



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



Commune de Brégnier-Cordon

## Etude et cartographie des aléas - Rapport technique -

**Cliché page de garde :**  
*Panorama Brégnier depuis le Mont de Cordon*

**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](mailto:rtm.chambery@onf.fr)

| <b>Date du dernier enregistrement</b> | <b>Désignation du document</b>  | <b>Numéro de devis</b> | <b>Nombre de pages</b> |
|---------------------------------------|---|------------------------|------------------------|
| 14/06/2018                            | <i>Rapport technique - Etude et cartographie des aléas – commune de Brégnier-Cordon</i> | D07-37                 | 72                     |

|                       | <b>Nom Prénom</b> | <b>Fonction</b>        |
|-----------------------|-------------------|------------------------|
| <b>Auteurs</b>        | Pierre Dupire     | Ingénieur géologue     |
|                       | David Etcheverry  | Ingénieur hydraulicien |
| <b>Relu et validé</b> | David Binet       | Chef du service RTM73  |

**Suivi des versions :**

| <b>Version</b> | <b>Date</b> | <b>Observations</b>  |
|----------------|-------------|----------------------|
| V0             | 22/05/2018  | Consultation commune |
| V1             | 14/05/2018  | Version restitution  |
|                |             |                      |
|                |             |                      |

## Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| <b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....                                       | <b>3</b>  |
| <b>I PREAMBULE</b> .....  | <b>4</b>  |
| I.1 Objet.....  | 4         |
| I.2 Méthodologie .....  | 4         |
| <b>II CONTEXTE PHYSIQUE DE LA COMMUNE</b> .....                       | <b>5</b>  |
| II.1 Contexte topographique et morphologique.....                     | 5         |
| II.2 Contexte géologique.....   | 6         |
| II.3 Contextes hydrographique, hydrologique et hydrogéologique .....  | 7         |
| II.4 Conséquences sur les risques naturels.....                       | 7         |
| <b>III ALEAS CHUTES DE BLOCS</b> .....                                | <b>9</b>  |
| III.1 Définition.....   | 9         |
| III.2 Historique et données disponibles.....                          | 9         |
| III.3 Traitements préalables .....                                    | 9         |
| III.4 Observations de terrain .....                                   | 11        |
| III.5 Ouvrages de protection .....                                    | 16        |
| III.6 Modélisations trajectographiques .....                          | 18        |
| III.7 Qualification de l'aléa .....                                   | 20        |
| <b>IV ALEAS GLISSEMENT DE TERRAIN</b> .....                           | <b>23</b> |
| IV.1 Définition.....  | 23        |
| IV.2 Historique et données disponibles.....                           | 23        |
| IV.3 Traitements préalables .....                                     | 23        |
| IV.4 Observations de terrain .....                                    | 24        |
| IV.5 Qualification de l'aléa .....                                    | 26        |
| <b>V ALEAS CRUES TORRENTIELLES</b> .....                              | <b>28</b> |
| V.1 Définition.....   | 28        |
| V.2 Historique et données disponibles.....                            | 28        |
| V.3 Description illustrée du ruisseau – observations de terrains..... | 28        |
| V.4 Analyse hydrologique .....  | 32        |
| V.5 Modélisation hydraulique.....                                     | 37        |
| V.6 Qualification de l'aléa .....                                     | 45        |
| <b>VI ALEAS DE RUISSELLEMENT</b> .....                                | <b>50</b> |
| VI.1 Définition.....  | 50        |
| VI.2 Méthodologie appliquée .....                                     | 50        |
| VI.3 Historique et données disponibles.....                           | 50        |
| VI.4 Traitements préalables .....                                     | 51        |
| VI.5 Observations de terrain .....                                    | 52        |
| VI.6 Qualification de l'aléa .....                                    | 60        |
| <b>VII SYNTHÈSE DES ÉVÉNEMENTS HISTORIQUES</b> .....                  | <b>62</b> |
| <b>VIII ANNEXES</b> .....   | <b>64</b> |
| VIII.1 Annexe 1 : Méthode MEZAP .....                                 | 64        |
| VIII.2 Annexe 2 : Description du modèle Rockyfor3D .....              | 66        |
| VIII.3 Annexe 3 : description du logiciel HEC-RAS.....                | 70        |

# 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).

Dans le cadre de la révision du 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 15 février 2018 en mairie de Brégnier-Cordon en présence d'Ugo TAMBELLINI (premier adjoint), Isabelle RICHARD (Adjoint), Sergio ARANDA (maire) et Pierre DUPIRE (ONF-RTM). Par ailleurs, le technicien forestier local, Jean-Michel MERIAUX a été consulté pour sa connaissance du territoire.

- 2) Traitements préalables sur SIG : ils permettent d'orienter l'expert dans son zonage en démontrant des susceptibilités aux phénomènes.
- 3) Observations de terrain : décrites et illustrées dans ce rapport, elles apportent une expertise complémentaire par approche dite « géomorphologique ». Le travail de terrain consiste à repérer des indices, voire des traces de phénomènes, dans le but d'identifier des terrains disposant de prédispositions à la survenance des aléas étudiés. Ce travail permet d'argumenter sur le choix des scénarios de références.
- 4) Modélisation numérique des phénomènes : l'analyse géomorphologique présentée au point précédent reste relativement empirique. Le recours à la modélisation (simulation numériques des phénomènes) apporte des éléments quantitatifs complémentaires par approche scientifique. Le présent rapport aborde les différentes étapes de construction des modèles et l'analyse critique des résultats.
- 5) Application des grilles de qualification des aléas par type de phénomène : ces grilles sont détaillées dans le présent rapport.

## II Contexte physique de la commune

### II.1 Contexte topographique et morphologique

La commune de Brégnier-Cordon s'étend sur 11,6 km<sup>2</sup>. Le territoire s'étage entre 203 m au niveau du Rhône et 460 m en amont de Glandieu sur la Montagne de Brégnier.

Il est délimité à l'Ouest et au Sud par le Rhône, et à l'Est par les reliefs. La commune est divisée en deux par le canal du Rhône : la partie Nord rassemblant les secteurs de Brégnier, Glandieu ainsi que la Bruyère et la partie Sud formant « l'île » de Cordon.

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

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

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

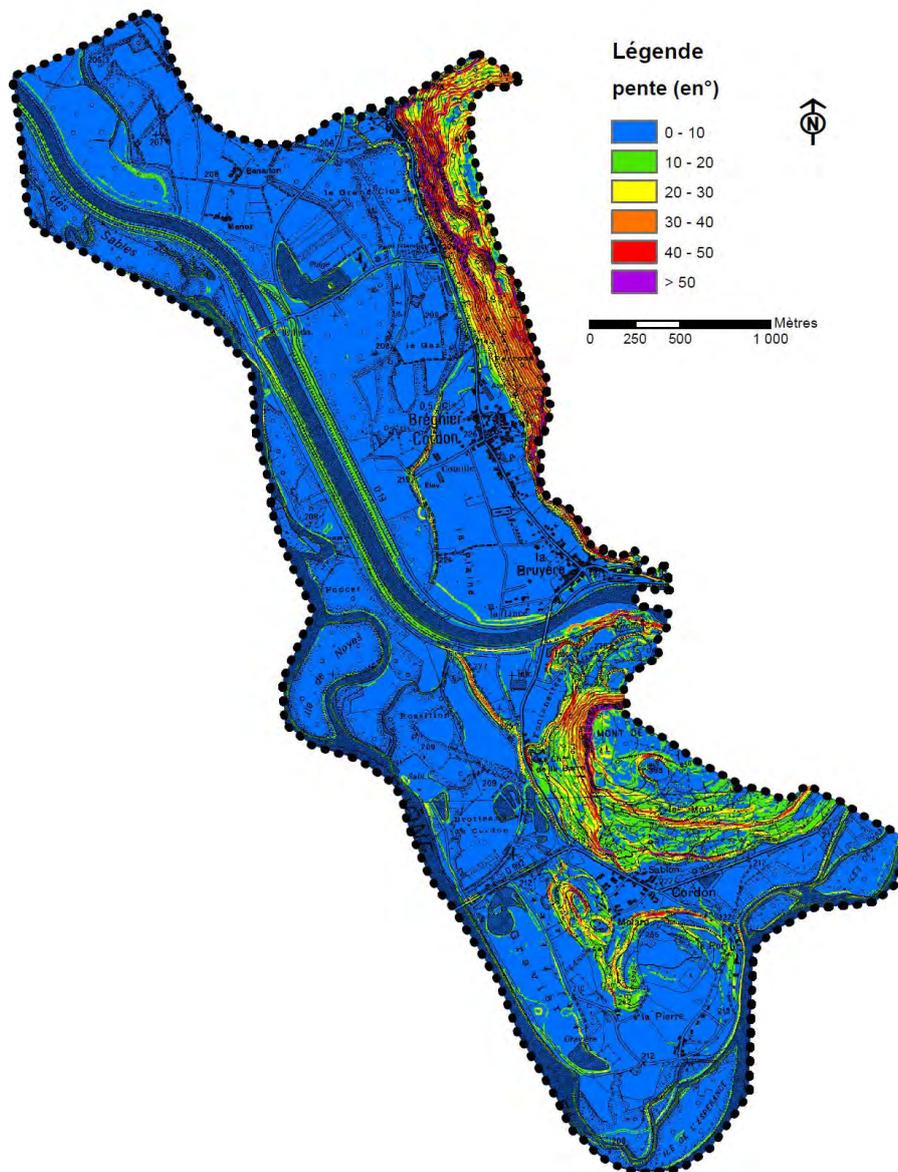


Figure 1 : carte des pentes

## II.2 Contexte géologique

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

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

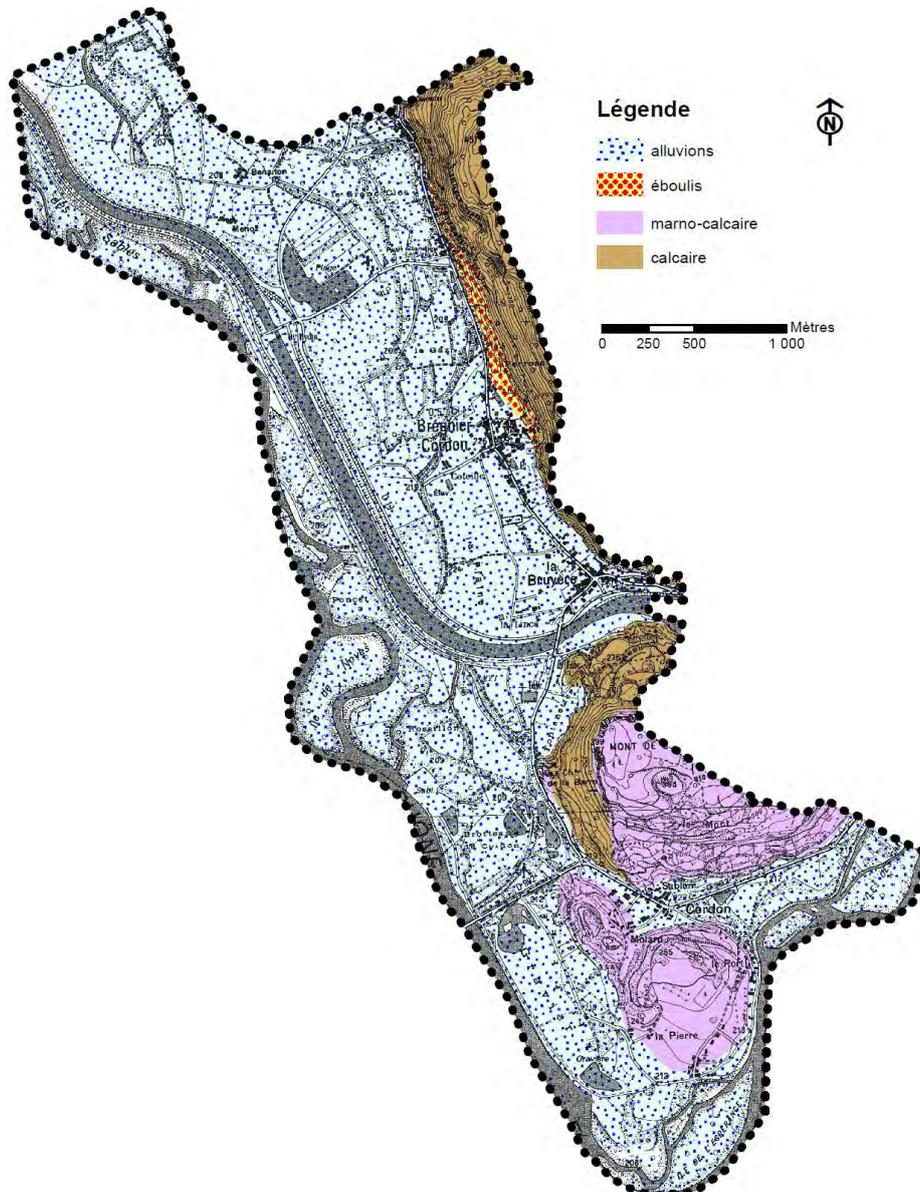
Les barres rocheuses dominant la totalité du territoire communal sont constituées de formations secondaires d'origine sédimentaire et datées du Jurassique moyen.

La falaise de la montagne de Brégnier est entièrement constituée de calcaires compact du kimméridgien.

Le Mont de Cordon est composé de calcaires plus gréseux voir graveleux du Berriasien. Sur sa face Nord-Ouest, se retrouvent des falaises du Portlandien à calcaires fins.

Les pieds de versant sont tapissés d'éboulis.

La plaine du Rhône est composée d'alluvions d'origine fluviatile post-würmiennes et récentes. Ces formations sont composées d'éléments caractérisés par une granulométrie particulièrement étendue. Notons que l'on distingue dans ces zones d'anciens méandres du Rhône.



## II.3 Contextes hydrographique, hydrologique et hydrogéologique

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

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

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

Plusieurs axes de ruissellement sont connus dans les talwegs des reliefs de la commune. Ceux-ci peuvent être reliés au Rhône ou au Gland, dans des fossés, ou simplement infiltrés à leur débouché.

Des fossés drainent la plaine du Rhône en recueillant les eaux pluviales et les eaux des réseaux karstiques. Ils s'écoulent lentement dans les anciens méandres du Rhône, traversant des zones marécageuses.

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

Le secteur d'étude est connu pour sa particularité karstique qui engendre inévitablement des écoulements souterrains difficiles à appréhender en l'absence d'investigations spécifiques. Des exutoires sont notamment connus au hameau de Glandieu. Les débits peuvent être significatifs (quelques dizaines de litres d'eau par minute).

## II.4 Conséquences 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 sont généralement très frottantes et leur mode de dépôt les placent toujours en deçà de leur pente d'équilibre naturelle. Les glissements de terrain naturels sont possibles mais peu probables, par contre, leur pente souvent forte les expose à des déclenchements anthropiques ;
- Les barres de calcaires connaissent pas ou peu de glissement sauf lorsqu'ils affectent la couche de colluvions généralement peu épaisse recouvrant localement le substratum calcaire.

### II.4.2 Concernant les chutes de blocs

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

La structure du massif rocheux, la présence de plusieurs plans de discontinuités et leurs orientations constituent des paramètres prépondérants de prédisposition naturelle aux

instabilités. Le phénomène de gélifraction représente le principal facteur d'évolution des séries calcaires constituant les falaises. En effet, dans une région caractérisée par des saisons hivernales relativement vigoureuses, l'alternance des cycles gel/dégel se développant dans les fissures de la roche, contribue fortement à l'érosion du massif par fragmentation. Ce phénomène, renforcé par les pressions hydrostatiques (dus à la pluviométrie) qui se développent au contact des surfaces de discontinuité, conduit à une évolution relativement lente des falaises. Indépendamment de cette vitesse, ce processus d'altération est cependant inexorable. Il se traduit progressivement par le découpage d'écaillés 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 prépondérants seront liés 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 cubes 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 :

- ANTEA, 1995, Examen des menaces de chutes de rochers sur le hameau de Glandieu.
- ANTEA, 1995, Définition des travaux de protection prioritaires contre les chutes de rocher.
- ANTEA, 2001, Actualisation des menaces de chutes de masses rocheuses au droit de la propriété Trichard.
- ANTEA, 2013, Actualisation du diagnostic des menaces de chutes de blocs rocheux au droit de Glandieu.
- ANTEA, 2015, Mission G2 PRO de Mise en place de protections complémentaires contre les chutes de blocs rocheux – Glandieu.
- ANTEA, 2017, Inspection des écrans pare-blocs au lieu-dit de Glandieu
- DDE-SFRM, 1998, Plan de Prévention des Risques Naturels.
- Commune de Brégnier-Cordon. Réunion de travail du 15/02/2018.

##### Evènements historiques :

| Secteur                          | Date          | Observation(s)   | Source(s)        |
|----------------------------------|---------------|--|------------------|
| Entre Glandieu et Petit Glandieu | 1946          | Des blocs d'un volume important ont atteint la route en pied de versant        | PPR 1998 Commune |
| Entre Glandieu et Petit Glandieu | 1954          | Des blocs d'un volume important ont atteint la route en pied de versant        | PPR 1998 Commune |
| Glandieu                         | 2008 - 2009   | Un gros bloc s'est décroché dans la cascade                                    | Commune          |
| Face Nord du Mont Cordon         | 2008          | Un éboulement donnant de gros blocs s'est produit.                             | Commune          |
| Petit Glandieu                   | 2013          | Un bloc d'environ 1 m <sup>3</sup> s'est décroché et a roulé jusqu'aux maisons | Commune          |
| Entre Glandieu et Petit Glandieu | 2015          | Un bloc d'environ 1 m <sup>3</sup> s'est décroché et a atteint la route        | Commune          |
| Château de la Barre              | régulièrement | Chutes de pierres sur la RD 19   | Commune          |
| La Bruyère                       | régulièrement | Un éboulis actif (donc alimenté) est connu sur le versant derrière la Poste    | Commune          |
| Etang station épuration          | régulièrement | Un éboulis actif (donc alimenté) est connu                                     | Commune          |

Tableau 1: historique des phénomènes de chutes de blocs

#### III.3 Traitements préalables

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

Un premier traitement a donc consisté à mettre en avant les portions de versants disposant de telles pentes (cf. carte ci-contre). Ces secteurs sont potentiellement des zones de départ

de blocs qui peuvent être masqués par la végétation par exemple. Ce travail permet, en outre, de localiser des petits affleurements masqués par la végétation qui auraient pu ne pas être aperçus en phase de reconnaissance de terrain.

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

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

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

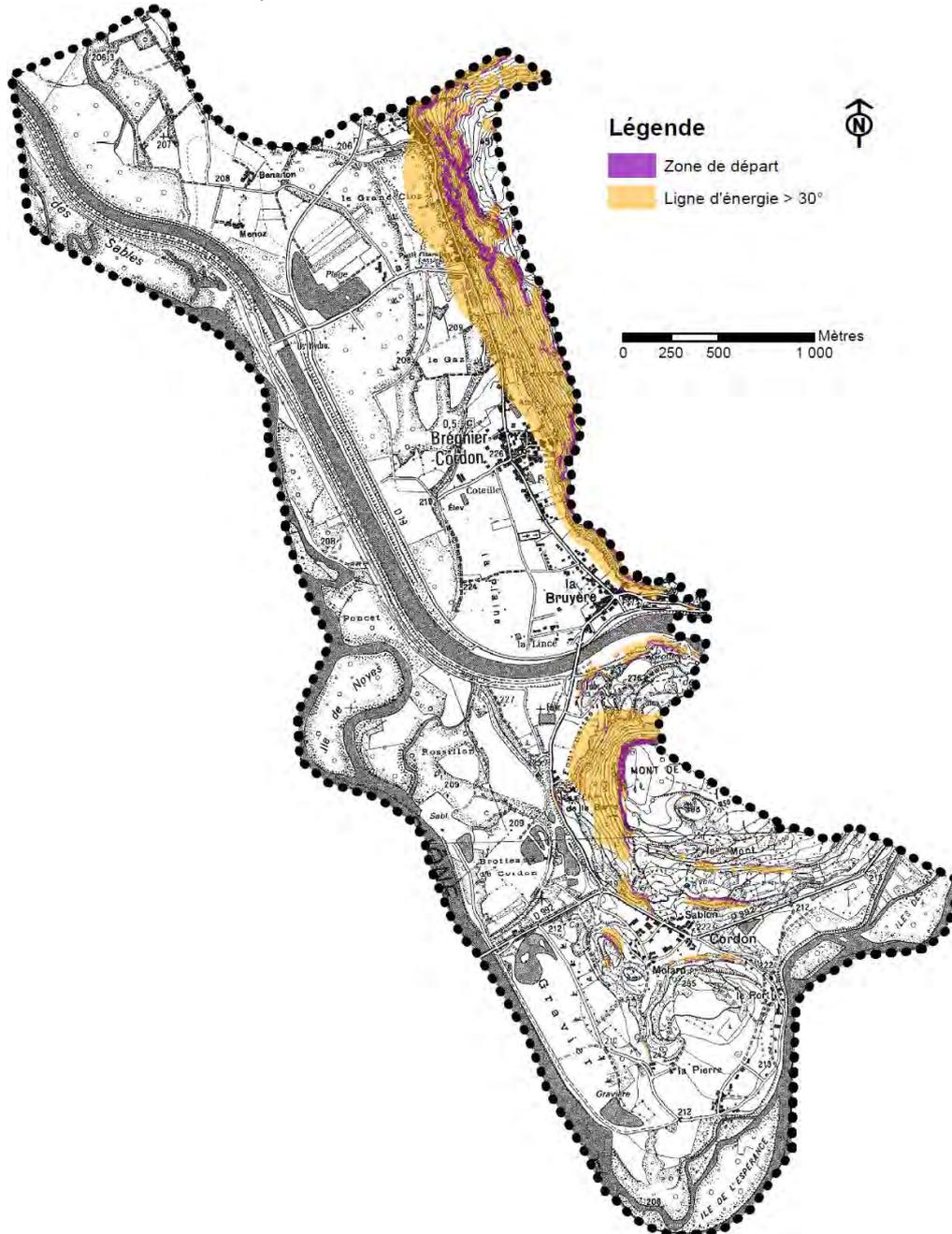


Figure 3 : Carte des zones d'atteintes potentielles de chutes de blocs

La présente carte montre plusieurs enjeux urbanisés pouvant être affectés par les chutes de blocs. Il sera par conséquent réalisé une modélisation trajectographique au droit des principaux enjeux.

### III.4 Observations de terrain

*Remarque : les observations de terrain ont été réalisées depuis le pied de falaise ou à distance, sans reconnaissances en techniques alpines, non prévues au marché. De fait les observations ne peuvent pas se garantir d'exhaustives.*

#### III.4.1 2.2.1 Aperçu structural

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

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

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

#### III.4.2 Secteur de Glandieu

*Remarque : ce secteur a fait l'objet de plusieurs études détaillées d'Antea. Les observations suivantes ont donc vocation à présenter le contexte et définir un scénario de référence plutôt qu'une analyse exhaustive des instabilités. Pour une description plus fine, il conviendra de se reporter aux études précitées.*

Ce secteur à la morphologie très particulière est formé de quatre niveaux de falaise successifs de hauteur variable (entre 10 et 30 m) précédés ou entrecoupés de talus inclinés entre 25° et 40° pour une dénivelée totale d'environ 160 m et une pente intégratrice supérieure à 40°.

La présence de la végétation très dense et la succession de vires interdisent l'accès aux falaises supérieures. Depuis les observations à distance, celles-ci semblent assez saines dans leur globalité bien que l'on distingue en première approche, ponctuellement, des masses de plusieurs dizaines de m<sup>3</sup> pouvant se décrocher à moyen terme. Ces compartiments étant relativement fragmentés, les volumes unitaires après fragmentation ne devraient pas excéder 5m<sup>3</sup>.



Figure 4 : Exemples de masses de plusieurs dizaines de m<sup>3</sup>

En ce qui concerne les falaises inférieures, celles-ci sont en partie accessibles mais la végétation très dense a rendu les accès et les repérages difficiles. La falaise est ici moins compacte et plus litée donnant lieu à une multitude de masses instables de volume plus modéré (< 1 m<sup>3</sup>).



Figure 5 : exemple de masse de  $0,5\text{m}^3$  en surplomb

### III.4.3 Secteur de Petit Glandieu

*Remarque : ce secteur a fait l'objet de plusieurs études détaillées d'Antea. Les observations suivantes ont donc vocation à présenter le contexte et définir un scénario de référence plutôt qu'une analyse exhaustive des instabilités. Pour une description plus fine, il conviendra de se reporter aux études précitées.*

Ce secteur présente la morphologie suivante :

- un talus de pied fortement boisé penté à  $35/40^\circ$  (hauteur = 40m) ;
- une grande falaise de 60 m de haut dominant ce talus.

A noter la présence d'une petite vire rocheuse de 5 m de large en pied de falaise.



Figure 6 : vue d'ensemble de la falaise dominant Petit-Glandieu

Les observations à distance n'ont pas permis de voir les instabilités de manière exhaustive. Toutefois plusieurs instabilités entre 1 et  $5\text{m}^3$  pouvant se décrocher à court terme sont observables et donnent d'ores et déjà une idée des masses mobilisables sur le reste de la falaise.



Figure 7 : Pilier de 3 à 5 m<sup>3</sup> à gauche, écaille de 1 à 2 m<sup>3</sup> à droite

Sur la partie Nord du lieu-dit Petit Glandieu se distingue une cicatrice fraîche d'éboulement d'un volume total de 5 m<sup>3</sup> avec des blocs unitaires de quelques centaines de litres. Plusieurs masses de cette blocométrie peuvent se remobiliser directement aux abords dans un court délai.

Les blocs en question sont visibles sur le versant en aval jusqu'en bordure de route. Signalons également la présence d'un bloc de 2 m<sup>3</sup> dans le jardin d'une propriété. Celui-ci est ancien d'après l'habitant (mais probablement d'ordre centennal).



Figure 8 : Cicatrice fraîche à gauche, blocs éboulés à droite



Figure 9 : bloc d'environ 2 m<sup>3</sup> éboulé (relativement ancien)

### III.4.4 Secteur Chef-lieu

En amont du chef-lieu, les parois rocheuses sont moins marquées, voire même discontinues. Elles se distinguent surtout en partie sommitale du versant sur une trentaine de mètres de hauteur.

Le Nord du chef-lieu est dominé par une barre (dénommée Perroset sur la carte IGN) très verticale. Celle-ci se compose de bancs calcaires massifs pouvant atteindre 2 m d'épaisseur, néanmoins la roche s'altère en surface donnant lieu à des chutes de pierres assez récurrentes (patine jaunâtre de la falaise témoignant d'une érosion récente) qui finissent par sous-caver l'ensemble et créer donc des surplombs. Ces derniers, estimés à 5m<sup>3</sup> pour les plus gros, peuvent rompre à moyen terme.

Le versant en aval présente une pente de moyenne de 35° permettant à des blocs de se propager jusqu'aux enjeux habités. Notons que ce versant est colonisé par une végétation arbustive dense. Celle-ci joue un rôle incontestable pour retenir des petites pierres, mais n'a aucune influence pour des blocs supérieurs à 1m<sup>3</sup>.



Figure 10 : Barre rocheuse de Perroset au droit de la partie Nord du chef-lieu

Plus au Sud, au droit de l'église, et des terrains de sport, la barre rocheuse disparaît au profit d'affleurements moins massifs et bien moins verticaux. Ceux-ci sont plus friables mais la blocométrie est bien inférieure (entre 0,25 et 1 m<sup>3</sup>). L'affleurement est globalement assez peu actif, seule une cicatrice d'éboulement relativement récent se distingue, les blocs issus de cet événement n'ont pas atteint le pied de versant.



Figure 11 : Affleurements au droit du bourg

### III.4.5 Secteur « entre le chef-lieu et La Bruyère »

Sur cette zone qui s'étend sur un linéaire de 500 m, la falaise est assez irrégulière et présente ici une morphologie typique des parois façonnées par la déglaciation. Il en résulte des affleurements « arrondis » mais ceux-ci étant relativement compacts, ils ont été assez peu fracturés par la décompression au retrait glaciaire.

En revanche, on distingue en surface des patines claires-jaunâtres, qui témoignent d'une certaine altération due notamment à des phénomènes de gélifraction.

Il en demeure des chutes de pierres de volume généralement inférieur à  $0,25 \text{ m}^3$ . L'absence de blocs éboulés en pied de versant témoigne d'une activité peu élevée. Par ailleurs, le profil topographique est propice à des propagations peu étendue (correspondance à un profil type B de la méthode Mezap, cf. annexe1).

Toutefois, certaines habitations se sont implantées très près du versant ; ces dernières peuvent être affectées.



Figure 12 : Affleurements avec patine jaunâtre témoignant d'érosion et habitations proches du versant

### III.4.6 Secteur Mont de Cordon

Le massif forme une butte-témoin quasi-circulaire avec une barre rocheuse qui couronne l'ensemble sur la face Nord-Ouest. Cette paroi se compose d'une falaise sommitale haute de 50 m environ et une falaise inférieure d'une trentaine de mètres. Les deux sont entrecoupées par une vire d'une dizaine de mètres de largeur.

La roche présente une alternance de bancs massifs calcaires et de strates plus marneuses moins compactes. Il en résulte des surplombs qui peuvent donner lieu à des éboulements de volume pouvant atteindre jusqu'à  $10 \text{ m}^3$ . Les affleurements sont par ailleurs relativement fracturés (vraisemblablement du fait de la décompression au retrait glaciaire).

Le versant dispose d'un couvert forestier assez dense qui retient l'essentiel des matériaux éboulés (les pierres et petits blocs). En revanche cette végétation est bien insuffisante pour le scénario de référence (blocs entre 1 et 10 m<sup>3</sup>). L'événement de 2008 corrobore cette affirmation.



Figure 13 : falaise du Mont de Cordon

### III.5 Ouvrages de protection

Il existe plusieurs ouvrages de type écrans de filets pare-blocs sur le secteur de Glandieu et Petit-Glandieu.

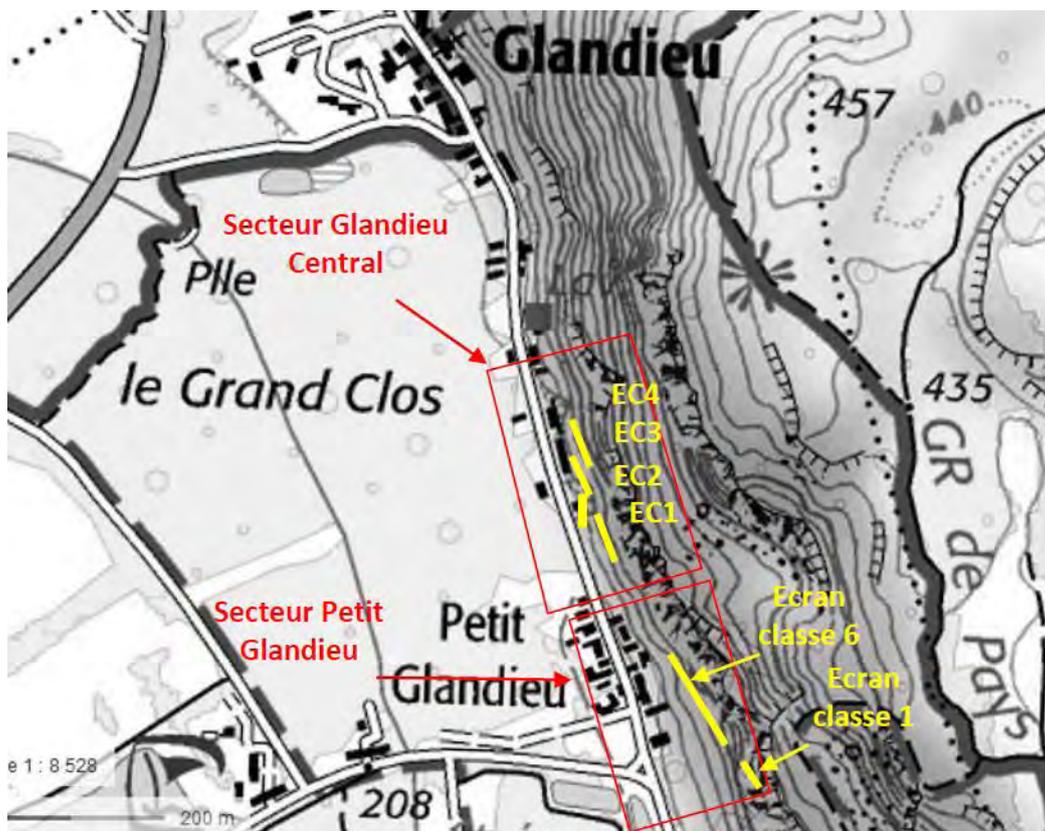


Figure 14 : localisation des filets (source : Antea)

Une campagne récente d'inspection des ouvrages a été réalisée par Antea. Celle-ci a mis en exergue quelques pathologies notoires remettant en question l'efficacité des ouvrages. Le tableau suivant synthétise ces observations et donne une estimation de l'efficacité.

| Désignation (cf figure ci- avant) | Classe selon NF P 95-308 | Date de pose | Longueur | Pathologies  | Efficacité |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------|----------|--|------------|
| Classe 6                          | 6                        | 2001         | 100 ml   | Filet non plaqué au sol.<br>Hauteur utile diminuée     | Moyenne    |
| Classe 1                          | 1                        | 2001         | 20 ml    | Accumulation de matériaux dans le filet                | Faible     |
| EC1                               | 6                        | 2001         | 40 ml    | Bloc de 150l dans le filet, frein sollicité, corrosion | Moyenne    |
| EC2                               | 6                        | 2001         | 20 ml    | Corrosion  | Moyenne    |
| EC3                               | 5                        | 1996         | 30 ml    | Corrosion  | Moyenne    |
| EC4                               | 5                        | 1996         | 30 ml    | Corrosion + perte de hauteur utile                     | Faible     |

Tableau 2 : Estimation de l'efficacité des ouvrages



Figure 15 : filet EC1 impacté par un bloc de 150 l

Notons que tous ces ouvrages ne sont aujourd'hui plus conformes aux normes en vigueur (ETAG27).

Il existe par ailleurs des ouvrages de types ancrages ou filets plaqués. Ceux-ci ont été observés à distance mais l'analyse de leur efficacité et leur état n'a pas pu être effectuée car ces derniers sont situés en falaise.

Enfin rappelons ici que si ce dispositif a le mérite d'exister et d'apporter une certaine protection aux habitations, celui-ci ne sera pas pris en compte dans la qualification des aléas conformément à la doctrine nationale. Cela tient du fait que les filets sont non pérennes (durée de vie donnée à 25 ans), qu'ils peuvent avoir un usage unique en cas de sollicitation d'un gros bloc, l'ouvrage n'est plus efficace, et que ce type de dispositif nécessite un entretien accru qui représente une contrainte difficile à respecter pour les maîtres d'ouvrages.

## III.6 Modélisations trajectographiques

### III.6.1 Périmètre modélisé

Les zones modélisées se localisent à l'aplomb des secteurs urbanisés depuis les reliefs principaux (Montagne de Brégnier en amont du Chef-Lieu, de Glandieu et du Petit-Glandieu).

### III.6.2 Description du modèle

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

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

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

### III.6.3 Acquisition topographique

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

### III.6.4 Données d'entrées au modèle

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

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

Les hypothèses de départ retenues correspondent à un bloc de 10 m<sup>3</sup> sur le secteur de Glandieu et de 5 m<sup>3</sup> en amont du Chef-Lieu. Ces types de blocs sont connus dans l'historique, les reconnaissances d'Antea et les observations de terrain du PPR. Pour chaque pixel de 1 m identifié comme zone de départ, il a été lancé 1000 blocs.

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

### III.6.5 Résultats

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

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

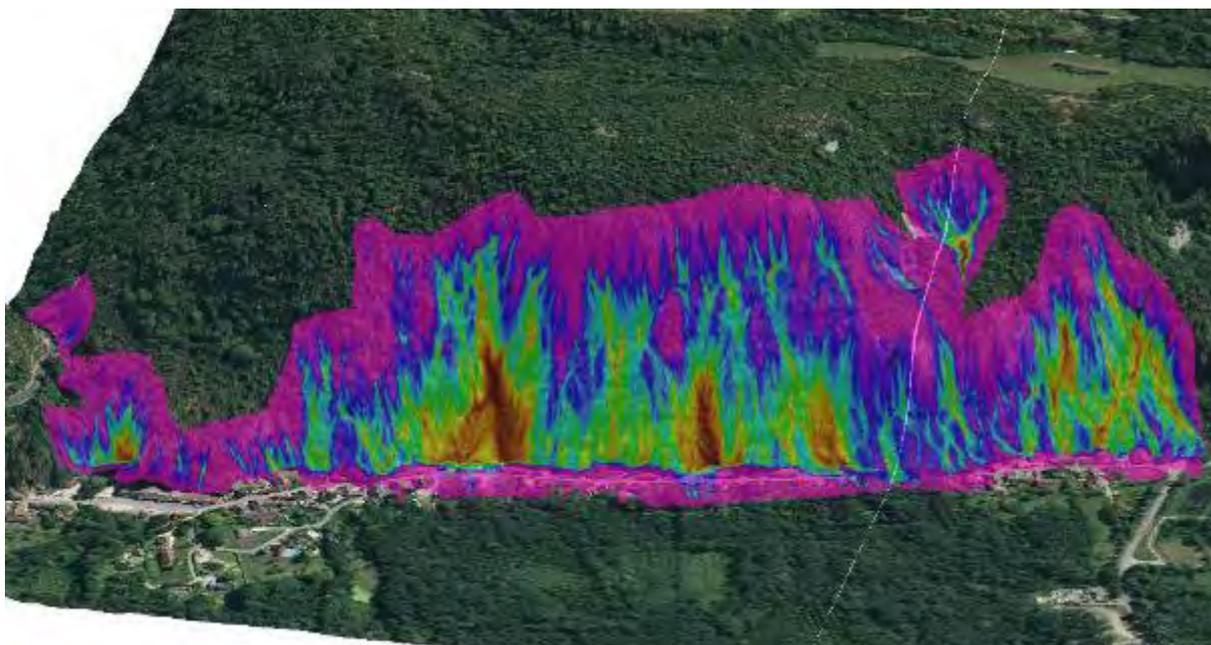


Figure 16: carte des modélisations RF3D sur le secteur de Glandieu

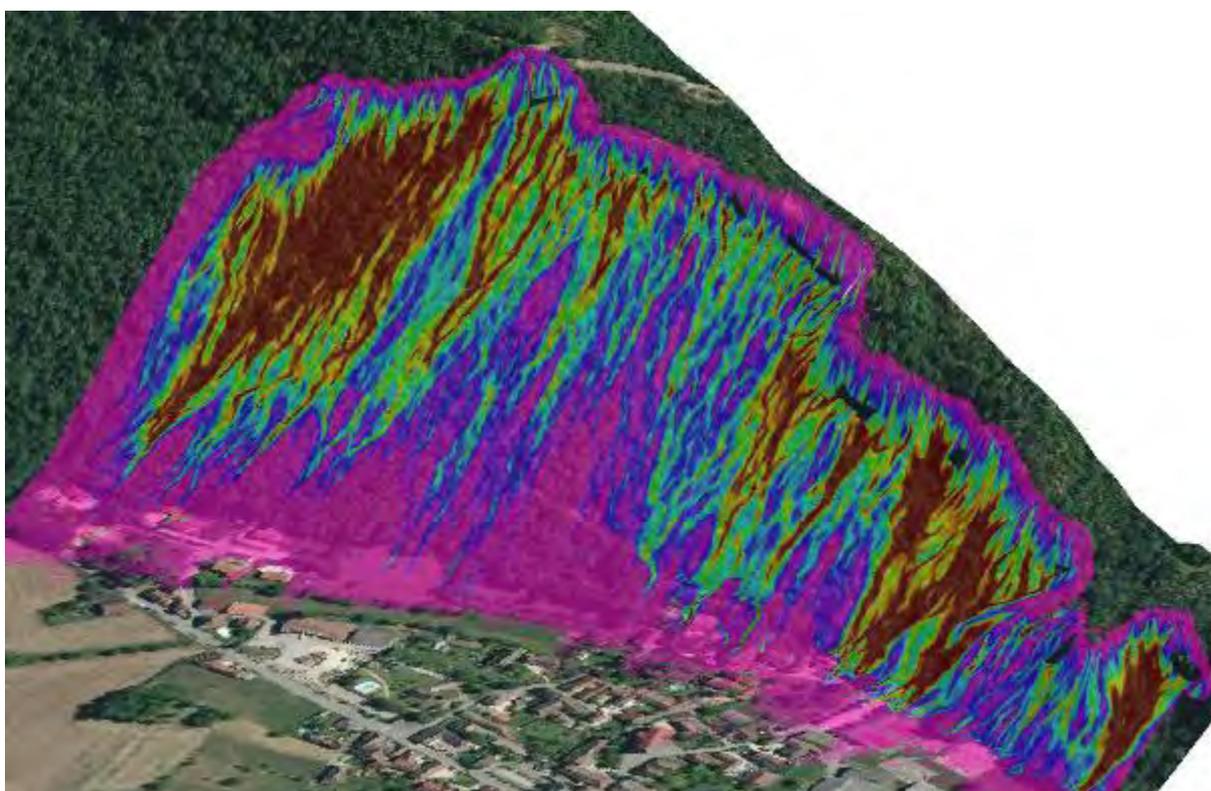


Figure 17: carte des modélisations RF3D sur le secteur du Chef-Lieu

## III.7 Qualification de l'aléa

### III.7.1 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.

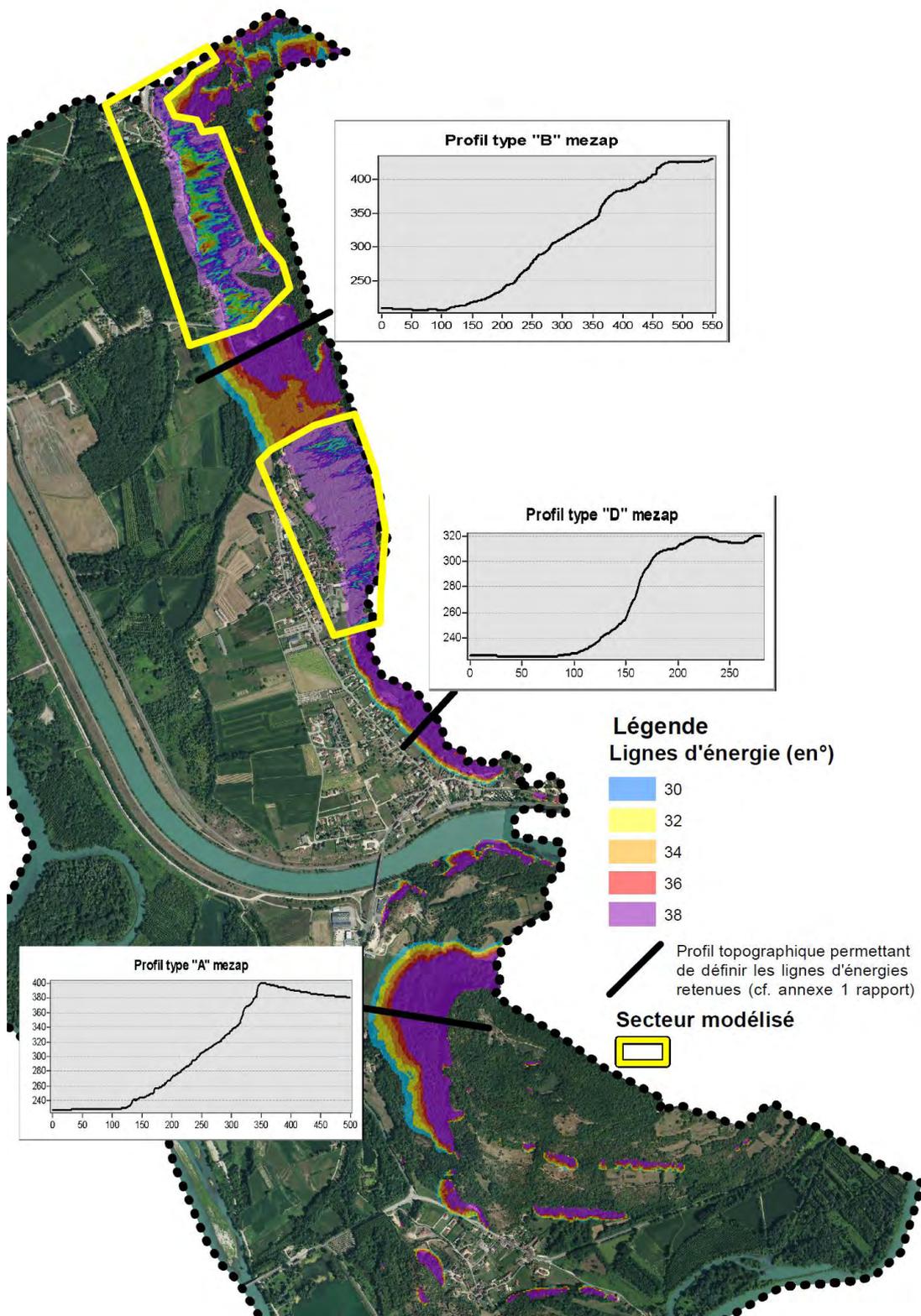


Figure 18 : carte de traitement des chutes de blocs

### III.7.2 Zones « hors enjeux urbanisés »

Conformément à la méthodologie préconisée au niveau national, les zones « hors enjeux urbanisés » et à enjeux isolés, sont traitées par application du guide MEZAP<sup>1</sup>.

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 <sup>3</sup> | 0,25<V≤1 m <sup>3</sup> | 1<V≤10 m <sup>3</sup> | V>10 m <sup>3</sup> |                              |
|                          |             | 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 3: grille de qualification des aléas chutes de blocs en zone non urbanisée

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

Ce traitement est appliqué à tous les secteurs non traités par modélisation trajectographique (zone naturelle et d'enjeux diffus ou isolés).

|                            | Intensité                          | Activité | Probabilité d'atteinte |     | Probabilité d'occurrence | Aléa résultant |
|----------------------------|------------------------------------|----------|------------------------|-----|--------------------------|----------------|
|                            |                                    |          |                        |     |                          |                |
| Entre Brégnier et Glandieu | 1<V≤10 m <sup>3</sup><br>Elevée    | Forte    | Fort                   | 36° | Elevée                   | Fort P3        |
|                            |                                    |          | Moyenne                | 34° | Elevée                   | Fort P3        |
|                            |                                    |          | Faible                 | 32° | Modérée                  | Fort P3        |
| La Bruyère                 | 0,25<V≤1 m <sup>3</sup><br>Modérée | Faible   | Fort                   | 38° | Très élevée              | Fort P3        |
|                            |                                    |          | Moyenne                | 35° | Modérée                  | Moyen P2       |
|                            |                                    |          | Faible                 | 33° | Faible                   | Moyen P2       |
| Mont de Cordon             | 1<V≤10 m <sup>3</sup><br>Elevée    | Moyen    | Fort                   | 34° | Elevée                   | Fort P3        |
|                            |                                    |          | Moyenne                | 32° | Modérée                  | Fort P3        |
|                            |                                    |          | Faible                 | 30° | Modérée                  | Fort P3        |
| Affleurements divers       | V≤0,25 m <sup>3</sup><br>Faible    | Faible   | Fort                   | 34° | Très élevée              | Fort P3        |
|                            |                                    |          | Moyenne                | 32° | Modérée                  | Moyen P2       |
|                            |                                    |          | Faible                 | 30° | Faible                   | Faible P1      |

Tableau 4: croisement méthode MEZAP par secteur

### III.7.3 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      |
|           |                    | Probabilité d'atteinte |            |             |

Tableau 5 : grille de qualification des aléas chutes de blocs en zone urbanisée

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

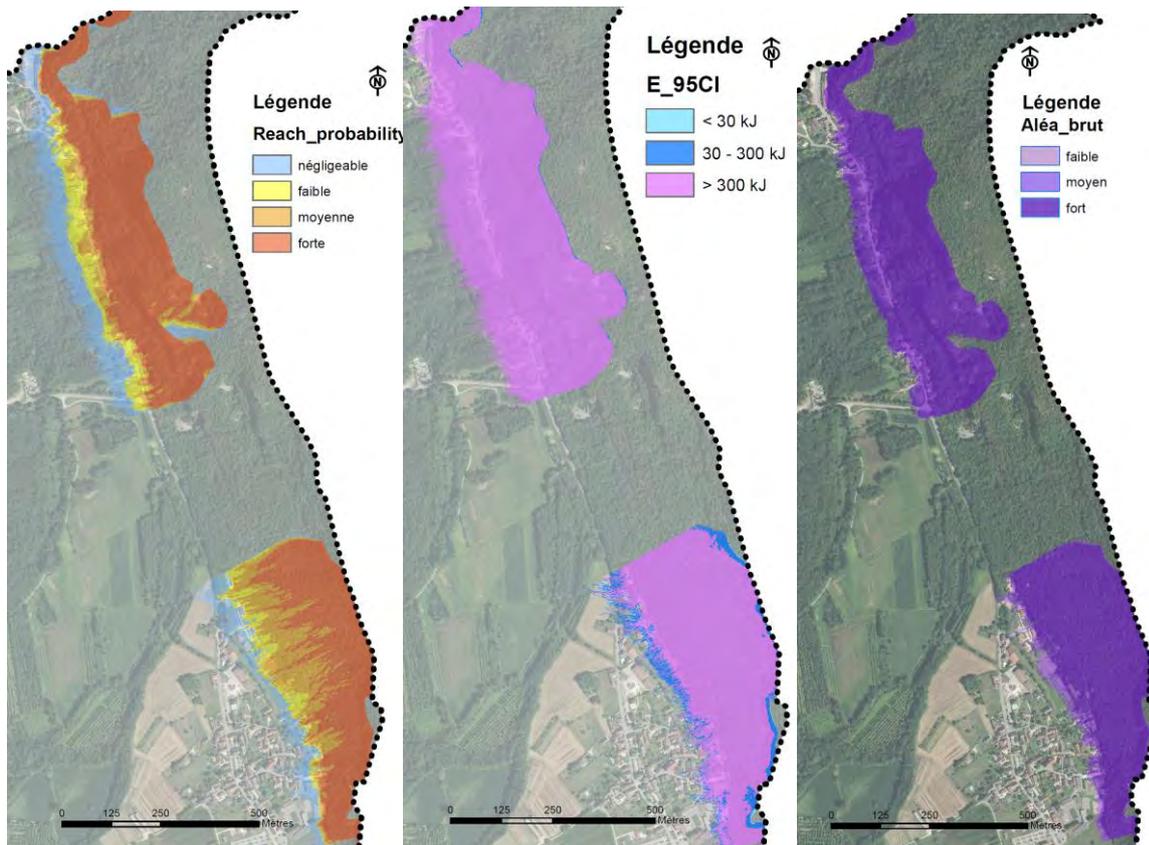


Figure 19 : Croisement probabilité d'atteinte avec intensité et aléa brut résultant

### III.7.4 Aléas résultants

Sur le secteur de Glandieu l'aléa est fort sur toute l'étendue de la zone exposée du fait d'une intensité élevée (blocs supérieurs à  $5\text{m}^3$  potentiellement mobilisables). Les modélisations montrent en effet des énergies bien supérieures à 300 kJ.

Entre Glandieu et Brégnier, l'aléa est également fort jusqu'en pied de versant pour les mêmes raisons : une intensité élevée du fait de blocs potentiellement importants au départ.

Sur Brégnier, l'ensemble du versant est en aléa fort ce qui peut localement descendre jusque sur le replat en fonction de la topographie. Le cas échéant, c'est de l'aléa moyen qui concerne le pied de versant.

Sur le linéaire de falaise entre Brégnier et la Bruyère, l'aléa est fort jusqu'en pied de versant et moyen sur une bande de 15 à 20 de mètres de largeur sur le replat.

Au niveau du Mont de Cordon, l'aléa est fort jusqu'en pied de versant du fait d'une intensité potentiellement élevée (blocs supérieurs à  $1\text{m}^3$  pouvant atteindre même plusieurs  $\text{m}^3$ ).

Sur l'ensemble des autres petites barres rocheuses ou micro-affleurements, l'aléa varie de fort sur les zones de pente, à moyen en pied de versant, jusqu'à parfois faible sur les replats.

Par rapport au précédemment PPR, il demeure des différences substantielles du fait d'une différence notoire de méthodologie.

Concernant l'étendue du zonage, elle est ici plus représentative (au moins en zone d'enjeux) du fait du recours à des modélisations. Il en résulte un zonage souvent moins étendu qui considère les aspects topographiques du site.

Concernant le degré d'aléa : il s'avère globalement plus sécuritaire. Cela tient en partie du fait que dans les PPR antérieurs, l'aléa se basait sur la probabilité d'atteinte. Les méthodologies de qualification ont changé depuis : il est aussi considéré l'intensité du phénomène. Or les modélisations sont sans appel : avec une énergie supérieure à 300 kJ, l'intensité (mesurée par les éventuels dégâts au bâti) est forcément forte.

## IV Aléas glissement de terrain

### IV.1 Définition

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

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

### IV.2 Historique et données disponibles

#### Sources d'informations consultées :

- Commune de Brégnier-Cordon. Réunion de travail du 15/02/2018.

#### Evènements historiques :

| Secteur                   | Date               | Observation(s)   | Source(s) |
|---------------------------|--------------------|--|-----------|
| Croisement RD992 et RD 19 | Régulièrement 2013 | Talus aval de la RD en glissement. Enrochement posé en 2013 par le CD. | Commune   |

Tableau 6: historique des phénomènes de chutes de blocs

### 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 7 : prédisposition des terrains aux glissements

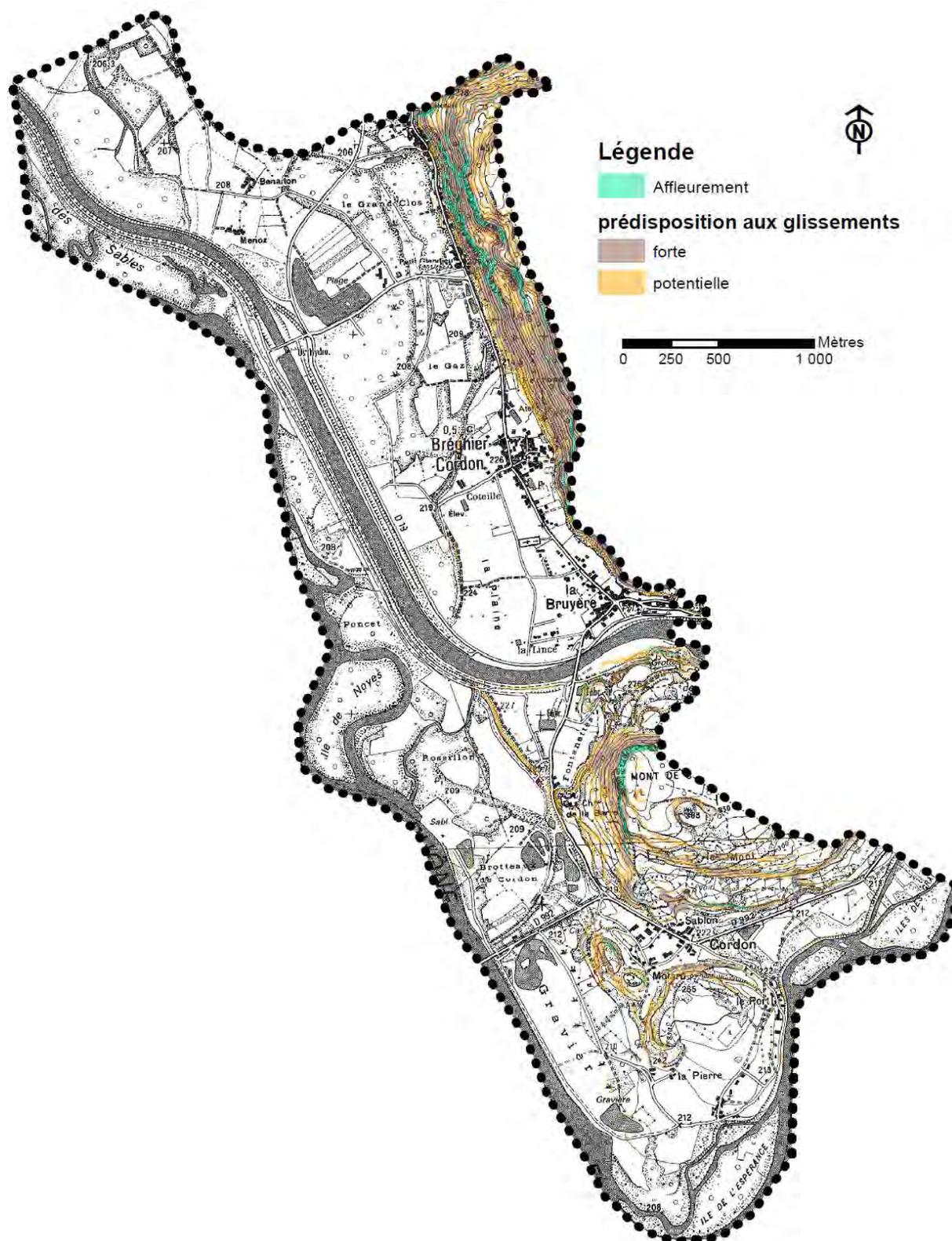


Figure 20 : carte de susceptibilités aux glissements de terrain

#### IV.4 Observations de terrain

Aucun glissement actif n'a été observé, en revanche plusieurs zones d'extraction de matériaux sont visibles et permettent de distinguer la nature du sol. On y distingue des matériaux

d'éboulis entremêlés à des fines argileuses qui pourraient présenter des prédispositions géomécaniques aux glissements.



Figure 21 : Exemple d'une zone d'extraction à Glandieu

Par ailleurs, les éboulis de l'ensemble des versants sont généralement recouverts par une couche altération pouvant atteindre 1 m d'épaisseur. Cette dernière peut donner lieu à des glissements superficiels et localisés un peu partout, notamment lorsque les sols sont saturés en eau. Or il est à noter que l'ensemble de ces versants reçoit les eaux provenant des falaises.



Figure 22 : Exemples permettant de constater une couche sensible aux glissements sur les éboulis (à droite entre le chef-lieu et la Bruyère, à droite : La Bruyère)

Enfin, il existe des instabilités très ponctuelles de type talus routier, pied de versant en zone humide ou berges de fossés en érosion. Ce type de désordre s'observe par exemple au Nord du Port ou un poteau électrique a fini par s'incliner légèrement et des fissures sont visibles au bâti.



Figure 23: Exemple de désordres dus à des terrains de mauvaise qualité

## IV.5 Qualification de l'aléa

### IV.5.1 Grille appliquée

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

L'intensité est établie selon la logique suivante :

| Faible  | Modérée   | Élevée   | Très élevée   |
|---|---|--|---|
| Dommages limités, non structurels, sur un bâti standard | Dommages structurels au bâti standard.<br>Pas de dommages au bâti adapté à l'aléa | Destruction du bâti standard.<br>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 le guide méthodologique PPR montagne

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

| Probabilité d'occurrence | Description   |
|--------------------------|---|
| Forte                    | Glissement actif avec traces de mouvements récents,<br>ou<br>Glissement ancien,<br>ou<br>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,<br>ou<br>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 9 : Probabilité d'occurrence glissement de terrain selon le 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 10 : Aléa glissement de terrain selon le guide méthodologique PPR montagne

#### IV.5.2 Aléas résultants

Les pentes situées en aval des falaises jusqu'en pied de versant sont potentiellement soumises aux glissements. Il existe en effet un contexte hydrologique et hydrogéologique aggravant (sources) et la pente est relativement marquée (entre 20 et 40°). Ces conditions leur confèrent néanmoins une probabilité d'occurrence jugée comme faible corroborée par l'absence d'historique et de signe d'activité marquée observable sur le terrain.

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

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

Sur l'ensemble des autres secteurs, l'aléa est également classé comme faible car il s'agit de « micro » phénomènes avec une étendue peu marquée et une épaisseur très limitée. En effet, retenons que sur l'essentiel du territoire communal, le substratum est subaffleurant ce qui limite évidemment l'intensité et la probabilité d'occurrence.

## 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 :**

- DDE-SFRM, 1998, Plan de Prévention des Risques Naturels.
- Commune de Brégnier-Cordon. Réunion de travail du 15/02/2018.
- Enquête de terrain : lors de la phase de terrain, des témoignages de riverains ont pu être recueillis. Le cas échéant, les éléments notables sont repris dans la description des observations de terrains.

#### **Evènements historiques :**

| Secteur                             | Date         | Observation(s)  | Source(s)            |
|-------------------------------------|--------------|---|----------------------|
| Interface Rhône – ruisseau du Gland | 13/02/1990   | Les méandres en aval immédiat de la cascade posent des problèmes (érosion importante). Dans le secteur des lieux-dits des Sables, Benaiton et Menoz l'eau inondait les habitations par 40 cm.   | PPR<br>Arrêté CATNAT |
| Interface Rhône – ruisseau du Gland | 21/12/1991   | Arrêtés de catastrophes naturelles  | Arrêté CATNAT        |
| Interface Rhône – ruisseau du Gland | Janvier 2018 | Suite à une succession des précipitations (les plus marquées les 5 et 21/01), l'eau du Gland a débordé dans la plaine. Les eaux étaient à la limite d'atteindre le niveau des maisons de Benaiton. Plusieurs chemins et routes inondés. | Commune              |

Tableau 11: historique des phénomènes crues torrentielles

#### **Remarques :**

La commune signale une forte interaction entre le Rhône et le ruisseau du Gland. Les principaux événements se seraient ainsi passés lors d'une crue du Rhône dont le niveau élevé limitait l'exutoire des eaux du Gland.

### V.3 Description illustrée du ruisseau – observations de terrains

#### **Généralités**

Le ruisseau du Gland draine un vaste bassin versant de près de 51 km<sup>2</sup> répartis sur les communes d'Innimond, St Germain les Paroisses, Ambléon, Colomieu, Conzieu, Arboys en Bugey et Prémeyzel.

Il débouche dans la plaine à partir de la cascade de Glandieu. Ce n'est que quelques hectomètres en amont de cette cascade que le ruisseau entre sur le secteur d'étude, constituant la limite géographique entre les communes de Brégnier-Cordon et Groslée-Saint Benoit.

Le ruisseau traverse alors la plaine du Rhône. Le tracé du lit mineur bascule, à partir de la RD 19, vers le Nord sur la commune de Groslée Saint Benoit. Néanmoins, en cas de crue du

ruisseau et/ou du Rhône, l'inondation de la plaine, liée à ces deux unités hydrologiques, s'étend largement dans la plaine sur les deux territoires communaux.

### **Amont de la cascade de Glandieu**

En amont de la cascade de Glandieu, le ruisseau longe la route et la revanche reste faible. Un seuil, lié à la centrale de Groslée au sommet de la cascade, fixe ce niveau le long de la route. Des débordements sont possibles sur la route. Un tel scénario s'est produit en février 1990 et était proche de se reproduire en janvier 2018.

A noter qu'en février 1990, la crue avait également déstabilisé la route. Il est vraisemblable que le tronçon déstabilisé soit celui à l'aval immédiat du seuil, protégé aujourd'hui par des enrochements. L'érosion de la berge est due aux forts débits mais également à l'orientation du seuil qui dirige les écoulements vers cette berge rive droite. Elle favorise par la même occasion les débordements vers la route en ce point.



Figure 24 : Ruisseau du Gland le long de la RD10, en amont de la cascade

Les eaux qui débordent sur la route la suivent et sont susceptibles de se déverser vers les maisons en contrebas, contre les falaises à Glandieu. Lors de la crue de 1990, trois cascades auraient été ainsi formées et se seraient déversées sur les enjeux habités. Ces inondations concernent la commune voisine de Groslée Saint Benoit.

### **Traversée du hameau de Glandieu**

A l'aval de la cascade, le ruisseau franchit la route communale au cœur du hameau puis méandre sur un tronçon encaissé à l'aval. Des érosions de berges sont possibles au niveau des méandres et ont été constatées lors de la crue de 1990.



Figure 25 : Cascade du Glandieu et lit à l'ava

A l'aval, le lit devient bien moins encaissé et s'écoule non loin des habitations. Ces dernières sont généralement bien plus hautes que le cours du Gland. Une habitation fait exception sur la commune de Brégnier Cordon, celle de la photo de droite sur la figure suivante. Des divagations pourraient s'approcher de l'habitation. Néanmoins, le niveau de vie est hors d'atteinte.



Figure 26 : Habitation pouvant être approchée par les divagations du ruisseau

### **La plaine en aval**

A l'aval, le ruisseau du Gland traverse la RD 19 puis la plaine. Un étalement important, sur plusieurs hectares, des eaux du Gland et du Rhône est observée dès que l'un de ces deux cours d'eau est en crue. Le niveau du Rhône a une influence sur les conditions d'écoulements du ruisseau du Gland dans la plaine.



Figure 27 : Traversée de la RD19 et lit à l'aval

Sur la commune de Groslée Saint Benoit, ces inondations en plaine ne concernent que des routes mais aucun enjeu habité.

Sur la commune de Brégnier Cordon, les trois hameaux des Sables, de Benaiton et de Menoz, sont situés en zone inondable du Rhône et sont donc également exposés en cas de crue du ruisseau du Gland, dès lors que l'on considère un scénario pessimiste avec une crue concomitante du Rhône. D'autre part, la zone inondable du Rhône remonte bien en amont de la RD19 et vient jusqu'en bordure des habitations à Petit Glandieu, en contrebas de la route communale. Sur ce hameau, les habitations dont le niveau de vie est proche de la route communale menant à Glandieu semblent hors d'atteinte. En revanche, coté aval, certaines propriétés ou dépendances sont bien plus basses et vraisemblablement en zone inondable.



*Figure 28 : Hameau de Benaiton en zone inondable*



*Figure 29 : Maisons à Petit Glandieu : au premier plan, une dépendance inondable – au second plan, une maison surélevée, au niveau de la route communale*

Notons par ailleurs l'existence de très nombreux ouvrages sous les routes qui, sans ces ouvrages, feraient obstacle à l'écoulement dans la plaine. Ils permettent une vidange progressive des casiers d'inondations.



Figure 30 : Exemple de connexions entre casiers d'inondation délimités par des routes dans la plaine

## V.4 Analyse hydrologique

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

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

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

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

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

### V.4.2 Pluviométrie

#### Données de pluie journalière :

Aucun poste pluviométrique n'est présent sur le bassin versant du Gland 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 cumulés journaliers de référence suivants :

| $P_{j10}$ (mm) | $P_{j100}$ (mm) |
|----------------|-----------------|
| 80             | 115             |

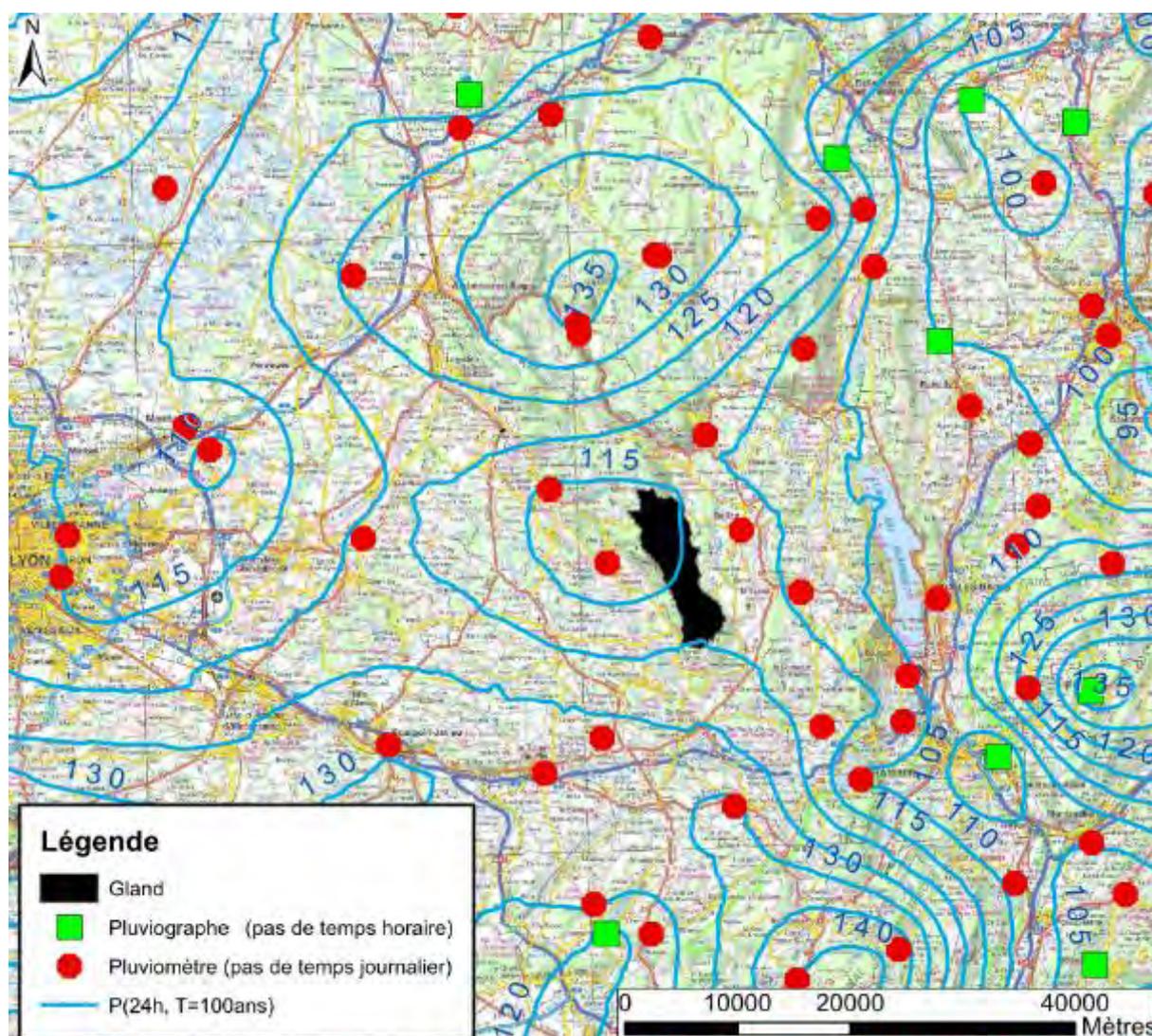


Figure 31 : Répartition spatiale des pluies journalières centennales

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

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

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

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

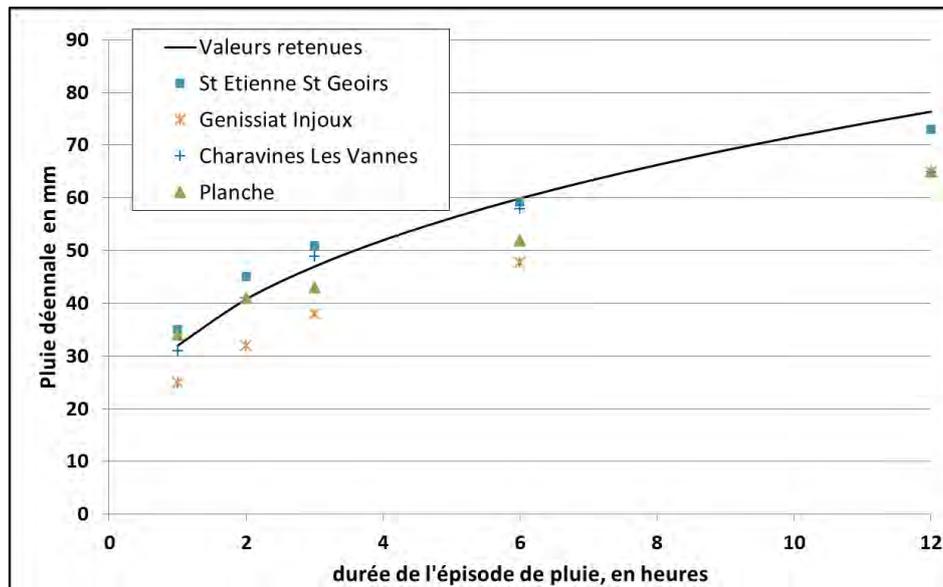


Figure 32 : Ajustement de la loi de Montana

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

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

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

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

#### V.4.3 Variables représentatives du temps de transfert

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

| Méthode                        | Temps de concentration (h) |
|--------------------------------|----------------------------|
| Kirpich                        | 1,87                       |
| Sogreah                        | 5,43                       |
| Turraza                        | 9,66                       |
| Giandotti                      | 5,03                       |
| Izzard Meunier (BV végétalisé) | 6,65                       |

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 :

$$5 \text{ h} < t_c < 10 \text{ h (valeur probable : 6 h)}$$

#### V.4.4 Détermination du débit de référence décennal

##### Application de différentes formulations statistiques

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

| Méthode   | Qi10 (m³/s) |
|---|-------------|
| Régressions multiples (Mathys et Peteuil, 2010)<br>[paramètres : surface drainée]                 | 28,5        |
| Régressions multiples (Mathys et Peteuil, 2010)<br>[paramètres : surface drainée et pluviométrie] | 52,4        |
| SOCOSE  | 29,5        |
| Crupedix  | 23,2        |
| SCS simplifiée  | inadaptée   |
| Méthode rationnelle   | 25,8        |

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

#### **Transposition de bassins versants jaugés (Banque Hydro) :**

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

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

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

- Le Suran à Germagnat – référence V2814050

| Stations                              | Surface du bassin versant (km²) | Débit décennal instantané (m³/s) | Débit pseudo spécifique (m³/s/km <sup>1,6</sup> ) |
|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---|
| Le Furans à Pugieu entre 1966 et 1983 | 58                              | 25                               | 0,97  |
| Le Furans à Pugieu entre 1984 et 2018 | 58                              | 18                               | 0,69  |
| Le Furans à Arbignieu                 | 160                             | 37                               | 0,63  |
| Le Suran à Germagnat                  | 193                             | 62                               | 0,92  |

Aussi, un débit pseudo-spécifique de 0,7 à 1 m³/s/km<sup>1,6</sup> est estimé représentatif de ces bassins versants et transposable au ruisseau du Gland. En considérant sécuritairement une valeur de 1 m³/s/km<sup>1,6</sup>, le débit décennal du Gland serait de l'ordre de 23 m³/s.

#### **Synthèse**

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

$$Q_{10} = 25 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### V.4.5 Détermination du débit de référence centennal

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

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

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

Aussi, le débit centennal du ruisseau du Gland est estimé à :

$$Q_{100} = 44 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### 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 : 44 m<sup>3</sup>/s, comme estimé précédemment
- Temps de montée : 9 heures, soit sensiblement proche de 1,5.  $t_c$
- Coefficient de forme : 2,75. Cette valeur est ajustée afin que le volume de l'hydrogramme corresponde au volume d'eau ruisselé en considérant un coefficient de ruissellement centennal de 0,3 et une pluie journalière centennale. Ce choix semble sécuritaire compte tenu du boisement du bassin versant et permet ainsi de considérer une importante saturation des terrains avant l'évènement.

Cette méthode aboutit à un hydrogramme de crue assez long.

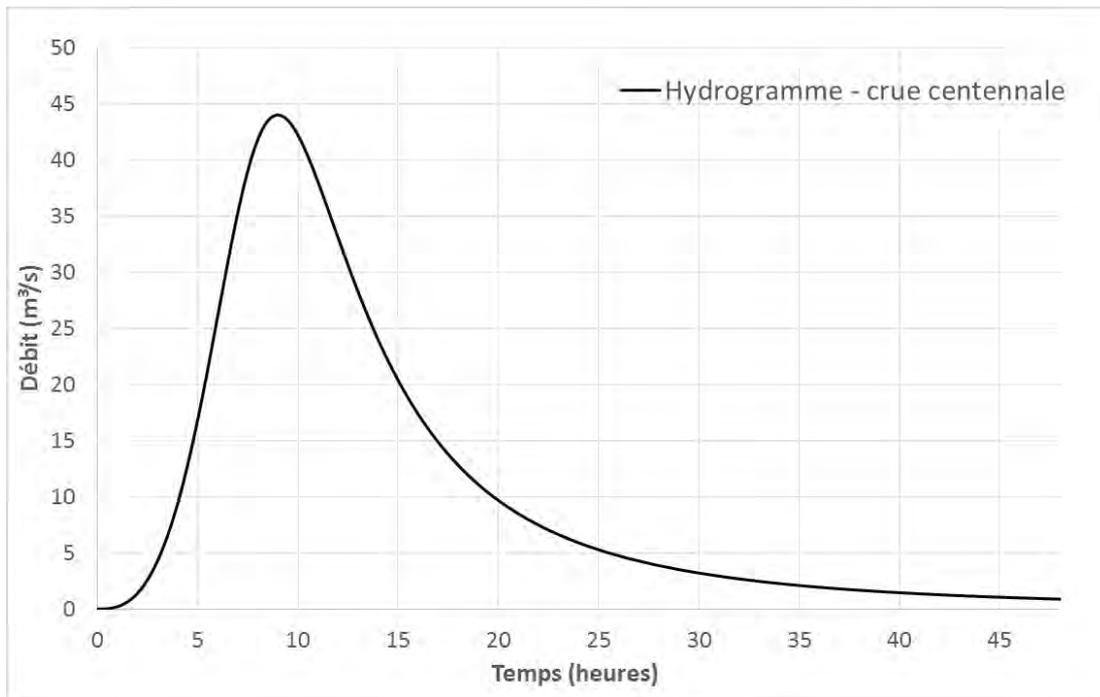


Figure 33 : Hydrogramme retenu pour une crue centennale sur le ruisseau du Gland

## V.5 Modélisation hydraulique

### V.5.1 Recours à la modélisation et objectifs

Dans le cas particulier du Gland, les enjeux habités sont généralement peu denses voire isolés. Toutefois, comme le confirme l'historique des événements, le niveau d'aléa est fortement dépendant de la cote d'eau du Rhône. Aussi, une simple analyse géomorphologique de terrain n'est pas suffisante à l'évaluation du niveau d'aléa dans un cas où des enjeux paraissant éloignés (hameaux de Menoz et Benaiton) peuvent être atteints par un phénomène s'apparentant à de l'inondation de plaine. L'analyse de l'aléa torrentiel sera alors appuyée par **une modélisation hydraulique à deux dimensions**, méthode appropriée à ce type de phénomène.

L'aléa inondation lié aux crues du Rhône a déjà fait l'objet d'études antérieures et ne fait pas l'objet de nouvelles analyses dans le cas de la présente étude. La cartographie associée de cet aléa inondation est une donnée fournie par la DDT de l'Ain et est intégrée au rendu de cette étude.

L'analyse des aléas liés aux crues du ruisseau du Gland considèrera une situation pessimiste avec le Rhône à sa cote centennale, soit en d'autres termes, une concomitance des crues centennales du Gland et du Rhône.

Pour une crue centennale du Rhône, une très vaste étendue de la plaine rive droite du Rhône (notamment sur le territoire communal de Brégnier Cordon) est déjà exposée à un aléa inondation du Rhône. Les objectifs de la modélisation réalisée dans le cadre de la présente étude seront donc :

- Sur les zones non exposées à un aléa I du Rhône, d'évaluer le niveau d'aléa lié à une crue centennale du Gland pour un niveau haut du Rhône susceptible d'influencer les conditions d'écoulement du Gland.
- Sur les zones déjà exposées à un aléa I du Rhône, de requalifier le niveau d'aléa sur d'éventuels secteurs où les apports complémentaires du Gland viennent l'augmenter.

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 « Recherche et Développement » de l'ONF à l'aide de l'outil Lastools. La précision des dalles utilisées est de 1m.

La précision du MNT est globalement très satisfaisante en lit majeur, c'est-à-dire dans toute la plaine du Rhône. 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).

A proximité des enjeux, des profils en travers levés par un géomètre expert ont permis une correction de la topographie afin d'aboutir à une meilleure représentativité du terrain naturel. Par ailleurs, les levés topographiques ont également concernés deux ouvrages de franchissement afin d'intégrer leur géométrie au modèle (pont communal à Glandieu et pont de la RD19).

Dans le cas du ruisseau du Gland, 8 profils en travers ont été levés. Ils sont localisés sur la figure suivante.

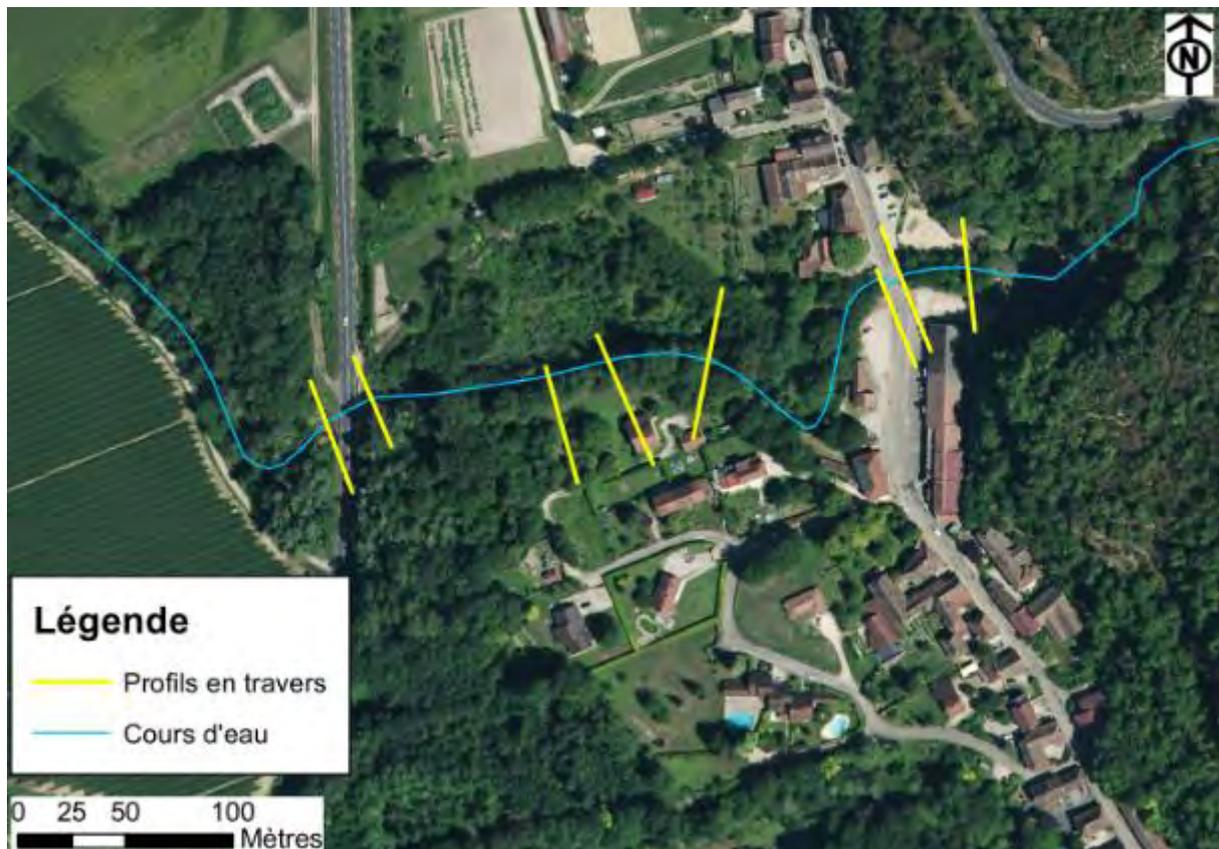


Figure 34 : Profils en travers levés par un géomètre expert

D'autres profils en travers ont également été relevés afin de représenter le niveau du terrain naturel au niveau des hameaux de Menoz et Benaiton. En effet, celui-ci aurait pu être faussé par l'effacement du bati du MNT initial. Ces profils sont localisés sur la figure ci-dessous.

Enfin, il n'a pas été jugé nécessaire d'intégrer le bâti aux données topographiques dans la mesure où la dynamique des écoulements supposée avant modélisation (et confirmée par la suite) est peu marquée autour des bâtiments situés en zone d'expansion. Ils n'influent donc pas ou très peu les conditions d'écoulement.

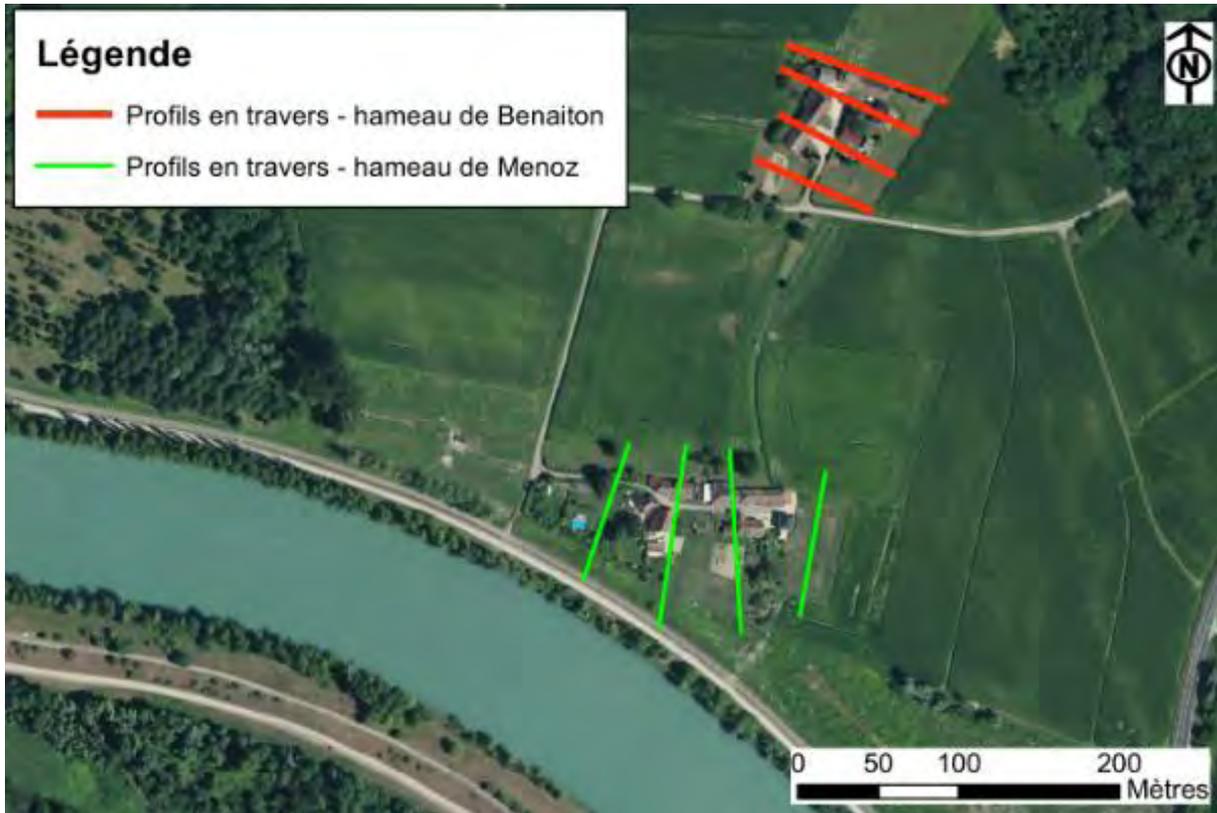


Figure 35 : Profils levés au droit des hameaux de Benaiton et Menoz

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

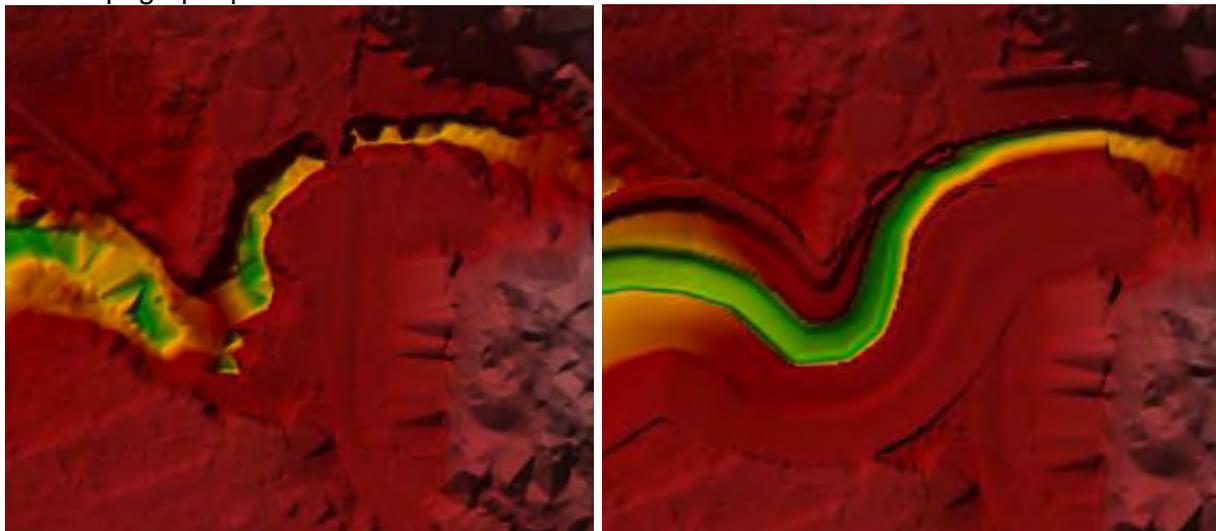


Figure 36 : Exemple de modification du MNT dans la traversée de Glandieu

Enfin, sur toute la traversée de la plaine, le MNT est peu précis au droit du lit mineur (raisons évoquées précédemment). Les données topographiques du lit mineur ont été retravaillées à l'aval de la RD19, sans qu'aucun profil en travers ne soit pour autant levé par un géomètre. Le travail a consisté à interpoler le terrain entre des profils en travers (issus du MNT) semblant représentatifs d'une section du lit mineur (profils moins « erronés » que la moyenne). La précision de la topographie du lit n'est évidemment pas ou peu améliorée. En revanche, ces modifications ont l'avantage de permettre une meilleure représentation d'un flux privilégié dans le lit mineur, tout du moins avant débordement. Ces modifications s'avèreront sans effet dans la mesure où toute la plaine est inondée par la seule condition aval au droit du Rhône.



Figure 37 : Modification approximative du lit mineur dans la plaine

### 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, illustrée sur la figure ci-après, englobe :

- Le linéaire du ruisseau du Gland depuis l'aval de la cascade jusqu'à la plaine,
- Les hameaux des Sables, de Menoz et de Benaiton dans la plaine du Rhône,
- Une zone dans la plaine suffisamment large, allant au-delà d'une zone où les apports du Gland peuvent influencer les conditions d'écoulements dans la plaine déjà inondée par le Rhône. Ce point a fait l'objet d'une validation après modélisation. .

Le modèle n'a pas pu représenter le linéaire en amont de la cascade et les conséquences liées au déversement sur la RD en amont de Glandieu. Les trop fortes pentes (cascade, route, déversement vers les falaises) sortent du domaine de validité d'une modélisation HECRAS et sont à l'origine d'instabilité dans le calcul.

Enfin, le modèle ne représente pas les très nombreuses connections dans la plaine (buses sous route) qui ont une influence sur le remplissage et les vidanges des casiers d'inondations. Aussi, plus on s'éloigne vers l'amont ou vers l'aval de la vallée du Rhône depuis l'axe du ruisseau du Gland, plus le modèle devra être considéré avec précaution.

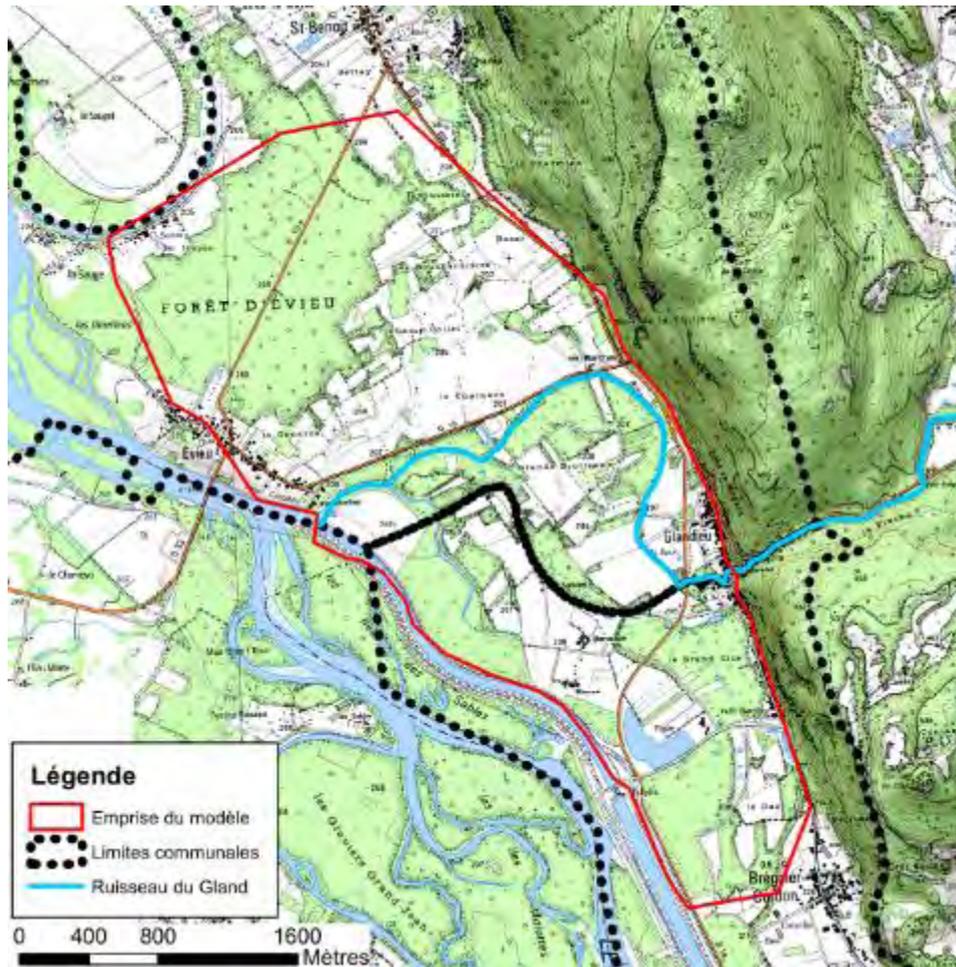


Figure 38 : Emprise du modèle

#### 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 :

A la confluence du Gland avec le Rhône, la condition limite aval est déterminée par le niveau dans le canal du Rhône pour une crue centennale.

Celle-ci a été déterminée par interprétation de la cartographie de l'aléa inondation.

Un profil en travers a été tracé à l'amont immédiat de la confluence Gland/Rhône et il est considéré que la cote du Rhône correspond à la limite entre une zone hors aléa et une zone d'aléa faible.

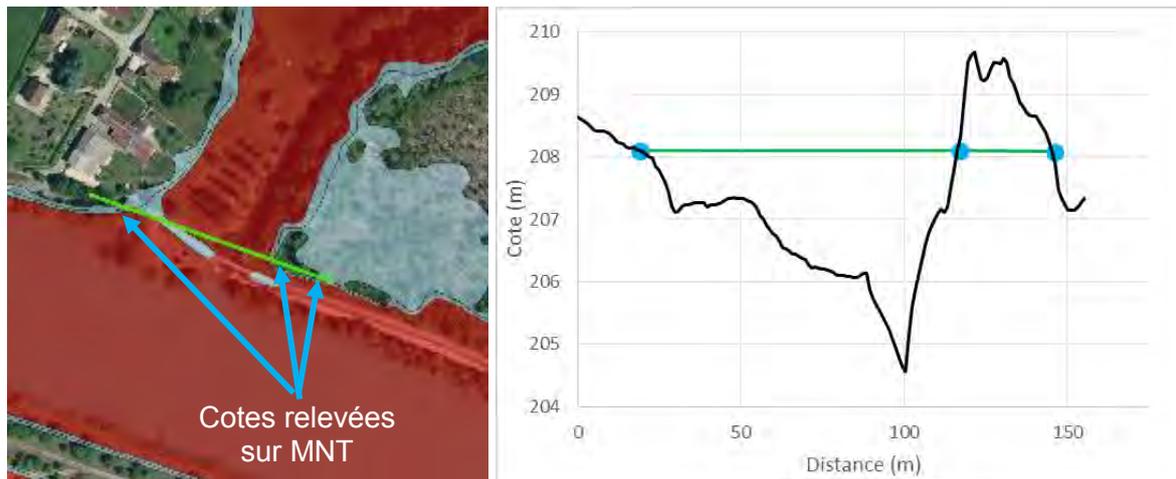


Figure 39 : Détermination de la condition limite aval

Le profil en travers intersecte la limite aléa faible/pas d'aléa à une cote variant entre 208,08 et 208,10 m. **Une condition limite aval fixée à 208,10 m est considérée dans le modèle.**

Sur les autres bords du modèle dans la plaine, les conditions aux limites considérées correspondent aux hauteurs normales. Pour rappel, ces limites de modèle ont été construites suffisamment loin pour qu'une crue du Gland n'influence plus les hauteurs d'eau au droit de ces limites.

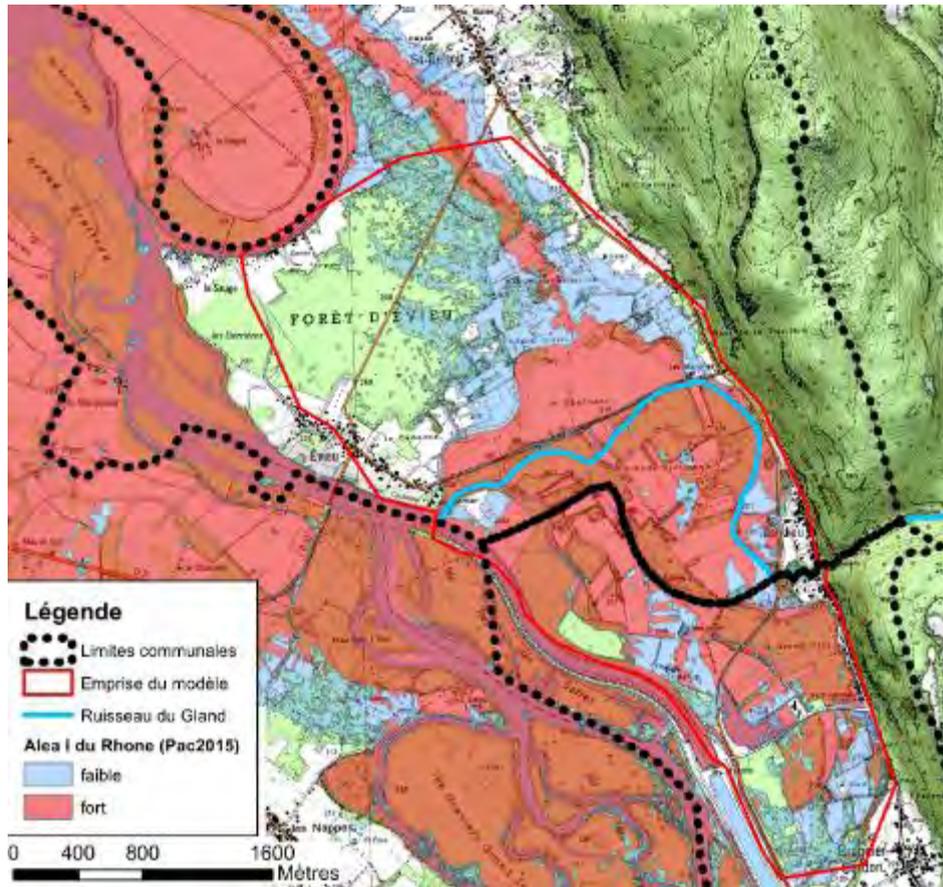
Les conditions aux limites considérées correspondent aux hauteurs normales en sortie aval du modèle. Dans la mesure où la limite aval du modèle est très éloignée du hameau des Granges, l'influence de cette condition est nulle au niveau du hameau des Granges.

#### **Coefficient de frottement :**

Un coefficient de frottement unique est retenu sur l'ensemble du modèle. Il est fixé à  $n=0,04$ .

### **V.5.5 Résultats**

Avant toute simulation, l'observation de la cartographie de l'aléa inondation du Rhône montre que l'effet d'une crue du Rhône remonte jusqu'en amont du pont de la RD 19, selon un aléa fort. Les hameaux des Sables, de Benaiton, de Menoz et l'aval de Petit Glandieu sont déjà concernés par un aléa inondation.



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 lignes de courants qui permettent d'identifier la direction prise par les écoulements, notamment autour des bâtiments (outil « particule tracing » dans HECRAS)

L'analyse des flux hydrauliques durant la crue montrent qu'au droit des hameaux des Sables, de Menoz, de Bénaiton et qu'en aval immédiat de Petit Glandieu, les circulations d'eau lors d'une crue conjuguée du ruisseau du Gland restent très faibles.

En analysant des profils en travers au droit de ces hameaux, il apparaît que lors de la crue du ruisseau du Gland, l'évolution de la cote d'eau est négligeable (de l'ordre du centimètre). A titre d'exemple, sur un profil en travers de 100 m de long tracé sur le hameau de Bénaiton, le débit maximal traversant la section est de 0,3 m<sup>3</sup>/s.

**Ainsi, au droit des hameaux des Sables, de Bénaiton, de Menoz et de Petit Glandieu c'est la cote du Rhône qui est déterminante dans la qualification de l'aléa inondation.**

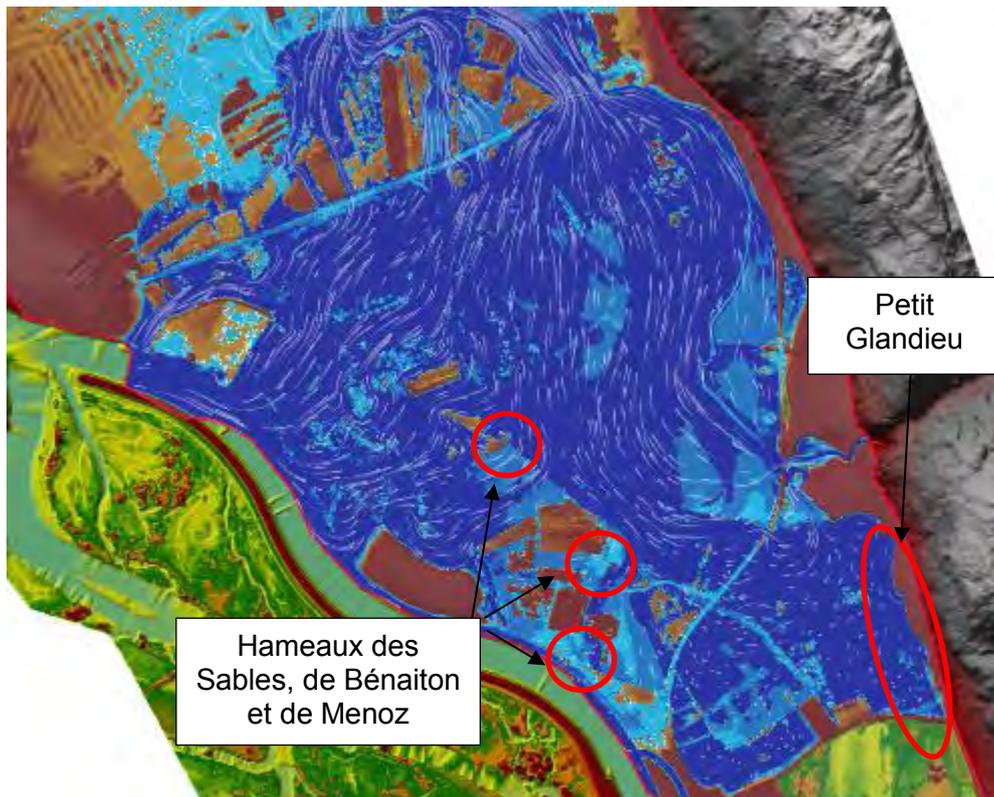


Figure 41 : Lignes de courant

Les cartes des hauteurs et vitesses seront présentées au paragraphe suivant. L'analyse présentée au droit des hameaux s'avère valable sur quasiment toute la plaine du Rhône.

En effet, dans le cas de crues concomitantes du Gland et du Rhône, les apports du ruisseau du Gland ont, dans la plaine, une influence sur l'aléa sur un secteur d'emprise limitée, qui comprend :

- L'espace en amont de la RD19 jusqu'à, coté rive gauche, la route communale reliant Glandieu à la RD19 ;
- Les lits mineurs et majeurs du Gland sur environ 150-200m à l'aval du pont de la RD 19, là où s'opère rapidement une diffusion du flux hydraulique dans la plaine inondée.

Dans toute la plaine à l'aval, l'influence de la crue du Gland est négligeable sur l'aléa, qui reste dicté par la crue du Rhône.



Figure 42 : zone de plaine où l'aléa est influencé par la crue de référence du Gland

## V.6 Qualification de l'aléa

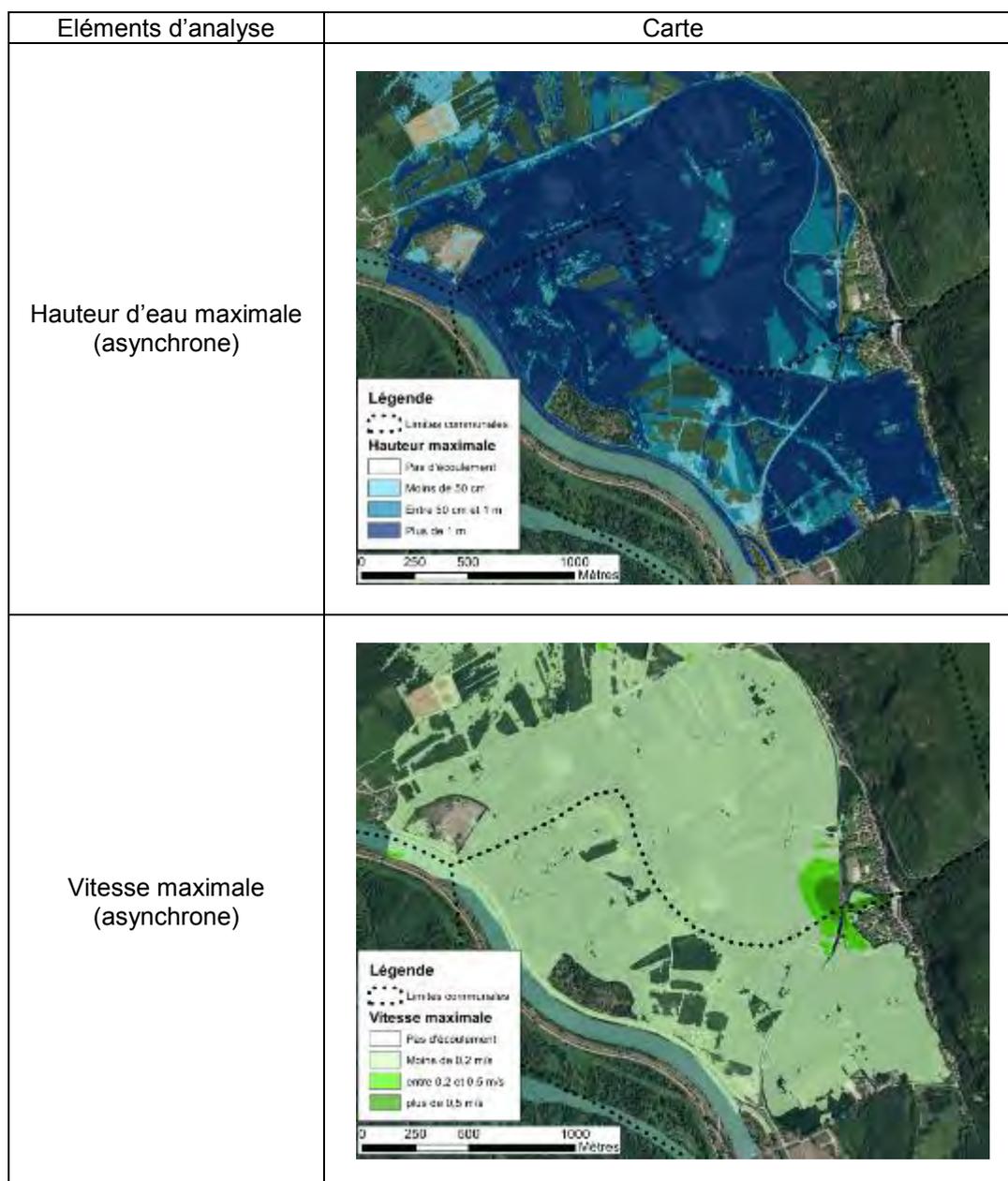
### V.6.1 Sur les secteurs modélisés

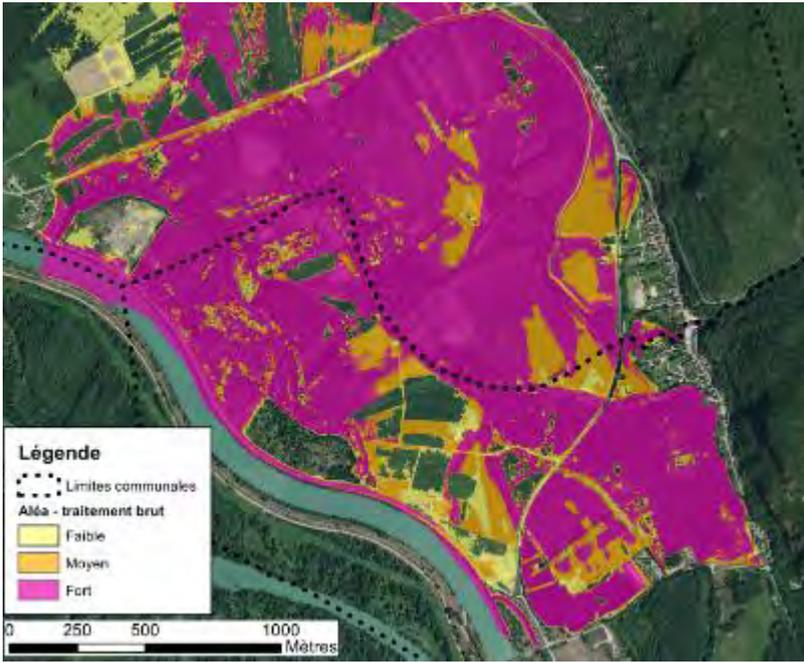
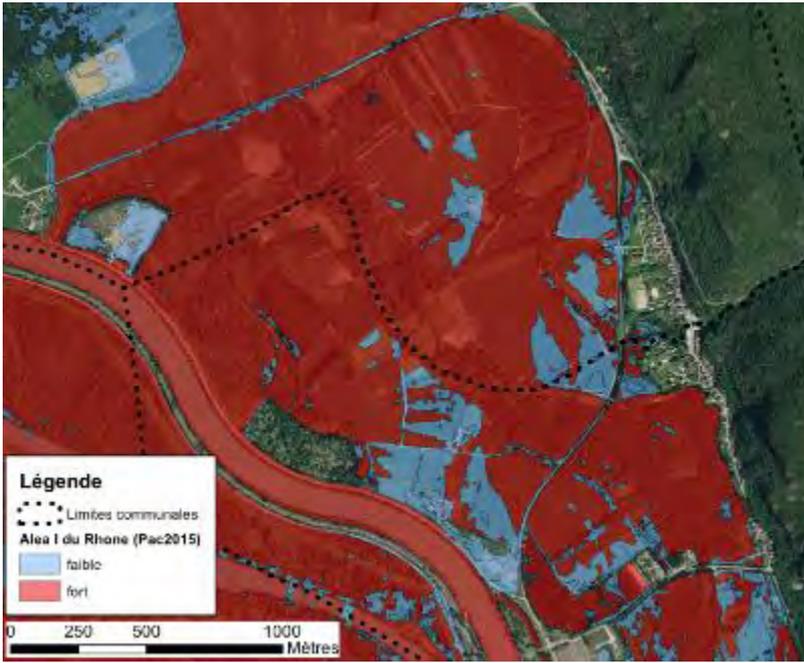
#### Pré-analyse automatique : croisement hauteur/vitesse

Pour les zones modélisées, la pré-qualification de l'aléa est réalisée par analyse des couples hauteurs/vitesse.

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

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



| Eléments d'analyse                        | Carte   |
|---|---|
| Aléa, traitement brut, résultat du modèle |  <p><b>Légende</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>--- Limites communales</li> <li>Aléa - traitement brut</li> <li>Jaune Faible</li> <li>Orange Moyen</li> <li>Rose Fort</li> </ul> <p>0 250 500 1000 Mètres</p> |
| Aléa I du Rhône                           |  <p><b>Légende</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>--- Limites communales</li> <li>Aléa I du Rhône (Pac2015)</li> <li>Bleu faible</li> <li>Rouge fort</li> </ul> <p>0 250 500 1000 Mètres</p>                   |

La carte des vitesses illustre d'une autre manière la diffusion rapide de la crue du Gland dans la plaine dès l'aval de la RD19.

Concernant l'aléa dans la plaine, pour rappel déterminé par la crue du Rhône, quelques différences de zonage existent entre le prétraitement et la cartographie de l'aléa I du Rhône et sont essentiellement dues aux raisons suivantes :

- Différence de grille d'aléa : le zonage de l'aléa Rhône ne différencie que deux classes d'aléa (fort et faible). L'aléa moyen de la présente étude semble correspondre à un

niveau d'aléa faible dans la précédente étude. La classe d'aléa fort est cohérente entre les deux études.

- Différences des données topographiques. La cartographie au droit de certains champs est révélatrice. D'une étude à l'autre, des parcelles isolées sont soit hors zone d'aléa, soit exposées. La différence vient vraisemblablement d'une topographie faussée lors d'une acquisition LIDAR par un niveau de culture variable selon les champs.
- Choix des paramètres d'entrée du modèle.

### **Cas des secteurs influencés par le ruisseau du Gland**

Sur le secteur influencé par la crue du Gland, soit en amont de la RD19 et au nord de la route communale reliant Glandieu à cette même RD, une visite de terrain post modélisation a permis d'ajuster ou de confirmer les résultats du modèle :

- Concernant l'habitation en rive gauche, le modèle confirme des débordements sur le terrain qui s'approchent de l'habitation sans l'atteindre. Le niveau de vie resterait quoi qu'il en soit hors d'atteinte.
- Les contours des niveaux d'aléas concernant les débordements sur les deux rives en amont de la RD 19 et notamment vers la plaine en rive gauche ont été ajustés pour éviter des micro-polygones. La « pixellisation » des niveaux d'aléa bruts est le résultat d'une topographie approximative en zone boisée. Ces espaces naturels de plaine ne sont concernés par aucun enjeu.

### **Cas des secteurs non influencés par le Gland**

Sur le reste de la plaine, la crue du Rhône est prépondérante sur le niveau d'aléa.

Dans la mesure où l'objet de la présente étude n'était pas une modélisation de l'aléa inondation du Rhône et où de nombreuses approximations ont été effectuées (non représentation de nombreuses connections inter-casiers par exemple), **l'aléa considéré sera celui porté à connaissance par la DDT de l'Ain.**

Un avantage à ce choix est qu'il permet ainsi de différencier un aléa de type « torrentiel » sur le secteur influencé par le Gland à un aléa de type « inondation » sur les secteurs uniquement influencés par le Rhône. Ce choix semble adapté à la dynamique des phénomènes attendus.

## **V.6.2 Hors secteurs modélisés**

L'amont de la cascade du Gland n'a pas été couvert par le modèle car soit en zone naturelle, soit hors domaine d'application d'un modèle hydraulique.

Ce secteur a été traité à partir d'une analyse hydro-géomorphologique, la qualification de l'aléa sera basée selon la grille de qualification des aléas basée de guide PPR crue torrentielle. Le principe étant que le niveau d'aléa est basé sur un croisement entre niveau d'intensité et probabilité d'atteinte, qu'il convient donc d'abord de définir :

| 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.<br>La hauteur d'écoulement ou d'engravement dépasse 1 m. | La brutalité des débordements rend pas possible un déplacement hors de la zone exposée ou jusqu'à une zone refuge.<br>La hauteur d'écoulement ou d'engravement reste inférieure à 1 m. | Les phénomènes sont progressifs et laissent la possibilité d'anticiper pour quitter la zone menacée ou rejoindre une zone refuge<br>La hauteur d'écoulement ou d'engravement reste inférieure à 0,5 m. |

|                                   |                              |   |  |   |
|-----------------------------------|------------------------------|---|--|---|
|                                   |                              | Les affouillements verticaux ont une profondeur supérieure à 1 m.<br>La taille des plus gros sédiments transportés excède 50 cm.  | Les affouillements verticaux ont une profondeur qui ne dépasse pas 1 m.<br>La taille des plus gros sédiments transportés n'atteint pas 50 cm.  | Les affouillements verticaux ont une profondeur qui ne dépasse pas 0,5 m.<br>La taille des plus gros sédiments transportés n'atteint pas 10 cm.   |
|                                   | Flottants                    | Les risques d'impact par des flottants de grande taille sont importants   | Les risques d'impact par des flottants de grande taille sont modérés.  | Les flottants sont de petite taille et ne peuvent pas endommager une façade de maison.  |
| Effets prévisibles sur les enjeux | Espace naturels et agricoles | Des phénomènes d'engravement ou d'érosion de grande ampleur sont prévisibles à cause des divagations du lit du torrent. Ils conduisent à de profonds remaniements des terrains exposés.   | Des phénomènes d'engravement ou d'érosion sur les parcelles exposées, mais leur ampleur reste limitée.   | Les écoulements prévisibles sont de faible hauteur. Les dépôts peuvent être boueux mais sans matériaux de plus de 10 cm. Les affouillements prévisibles sont faibles.   |
|                                   | Bâtiments                    | Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement et les matériaux charriés peuvent détruire les bâtiments exposés. La ruine des constructions peut notamment intervenir sur les façades ou par sapement des fondations (les angles des bâtiments étant particulièrement menacés d'affouillement en raison des surtasses induites par la concentration des écoulements). | Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement et les matériaux charriés peuvent endommager gravement les façades non renforcées mais sont insuffisants pour endommager les façades renforcées. Les affouillements prévisibles ne sont pas assez profonds pour entraîner la ruine des constructions normalement fondées. | Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement sont modérées et ne peuvent pas endommager des façades usuelles même non renforcées. Les affouillements prévisibles sont faibles et ne peuvent pas menacer les fondations des bâtiments. |
|                                   | Infrastructures et ouvrages  | Les ponts peuvent être engravés, submergés ou emportés. Les routes ou les équipements (pylônes, captages, etc.) faisant obstacle aux divagations du torrent peuvent être détruites ou ensevelies par les dépôts. Les voies de communication sont impraticables du fait de la perte du tracé. De longs travaux de déblaiement et remise en service sont nécessaires.         | Les dégâts aux infrastructures, aux ouvrages et aux équipements (pylône, captage, etc.) restent modérés et leur remise en service peut être rapide.  | Les routes peuvent être submergées mais sans endommagement et avec possibilité de remise en service rapide.   |

Tableau 13: tableau d'intensité crue torrentielle

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

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

Tableau 14: 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 15: grille de qualification des aléas de crue torrentielle en zone non urbanisée

### V.6.3 Aléas résultants

#### **Hameaux de Benaiton, de Menoz, des Sables et Petit Glandieu :**

En considérant la possibilité de concomitance de crues du Rhône et du Gland, le niveau du Rhône est prédominant sur le niveau d'aléa sur les hameaux de Benaiton, de Menoz, des Sables et de Petit Glandieu.

Le niveau d'aléa de la cartographie existante de l'aléa I du Rhône est donc considéré sur ces secteurs. Les trois hameaux de Bénaiton, Menoz et des Sables sont en zone inondable, tout comme les habitations en contrebas de la route à Petit Glandieu.

#### **Traversée du hameau de Glandieu (dont maison aval du pont) :**

Aucun enjeu sur la traversée du hameau de Glandieu n'est exposé à un niveau d'aléa.

Des débordements sont possibles sur un terrain privé en rive gauche à l'aval du hameau. Ils s'étalent selon un aléa dégressif moyen puis faible et viennent s'approcher de l'habitation sans l'atteindre. Les pièces de vie, à l'étage, resteraient hors d'atteinte.

## 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 Brégnier-Cordon. Réunion de travail du 15/02/2018.
- Enquête de terrain : lors de la phase de terrain, des témoignages de riverains ont pu être recueillis. Le cas échéant, les éléments notables sont repris dans la description des observations de terrains.

#### Evènements historiques :

| Secteur                    | Date          | Observation(s)  | Source(s) |
|----------------------------|---------------|---|-----------|
| Rue du Vieux Port          | Régulièrement | Inondation de la chaussée et des jardins par ruissellement lors de fortes précipitations                          | Commune   |
| Vers chemin du Grandchamps | Régulièrement | Inondation par ruissellement lors de fortes précipitations. Un propriétaire se plaint d'eaux dans son terrain.    | Commune   |
| RD992 direction Murs       | Régulièrement | Inondation de la route par ruissellement lors de fortes précipitations  | Commune   |
| Croisement RD992 et RD19   | Régulièrement | Inondation par ruissellement lors de fortes précipitations avec formation d'un lac contre les remblais des routes | Commune   |
| Route de Pluis La Bruyère  | Régulièrement | Inondation de la route par ruissellement lors de fortes précipitations  | Commune   |

|  |               |  |         |
|--|---------------|--|---------|
| Chef-Lieu<br>Chemin<br>Lelinaz et<br>aval  | Régulièrement | Inondation par ruissellement lors de fortes précipitations. Cunettes obstruées par des « barrages » réalisées par un particulier. Des maisons ont déjà été inondées. | Commune |
| Entre<br>Glandieu et<br>Petit-<br>Glandieu | Régulièrement | Source canalisée qui sort de la montagne   | Commune |
| Entre<br>Glandieu et<br>Petit-<br>Glandieu | Régulièrement | Ruissellements constatés aux mois d'Août et Septembre  | Commune |

Tableau 16: historique des phénomènes crues torrentielles

#### 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.*

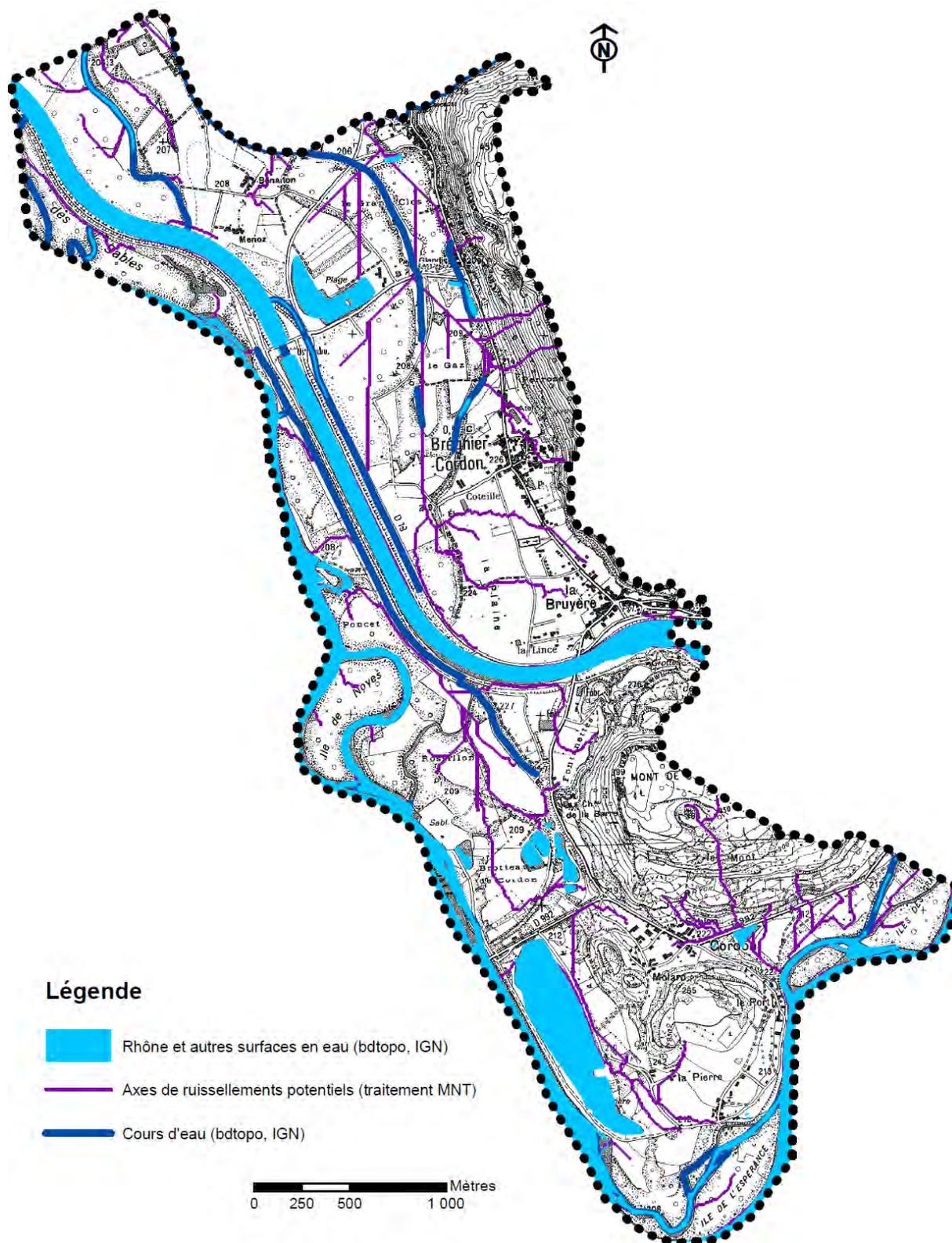


Figure 43 : Carte des écoulements préférentiels

## VI.5 Observations de terrain

### VI.5.1 Secteur de la route de Murs et Gélignieux

A proximité de la route de Murs et Gélignieux, une résurgence est observée dans une propriété et vient se déverser sur la route au-dessus du camping. L'écoulement s'effectue alors dans

une cunette peu marquée et pourrait emprunter toute la largeur de la route. A l'aval, il est capté par des regards d'eaux pluviales. En cas d'obstruction, les eaux s'étalent dans un point bas englobant la route et une extrémité du camping.



### **VI.5.2 Différents secteurs au pied du Mont Cordon**

Aucun axe de ruissellement de surface bien marqué ne draine le massif calcaire du Mont Cordon. Aussi, en son pied sur des terrains alluvionnaires, des résurgences peuvent apparaître, ou de simples dépressions topographiques peuvent concentrer les eaux de ruissellements en cas de fortes pluies.

#### **Secteur des Fontanettes**

Sur le secteur des Fontanettes (nom porté sur la carte IGN), un champ en bordure de la RD 19 constitue un point bas, fermé par la route départementale. Il peut, en cas de précipitations intenses, être le siège d'accumulation d'eau.

Par ailleurs, un chemin débouchant sur la RD 19 et menant au château de la Barre peut concentrer les eaux de ruissellement et être raviné. Il est marqué par l'érosion. Une partie des eaux concentrées par la piste pourrait se déverser devant la face amont d'une propriété au départ de la piste. L'autre partie des écoulements s'étalerait au carrefour avec la RD 19.



Figure 44 : Piste ravinée par l'érosion et maison susceptible d'être atteinte au second plan

#### **Secteur du carrefour RD992 et RD19**

A l'aplomb du carrefour entre les routes départementales RD992 et RD19, une légère dépression concentre les écoulements vers ce carrefour. Des résurgences sont également visibles sur le mur de soutènement en bordure de voirie au pied du champ.

Les écoulements sont en partie captés par une cunette en bord de route puis rejeté, via un passage busé, dans la plaine inondable du Rhône du côté aval du talus routier. Lors de fortes précipitations, la cunette est insuffisante et le carrefour est également atteint par surverse.



Figure 45 : Combe à l'amont du carrefour et direction des ruissellements atteignant le carrefour

### **Secteur de Cordon, route départementale RD 992**

Une légère dépression du terrain peut concentrer les eaux de ruissellement en amont du hameau de Cordon au pied d'un affleurement rocheux.

Ces eaux sont susceptibles de s'étaler sur la chaussée de la RD 992. Cette route semble avoir été aménagée en connaissance du phénomène avec des trottoirs et surtout une chaussée amont plus basse, protégeant ainsi les maisons de l'autre côté de la route d'un éventuel déversement des eaux de surface.



Figure 46 : Route départementale RD 992 à Cordon

### **Secteur de Sablon (chemin du Mont et chemin du Grandchamps)**

Deux axes d'écoulements sont identifiés sur le secteur de Sablon.

Le premier débouche d'une combe marquée et s'écoule jusqu'au chemin du Mont. Lors d'épisodes pluvieux intenses, les eaux captées par cette combe, habituellement sèche, débouche sur une piste recouverte de graviers puis sur une route goudronnée entre des habitations.

De nombreuses grilles et regards ont été installés pour capter ce ruissellement. En cas d'épisode exceptionnel, le chemin du Mont pourrait être inondé mais la probabilité de ce scénario reste faible : les nombreuses grilles semblent pouvoir capter une grande partie des écoulements. Un témoignage d'une riveraine confirme l'absence d'évènement avec formation d'une retenue au niveau du carrefour.



Figure 47 : Premier axe de ruissellement jusqu'au chemin du Mont

Un deuxième axe d'écoulement est formé par une piste forestière tracée au fond d'une combe naturelle. A mi-pente, une source existe et est identifiée sur la carte de l'IGN. En cas de fortes précipitations, les eaux captées par la combe naturelle viennent s'ajouter à l'eau issue de la source.

Ces écoulements dégradent la piste par ravinement comme l'illustre la photo ci-dessous.

Le dévers de la piste génère un basculement naturel des écoulements vers des terrains enherbés. Les eaux ne s'écoulent donc pas jusqu'au départ de la piste, qui reçoit déjà les eaux issues du premier axe de ruissellement.

Au pied des terrains enherbés sur lesquels se déversent les eaux de ruissellement, une maison est en cours de rénovation. Une succession de terrasses en amont et des aménagements de cunettes redirigent les eaux vers l'Est, limitant fortement les risques d'atteinte de l'habitation qui est pourtant édifiée au fond de l'axe de la combe. Pour autant, la possibilité d'atteinte n'est pas écartée en cas d'épisode exceptionnel.

Les eaux redirigées s'écoulent alors dans un champ vers le chemin de Grandchamps où elles ont ensuite tendance à s'accumuler sur ces terrains à faible pente, jusqu'à la route départementale RD 992.



Figure 48 : Piste ravinée (à gauche) – terrasses et cunettes redirigeant les eaux vers l'Est, évitant ainsi la maison au second plan



Figure 49 : Direction du ruissellement vers le chemin de Grandchamps

### **Secteur en bordure de route départementale RD 992**

La bordure de la route départementale RD 992 constitue un point bas (fermé par la RD) où s'accumulent les eaux issues du Mont Cordon.

Au-delà de la cunette de bord de route, on note :

- un champ avec une légère dépression pouvant concentrer les eaux de ruissellement
- une piste dont le départ, dans le sens de la pente, peut concentrer les eaux de ruissellement, à l'origine de son ravinement et d'un étalement de la lame d'eau sur la route départementale.

Ces terrains en bordure de route départementale sont déjà concernés par l'aléa inondation du Rhône.



Figure 50 : Combe dans un champ et cunette en bord de la RD 992



Figure 51 : Piste dans le sens de la pente, ravinée par des écoulements de surface

### **VI.5.3 Secteur du chef lieu, chemin de Lelinaz (source)**

A proximité des terrains de tennis, une source alimente un axe de ruissellement traversant le chef-lieu.

Au départ de cet axe de ruissellement, où celui-ci est encore peut marqué, un champ pourrait être inondée par accumulation des eaux. Des habitations en bordure de ce champ pourraient alors être inondées. A noter que la commune signale des inondations sur ce secteur.

A l'aval, l'axe de ruissellement suit son cours entre les habitations. Le gabarit de l'axe semble adapté aux écoulements qui restent quoi qu'il en soit « régulés » par l'inondation du prè à l'amont et la succession d'ouvrages hydrauliques (buses et autres franchissements).

La commune signale des inondations dues à des « barrages » réalisés par des particuliers. Ce type d'aléa, d'origine uniquement anthropique, n'est pas considéré ici.



Figure 52 : Terrains pouvant être inondés vu de l'amont et de l'aval



Figure 53 : Axe d'écoulement passant chez les particuliers

L'axe est ensuite busé sous une entreprise puis débouche à l'aval de la route de la Mairie pour rejoindre la plaine du Rhône.



Figure 54 : Débouché en aval de la route de la mairie de l'axe du ruissellement traversant le chef-lieu

#### **VI.5.4 Secteur de Petit Glandieu (résurgences)**

Sur le secteur de Petit Glandieu, des résurgences ont été signalées par la commune. Elles sortent des falaises en amont des habitations et ont été canalisées car à proximité des enjeux. Les deux résurgences sont illustrées sur la figure suivante. En cas d'épisode exceptionnel durant lesquels la capacité de la canalisation serait insuffisante, des débordements seraient possibles entre les habitations avec étalement sur la route communale.



Figure 55 : Résurgences sur le secteur de Petit Glandieu

#### **VI.5.5 Secteur signalé mais non cartographié**

La commune a signalé des ruissellements dans les jardins et les routes au-dessus de la route du Vieux Port.

Au-dessus de la route du Vieux Port, les propriétés sont en effet construites sur la pente d'un petit versant qui est constitué sur des terrains calcaires. Des résurgences sont alors possibles sur l'ensemble du versant, ce qui explique le ruissellement enregistré lors de fortes précipitations.

En revanche, aucun axe de ruissellement naturel captant et concentrant ces écoulements n'a été relevé. Aussi, tout le versant au-dessus de la route du Vieux Port peut être sujet, compte tenu de sa nature calcaire et sa topologie (propriétés dans la pente), à du ruissellement de surface.

La gestion de ces écoulements, influencés par la microtopographie, relève d'une gestion classique des eaux de surface. En plus des eaux pluviales, il doit intégrer le cumul possible des eaux issues de résurgences. La figure suivante illustre l'aménagement d'un bourrelet en bordure de voirie évitant le déversement vers des propriétés.



Figure 56 : Bourrelet de goudron permettant de guider la lame d'eau ruisselée

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

Tableau 17 : grille de qualification des aléas de ruissellement

### VI.6.2 Aléas résultants

Nombreux secteurs de voirie sont concernés par un aléa ruissellement. Il peut être fort au débouché d'un axe de ruissellement concentré mais devient rapidement faible compte tenu d'une diffusion du flux sur la voirie.

Concernant les enjeux habités, on retient les points suivants.

#### **Secteur de Sablon :**

- La propriété en rénovation est considérée en aléa moyen. Les aménagements en amont permettent une redirection des écoulements vers l'Est. En revanche, en cas de déficience de ces aménagements ou d'un épisode exceptionnel avec érosion des terrasses et/ou dépôts plus importants modifiant la direction des écoulements, la maison pourrait être atteinte car elle est située dans l'axe de la combe naturelle.
- Le chemin du Mont est considéré en aléa faible et pourrait connaître une accumulation d'eau sur moins de 50 cm au niveau du carrefour en cas d'épisodes exceptionnels et d'insuffisances des grilles transversales sur la voirie.

#### **Chef-lieu :**

L'axe de ruissellement issu d'une source à proximité des terrains de tennis expose trois bâtiments au départ du tracé de cet axe, en aval immédiat d'un champ pouvant connaître une accumulation d'eau. L'aléa est qualifié de faible compte tenu de l'étalement de la lame d'eau entraînant une faible hauteur d'eau et de très faibles vitesses.

#### **Petit Glandieu :**

Les cours de deux propriétés sont concernés par un étalement faible de ruissellement en sortie de résurgences. Ces eaux sont aujourd'hui canalisées. En cas de débordement, la lame d'eau pourra s'étaler dans les cours privées puis sur la route communale.

#### **Secteur des Fontanettes :**

La façade amont d'une maison en bordure de piste est exposée à un aléa fort. Une surverse des eaux concentrées par la piste est possible et en cas d'érosion de la piste, l'ensemble du flux pourraient être redirigé vers la propriété.

### ***VI.6.3 Aléa très faible de ruissellement***

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

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

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

## VII Synthèse des événements historiques

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

| Secteur                             | Phénomène         | Date                      | Observation  | Source(s)         | N° Carte |
|-------------------------------------|-------------------|---------------------------|--|-------------------|----------|
| Entre Glandieu et Petit Glandieu    | Chutes de blocs   | 1946                      | Des blocs d'un volume important ont atteint la route en pied de versant  | PPR 1998 Commune  | 1        |
| Entre Glandieu et Petit Glandieu    | Chutes de blocs   | 1954                      | Des blocs d'un volume important ont atteint la route en pied de versant  | PPR 1998 Commune  | 2        |
| Interface Rhône – ruisseau du Gland | Crue torrentielle | 13/02/1990                | Les méandres en aval immédiat de la cascade posent des problèmes (érosion importante). Dans le secteur des lieux-dits des Sables, Benaiton et Menoz l'eau inondait les habitations par 40 cm.  | PPR Arrêté CATNAT | 3        |
| Interface Rhône – ruisseau du Gland | Crue torrentielle | 21/12/1991                | Arrêtés de catastrophes naturelles   | Arrêté CATNAT     | 4        |
| Glandieu                            | Chutes de blocs   | 2008 - 2009               | Un gros bloc s'est décroché dans la cascade  | Commune           | 5        |
| Face Nord du Mont Cordon            | Chutes de blocs   | 2008                      | Un éboulement donnant de gros blocs s'est produit.   | Commune           | 6        |
| Petit Glandieu                      | Chutes de blocs   | 2013                      | Un bloc d'environ 1 m <sup>3</sup> s'est décroché et a roulé jusqu'aux maisons   | Commune           | 7        |
| Entre Glandieu et Petit Glandieu    | Chutes de blocs   | 2015                      | Un bloc d'environ 1 m <sup>3</sup> s'est décroché et a atteint la route  | Commune           | 8        |
| Interface Rhône – ruisseau du Gland | Crue torrentielle | Janvier 2018              | Suite à une succession des précipitations (les plus marquées les 5 et 21/01), l'eau du Gland a débordé dans la plaine. Les eaux étaient à la limite d'atteindre le niveau des maisons de Benaiton. Plusieurs chemins et routes inondées. | Commune           | 9        |
| Croisement RD992 et RD 19           | Ruissellement     | Régulièrement Depuis 2013 | Talus aval de la RD en glissement. Enrochement posé en 2013 par le CCD.  | Commune           | 10       |
| Château de la Barre                 | Chutes de blocs   | régulièrement             | Chutes de pierres sur la RD 19   | Commune           | 11       |
| La Bruyère                          | Chutes de blocs   | régulièrement             | Un éboulis actif (donc alimenté) est connu sur le versant derrière la Poste  | Commune           | 12       |
| Etang station épuration             | Chutes de blocs   | régulièrement             | Un éboulis actif (donc alimenté) est connu   | Commune           | 13       |
| Rue du Vieux Port                   | Ruissellement     | Régulièrement             | Inondation de la chaussée et des jardins par ruissellement lors de fortes précipitations   | Commune           | 14       |
| Vers chemin du Grandchamps          | Ruissellement     | Régulièrement             | Inondation par ruissellement lors de fortes précipitations. Un propriétaire se plaint d'eaux dans son terrain.   | Commune           | 15       |
| RD992 direction Murs                | Ruissellement     | Régulièrement             | Inondation de la route par ruissellement lors de fortes précipitations   | Commune           | 16       |

| Secteur                          | Phénomène     | Date          | Observation  | Source(s) | N° Carte |
|----------------------------------|---------------|---------------|--|-----------|----------|
| Croisement RD992 et RD19         | Ruissellement | Régulièrement | Inondation par ruissellement lors de fortes précipitations avec formation d'un lac contre les remblais des routes  | Commune   | 17       |
| Route de Pluvis La Bruyère       | Ruissellement | Régulièrement | Inondation de la route par ruissellement lors de fortes précipitations   | Commune   | 18       |
| Chef-Lieu Chemin Lelinaz et aval | Ruissellement | Régulièrement | Inondation par ruissellement lors de fortes précipitations. Cunettes obstruées par des « barrages » réalisées par un particulier. Des maisons ont déjà été inondées. | Commune   | 19       |
| Entre Glandieu et Petit-Glandieu | Ruissellement | Régulièrement | Source canalisée qui sort de la montagne   | Commune   | 20       |
| Entre Glandieu et Petit-Glandieu | Ruissellement | Régulièrement | Ruissellements constatés aux mois d'Août et Septembre  | Commune   | 21       |

*Tableau 18 : 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).

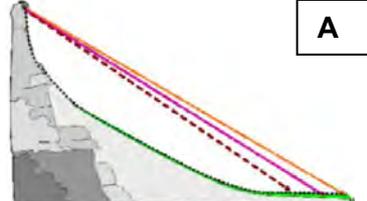
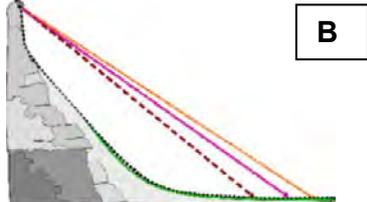
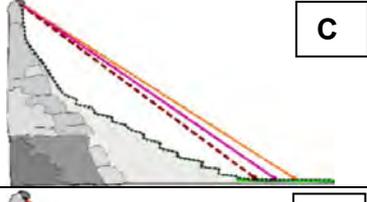
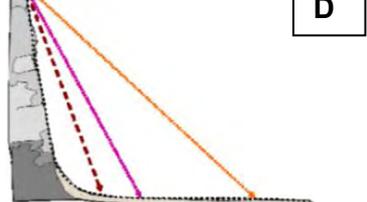
#### a) Intensité

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)<br><i>Valeurs indicatives à adapter par l'expert en fonction du terrain</i>   |       |        |
|--|---|-------|--------|
|  | Fort  | Moyen | Faible |
|  <b>A</b> | 34°   | 32°   | 30°    |
|  <b>B</b> | 38°   | 35°   | 33°    |
|  <b>C</b> | 36°   | 34°   | 32°    |
|  <b>D</b> | Cas particulier faisant l'objet d'un projet de recherche par l'IRSTEA dans le cadre du programme Rock the Alps (projet Interreg).<br>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  |
|---------------------------------------|--|
| <b>Faible</b>                         | De l'ordre d'un bloc de l'aléa de référence tous les 100 ans |
| <b>Moyen</b>                          | De l'ordre d'un bloc de l'aléa de référence tous les 10 ans  |
| <b>Fort</b>                           | De l'ordre d'un bloc de l'aléa de référence tous les ans     |

**d) Probabilité d'occurrence**

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

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

**e) Aléa résultant**

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

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

## VIII.2 Annexe 2 : Description du modèle Rockyfor3D

### Outils

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

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

### Forme du bloc

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

### Chute libre parabolique

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

### Rebond sur la surface de la pente

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

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

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

Les constantes utilisées sont :

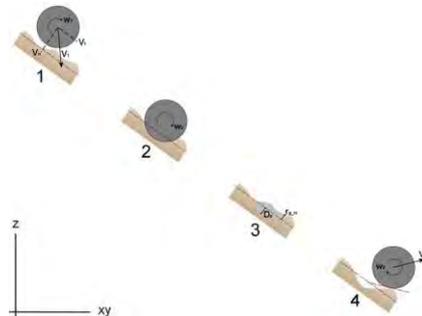
- $k = 1.207$  (constante représentant la forme sphérique du bloc)
- $B = 1.2$  (paramètre de compressibilité du matériau touché ; varie peu pour les différents matériaux)

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

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

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

où,



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

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

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

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

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

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

où  $\rho_{soil}$  est la densité du matériel impacté (en kg/m<sup>3</sup>) et calculé avec la formule,

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

Cette fonction donne des valeurs entre 1500 kg/m<sup>3</sup> pour des sols fins et de 2500 kg/m<sup>3</sup> pour la roche mère.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

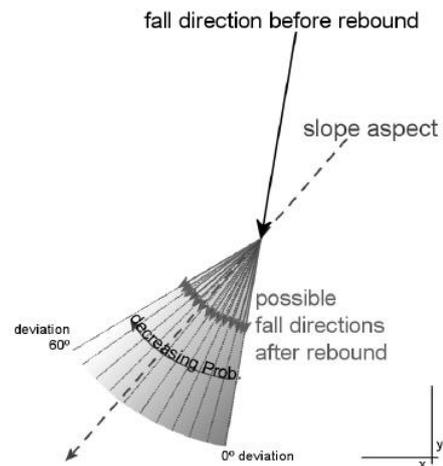
Tout comme dans Pfeiffer et Bowen (1989), l'angle de la pente sur le lieu du rebond est uniformément diminué de façon aléatoire lors de chaque rebond. Cependant, la réduction maximale de l'angle de pente est fixée à 4°. Le roulement est représenté par une séquence de rebonds sur une faible distance,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

### Calcul de la direction de chute

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

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

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



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

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

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

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

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

### **Paramètres de sols**

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

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

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

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

### VIII.3.1 Présentation générale du logiciel

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

Il s'agit d'un logiciel très largement utilisé de par le monde et bénéficiant vraisemblablement de la plus grande communauté d'utilisateurs. Son utilisation est approuvée aux Etats-Unis par la FEMA (Federal Emergency Management Agency)<sup>2</sup> 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*

---

<sup>2</sup> 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)