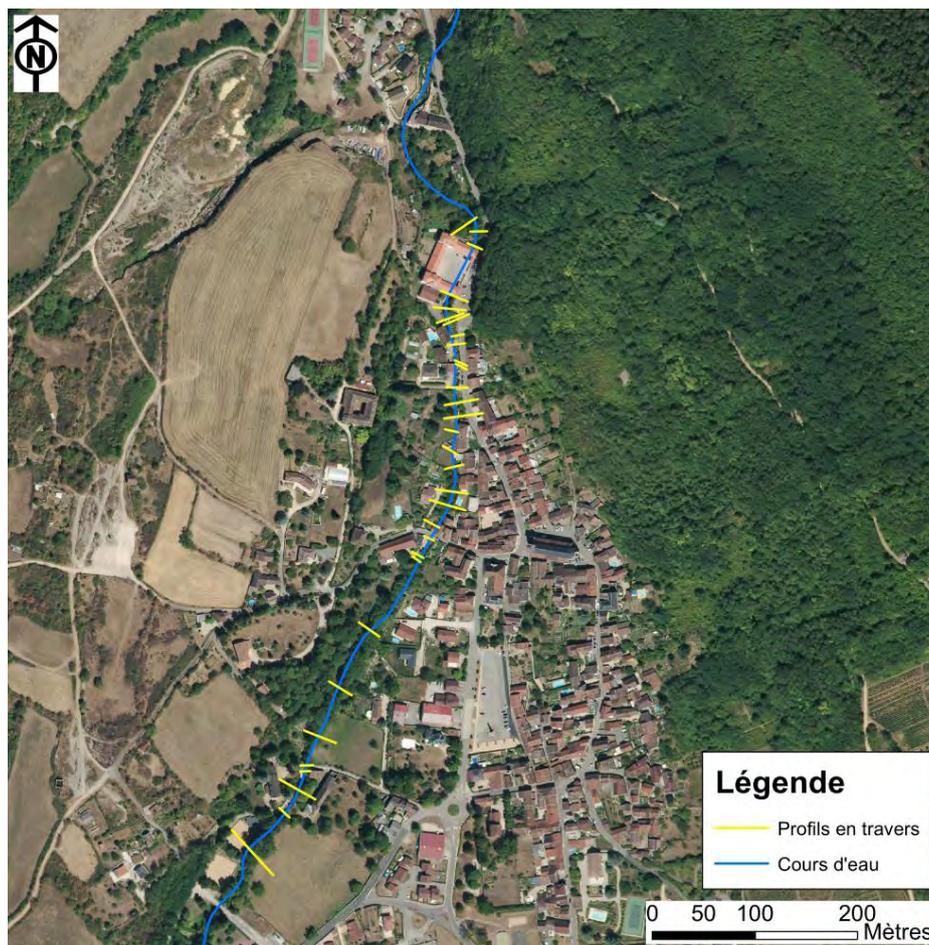


Figure 39 : Profils en travers levés par un géomètre expert

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 :

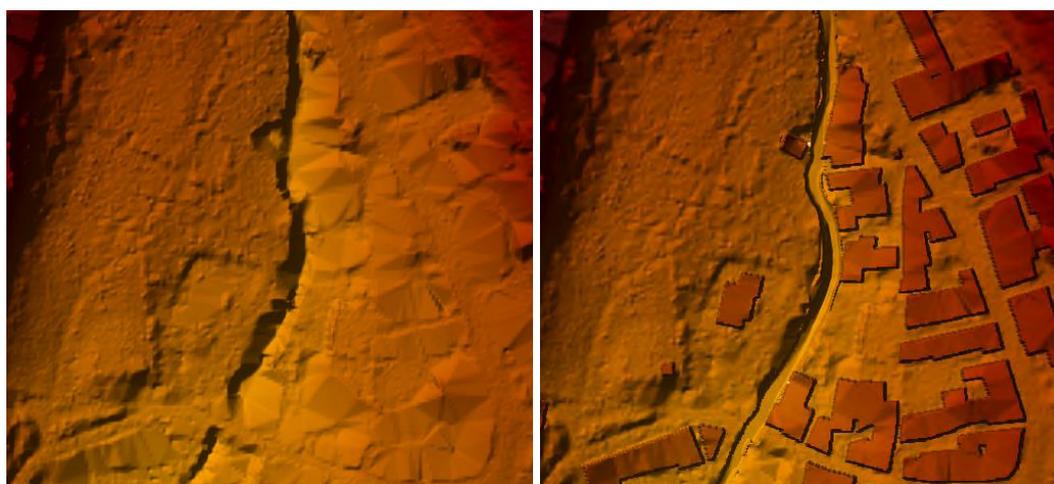


Figure 40 : Amélioration des données topographiques dans la traversée de Villebois

V.5.3 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 au paragraphe V.4.6.

Conditions aux limites :

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

Coefficient de frottement :

Sur l'ensemble du modèle, le coefficient de Manning retenu est $n=0.04$

V.5.4 Scénario simulé et résultats

Afin de prendre en compte les risques d'obstruction partielle du passage sous l'école, il a arbitrairement été considéré que l'obstruction partielle laisserait une fenêtre d'écoulement de 50 cm en pied d'ouvrage. Ce scénario paraissait essentiel à modéliser compte tenu de l'impact que peut avoir l'obstruction de ce franchissement sur l'aléa (débordements sur la route dirigés vers le chef-lieu).

Les autres ponts n'ont en revanche pas été considérés comme obstrués dans le modèle afin de ne pas multiplier les scénarios, et car ce choix n'est pas préjudiciable pour les raisons suivantes :

- Pour les passerelles amont, des débordements dirigeraient les eaux vers la route et leur cheminement se confondrait alors avec celui des débordements issus de l'amont de l'école pour le scénario testé.
- Pour les autres passerelles, le lit est encaissé et contraint entre les habitations. L'obstruction a alors peu ou pas de conséquences sur l'enveloppe et le niveau de l'aléa. Ces derniers seront ajustés à la marge lors de la phase de validation géomorphologique de terrains, avec prise en compte d'une possibilité d'obstruction partielle d'ouvrage.

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 naturelles hors zones urbaines denses

Pour les cours d'eau en zones naturelles, agricoles ou pour lesquels les zones urbaines traversées ou bordées sont peu denses, l'aléa a été qualifié par expertise hydro-géomorphologique de terrain, pour laquelle les principales observations ont été présentées, site par site, au paragraphe V.3.

Cette qualification de l'aléa est basée sur la grille du guide PPR crue torrentielle. Le principe général est que le niveau d'aléa est le résultat du croisement d'un niveau d'intensité et de probabilité d'atteinte définis au travers des 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.	Des phénomènes d'engravement ou d'érosion sur les parcelles exposées, mais leur ampleur reste limitée.	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 insuffisants pour endommager les façades renforcées. Les affouillements prévisibles ne sont pas assez profonds pour entraîner la ruine des constructions normalement fondées.	Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement sont modérées et ne peuvent pas endommager des façades usuelles même non renforcées. Les affouillements prévisibles sont faibles et ne peuvent pas menacer les fondations des bâtiments.
	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.	Les routes peuvent être submergées mais sans endommagement et avec possibilité de remise en service rapide.

Tableau 9: 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 10: 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)

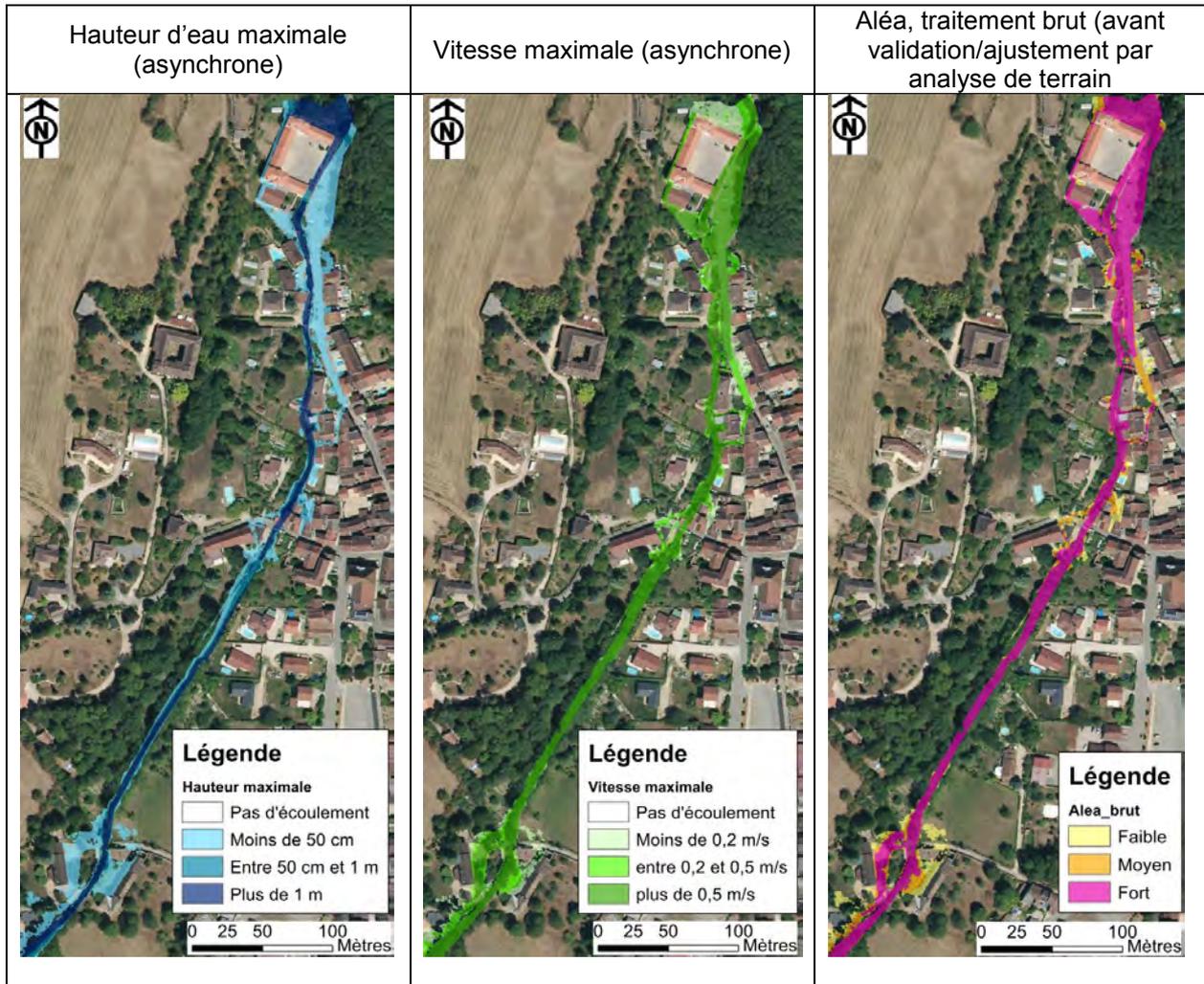
Tableau 11: grille de qualification des aléas de crue torrentielle en zone non urbanisée

V.6.2 Zones d'enjeux

Pour la zone modélisée, i.e. la traversée du chef-lieu de Villebois par le ruisseau du Rhéby, 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 12 : grille de qualification des aléas de crue torrentielle en zone urbanisée



Confirmation / ajustement sur le terrain :

La cartographie « brute » de l'aléa issue des résultats du modèle a fait l'objet des ajustements suivants :

- Les bâtiments encadrés par un aléa (école, secteur de la rue des sœurs) sont inclus à la zone d'aléa fort. Les résultats du modèle ne le représentent pas dans la mesure où la cote des bâtiments est 4 mètres au-dessus du terrain, volontairement pour prendre en compte l'effet des bâtiments sur les flux hydrauliques
- En amont du lavoir, la propriété rive gauche est classée en aléa fort : cf. observations de terrains.
- En amont du boulodrome :
 - o le niveau d'aléa sur la propriété rive droite a été réduit à un niveau faible : comme expliqué dans les observations de terrains, l'essentiel du flux restera dans l'axe du lit avec une partie sur la route et une partie retournant directement au lit mineur. La cour sera concernée par un étalement d'une faible lame d'eau, d'intensité et de probabilité faible.
 - o Concernant la rive gauche, le corps du bâtiment à l'aval immédiat du pont est en aléa fort dans la mesure où il peut recevoir un important flux en cas de surverse sur l'ouvrage. En revanche, le bâtiment adjacent est en aléa faible, car seulement atteignable par une faible lame d'eau en cas d'étalement devant la cour.

V.6.3 Aléas résultants

La cartographie annexée au rapport présente la qualification de l'aléa sur l'ensemble du linéaire des cours d'eau sur le territoire communal.

Les principaux points à retenir aux droits des enjeux habités sont les suivants :

Au niveau de l'école et de la RD60 :

- L'école et la route départementale sont concernées par un aléa fort au vue des risques de débordements en entrée du passage couvert.
- Lorsque la pente de la route départementale s'adoucit, l'aléa sur cette dernière baisse à un niveau moyen compte tenu de vitesses plus faibles. En bordure rive gauche de la route, une propriété et sa cour sont en aléa faible après étalement de la lame d'eau issue de la route.

Dans la traversée de la zone urbaine :

- Une propriété rive droite, plus basse qu'un muret de berge, est concernée par un aléa moyen,
- Une propriété constituant la berge rive gauche du torrent en amont de la passerelle du lavoir des sœurs est classée en aléa fort,
- Plusieurs propriétés dans le secteur de la ruelle des soeurs sont concernées par un aléa fort, liés aux écoulements provenant de la route départementale. L'écoulement concentré dans les ruelles peut atteindre des hauteurs et des vitesses fortes.
- En amont d'un franchissement de route communale, des propriétés en rive gauche sont concernées par un aléa moyen pour les plus proches et faible pour deux autres.

En amont du boulodrome :

- La propriété rive droite est concernée par un aléa faible,
- En rive gauche, une propriété est en aléa fort et une deuxième en aval est en aléa faible.

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 :

- Site web : <http://www.georisques.gouv.fr/>
- Commune de Villebois. Réunion de travail du 26/02/2018
- Enquête de terrain : lors de la phase de terrain, des témoignages de riverains ont pu être recueillis. Le cas échéant, les éléments notables sont repris dans la description des observations de terrains.

Historique des évènements :

D'après la commune, le Riou a connu des débordements en 2008. A l'arrivée au droit des enjeux, les écoulements et matériaux charriés ont obstrué la grille en entrée du tronçon canalisé (jusqu'au Rhéby) sur le chemin du Château. Les débordements ont ouvert des saignées sur la route alors soulevée puis se sont répartis aux abords d'au moins deux propriétés en bordure du Rhéby avant de rejoindre ce cours d'eau. Aucun dégât à l'intérieur des maisons n'est enregistré.

La commune précise par ailleurs que la couverture de l'axe d'écoulement le long du chemin du château date des années 1990-95.

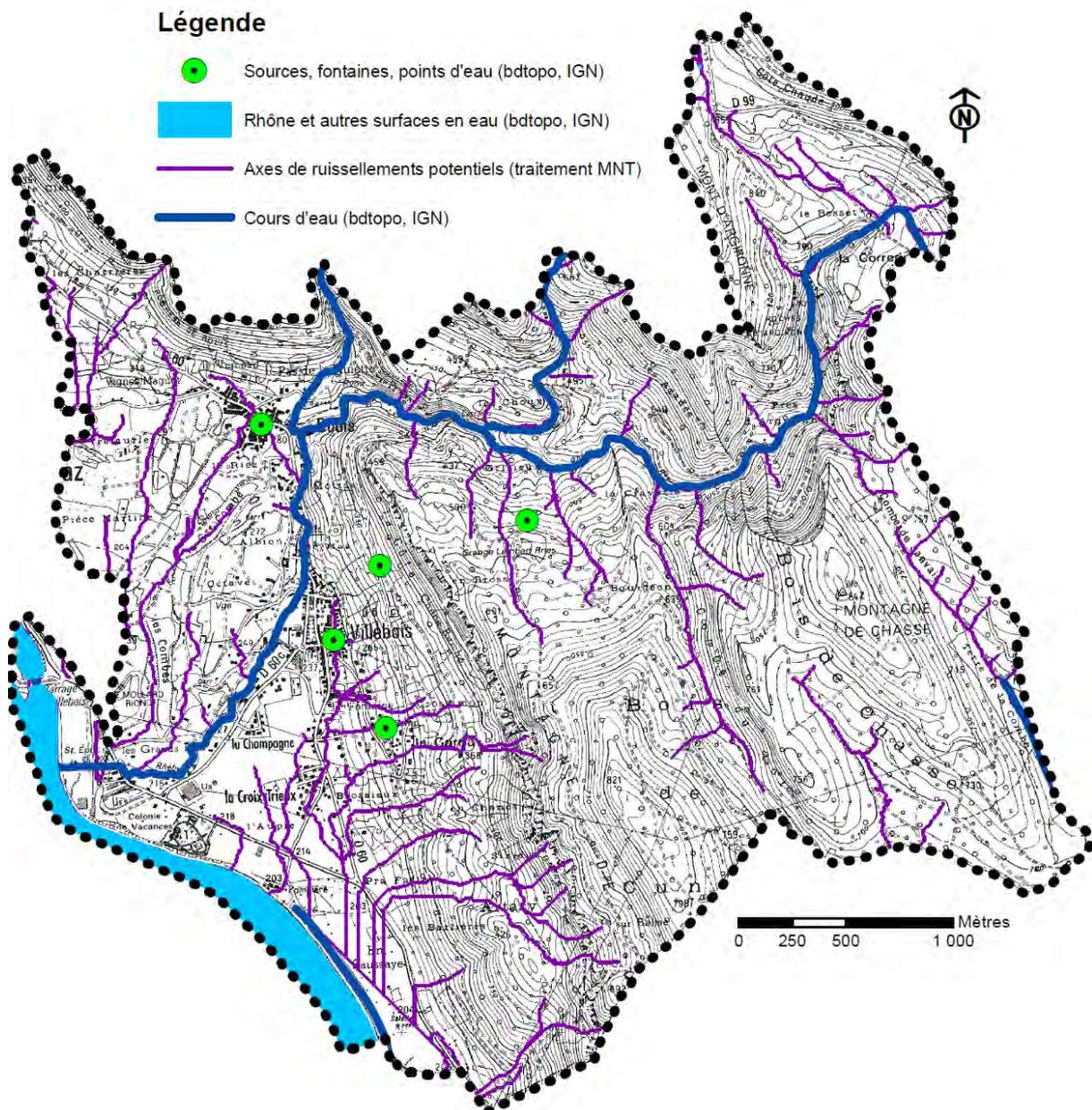
Hormis le Riou, aucun autre problème de ruissellement n'est signalé par la commune.

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.

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 Le Riou

Le Riou est un affluent du ruisseau du Rhéby, qu'il rejoint après avoir été busé sous le lieu-dit de Bouis. A l'approche des premières habitations, la combe laisse supposer que les écoulements sont rares sur cette combe naturelle : aucun lit torrentiel n'est marqué en amont. Selon un riverain, cet axe d'écoulement est en eau 2 à 3 fois par an. En revanche, cet axe draine un bassin versant de près de 3 km². L'infiltration dans des terrains perméables est donc importante en amont.

Un passage busé de très faible gabarit permet le franchissement d'une première voie d'accès. Le débordement en ce point est très probable pour un épisode centennal. Il engendrerait un étalement sur la voie avec retour rapide des écoulements au lit sans menacer aucun enjeu.



Figure 42 : Débouché du Riou en amont du chemin piétonnier

A l'aval, le lit mineur suit parallèlement un chemin piétonnier puis s'y déverse sur sa partie goudronnée. Cette configuration d'axe d'écoulement sur chemin piétonnier étaye le caractère généralement sec du talweg. Lors d'orage intense, le ravinement de la piste, l'érosion du lit mineur ou encore du goudron sont susceptibles d'apporter des matériaux aux écoulements.

Au départ du chemin piétonnier, les écoulements du chemin sont captés par un ouvrage avec une petite décantation et conduits jusqu'au Rhéby. En cas d'orage intense, les risques d'obstruction de l'ouvrage par matériaux charriés sont forts. Par ailleurs, la configuration de l'ouvrage, décalé par rapport à l'axe du chemin et avec une barrière en amont, n'est pas optimale et favorise également les débordements vers la route à l'aval.

Des débordements se seraient produits en 2008, d'après l'historique communiqué par la commune.



Figure 43 : chemin piétonnier et entrée en buse derrière la barrière

Après obstruction de l'ouvrage, les débordements suivent la route jusqu'au lavoir. En amont de ce dernier, une division du flux est probable de chaque côté du lavoir.



Figure 44 : Division des débordements autour du lavoir

En « rive gauche » du lavoir, ils se déversent alors sur une voie d'accès à des propriétés et rejoint le Rhéby. La propriété à droite de la voie d'accès (cf. premier plan de la photo suivante) semble protégée de toute atteinte à la faveur d'un dévers de la route et du petit muret de limite de propriété. En revanche, un garage sur la gauche de la voie privée et l'extension amont de la propriété rive gauche du Rhéby (mais dans l'axe d'un pont) peuvent être atteints par ces débordements.



Figure 45 : Axe ayant pris la gauche du lavoir

Les écoulements contournant le lavoir par la « rive droite » atteignent la route départementale puis sont susceptibles de la suivre dans le sens descendant vers le chef-lieu.

Le dévers de la route entraîne l'atteinte de trois propriétés en contrebas « rive gauche » de la route départementale. Des déversements sont aussi possibles entre les propriétés inondées, d'amont vers l'aval. Depuis les propriétés inondées, les écoulements retournent ensuite au Rhéby.



Figure 46 : Déversement vers les propriétés en rive gauche et débordements sur voirie

Les débordements depuis l'amont se répartissent ainsi entre les propriétés inondées et la voirie en rejoignant progressivement le Rhéby. Une lame d'eau de faible hauteur pourrait toutefois suivre la route jusqu'en aval de l'école, avant de rejoindre le ruisseau par différents points de déversements depuis la route, tout comme les débordements du Rhéby.



Figure 47 : Retour au lit du Rhéby

VI.5.2 Lotissement de Mollarion

Le lotissement de Mollarion est dans l'axe d'une combe naturelle.

La partie basse de cet axe d'écoulement est établie sur des terrains de surfaces alluvionnaires, contrairement à la majorité des combes sur la commune traversant des terrains d'éboulis ou calcaires. Aussi, en cas de fortes précipitations, la combe peut connaître un ruissellement de surface notable jusqu'à son débouché, au niveau du lotissement.

En amont des propriétés, d'après le levé LIDAR de 2016, une fosse permettait vraisemblablement de capter ces eaux de surface avant qu'elles n'atteignent une maison dans l'axe de la combe. Elle a depuis été en grande partie comblée. Une buse permettrait encore de récupérer une partie des eaux de surface. En cas de fortes précipitations, et donc d'autant

plus pour un scénario centennal, l'efficacité de cet aménagement paraît limitée et un ruissellement vers la propriété aval en point bas est probable.



Figure 48 : Ancienne fosse (à gauche) - fosse actuelle (à droite)



Figure 49 : Axe de la combe naturelle

En aval, un bassin d'orage récupère les eaux issues de la fosse amont et vraisemblablement les eaux pluviales des propriétés.



Figure 50 : Bassin d'orage et chenal à ciel ouvert

L'évacuation du bassin d'orage est ensuite busée sur plusieurs dizaines de mètres avant de retrouver un tronçon à ciel ouvert. Entre le bassin d'orage et ce tronçon ouvert, une propriété est dans l'axe de la combe naturelle. Pour un épisode centennal, elle pourrait être concernée

par du ruissellement en cas de dysfonctionnement des buses ou de dépassement de la capacité du bassin d'orage.

A l'aval du tronçon à ciel ouvert, l'axe est à nouveau canalisé sous la route et à proximité d'une propriété en construction. De façon équivalente, cette dernière pourrait être exposée à des ruissellements en cas de dysfonctionnement du passage couvert.



Figure 51 : Regard sur la partie enterrée

Enfin, l'axe retrouve un tronçon à ciel ouvert, en bordure de la ViaRhona jusqu'au ruisseau de la Perna.

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

Les principaux points à retenir aux droits des enjeux habités sont les suivants :

Le Riou :

Le lavoir est en aléa fort (V3). Un garage et une propriété rive gauche du Rhéby seraient également concernées par un aléa fort (V3). Celui-ci n'est pas représenté sur les cartes car ces secteurs sont également concernés par un aléa fort de crue torrentielle (T3).

Les propriétés entre la route départementale et le ruisseau du Rhéby sont concernées par un aléa faible (V1) compte tenu de faibles hauteurs d'eau attendues (inférieures à 50 cm) au vu de la diffusion des débordements.

La route départementale est concernée par un aléa moyen (V2). Bien que la part de débit attendue sur la route reste assez faible, ce niveau d'aléa moyen est maintenu afin de considérer un écoulement encore « concentré » sur la voirie. L'aléa moyen V2 rejoint l'aléa moyen T2 lié au Rhéby. Ces deux aléas se confondent jusqu'au retour au lit du ruisseau à l'aval de l'école.

A noter que sur les zones où les deux aléas T2 et V2 se superposent, seule l'aléa T2 a été affiché car c'est celui qui générera les contraintes constructives les plus fortes.

Lotissement de Mollarion :

- Au débouché de la combe, la propriété en aval de l'ancienne fosse et en point bas est exposée à un aléa moyen de ruissellement. (V2)
- Le bassin d'orage est classé en aléa fort (V3) compte tenu de la hauteur d'eau possible dans l'ouvrage
- La propriété entre le bassin d'orage et le tronçon à ciel ouvert et celle en aval de la route communale sont concernées par un aléa faible (V1). Elles pourraient être atteintes par une lame d'eau très diffuse en cas de dysfonctionnement des ouvrages enterrés et/ou de capacité insuffisante du bassin d'orage.

VI.6.3 Aléa très faible de ruissellement

Le niveau d'aléa très faible de ruissellement n'est pas cartographié. Il correspond à des hauteurs très faibles de ruissellement (quelques centimètres) pour lesquelles les règles de l'art en matière de construction doivent faire face par principe minimal de précaution.

Pour autant, tout le territoire communal est concerné par cet aléa dès lors que des précipitations sont observées.

Sa non-considération explique notamment la non continuité de certains axes de ruissellement en l'absence de cours d'eau exutoire : le contour d'aléa faible de ruissellement s'arrête lorsque la diffusion du flux est estimée telle que le niveau d'aléa devient très faible.

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
Trois demoiselles, à l'aplomb du hameau de Lacaria	Chutes de blocs	Historique	Au pied des trois Demoiselles, sur une bande d'au moins 60 m de large et 150 m de long, des blocs de 10 à 15 m ³ /unité sont identifiables sur le terrain. Aucune chute de blocs n'aurait néanmoins déjà atteint le hameau de Lacaria, zone d'enjeux la plus proche	Commune	1
En Chanot (trois demoiselles)	Chutes de blocs	Il y a 25-30 ans	Les blocs qui se sont propagés le plus à l'aval dateraient de 25-30 ans.	Commune	2
Artary	Chutes de blocs	Années 2000	Des chutes de blocs auraient renversés ou impactés des arbres sur près de 7 à 8 mètres de hauteur	Commune	3
Le Riou	Ruissellement	2008	A l'arrivée au droit des enjeux, les écoulements et matériaux charriés ont obstrué la grille en entrée du tronçon canalisé (jusqu'au Rhéby) sur le chemin du Château. Les débordements ont ouvert des saignées sur la route alors soulevée puis se sont répartis aux abords d'au moins deux propriétés en bordure du Rhéby avant de rejoindre ce cours d'eau.	Commune	4
Grisieux	Glissement	-	instabilité apparente des terrains avec existence de résurgences du versant rive gauche du Rhéby, vers le chemin de Porte	Commune	5
Au cœur de la traversée de la zone urbanisée	Crue torrentielle	-	Possibles désordres au niveau du lavoir des sœurs en cas de forte crue. Ce point se situe au cœur de la traversée de la zone urbanisée	Commune	6

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).

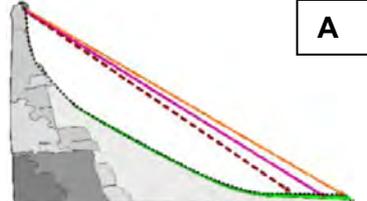
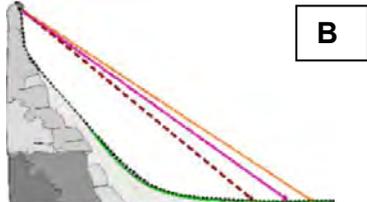
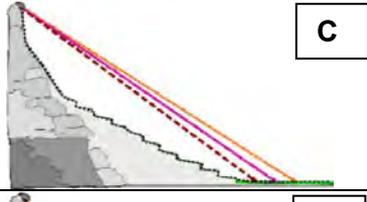
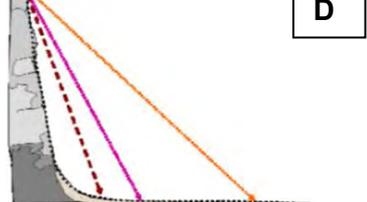
a) Intensité

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°
 D	Cas particulier faisant l'objet d'un projet de recherche par l'IRSTEA dans le cadre du programme Rock the Alps (projet Interreg). A titre indicatif, les valeurs dépassent les 40° et peuvent atteindre 60°.		

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
		$V \leq 0,25 \text{ m}^3$	$0,25 < V \leq 1 \text{ m}^3$	$1 < V \leq 10 \text{ m}^3$	$V > 10 \text{ m}^3$	
		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 :

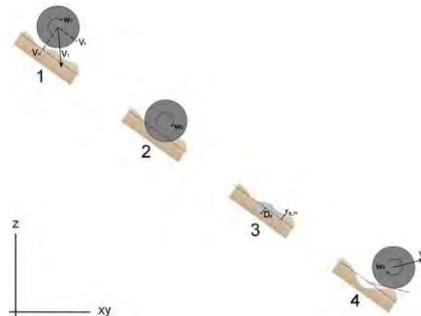
- $k = 1.207$ (constante représentant la forme sphérique du bloc)
- $B = 1.2$ (paramètre de compressibilité du matériau touché ; varie peu pour les différents matériaux)

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 :

$$V_{rot2} = \min \left[\frac{V_{r2}}{R}; V_{rot1} + \frac{(V_{t1} - V_{t2}) * 2}{5 * R} \right] \quad (10)$$

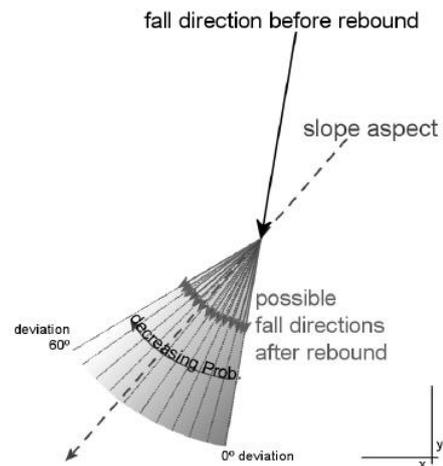
Tout comme dans Pfeiffer et Bowen (1989), l'angle de la pente sur le lieu du rebond est uniformément diminué de façon aléatoire lors de chaque rebond. Cependant, la réduction maximale de l'angle de pente est fixée à 4°. Le roulement est représenté par une séquence de rebonds sur une faible distance, 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

Soilttype (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)