



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 Lhuis

Etude et cartographie des aléas - Rapport technique -

Cliché page de garde :*Vue du bourg***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 |
|---------------------------------------|---|------------------------|------------------------|
| 18/06/2018 | <i>Rapport technique - Etude et cartographie des aléas – commune de Lhuis</i> | D07-37 | 87 |

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

Suivi des versions :

| Version | Date | Observations |
|----------------|-------------|----------------------|
| V0 | 22/05/2018 | Consultation commune |
| V1 | 18/06/2018 | 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 | 14 |
| III.6 Qualification de l'aléa | 16 |
| IV ALEAS GLISSEMENT DE TERRAIN | 20 |
| IV.1 Définition..... | 20 |
| IV.2 Historique et données disponibles..... | 20 |
| IV.3 Traitements préalables | 20 |
| IV.4 Observations de terrain | 21 |
| IV.5 Qualification de l'aléa | 26 |
| V ALEAS CRUES TORRENTIELLES | 28 |
| V.1 Définition..... | 28 |
| V.2 Historique et données disponibles..... | 28 |
| V.3 Observations de terrain | 29 |
| V.4 Analyse hydrologique du ruisseau du Moulin | 46 |
| V.5 Modélisations hydrauliques..... | 51 |
| V.6 Qualification de l'aléa | 55 |
| VI ALEAS DE RUISSELLEMENT | 61 |
| VI.1 Définition..... | 61 |
| VI.2 Méthodologie appliquée | 61 |
| VI.3 Historique et données disponibles..... | 61 |
| VI.4 Traitements préalables | 62 |
| VI.5 Observations de terrain | 63 |
| VI.6 Qualification de l'aléa | 75 |
| VII SYNTHÈSE DES ÉVÉNEMENTS HISTORIQUES | 77 |
| VIII ANNEXES | 79 |
| VIII.1 Annexe 1 : Méthode MEZAP | 79 |
| VIII.2 Annexe 2 : Description du modèle Rockyfor3D | 81 |
| VIII.3 Annexe 3 : description du logiciel HEC-RAS..... | 85 |

I Préambule

I.1 Objet

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

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

I.2 Méthodologie

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

Le présent rapport reprend les différentes étapes réalisées :

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

Dans le cadre de cette phase, une réunion de travail a été organisée afin de rassembler toutes les connaissances de terrain sur l'historique des phénomènes naturels connus sur la commune. Elle s'est tenue le 14 février 2018 en mairie de Lhuis en présence de Jean-Jacques LANDRIEUX (adjoint au maire), Bernard VIVIER (conseiller), Patrick COSTE (agent technique), Gérald VARVIER (agent technique), Ingrid ROLANDO (mairie), Jean-Michel MERIAUX (technicien forestier ONF) et David 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 Lhuis s'étend sur 24,43 km². Le territoire s'étage entre 200 m au niveau du Rhône et 1020 m au niveau de la montagne de Tentanet.

L'orientation générale des entités géographiques est Nord-Ouest / Sud-Est. La commune est organisée selon 4 unités : [1] la plaine du Rhône à l'Ouest, elle-même dominée par les premiers reliefs du Jura [2], peu marqués à la morphologie typique des terrains façonnés par le glacier du Rhône. En amont se dessine une vallée [3] relativement plate, entaillée pour partie par le ruisseau du Moulin. Enfin la partie Est est marquée par des versants plus abrupts [4] souvent surmontés de barres rocheuses typiques du massif jurassien.

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 dans la vallée intermédiaire.

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

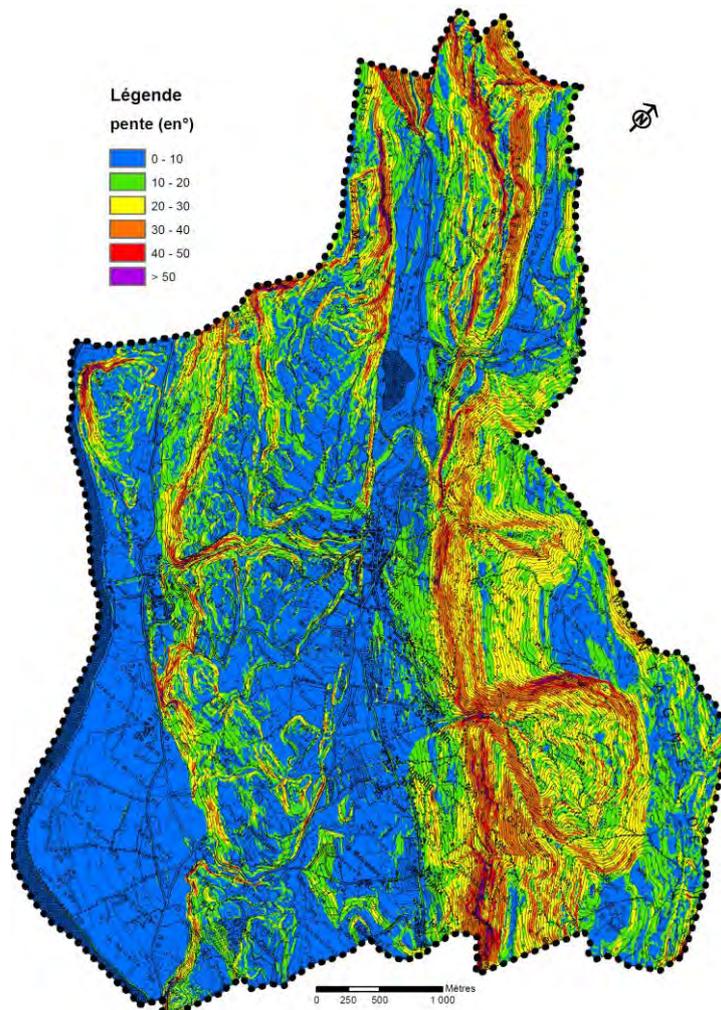


Figure 1 : carte des pentes

II.2 Contexte géologique

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

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

Les premiers reliefs en rive droite du Rhône ont subi les effets du rabotage du glacier du Rhône. Ceux-ci se composent de calcaires fins du Kimméridgiens.

La seconde série de relief plus abrupte à l'Est est constituée de calcaires plus massifs, dits « pseudolithographiques » de l'Oxfordien.

La vallée intermédiaire dans laquelle s'est implantée l'essentiel du bâti de la commune, y compris le chef-lieu, était occupée par le glacier du Rhône. Il en résulte un tapissage morainique sur les parties basses des versants, et d'alluvion en fond de vallée.

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

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

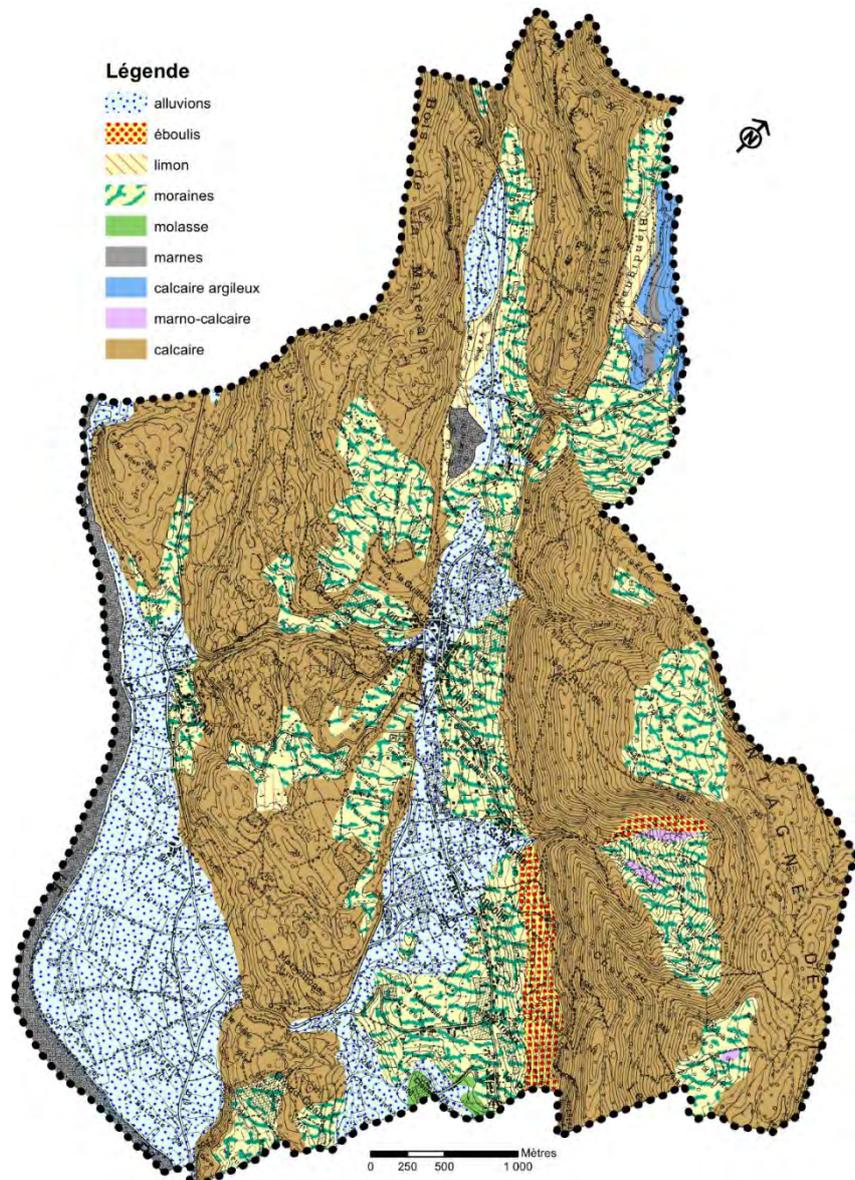


Figure 2 : carte géologique simplifiée

II.3 Contextes hydrographique, hydrologique et hydrogéologique

NB : le contexte hydrologique sera abordé plus en détail 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 présent dossier.

Le territoire communal s'étage sur deux niveaux, dominés par le versant Ouest de la montagne de Tentanet :

- la plaine du Rhône où l'on retrouve le hameau de Rix et quelques habitations isolées
- le plateau où s'établissent le chef-lieu et tous les autres hameaux (Millieu, Saint Martin, Ansolin, le Poncet).

Sur ce versant, trois unités hydrographiques possèdent un bassin versant bien marqué :

- Le ruisseau du Ponton qui se jette dans le lac de Milieu ;
- Le ruisseau de Pisserot, principal affluent du ruisseau du Moulin qui traverse le chef-lieu de Lhuis puis Rix avant de rejoindre la plaine du Rhône ;
- Le Creux du Nant, qui alimente le ruisseau de la Gorge se dirigeant ensuite vers Groslée-Saint-Benoit.

La description des cours d'eau sera détaillée plus tard.

Au-delà de ces principaux axes d'écoulement, l'ensemble du versant est sujet à des écoulements de ruissellement, qui selon la topographie, restent diffus où à l'inverse peuvent se concentrer sur des talwegs plus marqués. Le débouché de ces axes de ruissellements sur le plateau urbanisé et/ou l'accumulation de l'eau de ruissellement dans des points bas du plateau urbanisé peuvent être source de perturbations.

Les secteurs sujets à ces problématiques liées au ruissellement seront également détaillés dans la suite du rapport.

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

II.4 Conséquence sur les risques naturels

II.4.1 Concernant les glissements

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

Ainsi :

- Les alluvions sont des formations frottantes peu sensibles. Les glissements de terrain y sont très peu probables compte 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 place 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'elles affectent la couche de colluvions généralement peu épaisse recouvrant localement le substratum calcaire.

II.4.2 Concernant les chutes de blocs

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

La structure du massif rocheux, la présence de plusieurs plans de discontinuités et leurs orientations constituent des paramètres prépondérants de prédisposition naturelle aux instabilités. Le phénomène de gélifraction représente le principal facteur d'évolution des séries calcaires constituant les falaises. En effet, dans une région caractérisée par des saisons hivernales relativement vigoureuses, l'alternance des cycles gel/dégel se développant dans les fissures de la roche, contribue fortement à l'érosion du massif par fragmentation. Ce phénomène, renforcé par les pressions hydrostatiques dues à la pluviométrie qui se développent au contact des surfaces de discontinuité, conduit à une évolution relativement lente des falaises. Indépendamment de cette vitesse, ce processus d'altération est cependant inexorable. Il se traduit progressivement par le découpage d'écaillles 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.

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

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

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

III Aléas chutes de blocs

III.1 Définition

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

III.2 Historique et données disponibles

Sources d'informations consultées :

- Commune de Lhuis. Réunion de travail du 14/02/2018.

Evènements historiques :

Aucun évènement daté n'est connu sur la commune. En revanche, plusieurs indices de terrain ou site potentiel ont été souligné par la commune lors de la réunion de travail.

| Secteur | Date | Observation(s) | Source(s) |
|--|----------|--|-----------|
| Limite nord de la commune au-dessus de la RD 79 | Inconnue | Des blocs de plus d'une tonne sont calés par des arbres en forêt. Il s'agit d'une zone de protection définie dans l'aménagement forestier. | Commune |
| Limite sud de la commune – au-dessus du hameau Le Poulet | Inconnue | Existence d'un pierrier de petite blocométrie, mais absence d'historique connu ayant atteint les enjeux à l'aval | Commune |
| Hameau de Rix, côté Sud | Inconnue | Des affleurements rocheux seraient friables en amont des fermes au sud du hameau de Rix – pas d'historique connu. | Commune |
| Hameau de Rix, au-dessus des vignes | Inconnue | Des blocs se retrouvent dans la pente. | 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 a servi d'aide à la décision pour l'expert. Elle est basée sur un traitement numérique automatisé projetant une surface à pente constante, depuis les points en sommets de falaise jusqu'à l'intersection de cette surface virtuelle avec la surface topographique en pied de versant.

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

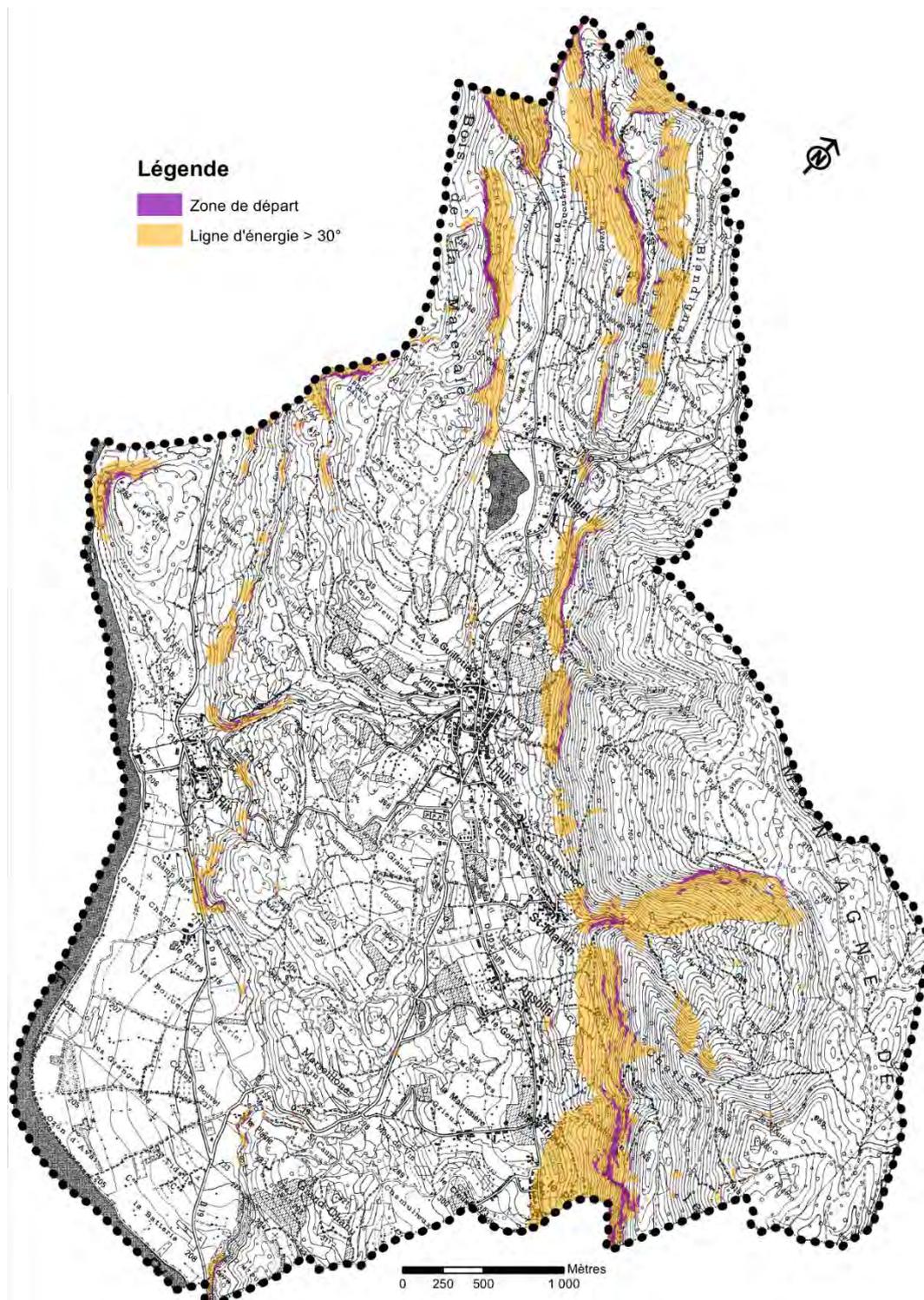


Figure 3 : Carte des zones d'atteintes potentielles de chutes de blocs

La présente carte montre que seul le hameau du Poulet constitue un enjeu urbanisé qui peut être affecté par les chutes de blocs. Une modélisation trajectographique sera proposée à ce niveau.

III.4 Observations de terrain

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

III.4.1 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 du Poulet

Le village est dominé par une barre rocheuse de plus de trente mètres de hauteur. Un éboulis vif de petite blocométrie se distingue au pied de l'affleurement principal. L'existence de cet éboulis témoigne d'une certaine activité de la falaise qui l'alimente de manière continue. L'observation de la falaise révèle une patine rocheuse jaunâtre qui corrobore l'existence d'une érosion active à ce niveau. Le phénomène prédominant est ici de type gélifraction (action gel/dégel) dans les couches les moins compactes. Cet effet entraîne des souscavages laissant apparaître des surplombs des couches plus massives qui pourraient se mobiliser à plus ou moins long terme.

Plus haut dans le versant se distinguent des traces d'un éboulement assez conséquent, a priori relativement récent. Il en résulte des gros blocs éboulés de plusieurs mètres cubes en équilibre dans l'éboulis. Leur remise en mouvement est une possibilité compte tenu de la pente à ce niveau. Il est difficile de définir le mécanisme de rupture à distance mais il est très probable qu'il s'agisse d'un éboulement lié à une rupture de surplomb comme subodoré sur l'affleurement voisin. Les blocs les plus en aval sont relativement hauts dans le versant dans la forêt.

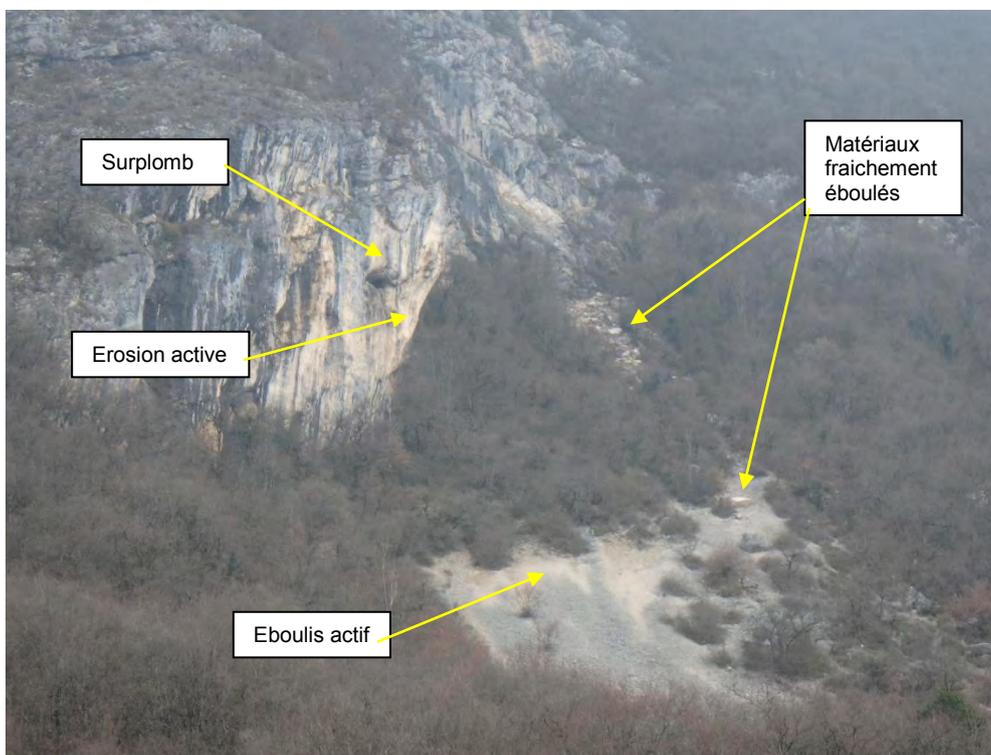


Figure 4 : falaise principale au droit du Poulet

Le parcours pédestre à l'arrière du village n'a pas permis de voir des blocs éboulés au niveau des habitations, ce qui va dans le sens de l'absence d'historique. En revanche, de nombreux blocs anciennement éboulés de 1 à 10 m³ (relativement vieux au regard de la patine sombre de la roche et de la mousse qui les colonise) peuvent s'observer à la cote 400 m. Ce qui indique que le site a déjà bel et bien connus d'autres événements que celui précité dont on distingue les vestiges.



Figure 5 : blocs anciennement éboulés à la cote 400 m

III.4.3 Secteur de Trieux - Ansolin

La falaise précédente se prolonge au Nord en amont des hameaux de Trieux et Ansolin. L'affleurement est moins marqué (hauteur de quelques dizaines de mètres) et il n'est pas observé de cicatrices témoignant d'une activité. Le versant forme, qui plus est, une terrasse intermédiaire avant les enjeux qui a pour effet de stopper les éventuelles propagations du fait d'un replat très net.

III.4.4 Secteur entre Saint-Martin et Milieu

Le traitement automatisé fait ressortir l'existence de zones de dépôts potentielles sur l'ensemble des versants qui dominent les villages de Saint-Martin, de Lhuis, jusqu'au Milieu. Sur le terrain ces affleurements sont, pour l'essentiel, camouflés par la végétation (même sans feuille). La reconnaissance des pieds de versant révèle en effet des terrains constitués pour partie d'éboulis anciens et stabilisés ce qui informe sur une alimentation ancienne en matériaux rocheux. Néanmoins aucun bloc n'a été relevé sur ces secteurs à proximité des enjeux.

III.4.5 Secteur du Milieu

Le hameau du milieu est dominé par une butte rocheuse sur laquelle transite la RD41. L'affleurement étant de taille limitée et directement à l'aplomb de la route précitée, les éventuelles chutes de pierres devraient être contenues sur l'espace de la chaussée. Le substratum se distingue également sous la RD en amont des habitations. La roche en place est relativement compacte mais peut être à l'origine de chutes de matériaux rocheux de petits volumes (< 0,25 m³).

III.4.6 Secteur de Rix

Le hameau de Rix est dominé par un versant rocheux sub-affleurant. La roche est visible notamment sur le talus routier de la route communale qui transite vers Lhuis au Nord-Est. Cette dernière relativement friable car très litée, peut donner lieu à des chutes de pierres inférieures à 0,25m³ qui se propageraient assez aisément au-delà de la route dans les vignes. Les bâtiments d'une ferme située au Sud du lieu-dit étant positionnés directement en pied de versant, ils peuvent être exposés à des chutes de pierres.

III.4.7 Secteur de la Plaine

Le hameau constitué de 3 habitations, est directement implanté contre une paroi rocheuse. Cette dernière est d'apparence plutôt saine mais peut néanmoins libérer des matériaux de faible blocométrie (inférieure à 0,25 m³).



Figure 6 : paroi rocheuse au droit des habitations de la Plaine

III.4.8 Autres secteurs

De nombreux autres affleurements se distinguent un peu partout sur la commune. Ils intéressent uniquement des zones naturelles éloignées des enjeux habités. Citons :

- Le Mont Cerf au Nord-Ouest de la commune offrant une barre calcaire en amont du Rhône ;
- Le relief au Nord de la commune, sur lequel transite GR de pays Tour de Lhuis et d'Izieu où le substratum est affleurement en nombreux points (il existe d'ailleurs une carrière d'extraction des matériaux rocheux) ;
- Les deux versant de part et d'autre la vallée du Moulin, le long de la RD79 (Bois de la Maneraie et versant d'Aillon) avec la présence quasi continue sur l'ensemble du linéaire, de parois rocheuses ;
- Le versant de la Tête d'Aillon qui présente un éperon rocheux bien marqué au droit de Blandignay ;
- Le bassin versant du Creux du Nant est dominé par des falaises notamment sur son revers Nord (Roche Bidet) qui présente un affleurement conséquent et actif.

Enfin signalons la présence de micro-affleurements dispersés un peu partout sur la commune dont l'étendue est minime. Ces derniers peuvent donner lieu à des chutes de pierres isolées mais la faible hauteur de ces derniers engendre des propagations très limitées.

III.5 Modélisations trajectographiques

III.5.1 Périmètre modélisé

La zone modélisée se localise au droit du hameau du Poulet.

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*).

Les hypothèses de départ retenues correspondent à un bloc de 5 m³. Ce type de bloc correspond à des instabilités potentielles observées en falaise et à des blocs éboulés vus en pied de versant. Pour chaque pixel de 1 m identifié comme zone de départ, il a été lancé 1000 blocs.

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

III.5.5 Résultats

La carte ci-après correspond aux nombres de blocs ayant traversé chaque cellule (ou pixel).

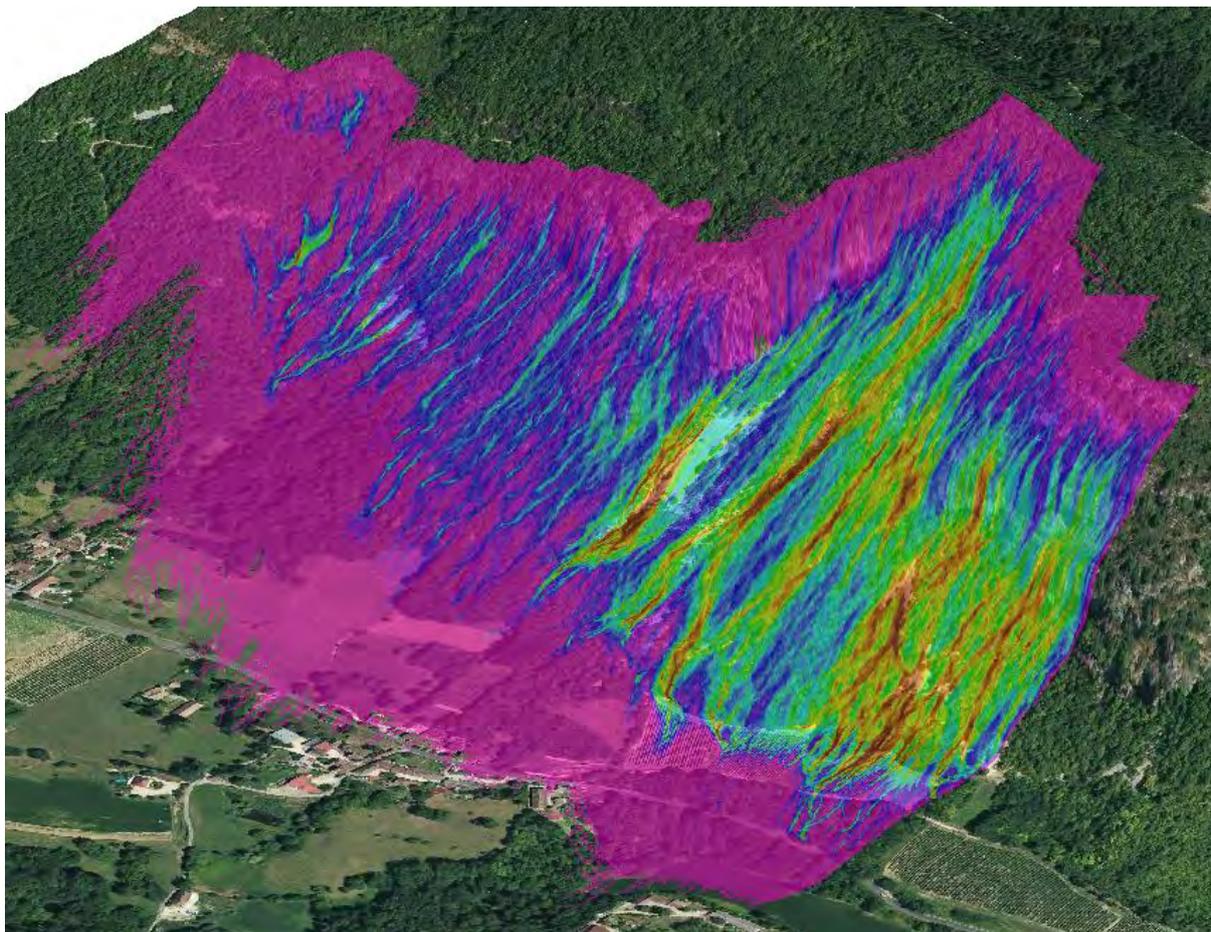
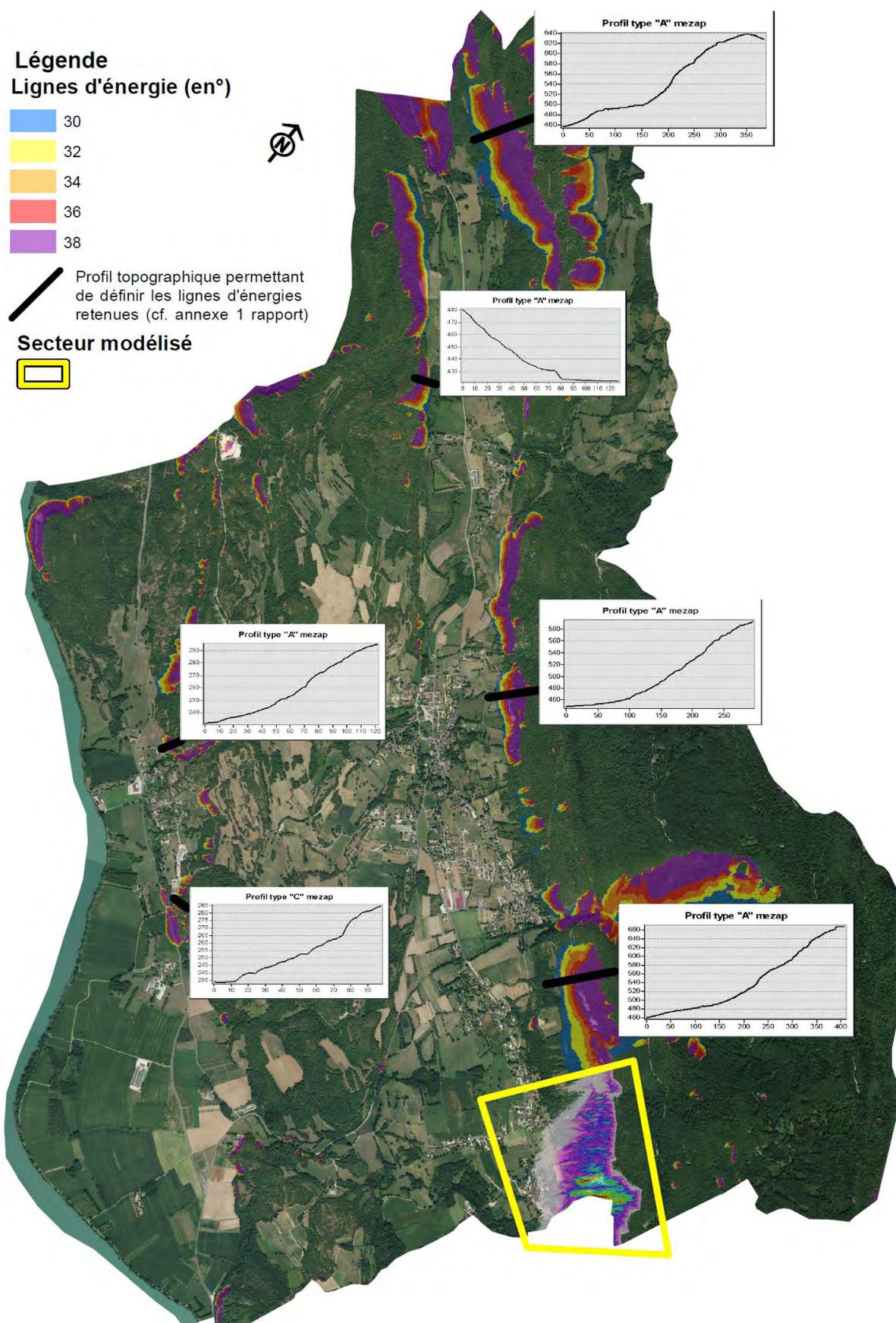


Figure 7: carte des modélisations RF3D

III.6 Qualification de l'aléa

III.6.1 Traitements effectués par secteur

La carte suivante présente les traitements d'analyse d'aléas par secteur. Retenons que les zones urbanisées ont fait l'objet de modélisations et que les zones naturelles ou d'enjeux diffus sont traitées avec la méthode Mezap appuyée par les lignes d'énergies.



III.6.2 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 |
|--|---------------------------------|----------|------------------------|-----|--------------------------|----------------|
| | | | | | | |
| Trieux - Ansolin | 1<V≤10 m ³ Elevée | Moyenne | Fort | 34° | Elevée | Fort P3 |
| | | | Moyenne | 32° | Modérée | Fort P3 |
| | | | Faible | 30° | Modérée | Fort P3 |
| Entre Saint Martin et Milieu | 1<V≤10 m ³ Elevée | Moyenne | Fort | 34° | Elevée | Fort P3 |
| | | | Moyenne | 32° | Modérée | Fort P3 |
| | | | Faible | 30° | Modérée | Fort P3 |
| Milieu | V≤0,25 m ³ Faible | Moyenne | Fort | 34° | Elevée | Fort P3 |
| | | | Moyenne | 32° | Modérée | Fort P3 |
| | | | Faible | 30° | Modérée | Fort P3 |
| Rix | V≤0,25 m ³ Faible | Moyenne | Fort | 34° | Très Elevée | Fort P3 |
| | | | Moyenne | 32° | Modérée | Moyen P2 |
| | | | Faible | 30° | Modérée | Faible P1 |
| La Plaine | V≤0,25 m ³ Faible | Faible | Fort | 38° | Très Elevée | Fort P3 |
| | | | Moyenne | 35° | Modérée | Moyen P2 |
| | | | Faible | 33° | Faible | Faible P1 |
| Mont Cerf, Bois de la Maneraie et versant d'Aillon, Tête d'Aillon, Roche Bidet | 1<V≤10 m ³ Elevée | Moyenne | Fort | 34° | Elevée | Fort P3 |
| | | | Moyenne | 32° | Modérée | Fort P3 |
| | | | Faible | 30° | Modérée | Fort P3 |
| relief au Nord de la commune, sur lequel transite GR de pays Tour de Lhuis et d'Izieu et autres micros - affleurements | V≤0,25 m ³ Faible | Forte | Fort | 34° | Très Elevée | Fort P3 |
| | | | Moyenne | 32° | Très Elevée | Moyen P2 |
| | | | Faible | 30° | Modérée | Faible P1 |

Tableau 3: croisement méthode MEZAP par secteur

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

III.6.3 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

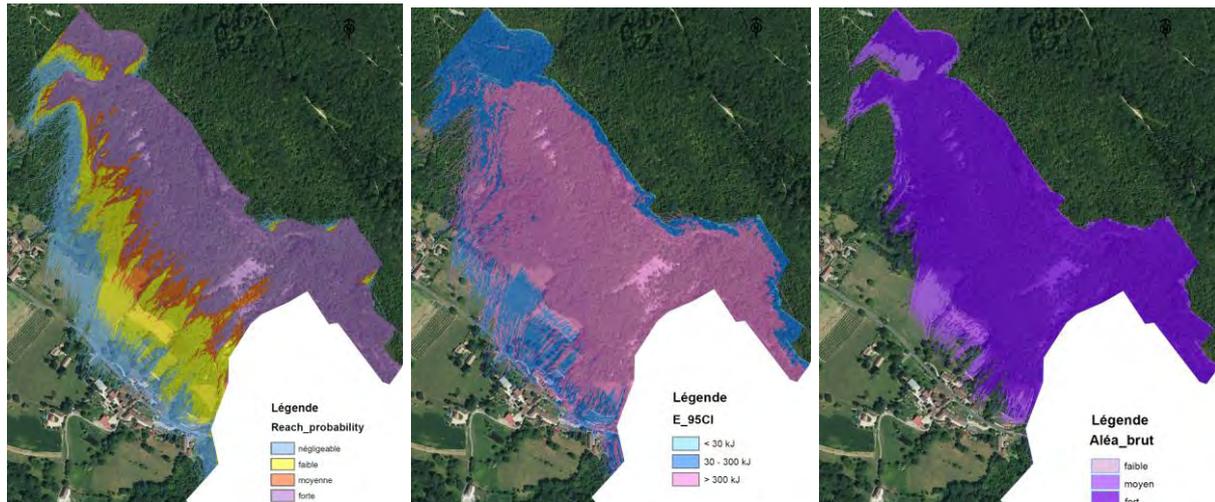


Figure 9 : Croisement probabilité d'atteinte avec intensité et aléa brut résultant

III.6.4 Aléas résultants

Le secteur de poulet constitue la zone la plus concernée par l'aléa. Celui-ci peut être fort au contact des habitations les plus au Sud-Est du fait d'une intensité élevée. En remontant vers le Nord l'aléa devient moyen. La pente s'atténuant à ce niveau, elle engendre une perte d'énergie et fait baisser de fait l'intensité.

Les bâtiments d'une ferme au niveau de Rix et les habitations de la Plaine sont également concernés par un aléa pouvant être fort du fait d'une probabilité d'atteinte forte (ceux-ci étant implantés très proches des affleurements).

Sur les autres secteurs le tableau du § III.6.2 synthétise le classement des aléas. Retenons que l'intensité constitue le paramètre prédominant dans ce croisement. Par conséquent, lorsque les blocs au départ peuvent dépasser 1 m³, l'aléa sera systématiquement fort.

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 :

- CONFLUENCE, 2013, Etude géotechnique d'avant-projet, RD79 : glissement de talus aval au PR6+595
- Commune de Lhuis. Réunion de travail du 14/02/2018.

Evènements historiques :

Seul un glissement récent hors zone d'enjeu a été signalé lors de la réunion de travail. Au-delà de cet évènement, deux zones potentiellement sujette à des glissements sont également signalées.

| Secteur | Date | Observation(s) | Source(s) |
|--|-----------------------|---|-----------|
| Millieu – chemin sur le secteur des Merlières | Début 2018 | Glissement du chemin | Commune |
| Versant rive gauche du ruissau du Ponton – Secteur Le Foyand | Pas d'évènement connu | Existence de zones mouilleuses | Commune |
| Bassin versant du Creux du Nant – Saint Martin | Pas d'évènement connu | Terrains sensibles, notamment la berge rive gauche du torrent | Commune |

Tableau 5: historique des phénomènes de glissements de terrain

IV.3 Traitements préalables

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

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

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

Tableau 6 : prédisposition des terrains aux glissements

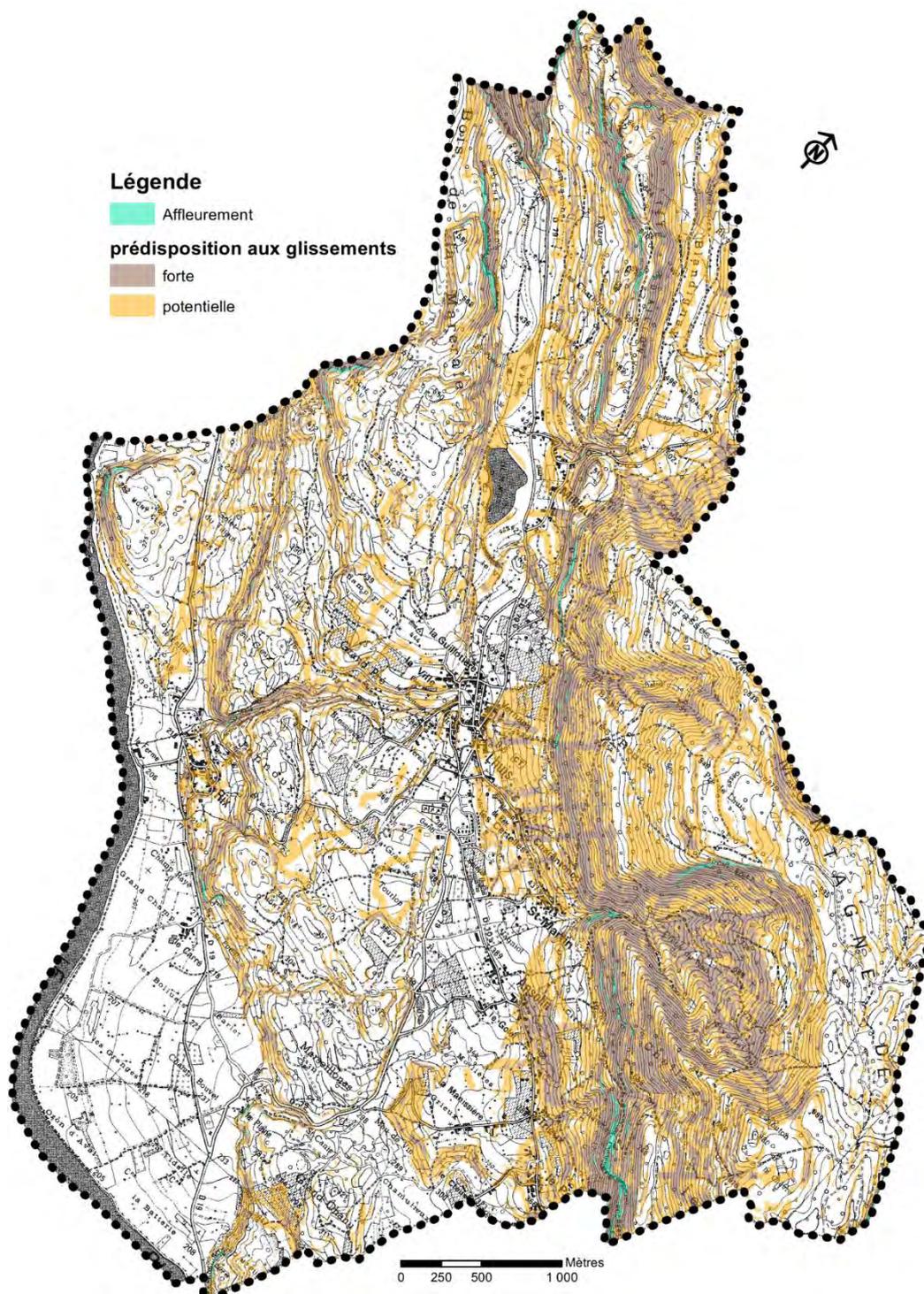


Figure 10 : carte de susceptibilités aux glissements de terrain

IV.4 Observations de terrain

IV.4.1 Secteur Le Poulet – Trieux – Ansolin

Le pied de versant sur lequel se sont implantés les hameaux se compose de formations morainiques. Ce type de matériaux dispose de propriété géomécanique relativement médiocre du fait d'une matrice argileuse sensible à la saturation des sols lorsqu'ils sont gorgés d'eau. Dans le cas présent, le site est marqué par un versant assez peu drainé par des talwegs. Par

conséquent les eaux de surface provenant du versant s'infiltrent dans l'éboulis en pied de falaise et se retrouvent alors au contact des sols morainiques plus bas. Les observations de terrain n'ont pas permis de relever des traces de mouvements très actifs. En revanche, il a été relevé de nombreux indices de mouvements lents (prairies présentant des bombements, maisons fissurées, etc.).



Figure 11 : maison fissurée sur Ansolin et sols bombés sur Le Poulet

Par ailleurs, des aménagements de type terrassements pour création de chemin, permettent de constater dans les zones talutées, des terrains de mauvaise qualité (cf cliché suivant).



Figure 12 : terrassement permettant de voir un sol de mauvaise qualité

IV.4.2 Secteur Saint-Martin – Lhuis chef-lieu

Comme le secteur précédent, la configuration du site est propice à des mouvements lents du fait d'un versant peu drainé dont les eaux de surfaces se retrouvent infiltrées dans les éboulis avant de se retrouver au contact d'une couche morainique en pied de pente.

Là aussi aucune trace de forte activité n'a été relevé, toutefois des désordres au bâti sont observables en plusieurs points comme en témoignent les illustrations suivantes.

Il est difficile de corroborer le phénomène dans les zones boisées du fait d'une végétation resserrée, en revanche des indices de glissements sont nettement plus clairs sur les parcelles agricoles où se distinguent des bombements et une couverture herbeuse hydrophile.



Figure 13 : de gauche à droite, maison fissurée à St Martin, maisons fissurées à Lhuis

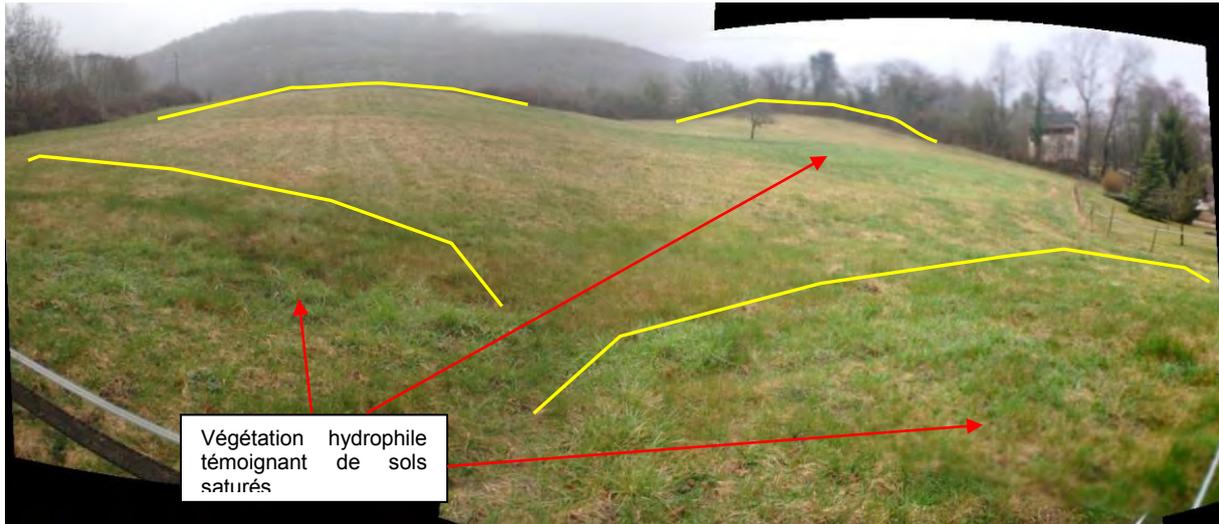


Figure 14 : sols bombé et présente de végétation hydrophile (Ouest de Lhuis)

IV.4.3 Secteur Merdallon – Le Foyand

Ce secteur ne concerne pas d'enjeux habités mais la RD41. Les terrains sont particulièrement humides et les terrains se composent d'une couverture morainique assez épaisse. Malgré une pente peu soutenue en partie basse (au droit de la RD41), on distingue ici des désordres témoignant d'une activité relativement forte : des poteaux PTT inclinés, le talus routier déstructuré, des sols gorgés d'eau, des bombements dans les prairies.



Figure 15 : traces d'activités de glissement

IV.4.4 Secteur Vallée du ruisseau du Moulin (en amont du Milieu)

Comme les zones précédentes, ce secteur est marqué par un tapissage morainique en rive gauche du ruisseau. Tout le pied présente des sols bombés jusqu'au droit de la RD79.

Par ailleurs, outre ces dépôts glaciaires sensibles aux glissements, les deux versants de part et d'autre de la vallée présente des pentes sur lesquelles le substratum est recouvert par une frange d'altération plus ou moins épaisse. Cette dernière se retrouve donc sur des terrains pentus et un fond dur. Il est donc possible que des glissements superficiels se produisent un peu partout si la couche de surface est saturée par effet « toboggan ».

IV.4.5 Secteur La Guillotière, Champ Fleuri

Malgré un substratum sub-affleurant visible en nombreux points, des traces de glissements sont visibles sur la couche de surface. L'origine des désordres est également due à une frange d'altération (couche terreuse) en surface qui peut glisser lorsqu'elle est gorgée d'eau et sur une pente suffisamment marquée.

Ce phénomène est par exemple bien visible de part et d'autre la rue de la Guillotière : en aval une prairie, pourtant faiblement pentée, présente une topographie moutonnée. Coté amont, des décrochements sont visibles sur le talus routier au contact de l'affleurant, et les terrains agricoles situés au-dessus sont eux-aussi bombés.



Figure 16 : indices de mouvement sur la Guillotière

IV.4.6 Secteur Le Charmieux

Entre « Sous la Grande » et Rix, plusieurs signes de glissements s'observent sur les parcelles en bordure de la route communale dans des formations argileuses (moraines). Ceux-ci prennent la même configuration que sur les autres zones précitées : des moutonnements sous forme de bombements.



Figure 17 : bombements des terrains morainiques au Sud du Charmieux

IV.4.7 Secteur de Rix

Le talus situé entre la RD19 et le village présente des terrains chahutés. La couche de surface est argileuse et la zone en question reçoit des eaux de ruissellement. De plus, il existe vraisemblablement une source à ce niveau dont son origine se trouverait à l'interface substratum / couche superficielle. Il en demeure des terrains bombés et humides. Le phénomène ne semble pas régresser vers l'amont au droit des habitations.



Figure 18 : terrain instable entre Rix et la RD19

IV.4.8 Secteur entre le Carré et la déchetterie

A ce niveau, au débouché d'une combe, s'observent un cône entaillé par du ravinement. Ce dernier permet d'observer dans les ravines une épaisseur de matériaux argileux assez conséquente en pied de pente. La zone reçoit des eaux du versant en amont sur lequel il existe une source (source de Rozanne).

IV.4.9 Autres secteurs

Globalement sur l'ensemble des reliefs aucun glissement très actif n'a été observé à l'exception des cas précités. Cela tient du fait que sur l'essentiel ces derniers, le rocher est sub-affleurant.

Il n'en demeure pas moins que ces zones peuvent connaître des glissements très superficiels et très ponctuels sur la couche d'altération qui recouvre parfois les versants rocheux et les éboulis. C'est d'autant plus possible lorsque les terrains sont gorgés d'eau et en pente. Par conséquent, tous les versants un peu raide, généralement boisés (témoignant donc d'une couche terreuse) peuvent donc très localement se déstabiliser.

IV.5 Qualification de l'aléa

IV.5.1 Grille appliquée

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

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

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

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

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

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

Tableau 8 : Intensité glissement de terrain selon guide PPR montagne

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

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

Tableau 9 : Aléa glissement de terrain selon guide PPR montagne

IV.5.2 Aléas résultants

Les secteurs de Poulet, Trieux, Ansolin, Saint-Martin et Lhuis sont concernés par un aléa moyen sur les pentes soutenues du fait d'une probabilité d'occurrence forte mais d'une faible intensité. Sur les pieds de versants au droit des hameaux, et ce malgré les maisons fissurées, l'aléa est considéré comme faible. En effet, ce type de désordres est un indice mais en aucun cas une résultante ferme de mouvement (les fissures pouvant provenir d'une mauvaise maçonnerie). Par ailleurs l'absence d'historique, sur ces hameaux anciens, corrobore ce classement.

Le secteur de Merdallon et le Foyand est classé en aléa fort. Malgré une pente peu soutenue, les signes observés témoignent d'un glissement actif (forte probabilité d'occurrence) et l'intensité est modérée.

Le secteur de la Guillotière est en aléa faible du fait d'un substratum subaffleurant (donc une couche très peu épaisse pouvant se mobiliser) donnant une intensité faible. La probabilité d'occurrence est également jugée comme faible.

Les zones morainiques, humides et en pente sont classées en aléa moyen du fait d'une probabilité d'occurrence moyenne et une intensité faible. Ce zonage concerne le secteur de Charmieux, la vallée du ruisseau du Moulin.

Le talus entre la RD19 et Rix est classé en aléa fort. Malgré une petite étendue du phénomène, les terrains sont franchement chahutés et très humides. La probabilité d'occurrence est donc forte et l'intensité moyenne.

Enfin, sur l'ensemble des zones de la commune non citées ici qui se trouvent en pente, il est à considérer que même si aucun glissement très actif n'a été observé à l'exception des cas précités, il n'en demeure pas moins que ces zones peuvent connaître des glissements très superficiels et très ponctuels sur la couche d'altération qui recouvre parfois les versants rocheux et les éboulis. C'est d'autant plus possible lorsque les terrains sont gorgés d'eau et en pente.

Par conséquent, tous les versants un peu raide, généralement boisés (témoignant donc d'une couche terreuse) peuvent donc très localement se déstabiliser.

V Aléas crues torrentielles

V.1 Définition

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

V.2 Historique et données disponibles

Sources d'informations consultées :

- Site web : <http://www.georisques.gouv.fr/>
- Site web : <http://www.leprogres.fr/ain-01-edition-amberieu-et-bas-bugey/2017/12/31/cruces-et-routes-inondees-dans-le-valromey-et-le-bugey>
- Commune de Lhuis. Réunion de travail du 14/02/2018.
- ASCONIT, 2015, *Etat des lieux des affluents rive droite du Rhône – Diagnostic, ruisseau de la Gorge*
- Suivi cartographique sous SIG des problèmes hydrauliques et des opérations d'entretiens réalisé par la commune – outil présenté par la commune lors de la réunion de travail et couches SIG mises à disposition dans le cadre de l'étude.
- 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 :

Les évènements recensés sont présentés par unité hydrographique puis par ordre chronologique.

| Ruisseau | Date | Localisation des désordres | Observation(s) | Source(s) |
|--|---|---|--|-----------------------|
| ? | 21/12/1991 | | Arrêté de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle | Site web (géorisques) |
| Ruisseau du Moulin et son affluent principal, ruisseau du Pisserot | 13/02/1990 | ? | Arrêté de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle | Site web (géorisques) |
| | | Affluent du Pisserot | Débordements : <ul style="list-style-type: none"> - sur le chemin communal à la cote 450 (aucun évènement depuis) - au droit de la RD79 : les débordements ont suivi la route et atteint une habitation 200 m plus bas. (aucun évènement depuis, mais en limite de débordement début 2018) | Commune |
| | 30/03/2015 | Pisserot | Débordement du Pisserot au 582 route d'Innimond | Commune |
| | | Moulin – ruisseau principal | Ecluse remplie de matériaux | |
| 31 décembre 2017 | Champs en bordure du ruisseau du Moulin | « Deux jours de pluies discontinues ont fait disparaître le lit naturel et créer une mare dans les champs alentours. Du sable charrié par le mouvement s'épand en épaisseur sur les bords | Site web (Le Progrès) | |

| | | | | |
|--|------------------------------|---|---|--------------------------|
| | Fréquent | Moulin – ruisseau principal (secteur Naray) | Débordements fréquents sur le chemin le traversant vers la cote 355 m. | Commune |
| Ruisseau de la Gorge et son principal contributeur, le Creux du Nant | 1990 | Creux du Nant – route communale cote 390 | Débordement au droit du passage de la route communale à la cote 390. Les débordements ont suivi la route et inondée une propriété 300 m plus bas. | Commune |
| | | Secteur La Plaine, cote 300 | Le ruisseau a débordé dans les près vers la cote 300. Les débordements ont suivi la route départementale et ont rejoint un lit qui serait le très ancien tracé du cours d'eau. | Commune |
| | 30/03/2015 | Creux du Nant – chemin du ruisseau à Saint Martin | Débordement au droit du passage busé du ruisseau cote 430 | Commune |
| | | route départementale et station d'épuration | Débordement en amont des lagunages | Commune |
| | | La Plaine | Débordement vers les près en rive gauche suite à la rupture du mur du canal. | Commune |
| Ruisseau du Ponton | Il y a plus de 40-50 ans | | Selon un riverain, le ruisseau du Ponton aurait débordé et inondé des propriétés en rive gauche le long de la route communale rejoignant la RD 79. Les débordements étaient également fréquents au niveau du carrefour de la RD 79. La traversée a fait l'objet de travaux de recalibrage. | Témoignage d'un riverain |
| | Fréquent, dont le 30/03/2015 | | Débordement fréquents dans les champs et sur les pistes vers la cote 480. | Commune |

Tableau 10: historique des phénomènes crues torrentielles

V.3 Observations de terrain

V.3.1 Ruisseau du Ponton

Le ruisseau de Ponton draine un petit bassin versant de près de 2,9 km² en amont de Millieu et est alimenté par différentes sources venant s'ajouter au ruissellement de surface. Il est en grande partie couvert de près mais le cours d'eau présente une ripisylve marquée. Aussi, le ruisseau est susceptible de transporter des flottants en crue.



Figure 19 : Bassin versant du ruisseau de Ponton (fond Google Earth)

Vers la cote 480, le torrent franchit une piste communale sur laquelle les débordements seraient fréquents. Ils sont dus à la conjonction de plusieurs éléments :

- sur ce secteur, la pente en long du ruisseau marque un replat ce qui favorise le dépôts des matériaux transportés et l'étalement du ruisseau en lit majeur ;
- C'est à cet endroit que plusieurs affluents convergent pour alimenter le Ponton ;
- Le franchissement busé du ruisseau a une capacité hydraulique limitée et sujet à obstruction par embâcles.



Figure 20 : Débordement d'un affluent du Ponton

Au débouché sur son cône de déjection, le ruisseau longe une route communale elle-même bordée de propriétés, franchit la route départementale puis se jette dans le lac de Millieu.

Au droit des enjeux, les eaux passent sous un bâtiment au travers d'un ouvrage à capacité hydraulique limitée. Sans même aborder la capacité hydraulique du franchissement, pour une crue centennale du ruisseau, le risque d'obstruction est très probable. Selon un riverain, la souche identifiée sur la photo ci-dessous aurait récemment été enlevée de l'entrée de l'ouvrage. Le même témoignage indique également des débordements ayant atteint les habitations en rive gauche il y a au moins plus de 40 ans.



Figure 21 : Point de débordement du ruisseau du Ponton

A l'aval, le lit à droite de la route dans le sens descendant a une capacité hydraulique très faible. Les débordements sont très probables.



Figure 22 : Lit à capacité hydraulique très réduite

Le ruisseau franchit ensuite la route communale pour la longer sur sa gauche sur quelques décimètres avant de franchir la route départementale RD 79. Selon le témoignage du même riverain, les débordements étaient fréquents à l'approche de cette RD 79. Le franchissement et le lit à l'amont ont fait l'objet de travaux de recalibrage (réaménagement du coude, protection de berge). Ces travaux réduisent les risques de débordements qui ne peuvent toutefois être exclus, notamment en cas d'obstruction par embâcles. Les débordements s'étalent alors dans les champs et peuvent engendrer une accumulation d'eau de plus de 50 cm contre la route qui fait obstacle à l'écoulement.



Figure 23 : Aménagement du ruisseau en amont de la RD et accumulation d'eau en rive gauche

V.3.2 Ruisseau du Pisserot

Le ruisseau du Pisserot est l'affluent principal du ruisseau du Moulin. Il prend sa source au pied de la Montagne de Tentanet et draine un petit bassin versant (environ 0,9 km²) entièrement boisé.

Au débouché au niveau des premiers enjeux, le lit du ruisseau est canalisé dans un ouvrage en pierres très anciens, localement dégradé et avec une importante végétation à l'exception des derniers mètres en amont de la route communale. Les débordements devaient y être fréquents par le passé comme semble indiquer une imposante digue à droite d'un chemin d'accès privé permettant de limiter les divagations du ruisseau.



Figure 24 : Digue à droite d'une piste d'accès à une propriété (à gauche) – canal empierré à l'approche de la route communale (à droite)

Le franchissement de la route communale s'effectue à travers une buse. Pour un évènement centennal, son obstruction par embâcles ou pierre arrachées du canal est très probable. Une partie des écoulements rejoindrait alors le lit mineur à l'aval mais une autre se déverserait sur la rive droite en aval et atteindrait une habitation. Elle est particulièrement menacée avec une rampe d'accès au garage en sous-sol.

A l'aval de la route communale, le ruisseau sépare deux propriétés (dont celle exposée précédemment citée). Le lit mineur est très peu encaissé et les risques de débordements sont importants. Ils s'approchent alors de l'habitation en rive gauche mais le dévers vers le ruisseau limite les risques d'atteinte de la propriété. En cas de cumul de facteurs aggravants (divagation à la faveur de dépôts de flottants et ou de matériaux par exemple) la face amont de la maison pourraient être atteinte.



Figure 25 : Débordements vers la rive gauche : vues depuis l'amont de la propriété (à gauche) et depuis l'aval (à droite)

A l'aval le ruisseau peut encore déborder sur la rive gauche et atteindre la route par le portail de la propriété.



Figure 26 : débordements en aval rive gauche de la propriété au 582 route d'Innimond – évènement connu le 30/03/2015 à droite (source : commune de Lhuis)

A l'aval de la route départementale RD 41, le lit mineur est très peu encaissé et végétalisé. Des débordements sont susceptibles de s'étaler dans les prés. Un tel évènement se serait produit récemment, en janvier 2018, comme l'indiquent les dépôts en rive gauche sur la figure ci-dessous.



Figure 27 : débordements dans les champs à l'aval de la route départementale RD 41

Le ruisseau franchit alors la route départementale RD 79 puis traverse un champ avant de rejoindre le ruisseau du Moulin.

En amont de la RD 79, un bac de décantation existe pour réduire le risque d'obstruction du franchissement busé. Pour un évènement de période de retour centennal, même curé avant la crue, sa capacité est estimée insuffisante et l'obstruction du franchissement probable. Le cas échéant, les débordements suivent la route départementale jusqu'au bourg de Lhuis. En février 1990, un tel évènement se serait produit et aurait inondé une habitation en contrebas de la route plus de 300 m plus bas.



Figure 28 : Bac de décantation et RD 79 suivie par les écoulements après débordements

V.3.3 Ruisseau de la Gorge

Généralités

Le ruisseau de la Gorge draine un bassin versant d'une surface d'environ 11 km² répartie sur les communes de Lhuis et Groslée-Saint Benoit.

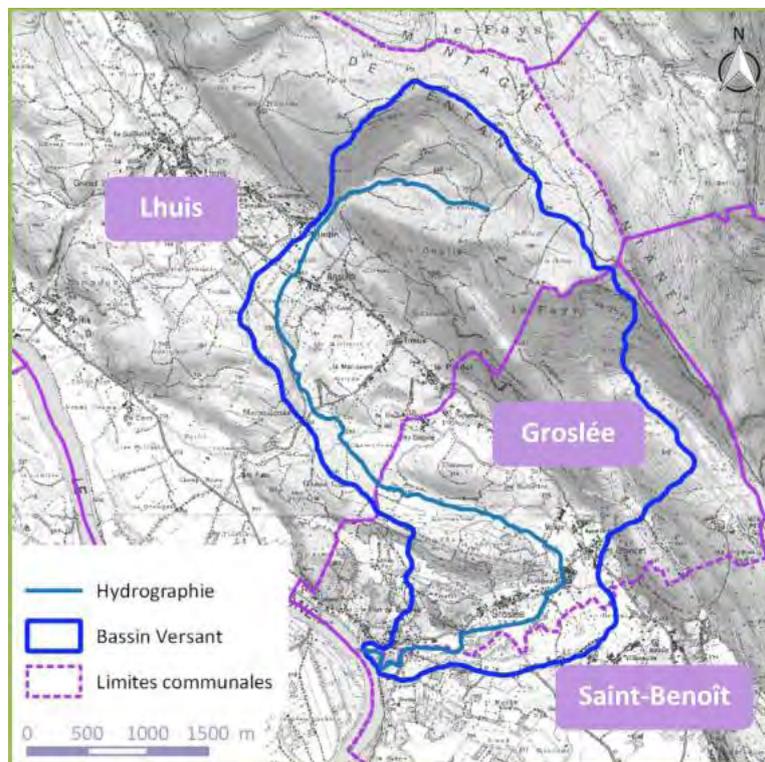


Figure 29 : Bassin versant de la Gorge - source : étude ASCONIT de 2015

Le Creux du Nant constitue une grande partie du bassin de réception du ruisseau de la Gorge. Il est totalement boisé et le ruisseau à forte pente traverse des reliefs calcaires et marneux. Les eaux chargées en calcaires sont à l'origine d'importantes accumulations de tufs.

Au débouché du Creux du Nant, le ruisseau suit une vallée beaucoup moins raide couverte de terrains molassique et morainique. L'érosion de ces terrains est susceptible d'apporter des matériaux au torrent remobilisés sous forme de charriage.

Sur ce tronçon, le ruisseau se dirige vers le Sud en direction de Groslée Saint Benoit. Historiquement, au niveau du Mau du Vin, comme précisé par la commune et supposé dans l'étude ASCONIT de 2015, il semblerait qu'au moins une partie du ruisseau prenait la direction d'une dépression vers le Sud Est pour rejoindre la plaine du Rhone. L'existence d'un ouvrage en pierres forçant l'écoulement vers son tracé actuel, celle d'un cône de déjection géologique au pied de la combe vers le Sud Est, l'observation d'un ancien lit d'écoulement encore bien marqué, des débordements vers cette combe en 2015 ou encore, selon l'étude ASCONIT, une inscription sur un rocher au bord du ruisseau « Agrippa Montanus, intendant des chemins, a amené les eaux du lac L. Varus Lucanus les a dirigées » sont autant d'arguments qui laissent supposer cet ancien tracé.

Cette plaine sera illustrée dans le cadre des observations de terrains, notamment au droit des débordements de 2015.

Le tracé actuel du ruisseau de la Gorge se dirige alors vers Groslée Saint Benoit, qu'il traverse au niveau du hameau de la Burlanchère puis se dirige vers le Rhone avec lequel il conflue au sud du Port de Groslée.

Secteur de Saint Martin au débouché du Creux du Nant

En bordure du hameau de Saint Martin, les eaux issues du Creux du Nant traversent une piste au droit de laquelle des débordements ont été signalés par la commune, notamment en janvier 2018.

Ces débordements sont dus à une capacité hydraulique insuffisante de l'ouvrage, qui plus est susceptible d'être obstruée par des embâcles (bassin versant boisé). Après analyse du site, les débordements rejoindraient rapidement le lit mineur sans menacer d'enjeux. Seule la viabilité de la piste peut être remise en cause.

A noter l'accumulation du tuf sur la photo de gauche ci-dessous.



Figure 30 : Franchissement du ruisseau issu du Creux du Nant à Saint Martin

Route communale Ansolin

En amont immédiat du franchissement de la route communale entre Ansolin et Saint Martin, le ruisseau marque un coude et la revanche est très faible au niveau de l'extrados. Pour une crue centennale, les débordements en ce point sont très probables. Ils pourraient également être accentués en cas d'embâcles dans le lit.

Le cas échéant, une partie s'étale en aval de la route et l'autre la suit en direction du hameau d'Ansolin et sont susceptibles d'inonder tous les points en contrebas de la route. En 1990, un tel évènement se serait produit et aurait inondé une propriété 300 m en aval, au droit du carrefour principal à Ansolin.



Figure 31 : Débordements possibles en amont de la traversée de la route communale entre Saint Martin et Ansolin

Secteur de la station d'épuration

A l'aval, le ruisseau traverse des champs et s'approche de la RD 79 qu'il longe sur sa rive droite.

Dans les champs, en amont d'un premier bassin de la station d'épuration, le lit mineur est localement très peu marqué et des débordements sur les champs sont possibles mais restent limités latéralement à la faveur de la topographie. Ce premier bassin n'est pas exposé.



Figure 32 : Traces de débordements en amont de la station d'épuration

Le ruisseau franchit ensuite une route communale au travers d'une buse. Les risques d'obstruction sont avérés compte tenu de la végétation en amont. Des traces de récents débordements en janvier 2018 étaient encore identifiables sur la voirie.



Figure 33 : Route pouvant être surversée et traces de récents dépôts

Lors du dernier épisode, les débordements ont vraisemblablement rapidement rejoint le lit et n'ont pas atteint les lagunages en rive gauche à l'aval (en arrière-plan de la photo de droite). Pour un épisode estimé d'occurrence centennale, il est vraisemblable qu'une majeure partie des écoulements rejoignent également le lit mineur à l'aval mais l'atteinte des lagunages n'est pas exclue.

Secteur du Mau du vin : divagations possibles vers un ancien lit

Sur le secteur du Mau du Vin, la pente du ruisseau faiblit, ce qui favorise les dépôts de matériaux en crue. Le lit est aujourd'hui chenalisé entre des merlons de matériaux de curage, qui témoignent de cette problématique d'engravement.

Malgré cette chenalisation, le lit du cours d'eau, est très peu encaissé, voire à hauteur du terrain naturel à l'aval des merlons de curage ou même perché (i.e. plus haut que le terrain naturel derrière les merlons). En cas de crue centennale, l'engravement du secteur sera à nouveau inéluctable compte tenu de la rupture de pente et des divagations dans les champs de part et d'autre sont possibles. Celles vers la rive gauche restent contenues dans un champ. Celles vers la rive droite sont susceptibles de se diriger vers la route départementale et rejoindre un ancien lit.



Figure 34 : Lit perché sur le secteur du Mau du Vin

Vers la branche Est, les débordements suivent pour partie la route départementale et se déversent vers un ancien lit. Les écoulements captés, franchissent la route départementale à travers une buse, s'écoulent dans un champ à droite de la route puis sont dirigés à nouveau à gauche de la route, dans un lit bien marqué, au travers d'une grille et d'une buse.

Enfin, les eaux débouchent au lieu dit La Plaine et s'étalent dans les près contre la RD 79 faisant obstacle à l'écoulement. Il n'existe aucun exutoire.



Figure 35 : Double franchissement de la RD 79



Figure 36 : Ancien lit et débouché au lieu-dit la Plaine

Aval du Mau du Vin – tracé actuel

A l'aval du Mau du Vin, le lit était canalisé entre deux murs en pierre. Il s'agirait d'un très ancien ouvrage ayant permis la dérivation, au moins partielle, du ruisseau vers Groslée Saint Benoit.

Au fur et à mesure de l'engravement, le ruisseau s'est retrouvé perché entre les murs. Une rupture récente du mur de rive gauche, qui daterait d'une crue en mars 2015, a entraîné le déversement des écoulements dans les près puis l'érosion régressive des dépôts dans le canal. Les écoulements rejoignent le lit du cours d'eau en aval du champ.



Figure 37 : Rupture du mur en rive gauche d'un ancien canal et divagations dans les champs

Un retour dans l'ancien chenal n'est en l'état plus possible au vue du niveau perché du lit à l'aval. Une érosion régressive dans le canal est attendue. Par ailleurs, des débordements et divagations vers la rive droite sont également probables pour l'évènement de référence, après rupture du mur de droite et/ou débordements en partie amont du tronçon où la revanche est faible. Afin de prendre en compte l'intensité des phénomènes possibles, notamment en cas de rupture des murs de chenalisation, l'ensemble de la zone potentielle de divagations sera classée en aléa fort.



Figure 38 : débordements actuels en rive gauche et possible en rive droite

V.3.4 Ruisseau du Moulin

Généralités et ruisseau à l'amont des enjeux

Le ruisseau du Moulin est alimenté par des eaux issues du lac de Millieu et par le ruisseau de Pisserot, affluent principal. Celui-ci a été décrit précédemment.



Figure 39 : Branche du ruisseau du Moulin issue de Millieu

Les deux branches sont susceptibles d'apporter des matériaux au ruisseau, essentiellement celle du Pisserot avec notamment ses derniers décamètres en amont de la confluence en cours de dégradation.



Figure 40 : Erosion du Pisserot à l'amont immédiat de la confluence avec le ruisseau du Moulin

Un replat au niveau de la confluence permet une régulation de ces apports.



Figure 41 : Aval immédiat de la confluence Pisserot / Moulin

Traversée du chef-lieu de Lhuis

Le ruisseau traverse alors le bourg de Lhuis au plus près des enjeux.

De l'amont vers l'aval, on peut lister :

- Le franchissement d'une propriété avec un long passage couvert sous chemin d'accès et cour, un court tronçon à ciel ouvert puis un passage à nouveau couvert sous la propriété.
- Le franchissement d'une route communale à l'aval d'un canal séparant deux propriétés,
- Un lit chenalisé entre des propriétés mais assez profond,
- Le franchissement d'une deuxième route communale à l'aval duquel le ruisseau se déverse dans un bac de décantation privé (dit « écluse » par la commune)
- Le franchissement d'une troisième route communale. Le ruisseau s'écoule alors le long de propriétés (ancien moulin) avant de rejoindre un lit naturel.



Figure 42 : Franchissement sous une propriété avec court passage à ciel ouvert



Figure 43 : Lit à l'aval de la première propriété traversée à gauche (vue vers l'amont) - lit à l'aval sur le même tronçon avec franchissement d'une route commune à droite (vue vers l'aval)



Figure 44 : Lit entre les deux routes communales amont



Figure 45 : Rejet dans l'écluse et lit en aval de la troisième route communale

Au vu des observations en amont immédiat des enjeux, le ruisseau du Moulin est susceptible de charrier des volumes non négligeables de matériaux, notamment issus de l'érosion des terrains traversés par l'affluent du Pisserot. Par ailleurs, la végétation est également importante en amont des enjeux. Aussi, pour un scénario de période de retour centennale, l'obstruction du premier ouvrage de franchissement (entrée du long passage couvert sous propriétés) est probable. Le cas échéant, le court tronçon à ciel ouvert n'empêchera pas l'inondation de la propriété transversale mais permet un retour des écoulements au lit en limitant l'accumulation d'eau devant le bâtiment.

A l'aval jusqu'au déversement dans « l'écluse », le lit est artificialisé et les ouvrages hydrauliques sont d'un gabarit proche du premier franchissement. Par ailleurs, la pente en long est régulière voire augmentée sous les ouvrages permettant ainsi une accélération des écoulements. Aussi, les risques d'obstruction des franchissements par des matériaux et/ou des flottants sont négligeables, après « l'écran » formé par le premier franchissement.

L'élargissement dans l'écluse favorise un dépôt des matériaux charriés. L'engravement réduit alors progressivement la capacité d'évacuation en sortie d'écluse. Les photos ci-après illustrent une capacité hydraulique devenue très faible (cf. ouvrage en rouge sur la photo de gauche). Aussi, pour un scénario de période de retour centennale, l'obstruction de l'ouvrage aval de l'écluse est jugée probable.



Figure 46 : Ecluse engravée et rétention d'eau due à une capacité d'évacuation devenue insuffisante (source : commune de Lhuis)

Compte tenu de ces éléments d'analyse, **le scénario de référence considérera une obstruction du premier ouvrage amont de franchissement (passage couvert en amont de la propriété transversale à l'écoulement) et de l'ouvrage aval de l'écluse.**

L'obstruction du premier ouvrage de franchissement entrainera, comme écrit précédemment, l'inondation de la propriété transversale avant retour au lit via le court passage à ciel ouvert. A l'aval, l'obstruction de l'ouvrage aval de l'écluse sera à l'origine d'un déversement sur la route et une atteinte des propriétés en contrebas rive gauche. La topographie de la route permet de façon évidente un retour des débordements au lit mineur après contournement du moulin et déversement entre ce dernier et la propriété aval. Ces risques d'atteinte seront confirmés après modélisation hydraulique.



Figure 47 : Direction suivie par les débordements après obstruction des ouvrages

Cas de la traversée d'un chemin en aval de Grand Pré

Vers la cote 355, un chemin franchit le ruisseau et ferait l'objet de débordement selon la commune. Sur ce secteur, le ruisseau est en effet susceptible de divaguer dans un espace entièrement naturel et à faible pente. Une buse à capacité hydraulique limitée sous la piste, des dépôts possibles sur les faibles pentes en amont et la forte probabilité de formation d'embâcles contribuent à faire déborder le ruisseau sur la piste. Ces débordements sont même attendus pour des crues de faibles périodes de retour. A noter également des sorties d'eau sur le versant rive gauche qui viennent augmenter le ruissellement sur la piste.



Figure 48 : Franchissement d'une piste sur le ruisseau du Moulin vers la cote 355

Débouché en limite nord du hameau de Rix

Au débouché dans la plaine du Rhone, le ruisseau longe les habitations les plus au Nord du hameau de Rix. Le lit est très peu encaissé. Sur la partie amont, l'encaissement de la combe permet d'éviter l'atteinte d'une habitation en rive gauche. Un coude au droit d'un garage favorisera les débordements en aval vers la rive droite plutôt que vers la rive gauche. Cette dernière reste néanmoins menacée en cas d'importantes divagations.



Figure 49 : Partie amont de la traversée de Rix par le ruisseau du Moulin



Figure 50 : Partie aval de la traversée de Rix par le ruisseau du Moulin

A l'aval, le ruisseau franchit la route départementale RD 19 au travers d'un dalot. Le risque d'obstruction n'est pas exclu, notamment en cas de remobilisation de flottants (tas de bois). Le cas échéant, les débordements atteindraient les abords de la propriété (entreprise agricole) en aval rive gauche avant de rejoindre un lit encaissé jusqu'au Rhône.



Figure 51 : Lit du ruisseau du Moulin à l'aval de Rix

V.4 Analyse hydrologique du ruisseau du Moulin

Ce paragraphe a pour objectif une quantification, en termes de débit liquide, de la crue de référence du ruisseau du Moulin. Notons qu'il s'agit du seul ruisseau sur la commune de Lhuis pour lequel une telle démarche est menée car elle constituera une donnée d'entrée d'un modèle hydraulique construit pour analyser les risques de débordements de ce cours d'eau dans la traversée du chef-lieu. Sur les autres cours d'eau, la qualification de l'aléa sera réalisée par analyse géomorphologique. Les débordements seront essentiellement dus à des évolutions géomorphologiques ou des problèmes liés au transport solide (flottants). Aussi, la considération des capacités hydraulique « en eau claire » devient secondaire.

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 Prévission 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 ruisseau du Moulin 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 | 115 |

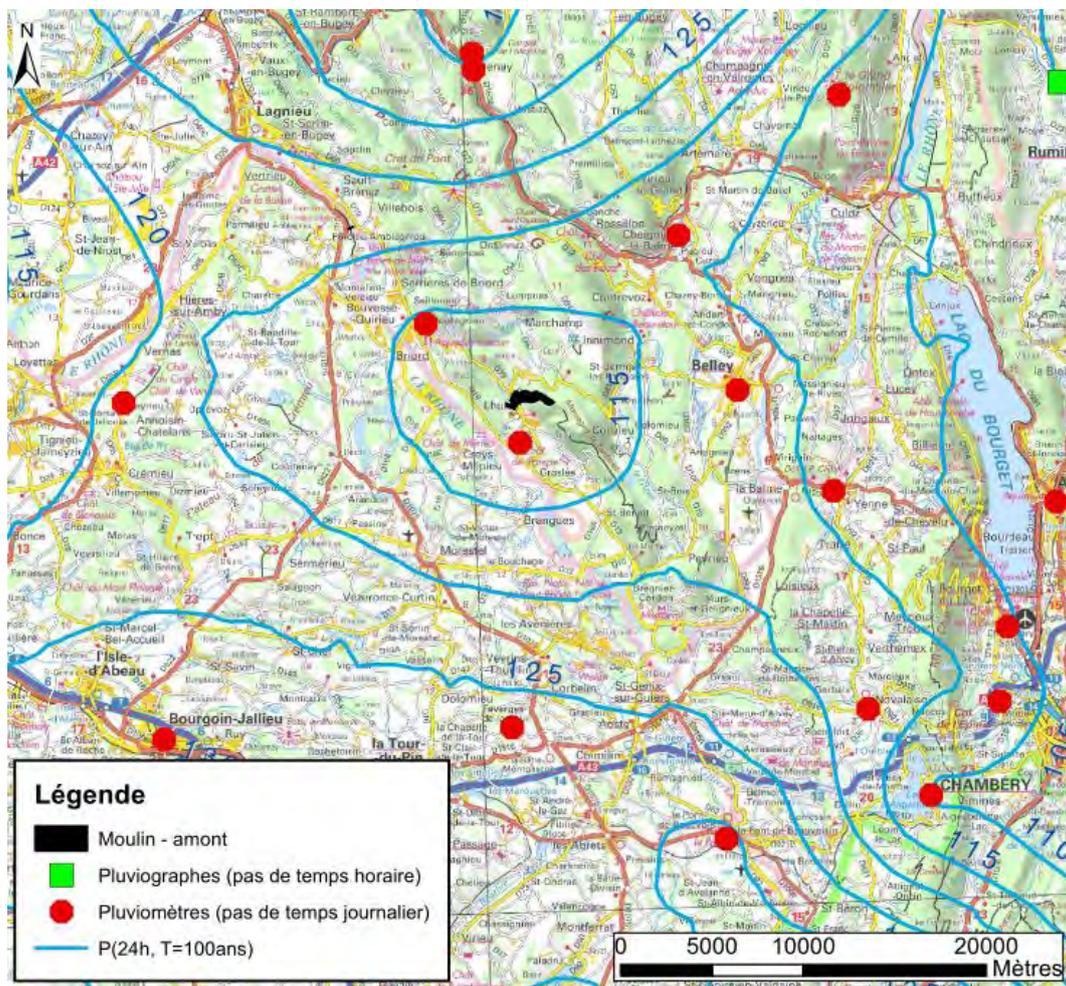


Figure 52 : Analyse spatiale des pluies journalières centennales

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 $P = a \cdot d^{-b}$, 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.

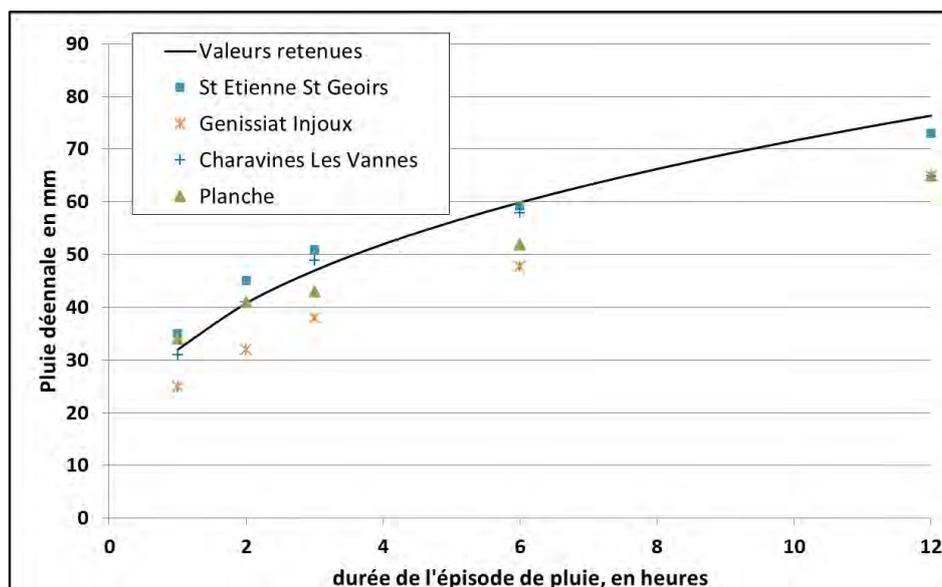


Figure 53 : ajustement de la loi de Montana

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 | 0,25 |
| Sogreah | 0,49 |
| Turraza | 0,36 |
| Giandotti | 0,71 |
| Izzard Meunier (BV végétalisé) | 0,96 |

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 :

$$0,3 \text{ h} < t_c < 1 \text{ h (valeur probable : 0,5 h)}$$

V.4.4 Détermination du débit de référence décennal

Application de différentes formulations statistiques

Le bassin versant du Moulin 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] | 1,6 |
| Régressions multiples (Mathys et Peteuil, 2010) [paramètres : surface drainée et pluviométrie] | 2,8 |
| SOCOSE | 2,5 |
| Crupedix | 1,5 |
| SCS simplifiée | 2,8 |
| Méthode rationnelle | 2,8 |

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

Choix d'une valeur de débit décennal :

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

$$Q_{10} = 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Comparaison aux bassins versants jaugés à proximité (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 assez proche, le ruisseau du Suran est également équipé de station hydrométrique exploitable dans un contexte comme celui du Moulin :

- 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 |

Les débits pseudo-spécifique décennaux de 0,7 à 1 m³/s/km^{1,6} sur les bassins versants jaugés à proximité du ruisseau du Moulin sont bien inférieurs à la valeur retenue sur le ruisseau du Moulin (1,71 m³/s/km^{1,6}). Toutefois, les surfaces des bassins versants jaugés sont nettement supérieures à celle du ruisseau du Moulin. Aussi, ce dernier ne réagit pas aux mêmes types d'épisodes pluvieux et connaît de fortes crues lors d'épisode pluvieux plus intenses mais plus courts (de type orage d'été). Pour de telles sollicitations, des débits pseudo-spécifiques plus élevés restent plausibles.

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 Moulin est estimé à :

$$Q_{100} = 4,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

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 : 4,4 m³/s, comme estimé précédemment
- Temps de montée : 1 heure, soit proche de 1,5. t_c
- Coefficient de forme : 1,9. 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. Ce choix semble sécuritaire compte tenu du boisement du bassin versant et permet ainsi de considérer une importante saturation des terrains avant l'évènement.

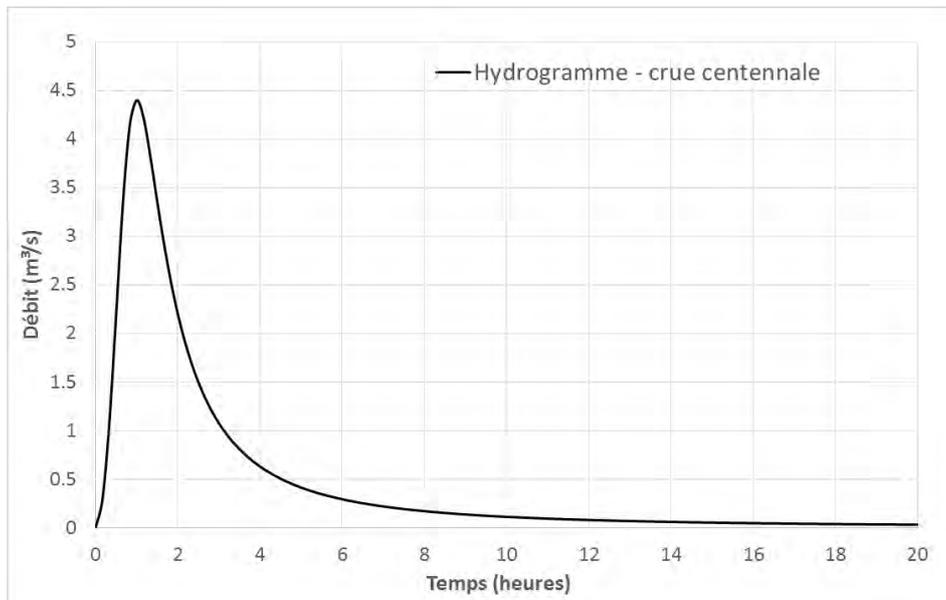


Figure 54 : Hydrogramme retenue pour une crue centennale sur le ruisseau du Moulin

V.4.7 Scénario de référence

L'évènement de référence retenu est une crue centennale atteignant un débit de pointe de 4,4 m³/s, selon l'hydrogramme défini au paragraphe précédent. Par ailleurs, pour cet évènement, les obstructions du passage couvert amont (de l'ordre de 70 m) et de l'ouvrage aval de l'écluse des deux ponts amont (pont voute et passage couvert) sont estimées probables et seront prises en compte.

V.5 Modélisations hydrauliques

V.5.1 Recours à la modélisation

Au droit des secteurs densément urbanisés, l'analyse de l'aléa torrentiel a été appuyée par une modélisation hydraulique. Les résultats ont ensuite été validés/ajustés par une analyse de terrain. Sur la commune de Lhuis, une seule zone a été modélisée : la traversée du chef-lieu par le ruisseau du Moulin.

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

V.5.2 Données topographiques

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

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

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

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

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

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

Dans le cas du ruisseau du Moulin, 18 profils en travers ont été levés. Ils sont localisés sur la figure suivante.

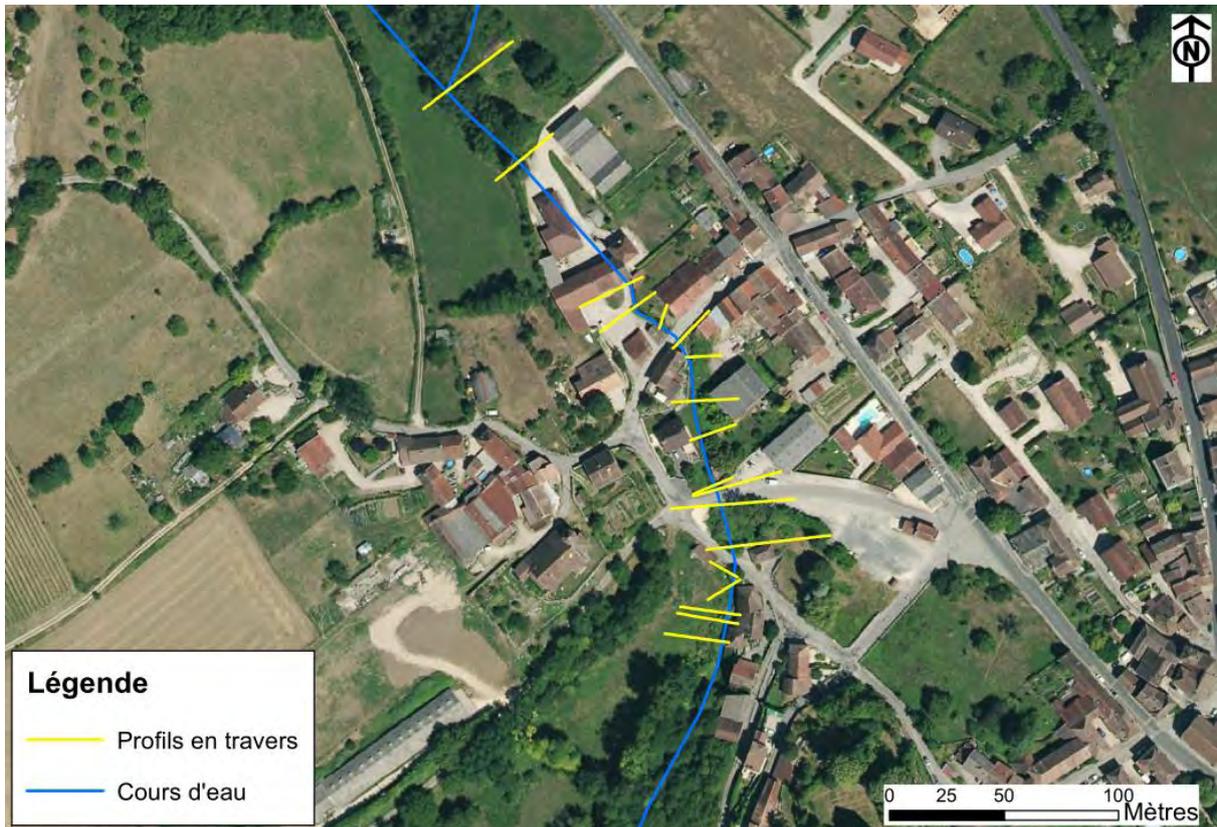


Figure 55 : Profils en travers levés par un géomètre expert

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 :

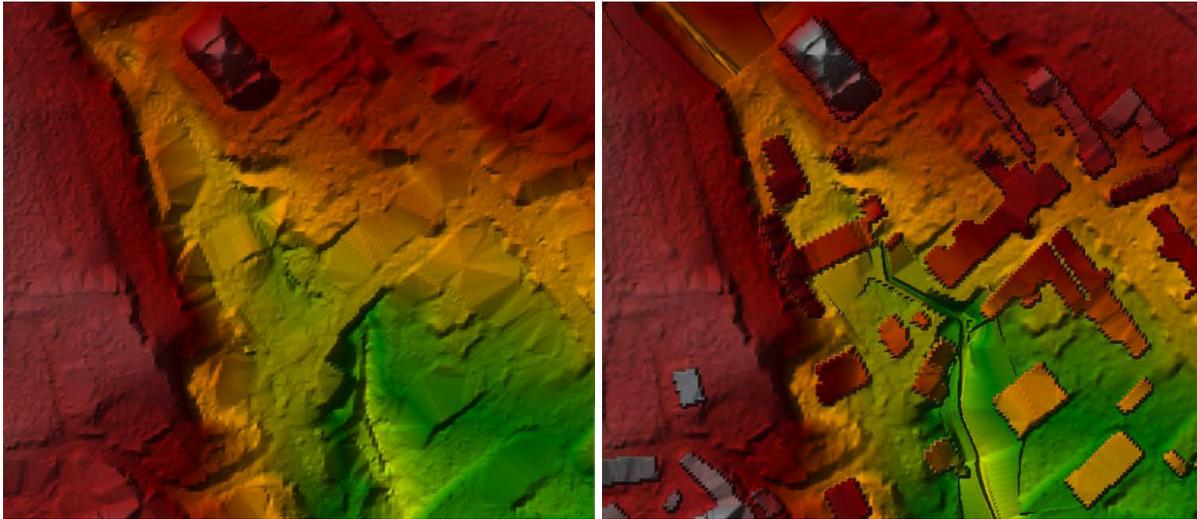


Figure 56 : Amélioration des données topographiques (avec le passage amont obstrué)

V.5.3 Description du modèle

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

L'emprise du modèle couvre le linéaire de la confluence avec le ruisseau du Pisserot jusqu'à l'aval du moulin, là où le terrain entre dans un tronçon naturel et encaissé.

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

V.5.4 Données d'entrées et paramètres du modèle

Débits injectés :

Sur un modèle à deux dimensions, seul un calcul en régime transitoire est possible. L'hydrogramme de crue injecté dans le modèle est celui défini dans l'analyse hydrologique au paragraphe V.4.6.

Conditions aux limites :

Les conditions aux limites considérées correspondent aux hauteurs normales en sortie aval du modèle. Dans la mesure où la limite aval du modèle est très éloignée du hameau des Granges, l'influence de cette condition est nulle au niveau du hameau des Granges.

Coefficient de frottement :

Les coefficients de Manning retenus sont :

- $n=0.04$ en lit mineur et lit majeur,
- $n=0.02$ en zone urbaine (routes et habitations).

V.5.5 Résultats

Première approche par un modèle 1D

La modélisation en une dimension a permis de mettre en évidence pour un débit liquide centennal et sans considérer d'obstruction d'ouvrages :

- Une capacité suffisante du passage couvert de 70 m, mais des conditions d'écoulement proches de la mise en charge.

- Une capacité insuffisante du franchissement de la route communale amont, avec mise en charge. Ce résultat est convergent avec l'observation de quelques dépôts de matériaux et végétaux sur la berge rive droite en amont de l'ouvrage. Ils font suite à une crue de janvier 2018.
- Un débordement au niveau de l'écluse. Il est favorisé par à un engravement déjà engagé de l'ouvrage amont et donc considéré en données topographiques d'entrée.

Cette analyse en 1D étaye d'autant plus le choix de considérer l'obstruction du franchissement amont et de l'ouvrage aval de l'écluse.

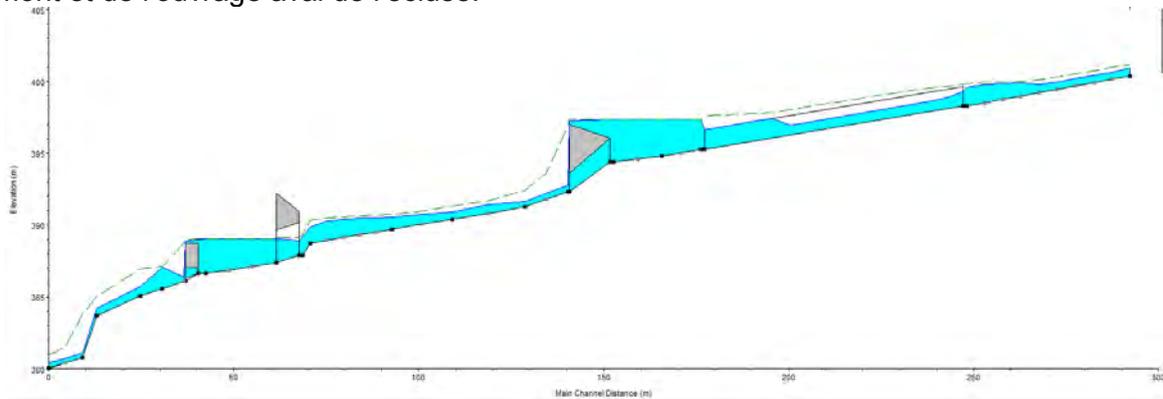


Figure 57 : Profil en long 1D de la ligne d'eau pour un débit centennial, sans obstruction d'ouvrage

Résultats

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.

Le modèle confirme :

- l'inondation de la propriété transversale à l'écoulement sous le premier franchissement, ce qui était inéluctable avec un scénario d'ouvrage obstrué,
- le contournement du moulin suivi de déversement entre ce dernier et la propriété aval permettant aux débordements de retourner au lit mineur.

Le modèle met également en évidence des débordements dans les deux cours (sur chaque rive) sur le court tronçon entre le premier passage couvert et la première route communale. Ces débordements font suite à la mise en charge du franchissement aval qui était déjà démontré sur un modèle 1D.

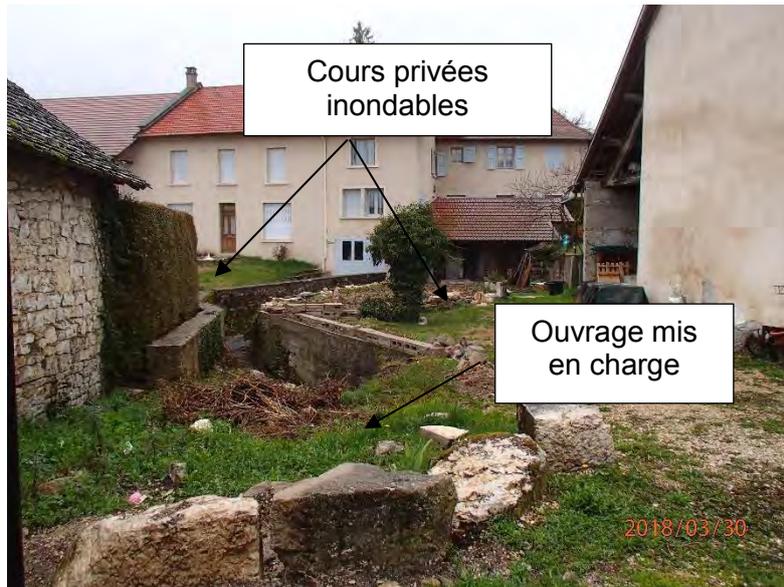


Figure 58 : Risques d'inondation en amont de la route communale amont

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.

Dans le cas de la commune de Lhuis, à l'exception de la traversée du bourg de Lhuis par le ruisseau des Moulins, tous les autres cours d'eau ont été traités selon cette approche hydro-géomorphologique.

Enfin, pour chacun de ces cours d'eau, l'estimation des débits de crue de référence (estimée d'occurrence centennale), n'a pas été présentée. En effet, tous les débordements prévisibles pour une crue centennale sont dus ou fortement aggravés par des risques d'obstruction par embâcles, des problèmes d'engravement ou des divagations des écoulements. Aussi, les débits liquides théoriques deviennent secondaires dans la qualification de l'aléa. Leur estimation sur des bassins versants torrentiels non jaugés présente qui plus est de grandes incertitudes comme le rappelle l'analyse hydrologique du torrent du Moulin.

| 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. |
| | 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. |
| | Infrastructures et ouvrages | Les ponts peuvent être engravés, submergés ou emportés. Les routes ou les équipements (pylônes, captages, etc.) faisant obstacle aux divagations du torrent peuvent être détruites ou ensevelies par les dépôts. Les voies de communication sont impraticables du fait de la perte du tracé. De longs travaux de déblaiement et remise en service sont nécessaires. | Les dégâts aux infrastructures, aux ouvrages et aux équipements (pylône, captage, etc.) restent modérés et leur remise en service peut être rapide. |

Tableau 11: tableau d'intensité crue torrentielle

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

| Probabilité d'atteinte | Signification |
|------------------------|--|
| Fort | 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 12: 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 13: grille de qualification des aléas de crue torrentielle en zone non urbanisée

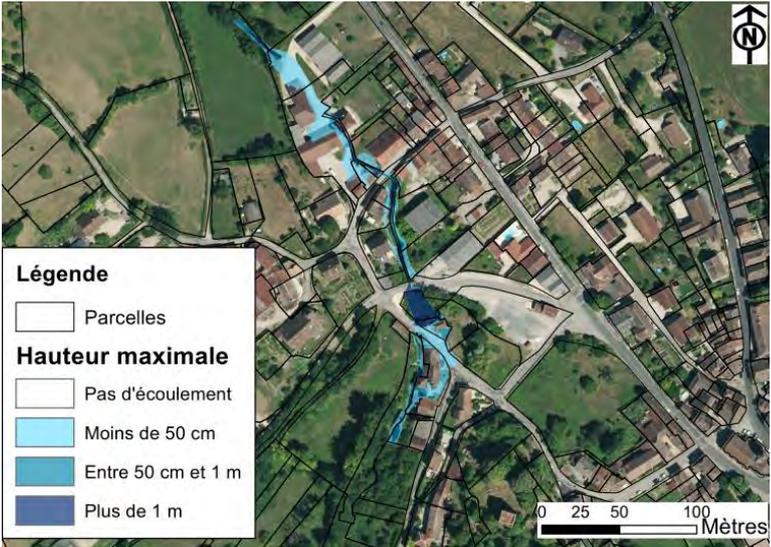
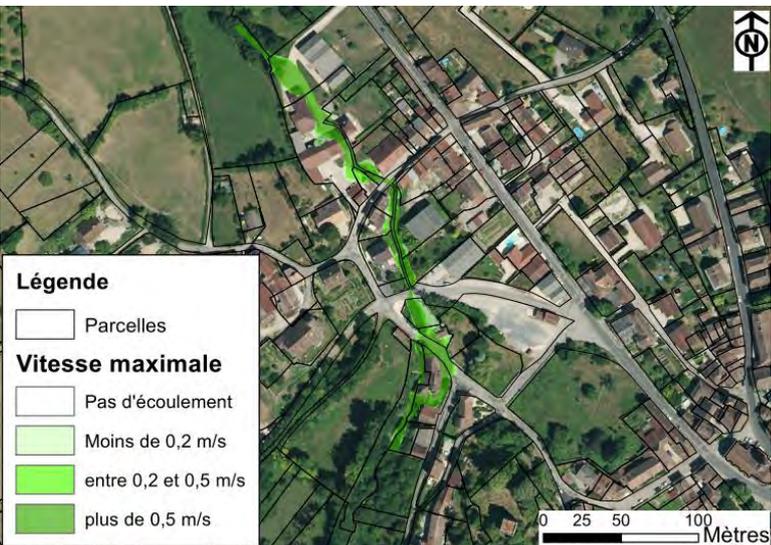
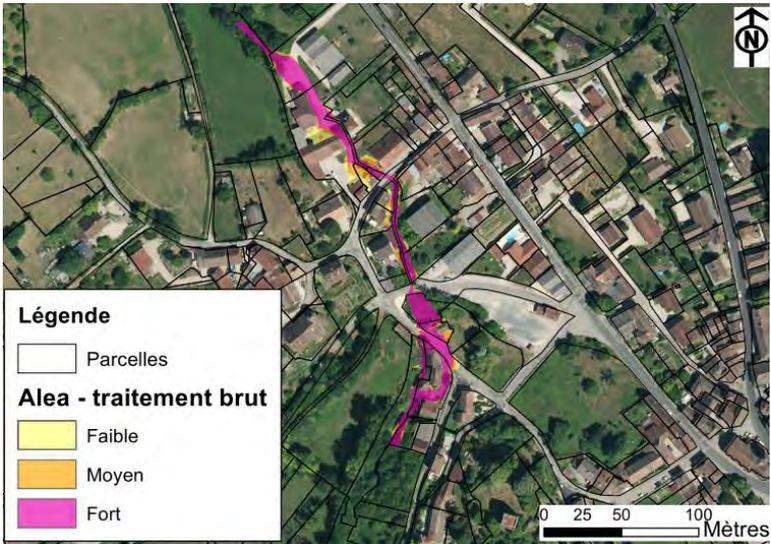
V.6.2 Zones d'enjeux

Croisement hauteur/vitesse à partir des résultats du modèle :

Pour la zones modélisée, i.e. la traversée du bourg de Lhuis par le ruisseau du Moulin, 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 14 : grille de qualification des aléas de crue torrentielle en zone urbanisée

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

Confirmation / ajustement sur le terrain :

Une analyse de terrain a entraîné les principaux ajustements suivants de la carte d'aléa brute :

- Cours privées en amont de la route communale amont : comme déjà détaillé au paragraphe V.5.5, les deux cours sont inondables. Le modèle indique un aléa moyen dans chaque cour. La rive droite a été surclassée en aléa fort pour prendre en compte un risque de rupture du mur d'une hauteur de l'ordre du mètre (coté aval entre crête de mur et terrain naturel) constituant la berge rive droite. En bordure, la zone d'aléa faible est sécuritairement élargie sur l'emprise de la route communale
- Entre les deux routes communales amont, le modèle indique une bande d'aléa parallèle au lit. Il s'agit de débordements bloqués derrière un muret délimitant la crête de berge des propriétés privées. Ce muret est bel et bien existant mais a été accentué à tort lors de la modification du MNT par interpolation entre profils. Après analyse de terrain, des débordements vers cette rive droite sont effectivement possibles sur les premiers mètres amont du tronçon mais à l'aval, l'étalement de la lame d'eau s'effectuera préférentiellement vers la rive gauche généralement plus basse. La bande de terrain entre le lit mineur et les murs de propriétés est classée en aléa moyen.
- L'emprise du bac de décantation a été reprise pour représenter précisément le terrain. Le modèle avait interpolé le bac de décantation entre deux profils. L'aléa fort reste inchangé dans cette emprise en lit mineur.
- Compte tenu de l'échelle de rendu, l'aléa est classé fort sur toute l'emprise inondable lorsque les emprises d'aléa moyen et faible seraient représentées par des micro-polygones, en marge d'une large zone en aléa fort.

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 :

- **Ruisseau de Ponton** : les débordements vers la rive gauche au droit de la route communale, liés à l'obstruction d'un passage couvert exposent les premières habitations à un aléa fort puis des habitations en second plan à un aléa moyen liée à une possible accumulation des eaux et matériaux. Les débordements s'étalent ensuite dans les prés mais une bande en bordure de route départementale est classée en aléa moyen compte tenu d'une accumulation possible d'eau sur plus de 50 cm.
- **Ruisseau de Pisserot** :
 - i. les possibles débordements au droit de la route communale amont exposent une propriété en contrebas rive droite à un aléa fort, notamment au vu d'une possible accumulation en point bas à la faveur de la rampe d'accès au garage. En aval, des débordements se rapprochent d'une propriété qui est exposée à un aléa moyen : elle pourrait être atteinte en cas de divagation importante sur des dépôts en lit majeur.
 - ii. Il existe un risque de débordement au droit de la route départementale. Le cas échéant, les écoulements suivent la route départementale et peuvent atteindre une propriété en contrebas de la route plus de 200 m en aval. Les écoulements retournent au lit mineur en se frayant un

cheminement entre plusieurs propriétés alors exposés à un aléa faible, compte tenu de la diffusion des écoulements.

- **Ruisseau de la Gorge** : les débordements sur la route communale qui se propagent vers Ansolin expose les abords de la route à un aléa moyen. Des ouvertures au niveau de la route pourraient en effet engendrer des accumulations d'eau sur au moins 50 cm. En aval du carrefour, l'aléa est estimé faible à la faveur d'une répartition du flux hydraulique.
- **Ruisseau du Moulin** :
- Dans la traversée de Lhuis :
 - i. Le risque fort d'obstruction du franchissement amont expose deux propriétés (celle transversale au lit et une en amont rive droite) à un aléa fort.
 - ii. Entre le passage couvert sous la propriété et la route communale amont, la cour en rive gauche est exposée à un aléa moyen et la cour en rive droite à un aléa fort, compte tenu d'un risque de rupture du mur constituant la berge. Ces débordements font suite à la mise en charge du franchissement aval.
 - iii. Entre les deux routes communales amont, la bande de terrain entre le lit mineur et les propriétés de rive droite est exposée à un aléa moyen.
 - iv. Enfin, les risques de surverse de l'écluse exposent le moulin et la propriété à l'aval à un aléa fort. Elles sont atteintes par les débordements de l'écluse avant que ceux-ci ne rejoignent le lit mineur.
- Sur la traversée du hameau de Rix :
 - i. la rive droite est exposée à un aléa fort mais aucune habitation n'est concernée.
 - ii. En rive gauche, un bâtiment est classé en aléa fort car il constitue la berge du ruisseau. Une autre propriété est exposée à un aléa moyen et pourrait être atteinte en cas de divagations importantes compte tenu du très faible encaissement du ruisseau, bien que les débordements prévisibles se dirigent préférentiellement vers la rive droite. Enfin, en aval de la RD 19, les abords d'une entreprise agricole sont exposés à un aléa faible en supposant l'obstruction du dalot. Le bâtiment n'est pas estimé dans l'emprise des débordements.

VI Aléas de ruissellement

VI.1 Définition

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

VI.2 Méthodologie appliquée

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

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

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

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

VI.3 Historique et données disponibles

Sources d'informations consultées :

- Commune de Lhuis. Réunion de travail du 14/02/2018.
- Suivi cartographique sous SIG des problèmes hydrauliques et des opérations d'entretiens réalisé par la commune – outil présenté par la commune lors de la réunion de travail et couches SIG mises à disposition dans le cadre de l'étude.
- Conservatoire d'Espaces Naturels Rhone Alpes, Décembre 2012, *Plan de Gestion 2013-2017, Lac de Millieu*
- 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 :

De manière générale, la commune signale que tous les talwegs du versant débouchent sur le plateau urbanisé et sont susceptibles de poser des problèmes, notamment au droit de passages busés.

Plus dans le détail, les phénomènes suivants relevant d'une problématique de ruissellement sont également recensés.

| Secteur | Date | Observation(s) | Source(s) |
|--|--------------------------------|---|-----------|
| Chemin du Creux (sud de la commune) | 30/03/2015 et 23/01/2018 | Débordement dans les champs et sur les pistes vers la cote 480. | Commune |
| Millieu – combe au Sud du ruisseau du Ponton | 30/03/2015 | Débordements au niveau du dalot à l'aval des maisons | Commune |
| | Janvier 2018 | Débordements au droit de la RD 41 | Commune |

Tableau 15: historique des phénomènes de ruissellement

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.

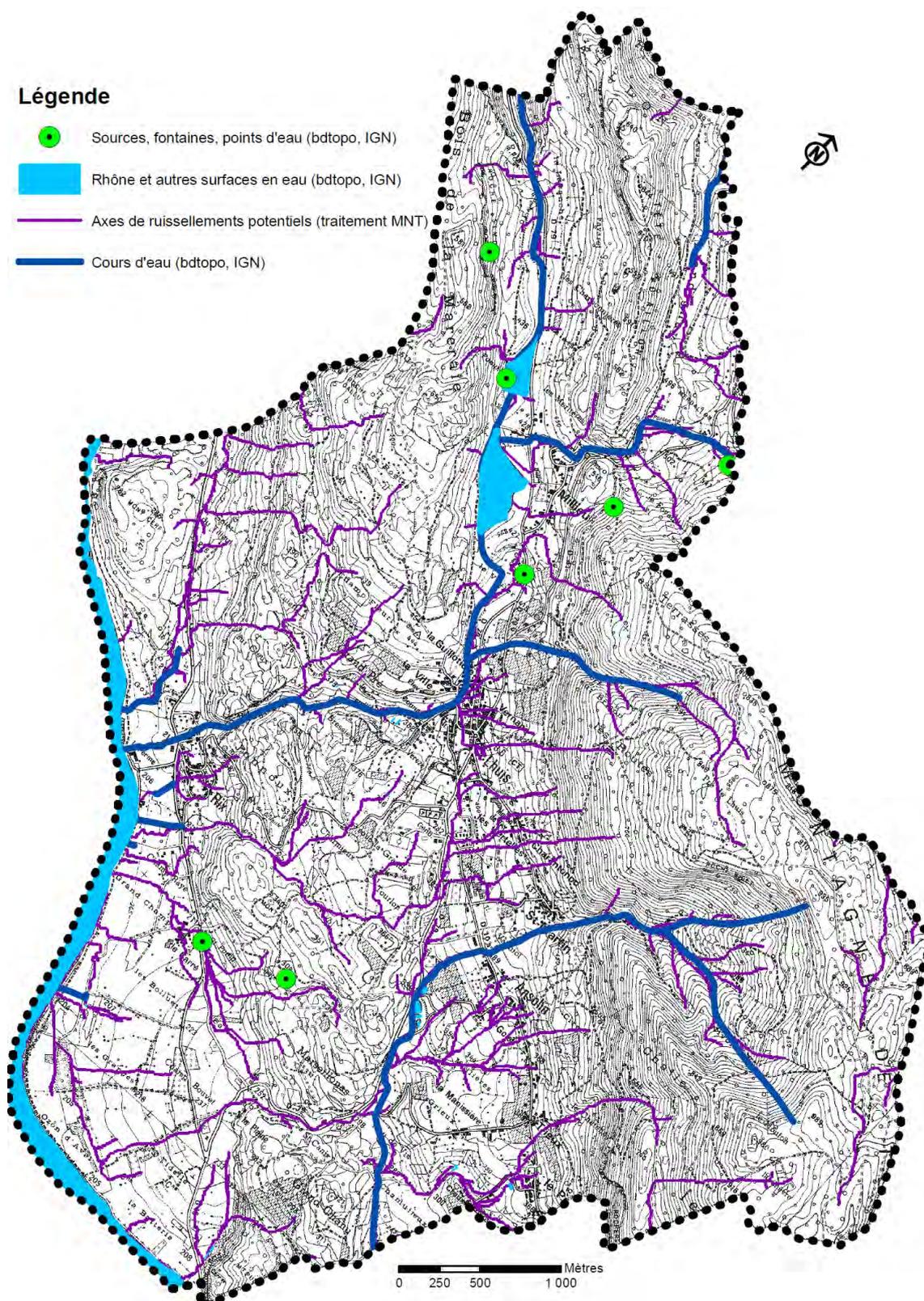


Figure 59 : Carte des écoulements préférentiels

VI.5 Observations de terrain

VI.5.1 Secteur Nord – versants le long de la RD 79

Au nord de Millieu, le long de la route départementale RD 79 les deux versants ne présentent aucun axe de ruissellement bien marqué, le ruissellement reste diffus.

Les eaux s'accumulent de part et d'autre de la route départementale qui fait obstacle à l'écoulement. Selon la hauteur de la route, les accumulations d'eau dans les cunettes et les terrains adjacents peuvent être importantes.



Figure 60 : Accumulation des eaux de ruissellements de part et d'autres de la RD 79

VI.5.2 Secteur Ouest – le long de la RD 19

A l'exception de quelques sorties d'eau ponctuelles en pied de versant, les versants de part et d'autre de la RD 19 ne présentent pas non plus de talwegs marqués.

A l'extrémité Nord de la limite communale, les eaux s'accumulent dans un point bas.



Figure 61 : Accumulation des eaux en contrebas de la route

Au Sud, dans le sens descendant vers Rix, les eaux du versant Est sont captées par une cunette en bord de route puis la traverse pour s'écouler à travers les prés avant de plonger vers le Rhône.

A noter une érosion des prés en sortie de buse traversant la route départementale. Elle est due à des fortes vitesses en sortie d'ouvrage.



Figure 62 : Ruissellement dans les près à l'Ouest de la RD19

VI.5.3 Secteur de Rix

Axe Nord

L'axe d'écoulement le plus au Nord (au sud de Rix toutefois) est alimenté par une source sous la route communale menant au chef-lieu. Les eaux s'écoulent dans un talweg encaissé. Cet axe d'écoulement ne menace aucun enjeu mais des débordements sont possibles au niveau d'un passage busé dans un carrefour au cœur du hameau. Ils suivraient alors la route communale avant de rejoindre le lit. En aval des enjeux, les écoulements peuvent se répartir de manière diffuse dans un champ en pente et engendrer d'importantes accumulations d'eau contre la route départementale RD 19 faisant obstacle à l'écoulement. Les eaux franchissent la route au travers d'un passage busé plus au Nord et rejoignent la plaine du Rhône.



Figure 63 : Lit en amont du carrefour inondable



Figure 64 : Lit encaissé à proximité des enjeux (à gauche) - lit à l'aval de la RD 19 (à droite)

Axe Sud

Plus au Sud, un axe d'écoulement collecte les eaux du versant et est busé sous des bâtiments agricoles disposés perpendiculairement à l'axe d'écoulement. L'obstruction de la buse engendrerait un étalement de la lame d'eau autour du bâtiment qui finirait par rejoindre le lit mineur à l'aval.



Figure 65 : Face amont des bâtiments agricoles

VI.5.4 Versant Est entre Millieu et Lhuis

Résurgence sous la RD 41 (route d'Innimond) :

Sous la RD 41 au nord du carrefour avec la RD 79b, deux résurgences d'eau ont été identifiées et peuvent générer un ruissellement marqué dans les champs.

Celle le plus au Sud, la plus proche du carrefour précité, se situe sous un réservoir d'eau qui témoigne également de la présence d'eau souterraine. L'eau ruisselle alors dans les champs et est susceptible de s'accumuler sur une hauteur importante dans le pré en bordure de la RD 79b qui fait office de digue.



Figure 66 : Axe de ruissellement en aval de la route d'Innimond

Un peu plus au nord, une autre sortie d'eau est identifiable dans les prés, également en contrebas de la RD 79b. D'après les renseignements communiqués par la commune, il s'agit en fait d'un trop-plein d'un réservoir communal, situé de l'autre côté de la route, alimenté par une source d'un faible débit pendant les mois d'été. Les traces dans les prés témoignent d'une diffusion rapide du flux dans les prés et les eaux finissent par s'infiltrer. Pour un épisode centennal, en considérant une possible saturation des terrains, le ruissellement pourrait se propager dans une direction SE-NO, sans pour autant menacer d'enjeu habité.



Figure 67 : Résurgence dans les champs sous la RD 79b

Combe au Sud du ruisseau du Ponton

Dans une direction parallèle au ruisseau du Ponton et environ 350 m plus au Sud, une combe est alimentée par une source. Cet axe d'écoulement est identifié sur le scan 25 de l'IGN.

Les écoulements traversent la RD41 au travers d'un dalot de capacité hydraulique limitée et réduite par accumulation de tuf. Des débordements sont possibles et rejoignent rapidement le lit mineur aval. De telles perturbations auraient été enregistrées en janvier 2018. Les écoulements suivent alors une combe bien marquée et raide à l'approche des enjeux.



Figure 68 : Combe au sud du ruisseau de Ponton, partie amont

Une succession de deux passages couverts en amont immédiat des habitations, là où la pente du cours d'eau faiblit, expose particulièrement les habitations en rive droite et leur face amont.



Figure 69 : Combe au sud du ruisseau du Ponton, à proximité des enjeux

Les écoulements transitent ensuite dans un étroit canal entre les habitations, franchissent la route communale à travers un dalot, traversent les prés, franchissent la route départementale et rejoignent le lac de Millieu.

Le dalot sous la route communale a une faible capacité hydraulique et est sujet à engrèvement, notamment lié à l'accumulation de tuf. Des débordements sont très probables pour un événement centennal.

Des débordements sont également probables sur le lit à travers les champs à l'aval, notamment favorisés par la possible formation de petits embâcles (branches et végétaux arrachés sur les berges). Ils s'étalent alors dans les champs mais peuvent engendrer des hauteurs d'eau importantes en amont de la RD 79 b qui fait obstacle à l'écoulement.



Figure 70 : Dalot engravé sous la route communale en 2015 (source de la photo de droite : commune de Lhuis)



Figure 71 : Lit entre les routes communale et départementale

VI.5.5 Secteur Sud de la commune

Le Poulet / Chemin du Creux

Au Sud de la commune, une sortie d'eau existe sur le secteur du lavoir, l'existence de ce dernier n'étant pas anodin.

Les eaux rejoignent une succession de deux étangs et se déversent vers un talweg naturel aval, et rejoignent une large zone humide en amont du Creux puis s'écoulent dans une cunette le long du chemin du Creux avant de rejoindre le ruisseau de la Gorge.

Ces ruissellements ne menacent aucun enjeu habité.



Figure 72 : Etang sous les habitations au hameau Le Poulet (à gauche) - ruissellement sur piste vers la station d'épuration (à droite)



Figure 73 : Débordement possibles sur piste et accumulation sur les terrains adjacents



Figure 74 : Débordements le 23/01/2018 (source : commune de Lhuis)

Chemin en limite Lhuis/Groslée Saint Benoit :

En limite communale avec Groslée Saint Benoit, une piste constitue un axe de ruissellement en concentrant les écoulements de ruissellement issus de l'amont.



Figure 75 : Chemin sud en limite avec Groslée Saint Benoit

VI.5.6 Deux axes de concentrations particuliers en zone urbaine

Chemin au hameau de Saint Martin

Au hameau de Saint Martin, lors de fortes précipitations, un chemin piéton établi dans un axe naturel d'écoulement (dans le sens de la pente et en point bas) permet une concentration importante des eaux ruisselées. L'érosion du chemin est également susceptible d'apporter des matériaux solides.

Au débouché dans le hameau, les eaux suivent la route communale dans le sens descendant (vers le Nord) et se répartissent entre le réseau pluvial (captage par des grilles), un réservoir au droit de la maison de retraite et une diffusion progressive sur voirie et terrains adjacents. La problématique de ruissellement devient alors celle de la gestion des eaux pluviales.



Figure 76 : Traces d'un ruissellement récent au début du chemin et voirie suivi par les écoulements



Figure 77 : Ruissellement enregistré le 22-23 janvier 2018 (source : commune de Lhuis)

Amont grande propriété Lhuis

Au droit d'une grande propriété dans le bourg de Lhuis, une sortie d'eau vient alimenter un petit étang. En cas de fortes précipitations, le trop plein peut raviner la piste privée et s'étaler en aval. Pour un épisode centennal, les eaux de ruissellement pourraient rejoindre la voirie par un portail en contrebas. La gestion de ces écoulements résiduels relèverait alors de la gestion des eaux pluviales.



Figure 78 : Sortie d'eau et traces de ravinement sur la piste (à gauche) - écoulement possible vers la voie publique (à droite)

VI.5.7 Lacs de Millieu et marais du Verney

Le lac du Millieu et le marais du Verney constituent de larges zones humides et donc larges zones d'accumulation des eaux.

D'après le plan de gestion du lac de Milieu, « il y a plusieurs décennies, ce secteur était exploité par ses propriétaires, autrefois agriculteurs, comme pêcherie. [...] Ces anciens usages sont aujourd'hui tombés en désuétude. » Plus tôt, « au moyen Age, le lac de Milieu avait un usage principalement industriel : l'eau servait à alimenter les moulins du village [...]. Cette exploitation fut rendue possible par la création d'un exutoire au sud ouest du lac. A cette époque, le lac fut probablement péché ».

Le marais du Verney et le lac de Millieu sont aujourd'hui déconnectés, séparés par un chemin faisant office de digue. La déconnexion aurait été réalisée au Moyen Age.

En l'état actuel, le marais du Verney au nord alimente le ruisseau de la Brive, tandis que le lac du Millieu alimente le ruisseau du Moulin.

Ces deux zones humides sont traitées en aléa ruissellement en considérant une importante accumulation possible d'eau.



Figure 79 : Lac de Millieu

VI.5.8 Zones d'accumulation dans des champs entre le sud du chef-lieu et la station d'épuration

Entre le sud du chef-lieu et la station d'épuration, en bordure de route départementale, des résurgences entraînent, selon la topographie, des accumulations d'eau sur de vaste surface ou une concentration de ruissellement à la faveur de chenaux plus marqués.

En amont, aucun axe d'écoulement concentré n'a été identifié. Ce secteur est alimenté par de multiples résurgences. D'après le témoignage d'un riverain, ce secteur serait appelé « le secteur des puits », ce qui indique clairement des résurgences connues et avérées.

Les eaux accumulées finissent pas s'infiltrer. Le débouché « topographique » serait le secteur des Charmieux, où aucun axe d'écoulement concentré n'a non plus été identifié : cf. paragraphe VI.5.9.



Figure 80 : Ruissellements observés en aval du chef-lieu de Lhuis

VI.5.9 Cas non cartographiés

Ruissellement diffus et forte infiltration

Sur le secteur du Charmieux au nord du Mont Lovat, de vastes prèes s'établissent sur un relief vallonné. Pour autant aucun axe de ruissellement marqué n'apparaît au niveau des points bas et cette importante surface de réception n'est reliée à aucun véritable cours d'eau en aval.

L'infiltration sur ces terrains est vraisemblablement importante et les ruissellements restent globalement diffus.



Figure 81 : Absence d'axe de ruissellement marqué dans les prèes sur le secteur Le Charmieux

Gestion des eaux pluviales

D'autres problèmes de ruissellements sont indiqués dans la cartographie communale de suivi des problèmes hydrauliques sur le territoire communal, notamment au niveau du bourg de Lhuis vers la rue de l'Ecole, de Saint Martin et d'Ansolin.

Ces trois secteurs urbanisés sont situés en pied de versant. Bien que le prétraitement semblait indiquer des axes de ruissellement, aucun talweg ne s'est avéré marqué en amont des enjeux (à l'exception du chemin au hameau de Saint Martin : cf. paragraphe VI.5.6).

Sur le versant, l'infiltration est importante. Néanmoins, en cas de fortes précipitations, le ruissellement, bien que diffus en amont, rejoint les hameaux et s'écoule à la faveur de la microtopographie (maisons, voirie,...). Cette problématique de ruissellement relève alors de la gestion anthropique des eaux pluviales. En matière d'aléa naturel, le niveau d'aléa serait inférieur à faible (très faible : lame d'eau de quelques centimètres maximums), pour lequel les règles de l'art en matière de construction doivent faire face par principe minimal de précaution.



Figure 82 : Ruissellement sur voirie : route de l'école vers le bourg (à gauche) – à Saint Martin (à droite) [source : commune de Lhuis]



Figure 83 : Obstruction d'une grille à Ansolin (source : commune de Lhuis)

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 |

| | | |
|--------|----|---|
| | | <ul style="list-style-type: none"> - 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 16 : 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 :

- **Combe au Sud de Ponton** : les écoulements sont canalisés entre les bâtiments et des risques de débordements en amont immédiat, notamment au niveau de deux ouvrages de franchissement étroits, exposent les bâtiments à un aléa fort.
- **Hameau de Rix – axe Sud** : un axe d'écoulement est busé sous un bâtiment agricole qui lui est transversal. La face amont est exposée à un aléa fort en cas d'obstruction de la buse. Les débordements contournent alors le bâtiment selon un aléa diminuant jusqu'à l'aléa faible au grès de la diffusion des écoulements.

En dehors de tout enjeu habité, certains secteurs sont classés en aléa moyen ou fort car susceptibles d'accumuler des hauteurs non négligeables d'eau à la faveur de point bas topographique ou de routes faisant obstacle à l'écoulement digue.

Enfin, certains débordements sur les voiries ne présentent pas d'exutoire. L'aléa faible a été arrêté à partir du moment où la diffusion des écoulements était estimée suffisante pour que le ruissellement relève de la gestion anthropiques des eaux pluviales.

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-consideration 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 |
|---|-------------------|--------------------------|--|--------------------------|----------|
| Ruisseau du Ponton | Crue torrentielle | Il y a plus de 40-50 ans | Débordement et inondation des propriétés en rive gauche le long de la route communale rejoignant la RD 79. Les débordements étaient également fréquents au niveau du carrefour de la RD 79. La traversée a fait l'objet de travaux de recalibrage. | Témoignage d'un riverain | 1 |
| Affluent du Pisserot | Crue torrentielle | 13/02/1990 | Débordements : <ul style="list-style-type: none"> sur le chemin communal à la cote 450 (aucun évènement depuis) au droit de la RD79 : les débordements ont suivi la route et atteint une habitation 200 m plus bas. (aucun évènement depuis, mais en limite de débordement début 2018) | Commune | 2 |
| Creux du Nant – route communale cote 390 | Crue torrentielle | 13/02/1990 | Débordement au droit du passage de la route communale à la cote 390. Les débordements ont suivi la route et inondé une propriété 300 m plus bas. | Commune | 3 |
| Secteur La Plaine, cote 300 | Crue torrentielle | 13/02/1990 | Le ruisseau a débordé dans les prés vers la cote 300. Les débordements ont suivi la route départementale et ont rejoint un lit qui serait le très ancien tracé du cours d'eau. | Commune | 4 |
| Creux du Nant – chemin du ruisseau à Saint Martin | Crue torrentielle | 30/03/2015 | Débordement au droit du passage busé du ruisseau cote 430 | Commune | 5 |
| Millieu – combe au Sud du ruisseau du Ponton | Ruissellement | 30/03/2015 | Débordements au niveau du dalot à l'aval des maisons | Commune | 6 |
| Chemin du Creux (sud de la commune) | Ruissellement | 30/03/2015 | Débordement dans les champs et sur les pistes vers la cote 480 | Commune | 7 |
| Affluent du Pisserot | Crue torrentielle | 30/03/2015 | Débordement du Pisserot au 582 route d'Innimond | Commune | 8 |
| Ruisseau du Moulin | Crue torrentielle | 30/03/2015 | Ecluse remplie de matériaux | Commune | 9 |
| Ruisseau de la Gorge | Crue torrentielle | 30/03/2015 | route départementale et station d'épuration Débordement en amont des lagunages | Commune | 10 |

| | | | | | |
|---|-------------------|------------------------------|---|-----------------------|----|
| Ruisseau de la Gorge | Crue torrentielle | 30/03/2015 | La Plaine Débordement vers les prés en rive gauche suite à la rupture du mur du canal. | Commune | 11 |
| 11Ruisseau du Ponton | Crue torrentielle | Fréquent, dont le 30/03/2015 | Débordement fréquents dans les champs et sur les pistes vers la cote 480. | Commune | 12 |
| Champs en bordure du ruisseau Moulin | Crue torrentielle | 31 décembre 2017 | « Deux jours de pluies discontinues ont fait disparaître le lit naturel et créer une mare dans les champs alentours. Du sable charrié par le mouvement s'épand en épaisseur sur les bords | Site web (Le Progrès) | 13 |
| Chemin du Creux (sud de la commune) | Ruissellement | 23/01/2018 | Débordement dans les champs et sur les pistes vers la cote 480 | Commune | 14 |
| Millieu – combe au Sud du ruisseau du Ponton | Ruissellement | Janvier 2018 | Débordements au droit de la RD 41 | Commune | 15 |
| Millieu – chemin sur le secteur des Merlières | Glissement | Début 2018 | Glissement du chemin | Commune | 16 |
| Moulin – ruisseau principal (secteur Naray) | Crue torrentielle | fréquent | Débordements fréquents sur le chemin le traversant vers la cote 355 m. | Commune | 17 |
| Limite nord de la commune au-dessus de la RD 79 | Chute de blocs | - | Des blocs de plus d'une tonne sont calés par des arbres en forêt. Il s'agit d'une zone de protection définie dans l'aménagement forestier. | Commune | 18 |
| Limite sud de la commune – au-dessus du hameau Le Poulet | Chute de blocs | - | Existence d'un pierrier de petite blocométrie, mais absence d'historique connu ayant atteint les enjeux à l'aval | Commune | 19 |
| Hameau de Rix, côté Sud | Chute de blocs | - | Des affleurements rocheux seraient friables en amont des fermes au sud du hameau de Rix – pas d'historique connu. | Commune | 20 |
| Hameau de Rix, au-dessus des vignes | Chute de blocs | - | Des blocs se retrouvent dans la pente. | Commune | 21 |
| Versant rive gauche du ruisseau du Ponton – Secteur Le Foyand | Glissement | - | Existence de zones mouilleuses | Commune | 22 |
| Bassin versant du Creux du Nant – Saint Martin | Glissement | - | Terrains sensibles, notamment la berge rive gauche du torrent | Commune | 23 |

Tableau 17 : 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).

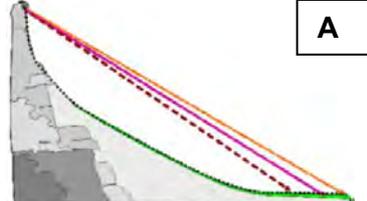
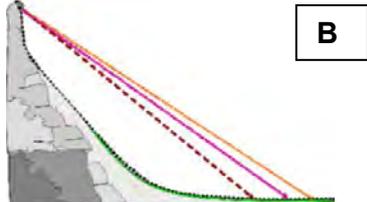
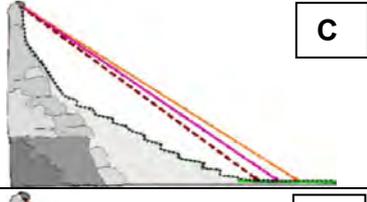
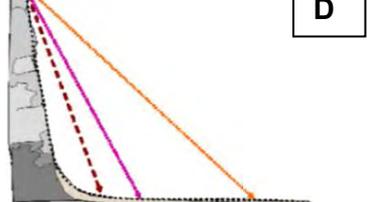
a) Intensité

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 |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------------|
| | | $V \leq 0,25 \text{ m}^3$ | $0,25 < V \leq 1 \text{ m}^3$ | $1 < V \leq 10 \text{ m}^3$ | $V > 10 \text{ m}^3$ | |
| Probabilité d'occurrence | Faible | Faible (P1) | Moyen (P2) | Fort (P3) | Fort (P3) | Très fort (P3) |
| | Modérée | Faible (P1) | Moyen (P2) | Fort (P3) | Fort (P3) | Très fort (P3) |
| | Elevée | Moyen (P2) | Fort (P3) | Fort (P3) | Très fort (P3) | Très fort (P3) |
| | Très élevée | Fort (P3) | Fort (P3) | Très fort (P3) | Très fort (P3) | Très fort (P3) |

VIII.2 Annexe 2 : Description du modèle Rockyfor3D

Outils

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

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

Forme du bloc

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

Chute libre parabolique

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

Rebond sur la surface de la pente

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

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

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

Les constantes utilisées sont :

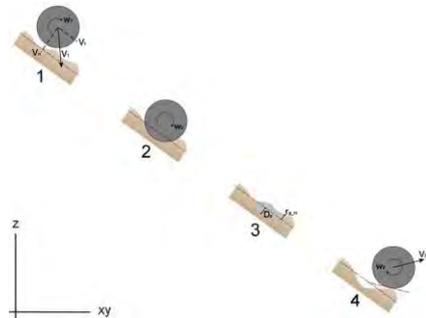
- $k = 1.207$ (constante représentant la forme sphérique du bloc)
- $B = 1.2$ (paramètre de compressibilité du matériau touché ; varie peu pour les différents matériaux)

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

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

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

où,



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

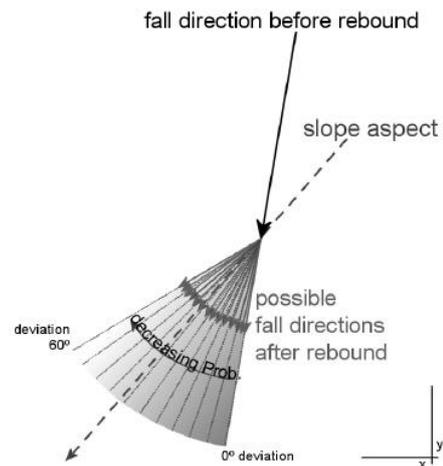
Tout comme dans Pfeiffer et Bowen (1989), l'angle de la pente sur le lieu du rebond est uniformément diminué de façon aléatoire lors de chaque rebond. Cependant, la réduction maximale de l'angle de pente est fixée à 4°. Le roulement est représenté par une séquence de rebonds sur une faible distance,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

Calcul de la direction de chute

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

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

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



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

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

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

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

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

Paramètres de sols

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

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

| 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)