



Université de Strasbourg

Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg

Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre

Institut de Physique de Globe de Strasbourg

MODELISATION DE SCENARIOS D'ALEA LAVE TORRENTIELLE DANS LE BASSIN DE BARCELONNETTE (FRANCE)

Nicolas KELLER

Mémoire Universitaire

Master 2 Ingénierie et Sciences de l'Environnement

2009/2010

Soutenance le 01/09/2010

Organisme d'accueil

Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST)

Institut de Physique de Globe de Strasbourg (IPGS)

5 rue René Descartes, 67084 Strasbourg Cedex

Tuteur de Stage

Jean-Philippe Malet

Chargé de recherche

CNRS (UMR 7516) - IPGS

Equipe « Géophysique expérimentale »

RESUME

Les laves torrentielles sont des mélanges d'eau, de sédiments et de roches s'écoulant dans les torrents des montagnes, caractérisées par leur complexité physique et mécanique.

Cette étude utilise le modèle rhéologique MASSMOV2D, afin de simuler les phases de **propagation** et de **dépôt**. La difficulté d'anticiper le comportement du phénomène, nous amène à appliquer différents paramètres d'initiation et propriétés rhéologiques. Des scénarios sont alors établis à l'échelle de cinq bassins versants du bassin de Barcelonnette, fortement affecté depuis des siècles par de nombreux événements de laves torrentielles.

Une méthodologie d'analyse des résultats de la modélisation est développée aboutissant à l'établissement de cartes de l'aléa et l'analyse des différents scénarios. L'influence des conditions initiales sur les paramètres permettant de caractériser le fluide sera étudiée, à partir de multiples zones sources sur chaque bassin versant.

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord **Jean-Philippe MALET**, Chargé de recherche CNRS à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, pour m'avoir encadré durant ce stage et supervisé mon travail en me fournissant conseils méthodologiques et recommandations quant à la rigueur nécessaire à la production scientifique.

Je suis aussi très reconnaissant envers **Anne PUISSANT**, du Laboratoire Image, Ville et Environnement de Strasbourg pour son aide matérielle qui s'est avérée indispensable pour mener à bien les modélisations.

Mes remerciements vont aussi à **Alexandre REMAITRE**, Maître de conférences à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, pour ses informations et le partage de son expérience et à **Julien TRAVELLETI**, Doctorant IPGS pour ses précieux conseils concernant les possibilités de traitement des données.

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Localisation du site d'étude.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 3 : Classification des mouvements de terrain selon le type de matériau et la teneur en eau</i>	<i>9</i>
<i>Figure 4 : Entités d'une lave torrentielle</i>	<i>10</i>
<i>Figure 5 : Morphologie d'une lave torrentielle.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 6 : Rhéogramme d'une lave torrentielle boueuse</i>	<i>12</i>
<i>Figure 7 : Logigramme de la méthode</i>	<i>15</i>
<i>Figure 8 : Modifications de MNT pour l'amélioration des lignes d'écoulements</i>	<i>16</i>
<i>Figure 9 : Modification des MNT en cône de déjection.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 10: Localisation du bâti dans le cône de déjection.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 11: Bâti, cône de déjection torrent de Sauze.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 12 : Détection du bâti par différence MNT/MNS</i>	<i>18</i>
<i>Figure 13 : Estimation des volumes par bassins versants</i>	<i>20</i>
<i>Figure 14 : Représentation des possibilités de conditions initiales.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 15: Logigramme de choix des conditions de déclenchement</i>	<i>22</i>
<i>Figure 16 : Dépôts résiduels en zone d'initiation.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 17 : Schématisation de la lave.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 18 : Objectifs de traitements</i>	<i>24</i>
<i>Figure 19 : Méthode d'agrégation des données.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 20 : Méthode de mesure de la distance de parcours.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 21 : Influence du volume sur la distance de parcours des zones sources</i>	<i>26</i>
<i>Figure 22: Distances de parcours par volume</i>	<i>26</i>
<i>Figure 23 : Distance de parcours moyen par bassin versant.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 24 : Aire d'étalement par volumes</i>	<i>27</i>
<i>Figure 25 : Variation de la distance de parcours en fonction de π, par zone source</i>	<i>28</i>
<i>Figure 27 : Variation de distance volumes</i>	<i>28</i>
<i>Figure 26 : Influence du seuil de contrainte</i>	<i>28</i>
<i>Figure 28 : Hauteurs et vitesses maximales par bassin versant.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 29 : Zone « verrou » - torrent de Bourget.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 30 : Vitesses en bord de chenal.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 31 : Distribution des valeurs h dans un échantillon de simulation</i>	<i>30</i>
<i>Figure 32 : Ecart types pour h et v par bassin versant.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 33 : Hauteurs et vitesses moyennes</i>	<i>31</i>
<i>Figure 34: Logigramme d'analyse de tendances.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 35: Influence des gammes de variation</i>	<i>32</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Caractérisation quantitative et qualitative de l'aléa.....</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 2 : Formules de méthodes globales d'estimation de volume</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 3 : Estimation de Q_{max}</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 4 : Paramètres de modélisation et gammes de variation.....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 5 : Volumes de départ par configuration du nombre de vagues</i>	<i>22</i>

RESUME.....	1
REMERCIEMENTS.....	2
LISTE DES FIGURES.....	3
LISTE DES TABLEAUX.....	3
I. INTRODUCTION.....	6
II. CONTEXTE D'ETUDE.....	7
II.1 STRUCTURE D'ACCUEIL ET PROJET CADRE.....	7
III. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE.....	7
III.1 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE.....	7
III.2 PREDISPOSITIONS DU BASSIN DE BARCELONNETTE A LA FORMATION DE L'ALEA.....	7
III.2.1 <i>Caractéristiques des bassins versants étudiés</i>	8
IV. CARACTERISATION DES LAVES TORRENTIELLES.....	8
IV.1 PARAMETRES GENERAUX.....	8
IV.2 CLASSIFICATION.....	9
IV.3 ENTITES FONCTIONNELLES.....	10
IV.4 DYNAMIQUE ET CINEMATIQUE.....	10
IV.4.1 <i>Phase de déclenchement</i>	11
IV.4.2 <i>Phase de propagation</i>	11
IV.4.3 <i>Dépôt</i>	11
IV.5 LOIS DE COMPORTEMENTS POUR L'ETUDE DES LAVES TORRENTIELLES.....	12
IV.5.1 <i>Caractéristiques rhéologiques</i>	12
IV.5.2 <i>Intérêt de l'approche rhéologique</i>	12
IV.6 METHODES D'EVALUATION DE L'ALEA.....	13
IV.6.1 <i>Mise en contexte</i>	13
IV.6.2 <i>Particularité de l'évaluation de l'aléa lave torrentielle</i>	13
IV.6.3 <i>Apport de la modélisation et des scénarios</i>	14
V. MATERIEL ET METHODE.....	15
V.1 TRAITEMENTS PREALABLES.....	16
V.1.1 <i>Données et objectif</i>	16
V.1.2 <i>Traitements initiaux</i>	16
V.1.3 <i>Modification des lignes d'écoulements</i>	16
V.2 RELEVES DE TERRAIN.....	17
V.2.1 <i>Démarche</i>	17
V.2.2 <i>Méthode et traitements</i>	17
V.2.3 <i>Modification des MNT pour les digues « toit plat »</i>	18
V.2.4 <i>Extraction du bâti</i>	18
V.3 ESTIMATION DES VOLUMES D'ECOULEMENTS.....	19
V.3.1 <i>Choix de méthode</i>	19
V.3.2 <i>Intérêt et limites de l'approche</i>	19
V.4 ETABLISSEMENT DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	21
V.5 HYPOTHESES D'INITIATION.....	22
V.6 SIMULATIONS.....	23
V.6.1 <i>Fonctionnement de MASSMOV2D</i>	23

V.6.2	<i>Présentation de Pc Raster</i>	24
V.7	TRAITEMENTS DES DONNEES.....	24
V.7.1	<i>Objectifs</i>	24
V.7.2	<i>Méthode</i>	24
VI.	RESULTATS.....	26
VI.1	ANALYSE DES VARIATIONS DE DISTANCE DE PARCOURS	26
VI.1.1	<i>Influence du volume</i>	26
VI.1.2	<i>Etalement des laves par bassin versant</i>	27
VI.1.3	<i>Influence du seuil de contrainte</i>	28
VI.2	INFLUENCE DES PARAMETRES DE SIMULATION SUR LA VITESSE, LA HAUTEUR ET L'ETALEMENT	29
VI.2.1	<i>Approche sur les valeurs maximales par volumes</i>	29
VI.2.2	<i>Résultats moyens</i>	31
VI.2.3	<i>Influence des paramètres de simulation</i>	31
VI.2.4	<i>Discussion</i>	32
VI.3	SIMULATIONS A L'APEX.....	33
VI.4	MISE EN PLACE DE CARTES D'ALEA	33
VII.	CONCLUSION	34
VIII.	BIBLIOGRAPHIE	35
IX.	ANNEXES	39

I. INTRODUCTION

Les laves torrentielles ont attiré l'attention des géomorphologues depuis plus d'un siècle, comme principal agent de formation des cônes de déjection dans les zones de montagne (Takahashi, 1991). L'importante augmentation de l'urbanisation dans les massifs montagneux, et particulièrement dans les zones proches des exutoires des torrents, ont induit nombre d'évènements dramatiques au cours du 20^{ème} siècle.

Les mouvements de terrains sont une importante source de catastrophes naturelles et de risques pour les sociétés dans les régions de montagne à travers le monde (Guariguata, 1990 ; Zhou et al. 2003). Les laves torrentielles sont le type de mouvement de terrain le plus dangereux, dans la dernière décennie, près de 30 000 personnes sont mortes de leurs conséquences engendrant des centaines de millions d'euros de dommages (Jakob, 2005).

En France, environ 4500 communes sont soumises à l'aléa torrentiel et 3000 aux mouvements de terrains. (Kert, 1995). Dans les marnes noires du sud du pays, et particulièrement dans la vallée de l'Ubaye, contexte de l'étude, les mouvements de terrain présentant des caractéristiques d'écoulements sont fréquents (Malet et al., 2002).

Pour la réduction du risque, lié aux laves torrentielles, l'étude de l'aléa à un rôle primordial (Kappes et al., 2010). Nous allons, à l'échelle de plusieurs bassins versants du bassin de Barcelonnette, simuler, à l'aide du modèle MASSOV2D, des **scénarios** de laves torrentielles par liquéfaction de volumes aux propriétés rhéologiques multiples. **L'échelle d'étude** est transitoire, entre les études limitées à un bassin versant, ou cône de déjection et les applications régionales probabilistes de déclenchement et de spatialisation de l'aléa.

Notre démarche d'évaluation des distances de parcours du fluide ainsi que de la significativité des variables initiales sur les caractéristiques de hauteurs et de vitesses permettra d'effectuer une quantification de l'influence des paramètres d'initiation et de mesurer leur influence sur les résultats.

Dans ce contexte, nous allons, après présentation de la structure d'accueil, et du projet cadre de ce travail, décrire le **contexte géographique** et les principales **caractéristiques des laves torrentielles**. Basé sur des informations issues de travaux antérieures dans la vallée de l'Ubaye et à travers le monde, nous allons proposer **méthodologie** axée sur les étapes préalables à la modélisation et l'établissement des scénarios aboutissants à des cartes de l'aléa et à l'analyse des résultats.

Enfin, les résultats des **modélisations**, aboutissent à une critique de la méthode et aux perspectives de développement de l'approche.

II. CONTEXTE D'ETUDE

II.1 Structure d'accueil et projet cadre

Ce stage a été effectué à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) (UMR 7516), dans les locaux de l'École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST) au sein de l'équipe « géophysique expérimentale ». Laboratoire où sont développées une grande variété de thématiques en sciences de la terre, l'IPGS traite plusieurs disciplines de la géophysique. Quatre équipes de recherche composent le socle de l'UMR 7516. L'équipe « géophysique expérimentale », sous la responsabilité de Jean Schmittbuhl, contient 14 chercheurs et enseignants chercheurs, 5 ingénieurs techniciens administratifs (ITA) et 12 doctorants. Le développement des méthodes géophysiques, l'expérimentation en géophysique ainsi que l'étude des processus géologiques et géomorphologiques en sont les objectifs.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet Européen "*Mountain-Risks: from prediction to management and governance*". Les objectifs sont l'évaluation quantitative du risque, l'analyse de l'aléa, le management et la maîtrise du risque. Les bassins versants étudiés, se localisent dans la vallée de Barcelonnette, labélisée Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versants (OMIV), par l'Institut national des Sciences de l'Univers (INSU).

III. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

III.1 Description de la zone d'étude

La vallée de l'Ubaye se situe au Sud-est de la France en région Provence-Alpes-Côte d'Azur dans le département des Alpes de Haute-Provence (04). D'axe Est/Ouest, elle s'étend sur 80 km entre la frontière italienne à l'Est et Serre ponçons à l'Ouest. Le bassin de Barcelonnette, peuplé de 7700 habitants (INSEE, 2007), se localise dans la zone Est de la vallée et s'étend sur 20km entre Jausier et Méolans, avec des altitudes variant entre 1100 et 3000 mètres. Le climat est qualifié de montagnard à influence méditerranéenne et à tendance continentale. Le bassin est soumis à de très nombreux travaux de recherches dans les domaines des instabilités de versants et de l'activité torrentielle. Ce « laboratoire à ciel ouvert » contribue alors à un développement significatif des connaissances scientifiques.

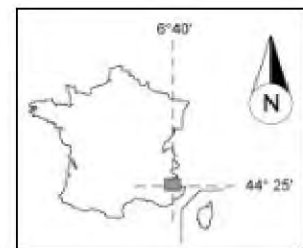


Figure 1 : Localisation du site d'étude

III.2 Prédispositions du bassin de Barcelonnette à la formation de l'aléa

Soumise aux aléas torrentiels et prédisposée aux d'aléas gravitaires (Malet, 2003), le bassin comporte de nombreux appareils torrentiels actifs (Remaître, 2006). Plusieurs facteurs contribuent à ces prédispositions. Dans un premier temps, le **cadre géologique et géomorphologique** se compose de formations marneuses callovo-oxfordiennes (ayant une forte susceptibilité à la météorisation et à l'érosion (Antoine et al., 1995)), de formations superficielles glaciaires et périglaciaires et de nappes de charriages, au sein de fortes pentes (supérieures à 20°, dans les parties amont). Le **contexte climatique**, apporte sur ce socle des précipitations de 700 à 800mm de moyenne annuelle avec une forte amplitude thermique diurne (15,3° en moyenne) qui conduit à une considérable désagrégation

superficielle de la roche et des sols fournissant une quantité importante de matériaux mobilisables par les torrents (Remaître, 2006).

Enfin, le nombre et l'intensité des événements peuvent être fortement aggravés par l'**action anthropique**. Les déboisements et défrichements au 18^{ème} et 19^{ème} siècle liés à la pratique de l'élevage ovin extensif ont contribué à une forte hausse de l'action érosive et à l'augmentation du nombre d'événements torrentiels catastrophiques. Les nombreux travaux de reboisement (plus de 200 000 ha) et l'intense correction du lit des torrents par les services RTM, suite à la loi de 1882, ont abouti à une baisse significative des dégâts et du nombre d'événement au 20^{ème} siècle.

Les phénomènes torrentiels de tous types y restent cependant fréquents. Depuis 1850, 576 événements torrentiels dont une centaine de laves torrentielles ont été référencés dans le bassin de Barcelonnette, ainsi que 132 mouvements de terrain (Amiot & Nexon, 1995).

III.2.1 Caractéristiques des bassins versants étudiés

Dans ce contexte, cinq bassins versants de la vallée de l'Ubaye feront l'objet de cette étude: RIOU CHANAL (RC), RIOU BOURDOUX (RB), SAUZE (SAU), SANIERES (SAN), et BOURGET (BO) (annexe 1).

Concernant le **choix des bassins versants**, ils font partie, des **appareils les plus actifs** pour les laves torrentielles de la vallée. Les données historiques sur les phénomènes torrentiels de la vallée de l'Ubaye rendent compte, pendant la période (1850-2004)

de 27 événements sur Riou-Bourdox, 18 sur Sanière, 6 sur Bourget, 9 sur Sauze et 3 sur Riou-Chanal. Trois d'entre eux sont situés en adret (Riou-Bourdox, Sanières, Bourget). Sauze et Riou-Chanal se localisent en versant ubac. Leurs propriétés morphologiques, et leurs gradients de pente distincts (Figure 2), dans ce contexte de forte activité torrentielle, confèrent alors à ces bassins versants des caractéristiques particulièrement propices à l'application de notre méthode.

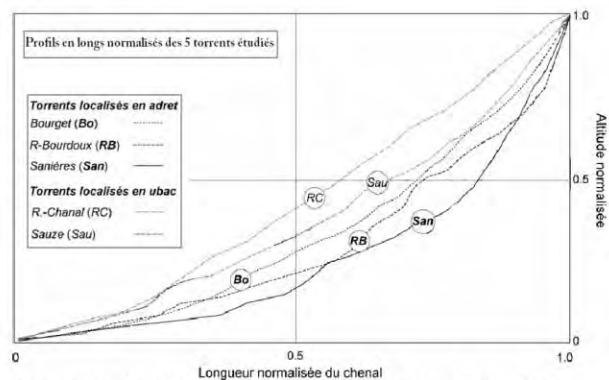


Figure 2 : Profils en long des cinq torrents étudiés (modifié de Remaître, 2006)

IV. CARACTERISATION DES LAVES TORRENTIELLES

Les torrents peuvent être le siège de plusieurs mécanismes (laves torrentielles, écoulements hyper concentrés, écoulements chargés et eaux claires). Pour définir les caractéristiques essentielles à la connaissance de l'aléa, nous développerons ses principales particularités physiques, sa dynamique, et ses méthodes d'expertises.

IV.1 PARAMETRES GENERAUX

Les laves torrentielles sont des mouvements de terrain de type écoulement, caractéristiques des zones de montagnes, au caractère imprévisible, soudain et violent.

Elles sont généralement définies comme un mouvement de masse chargé d'eau, d'argile et de matériaux minéraux et organiques grossiers (Hungry et al., 1984 ; Van Dine, 1985 ; Besson, 1996), le

flux étant contrôlé par la gravité et possède les propriétés d'un écoulement visqueux et torrentiel s'écoulant dans un chenal (Begueria, 2009). Nous allons tout d'abord caractériser ce type d'écoulement face aux autres mécanismes.

IV.2 CLASSIFICATION

Les laves torrentielles ont un comportement singulier et sont situés entre les écoulements hyperconcentrés et les glissements de terrain (figure 3). La classification de Meunier (1991) permet de situer le phénomène au sein d'une représentation synthétique, prenant en compte le type de matériaux et la teneur en eau.

La position des laves torrentielles au sein de cette classification ainsi que les nombreuses observations d'événements rendent compte de la difficulté de schématiser une lave type tant les conditions de propagations et les caractéristiques de l'écoulement sont variables au sein d'un même événement et fortement dépendantes des caractéristiques régionales. Les laves torrentielles se distinguent des mouvements de terrain par leurs vitesses plus élevées et leurs mode de déplacement, il s'agit d'un écoulement et non pas d'un glissement avec fracturation d'une masse. Elles sont aussi en discontinuité très nette avec les écoulements hyper-concentrés par leur concentration volumique (30-70% de part solides contre un maximum de 30% pour ces derniers) (Meunier, 1991).

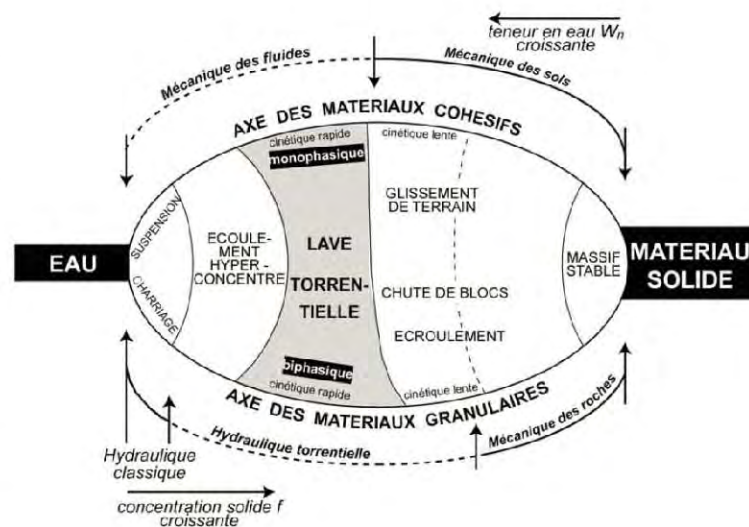


Figure 3 : Classification des mouvements de terrain selon le type de matériau et la teneur en eau. (Meunier, 1991)

La capacité pour un torrent de former des laves torrentielles dépend alors de la quantité de **matière mobilisable** susceptible de se mélanger à l'eau. Les conditions géologiques sont un paramètre central contrôlant l'occurrence d'un événement, particulièrement quant aux apports sédimentaires. La fréquence des laves torrentielles dépend alors de la rapidité de disponibilité en matériel (Jomelli, 2001). La fourniture en matériaux est étroitement liée à l'intensité et la durée des cycles gel/dégel, d'où l'activité plus intense des versants adrets. Une concentration d'argile suffisante pour créer **une matrice** (entre 15 et 55 %) est nécessaire pour engendrer des Laves (Bonnet-Staub, 1998), qui se forment sur de fortes pentes (10-20%) et ont des densités élevées (1.8-2.2 T/m³).

Enfin, la composition granulométrique divise deux types de laves torrentielles distinctes : elles sont **boueuses** ou « **cohésives** » lorsqu'elles se composent de plus de 20% de limons et d'argiles, en dessous de ce seuil, elles sont dites **granulaires** (Bonnet –Staub, 1998).

IV.3 ENTITES FONCTIONNELLES

Une lave torrentielle peut être schématiquement décomposée en **trois entités morphologiques fonctionnelles** distinctes :

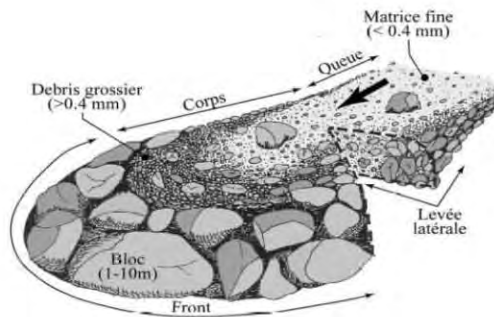


Figure 4 : Entités d'une lave torrentielle (Bardou, 2002)

Le front se compose des éléments les plus grossiers qui roulent ou glissent, poussés par le flux. Leur concentration résulte des processus de ségrégation et de migration durant l'écoulement (Pierson & Costa, 1987) et varie entre 30 et 65% (Hutter et al. 1996). Il peut être identifié comme un frein à l'écoulement mais également une force motrice importante. Généralement précédé d'écoulements hyperconcentrés, l'infiltration de particules d'air entre les blocs peut influencer la cinématique de son déplacement dans le cas de laves granulaires.

Le corps constitue la partie centrale, et se compose d'un mélange relativement homogène et entièrement saturé de particules plus fines. On peut cependant y observer localement des éléments plus grossiers qui peuvent être transportés par « portage ». Il forme **la part la plus importante du volume** de la lave, symbolise le comportement global de l'écoulement et est souvent associé à des bourrelets latéraux déposés au fur et à mesure de la progression de la coulée (Meunier, 1991).

La queue achève le passage de la lave et se compose d'une granulométrie semblable à un écoulement hyper-concentré, ne reflétant donc pas les lois d'écoulements d'une lave torrentielle. Elle « efface » généralement une part importante des dépôts laissés par le corps dans le chenal et peut être suivie d'un autre front (cf 4.1).

IV.4 DYNAMIQUE ET CINEMATIQUE

L'écoulement non linéaire induit la présence de **plusieurs fronts** (bouffées) (figure 5) dont le nombre, difficilement prévisibles (généralement entre 2 et 6), est séparé d'écoulements hyper-concentrés et reflète le caractère transitoire du phénomène (Bardou, 2002). La grande vitesse d'écoulement (5- 20 m.s⁻¹) et la densité élevée produit une capacité de transport très importante, pouvant entraîner arbres et blocs de plusieurs mètres cubes. La composante motrice de la force gravitaire permet ainsi d'accélérer les écoulements, d'entraîner les particules sédimentaires et les éléments grossiers volumineux. Dans les cas extrêmes, les volumes de matériaux transportés pour un événement varient de moins de 100 m³ à plus de 100 000 m³. L'importante énergie développée permet alors d'arracher des matériaux constituant les berges, procurant une alimentation en sédiments tout au long du parcours. Le passage d'une lave torrentielle dans un torrent est beaucoup plus morphogène que les

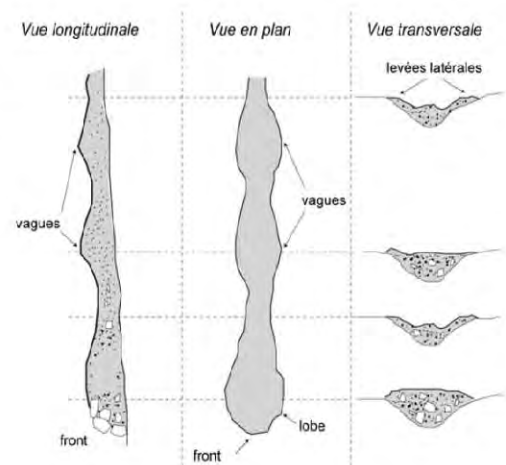


Figure 5 : Morphologie d'une lave torrentielle (Remaître, 2006)

autres écoulements et laisse des formes caractéristiques (Veyrat-charvillon, 2005) sur les berges dans la zone de propagation, ainsi que dans la zone de dépôt.

Un événement peut être décomposé en trois phases **distinctes**, reflétant trois zones morphologiques au sein du bassin versant : zone de production, zone de transport et zone de dépôt. Ces trois phases composent la cinématique des laves torrentielles.

IV.4.1 Phase de déclenchement

Les causes de déclenchement peuvent être des précipitations importantes, la fonte de glaces, ou la combinaison des deux. L'état hydrologique initial du bassin versant est bien évidemment important, les conditions seront alors favorables en sol initialement saturé, favorisant le déclenchement du ruissellement. L'eau est donc **l'élément primordial**, associée à des phénomènes météorologiques intenses et concentrés (Malet et al., 2005). Une quantité suffisante de **matériaux mobilisables** doit être disponibles dans le bassin versant (principalement dans et sur les berges du lit), et généralement, on n'identifie pas de zones ayant fournis l'essentiel du volume de la lave (Coussot, 1996). L'initiation du flux peut se produire par ruissellement généralisé, rupture d'embâcle, glissements de terrains, ou liquéfaction de mouvements de terrains lents par déformation du matériau soumis à une contrainte prolongée (Malet et al., 2005). La **susceptibilité** d'un bassin versant à l'initiation de laves torrentielles peut alors être estimée en fonction de la pente, des caractéristiques géologiques et géomorphologiques du socle, de la couverture végétale, et de l'exposition (Kappes et al., 2010).

IV.4.2 Phase de propagation

Durant la phase de **propagation**, les laves torrentielles prennent en charge des matériaux dans le chenal et déposent des sédiments sur les berges et dans le lit. Excepté les zones où le chenal est creusé dans des roches cohérentes, il est très rare que l'on puisse observer un tronçon où il n'y a eu que du transport (Bardou, 2002). La zone de propagation est fortement contributive en sédiments constitutifs de la lave et apporte la grande majorité des volumes, comparée aux apports des versants par ruissellement et grands glissements, ainsi, de petits glissements sont généralement visibles le long du parcours. La nature du flux, et son comportement lors de la phase de propagation peuvent être modifiés en fonction de la concentration et de la taille des sédiments pris en charge.

IV.4.3 Dépôt

Les **dépôts** se localisent dans et autour du chenal lors de la phase de propagation, mais l'essentiel des matériaux, lorsque les volumes pris en charge sont suffisants, se déposent dans les cônes de déjection. Les laves torrentielles peuvent cependant interrompre leurs parcours avant d'atteindre le cône de déjection. Une faible pente, un élargissement significatif du chenal, un changement brutal de direction entraînant perte de vitesse, un débordement important au dessus des berges, ou la présence de matériaux bloquant le flux dans le chenal peuvent conduire à l'arrêt de la lave.

→ La modélisation des différentes phases des laves torrentielles nécessite d'aborder des lois permettant de caractériser le comportement singulier de l'écoulement.

IV.5 LOIS DE COMPORTEMENTS POUR L'ETUDE DES LAVES TORRENTIELLES

IV.5.1 Caractéristiques rhéologiques

La **rhéologie** étudie l'écoulement et la déformation des corps sous l'effet des contraintes qui leurs sont appliqués, prenant compte de l'intensité de ces contraintes et de leur variation au cours du temps (Couarraze, G. & Grossiord, J.L, 1983). L'écoulement d'une lave torrentielle et de type **non-newtonien**, en raison de sa viscosité, de la force de friction des particules et de la rigidité initiale du mélange (Meunier, 1994). Le **seuil de contrainte** se définit comme la pression qui doit alors être appliqué pour que la masse soit mise en mouvement. Cette caractéristique de comportement conditionne le déclenchement du mélange, mais aussi ses conditions d'arrêt sur des pentes [1-18 %] (Bardou, 2002). Les connaissances actuelles permettent de calculer les caractéristiques d'écoulement en régime uniforme pour le corps de la lave boueuse, cependant limité par les singularités du lit et le caractère fortement granulaire de leurs fronts.

Les matériaux transportés, d'une grande hétérogénéité granulométrique, se trouvent donc englobés dans une **matrice**. Les propriétés rhéologiques de celle-ci sont donc essentielles afin de mieux comprendre les mécanismes de propagation (Coussot & Meunier, 1995). De nets progrès depuis plus d'une décennie (Malet et al., 2002) permettent d'obtenir nombre de modèles rhéologiques issus d'échantillons de terrains ou artificiels, à l'aide de rhéomètres ou sur plan incliné. Pour les laves torrentielles, les études montrent qu'en fonction de leurs compositions granulométrique, trois modèles de comportements peuvent être appliqués: **Herschel Buckley** et **Bingham** (figure 6) (forte proportion d'argiles), **Coulomb** (gamme plus étendue) et **Voellmy** (écoulement purement frictionnel). Les laves torrentielles boueuses, répondent à des comportements représentés par la loi de Herschel-Buckley :

$$\tau = \tau_c + K \dot{\gamma}^n$$

τ : Contrainte de cisaillement [PA]

τ_c : Seuil de contrainte [PA]

K : Consistance [s-1]

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement

$n = 1$ pour Bingham

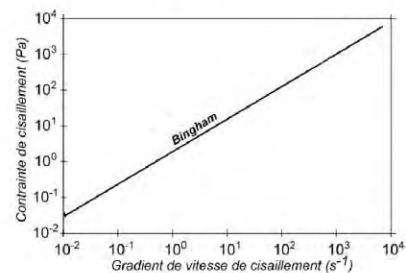


Figure 6 : Rhéogramme d'une lave torrentielle boueuse selon la loi de Bingham

IV.5.2 Intérêt de l'approche rhéologique

L'approche rhéologique pour l'étude de l'aléa lave torrentielle est prédominant, car reproduisant au mieux sa complexité. Elle permet de reproduire les caractéristiques d'écoulement « moyennes » du fluide. Le comportement distinct de la tête, du corps

et de la queue sont simplifiées par des paramètres reproduisant le corps de la lave. Ceci signifie que l'on néglige un ensemble d'effets « perturbateurs » tels que la présence de très gros blocs, l'hétérogénéité de la concentration solide et de la granulométrie du matériau, les glissements engendrés aux parois, la fracturation, la ségrégation et la sédimentation.

Cependant, le comportement non-uniforme (cf 3.4), au cours de son parcours, induit des paramètres rhéologiques changeants difficilement quantifiables. Les limites de l'approche rhéologique pour la modélisation des laves torrentielles se situent à ce niveau. Les modèles, permettant pour certains de

simuler différentes rhéologies, appliquent des paramètres constants au cours d'un évènement simulé.

IV.6 METHODES D'EVALUATION DE L'ALEA

IV.6.1 Mise en contexte

La définition communément admise aujourd'hui : Risque = aléa*vulnérabilité, ou l'aléa se définit par la probabilité de survenue d'un évènement naturel sur un espace donné (Lefèvre et Schneider, 2003), et la vulnérabilité comme la propension d'une société à subir des dommages en cas d'une manifestation naturelle (D'Ercole, 1994b), s'applique alors aux laves torrentielles avec certaines particularités :

IV.6.2 Particularité de l'évaluation de l'aléa lave torrentielle

Délimiter les zones à risque pour l'aléa lave torrentielle nécessite d'adopter une **démarche pluridisciplinaire** liant analyse géomorphologique (délimitation du cône de déjection et analyse des propriétés géologiques), recherche de témoignages oraux et étude de données historiques (fournissant quantité d'informations, manquant cependant souvent de précisions). La transposition de connaissances accumulées sur des bassins versants voisins peut permettre de palier le manque d'informations, et les aspects qualitatifs et quantitatifs de ces données contribueront à la qualité et la précision de l'expertise.

L'aléa lave torrentielle peut être **physiquement** caractérisé selon de nombreux paramètres : (hauteur, vitesse, vecteur vitesse, débit, force d'impact, viscosité, taille des particules, volumes accumulés, densité), auxquels s'ajoute la distance de parcours (l_{fan}) caractérisant les mouvements de terrains.

Dans une démarche d'étude des risques, ces écoulements ont deux paramètres permettant d'appliquer une matrice de classification : (h) hauteur et (v) vitesse. La définition des bornes à utiliser pour classer l'aléa est variable selon les auteurs. Nous présentons dans le tableau 1, les deux principales :

				Probabilité d'occurrence		
Intensité	BUWAL (1997)	Rickenmann (2005b)		Elevée	Moyenne	Basse
	h > 1m ou v > 1m/s	h > 1m ou v > 1.5m/s	Forte	Fort	Fort	Modéré
	h < 1m ou v < 1m/s	h > 1m et 0.4s < v < 1.5m/s	Moyenne	Modéré	Modéré	Faible
	non existant	h < 0.4m ou v < 0.4m/s	Basse	Faible	Faible	Très faible
				Très faible	Très faible	Très faible

Tableau 1 : Caractérisation quantitative et qualitative de l'aléa (modifié de Hurlimann, 2008)

La particularité des matrices d'évaluation du niveau d'aléa est que **le risque très faible est inexistant**. Ceci s'explique par la force d'impact potentiellement élevée même pour des hauteurs et des vitesses jugées faibles. La présence **d'éléments à risques** (enjeux) sur la zone de dépôt (partie actuellement active du cône de déjection), et l'évaluation de leurs **vulnérabilités** permettra d'aboutir au croisement des informations et à la spatialisation du risque.

Les infrastructures et le bâti sont structurellement très vulnérables. Parmi les 7 types d'impacts sur le bâti (Leone, 2005), les laves torrentielles soumettent aux structures des contraintes par poussée ou

par accumulation, et l'application de différentes méthodes d'analyse induit d'importantes différences dans l'estimation de la vulnérabilité de l'aléa (Akbas & Blahut, 2009).

Face aux aléas torrentiels, la protection par **réduction de l'aléa** (réduction de la fréquence et de l'intensité), **de l'exposition**, de la **vulnérabilité des enjeux** (mesures structurelles et non structurelles) sont envisageables. La protection par réduction de l'aléa s'avère historiquement prédominante. Sur les torrents alpins, les plus anciens et les plus nombreux des ouvrages mis en place sont **les seuils** et sont destinés à stabiliser le profil en long du torrent (Besson, 1996), que complètent plages de dépôts, reboisements et aménagements de berges. Il reste cependant très compliqué de prédire l'efficacité des ouvrages de protection (Yuanfan, 2007). L'exposition quant à elle sera gérée par modification de plans d'occupation des sols (POS).

IV.6.3 Apport de la modélisation et des scénarios

Dans ce contexte, la modélisation a un double rôle, de connaissance de l'aléa et d'aide à la décision. Reproduire par simulation numérique un aléa naturel d'une telle complexité, tant par ses possibilités de genèse, que par ses propriétés hydrodynamiques multiples lors de la phase de propagation, conduit inévitablement à un certain nombre d'incertitudes.

Les difficultés de modélisation tiennent à l'apport de matériaux en différents endroits du chenal et aux propriétés changeantes du flux lors de la propagation, ce qui oblige l'utilisation de différentes propriétés rhéologiques pour simuler différentes phases de l'événement (Crosta, 2000).

Les modèles de propagation et de dépôts récents, existants pour simuler les laves torrentielles boueuses : **BING** (Malet, 2003 ; Remaître, 2006), **DFEM** (Rickenmann et al., 2006), **FLO-2D** (Rickenmann et al., 2006 ; Bello et al., 2003 ; Hübl & Steinwentner, 2000 ; Sosio et al., 2006), montrent les possibilités des modèles rhéologiques et la finesse croissante de leurs résultats.

MASSMOV2D (Beguieria et al., 2009), simple d'utilisation, permettant d'exploiter les résultats directement avec un Système d'Information Géographique (SIG), et fournissant une bonne précision de résultat, sera utilisé dans cette étude. Les résultats de la modélisation seront associés à de volumes de départ multiples, ne fournissant pas de probabilité d'occurrence mais permettant, par ces volumes, de caractériser l'amplitude de l'aléa.

La formulation et l'analyse de différents jeux de **paramètres de scénarios réalistes** sont considérés comme la part la plus importante de l'évaluation de l'aléa (Petrascheck & Kienholz, 2003). Ces différentes propriétés peuvent ainsi être utilisés par la mise en place de scénarios à l'échelle de plusieurs torrents du bassin possédant des caractéristiques sédimentaires proches. Notre démarche fournira alors un **nombre conséquent de possibilités** de variation des propriétés d'un événement. La stratégie d'étude et de cartographie des résultats maximaux des simulations, apporte une solution pour la réduction des incertitudes dans le travail de gestion de l'aléa.

V. MATERIEL ET METHODE

Dans ce cadre géographique et scientifique, nous allons, détailler les étapes de la méthodologie mise en œuvre. Nous aborderons les **traitements préalables** réalisés sur les données, complétés par l'étude menée sur le **terrain** et l'estimation des **paramètres d'écoulement**. Puis, nous détaillerons la mise en place du **protocole expérimental** pour l'élaboration de **scénarios** et enfin, le **traitement** final des données.

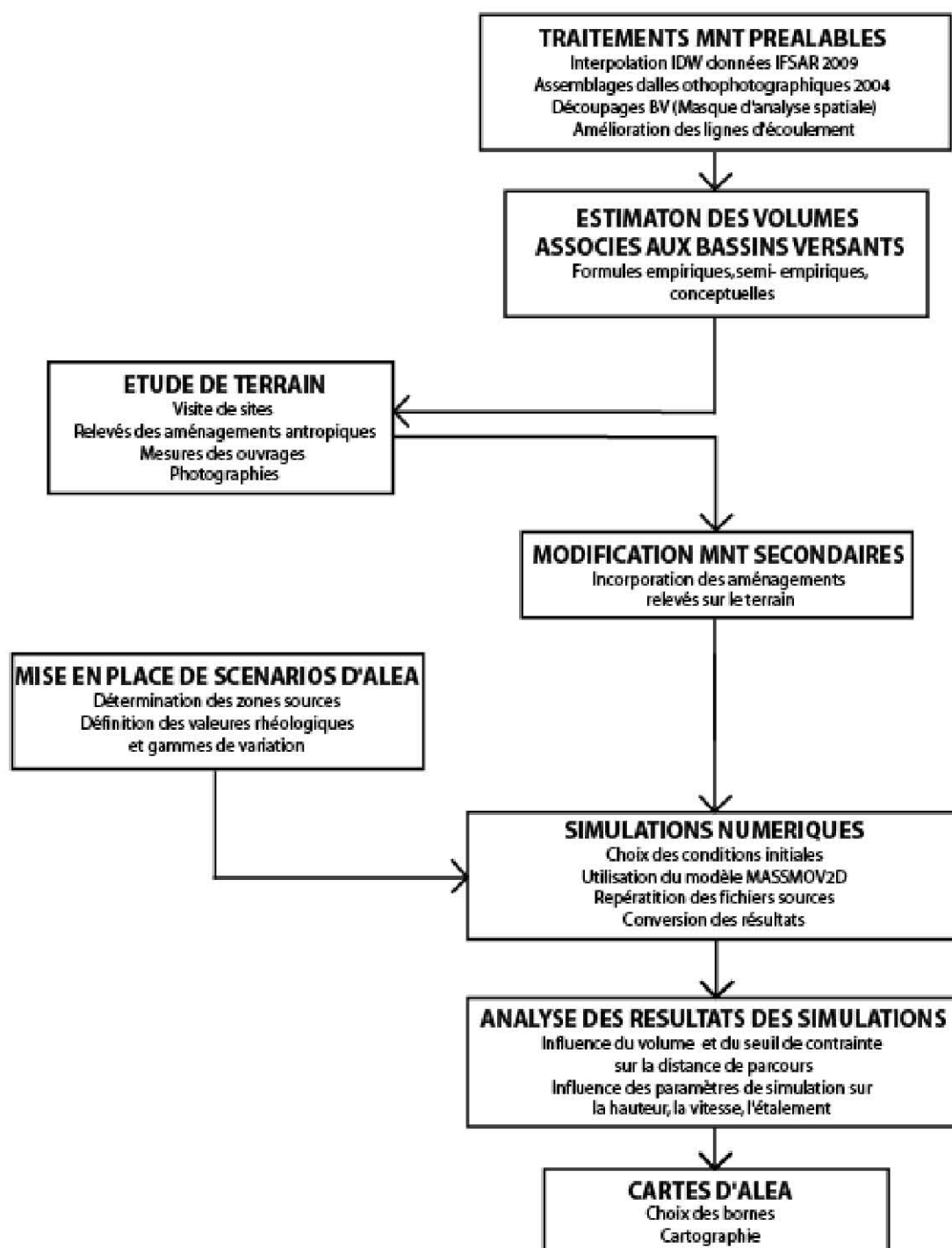


Figure 7 : Logigramme de la méthode

V.1 TRAITEMENTS PREALABLES

V.1.1 Données et objectif

Les traitements effectués ont été réalisés à partir de données couvrant la vallée de l'Ubaye : scan25 (2002), MNT et MNS issus de relevés IFSAR (2009), dalles ortho-photographiques (2004), à l'aide des outils logiciels suivants : Arcmap9.3 (ESRI), PC raster 3.0.0. Ces manipulations préalables ont pour objectif d'**améliorer la qualité** des données initiales.

V.1.2 Traitements initiaux

Deux délimitations des bassins versants ont été effectuées à l'échelle 1/2000, tout d'abord le **bassin hydrographique** (BH) permettant d'obtenir les caractéristiques nécessaires aux estimations de volumes initiaux, puis un **bassin versant élargis** (BVE) à partir de l'apex qui sera utilisé pour les simulations, permettant aux laves torrentielles de s'épandre dans le cône de déjection.

Les interpolations ont été réalisées par la méthode **Inverse-Direct-Weighting** (IDW), adaptée à la densité du nuage de points initial (Childs, 2004) pour un maillage de 5 mètres, après découpage du nuage de points IFSAR (2009) et validées par comparaison des courbes de niveau issues du SCAN25 (2004).

V.1.3 Modification des lignes d'écoulements.

L'encaissement des chenaux d'écoulement, leurs sinuosité, et parfois leurs faibles largueur produit nombre d'erreurs quant aux directions de flux à l'intérieur du chenal. Le degré de **cohérence de la topographie** aura un rôle important sur les résultats de hauteurs et vitesses du flux simulé, une représentation trop simplifiée de la topographie modifiera les forces influentes sur le flux (Chen, L 1999).

Les incohérences majeures des lignes de directions de flux ont alors été rectifiées en modifiant la valeur du ou des pixels dans les zones mises en cause (figure 8). La cohérence des écoulements à été testé par initiation de glissements à viscosité faible (<10Pa) avec MASSMOV2D, depuis différentes zones sources.

Cette étape de traitement nécessite **une grande attention**, les modifications doivent certes reproduire les écoulements dans les chenaux, mais au risque de modifier certaines irrégularités réelles (notamment le lien entre les bourrelets de berges et versants).

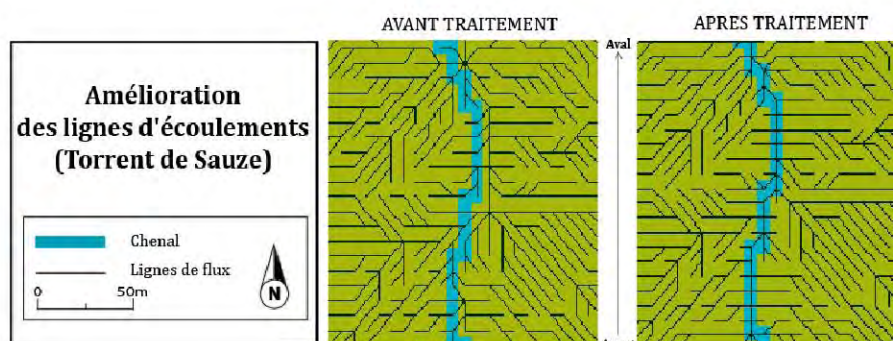


Figure 8 : Représentation de modifications de MNT pour l'amélioration des lignes d'écoulements

V.2 RELEVES DE TERRAIN

V.2.1 Démarche

Le MNT obtenu, ne reproduit pas la diversité et la hauteur réelle des berges des torrents dans les cônes de déjection malgré d'importantes modifications anthropiques. Ces détails géométriques sont **difficilement identifiables** sur ortho-photographies, et des relevés de terrain sont nécessaires pour reproduire la topographie réelle (Ghilardi et al., 2001). Afin de palier à ces imprécisions, d'obtenir une représentation **réaliste de la topographie**, et de **référencer les aménagements** effectués sur les berges des torrents, des mesures sur les cinq cônes de déjection concernés ont été effectuées.

V.2.2 Méthode et traitements

Les relevés de terrain effectués du 26/04/2010 au 01/05/2010 ont été réalisés à l'aide d'un GPS pour la localisation des éléments significatifs, et leurs reports sur SIG. Aussi, des mesures de hauteur et dans certains cas de largeur des aménagements de berges ont été effectués sur chaque élément. Les données ont été collectées sur des fiches de terrain (annexe 2).

Certaines variations mineures de niveau sur les berges, difficilement mesurables, engendrent inévitablement une simplification de représentation qu'il est délicat de quantifier. Chaque section représentative est alors jugée homogène.

L'objectif étant d'améliorer la précision du MNT dans les **cônes de déjection**, les mesures ont été prises à partir de l'**exutoire** jusqu'à l'**apex** en effectuant le trajet vers l'amont en rive gauche, puis la descente rive droite. La **dissymétrie** fréquente des aménagements de berges des deux rives impliquant des relevés distincts.

Différents types de berges (annexe 3) ont été observés. Les aménagements « **massifs** » concernent les zones les plus à l'aval, et sont constitués de digues. Quatre catégories de berges ont été observées : *berges naturelles* (aucun aménagement récent observé), *berges endiguées* (2 types ont été identifiés : un premier groupe au profil triangulaire et un second au toit plat), *murs de rive* (rehaussés ou non de bourrelets de rives), et *rehaussement de berges naturelles* (mise en place de « sacs de galets »).

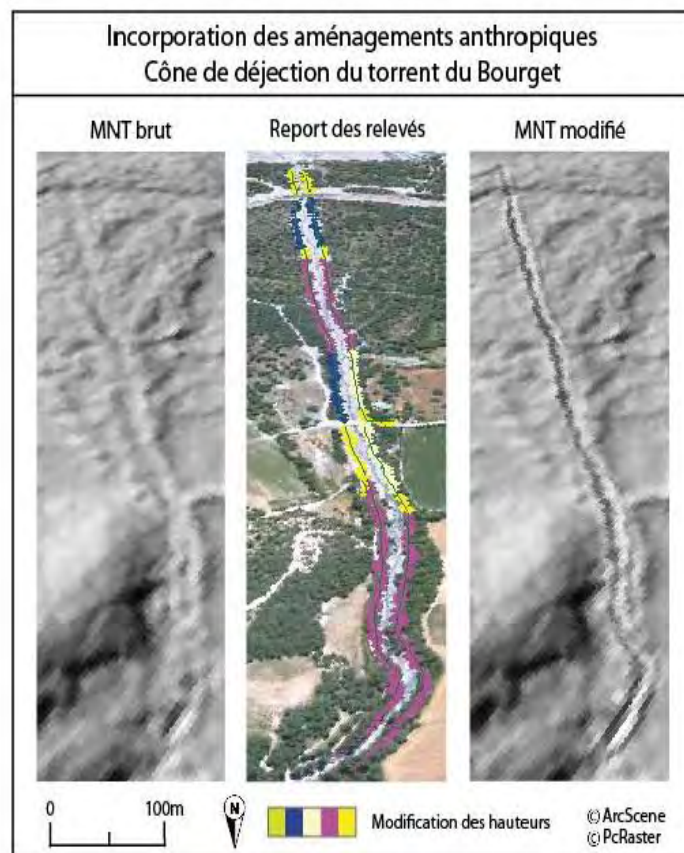


Figure 9 : Modification des MNT en cône de déjection

Les mesures effectuées sur ces éléments ont été reproduit sur SIG (figure 9). Les valeurs relevés sur le terrain ont été, pour chaque section, comparées aux valeurs obtenues après interpolation. Les pixels ont alors été modifiés **ponctuellement**, selon des **linéaires**, ou à l'intérieur de **polygones** selon le type et la largeur de l'aménagement. Les éléments ont enfin été éloignés du chenal afin de conserver au mieux sa largeur réelle lors de la conversion des éléments en raster (5*5m). Nous obtenons ainsi un MNT proche des conditions réelles d'écoulement.

V.2.3 Modification du modèle numérique de terrain pour les digues toit plat

L'interpolation réalisée n'ayant pas retranscrit le toit plat de ces aménagements, les altitudes diffèrent horizontalement, sur le toit, alors qu'elles devraient être similaires. Afin de préciser les modifications, le gradient de pente a été rectifié, après implémentation des ouvrages, en fixant des altitudes semblables perpendiculairement au chenal.

V.2.4 Extraction du bâti

Enfin, les éléments exposés à l'aléa dans la partie active du cône de déjection correspondant au découpage MNT élargis ont été digitalisés (figure 10) afin d'y surélever les valeurs et d'obtenir un MNT final. L'extraction de la différence d'altitude entre le MNT et le Modèle Numérique de Surface (MNS) ne fournit pas de résultats satisfaisants (figure 11).

Les variations relevés sont très ponctuelles et ne permettent pas de reproduire les éléments, tant spatialement que concernant les valeurs d'élévation du bâti. Les valeurs maximales, généralement inférieures à 3 mètres ne concernent que des superficies très réduite comparé aux bâti observé.

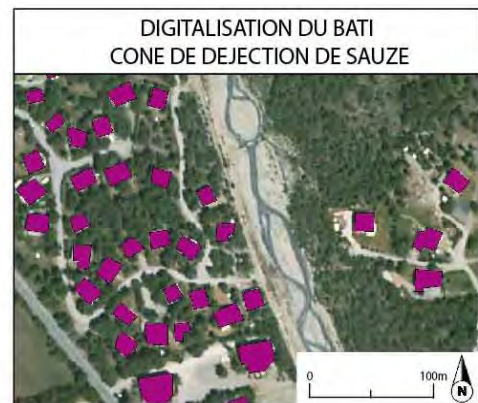


Figure 10: Localisation du bâti dans le cône de déjection

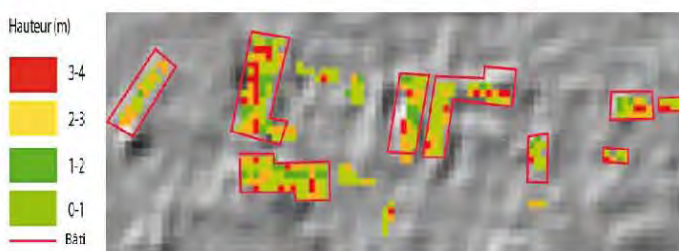


Figure 11 : Détection du bâti par différence MNT/MNS et valeurs associées, torrent de Riou-Bourdoux

Les infrastructures identifiées dans le cône de déjection ont donc été surélevées de 5 mètres, selon les polygones digitalisés, permettant de reproduire une surface approchant les conditions réelles et ainsi de modifier significativement la rugosité de ces zones lors de l'étalement du fluide (figure 12).

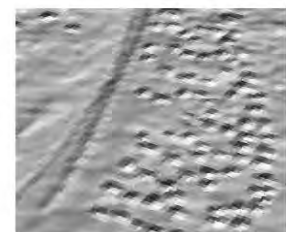


Figure 12: Bâti, cône de déjection torrent de Sauze

- Ces étapes de traitements permettent d'obtenir des MNT qualitativement convenables et proches des conditions réelles, permettant d'améliorer la cohérence et la précision des résultats de simulation.

V.3 ESTIMATION DES VOLUMES D'ÉCOULEMENTS

L'estimation des **volumes** des laves torrentielles est extrêmement importante pour l'évaluation de l'aléa, la détermination des mesures de gestion à appliquer (D'agostino, 2003), et fournira des informations pour l'établissement des scénarios. Trois démarches complémentaires sont disponibles : l'ajustement d'une loi statistique à un échantillon de lave, l'approche géomorphologique, et les méthodes globales sommaires.

V.3.1 Choix de méthode

L'ajustement d'une loi statistique nécessite l'analyse d'échantillons prélevés après le passage d'une lave, ou de données historiques, et applique les méthodes mises au point pour l'étude d'échantillons de variables hydrologiques. Les informations historiques concernant les volumes de laves torrentielles sont cependant rares (Brochot, 2000) et la distribution temporelle des laves est fortement discontinue. Cette approche permet de classer les événements selon plusieurs magnitudes, données importantes pour une étude de risque croisant intensité et probabilité.

L'approche géomorphologique permet d'identifier et de quantifier les apports des zones pouvant contribuer à la fourniture de matériaux dans le bassin versant et particulièrement dans le lit du cours d'eau (Hung et al., 1984). Ces estimations sont effectués à partir de cartes géologiques, de photographies aériennes et par relevés de terrain.

L'obtention d'une estimation des volumes sur chaque bassin versant, afin de quantifier les événements envisageables, ont été réalisés par les **méthodes globales sommaires**. Elles permettent d'obtenir des volumes de laves à différents amplitudes. Leurs caractéristiques commune est qu'elles s'appuient sur le traitement statistique de données présentant des **particularités régionales** (caractéristiques morphologiques du bassin versant, du cône de déjection et du chenal d'écoulement, type de substrats, couverture végétale).

Elles permettent d'estimer des volumes moyens, maximaux et prenant parfois en compte une période de retour. Des formules empiriques, semi-empiriques, ou obtenues par régressions statistiques, ont donc été appliquées à chacun des cinq bassins versants.

V.3.2 Intérêt et limites de l'approche

L'intérêt principal de cette méthode tient en la possibilité d'estimation **sans études de terrain préalables**. Les résultats permettent d'avoir une valeur approximative des volumes de laves potentiels pour chaque bassin versants. L'application des formules sur des cas concrets (Brochot et al., 2002 ; Remaitre, 2006) peuvent révéler une **dispersion importante des résultats**. En effet, elles ne rendent pas compte de la complexité de la genèse des laves et de la diversité du milieu. L'approche par méthodes globales sommaires est donc à considérer avec **précaution**, compte tenu de l'origine très différente de ces méthodes. Une confrontation avec une *approche géomorphologique* détaillée de chaque bassin versant ainsi qu'avec des *données historiques*, permettrait de préciser les résultats. Ces analyses rigoureuses s'avèrent cependant non appropriées à la **durée** et aux **objectifs** du stage.

Les formules de (Hempel, 1977), (Takei, 1984), (D'Agostino et al., 1996), (D'Agostino, 1996) permettent d'obtenir un **volume moyen** tandis que (Hung et al., 1984), (Kronfellner-Kraus, 1985), (Vandine, 1985), (Rickenmann, 1996), (Marchi & Trecca, 1996) aboutissent à une estimation du **volume maximal** (Tableau 2).

Référence	Formule	Légende
Hampel (1977)	$V_a = 150 Ad (Sf-3)e^{2.3}$	Sf : Pente du cône de déjection (%) c : Paramètre statistique IG : Facteur géologique, o : coefficient de ruissellement R24 : Cumul des précipitations sur les 24H précédent l'événement (mm) Li : Longueur d'un bief homogène (m) ei : Taux de production des sédiments pour un bief (i) ($m^3.m^{-1}$) K : Facteur de torrentialité lc : pente moyenne du chenal (%) Lc : Longueur du chenal torrentiel (m) lb : Elévation du relief (m), SNV : Surface de sols nus (km^2) Jc : Pente du cône de déjection L : Longueur du lit entre point de départ potentiel et point le plus bas du dépôt
Takei (1984)	$V_a = c 13600 Ad e^{0.51}$	
D'Agostino et al. (1996)	$V_a = 39 (45) Ad (e^{0.9}) Sf e^{1.5 IG}$	
D'Agostino (1996)	$V_a = 29 100 Ad e^{0.67}$	
PWRI (1984)	$V = 1100 O R24 Ad$	
Hungr et al. (1984)	$V = (L1e1)+...+(Liei)$	
Kronfellner-Kraus (1985)	$V = K Ad lc$	
Vandine (1985)	$V = 10 000 Ad$	
Rickenmann et Zimmermann (1993)	$V = Lc (110 - 2.5 Sf) (15\% < Sf < 40\%)$	
Rickenmann (1996)	$V = Lc (6.4 Sf - 23) (7\% < Sf < 15\%)$	
Marchi et Trecca (1996)	$V = 70 000 Ad$	
Rickenmann (2001)	$M = (110 - 2.5Jc) L$	
Zeller (1976)	$V/Ad = c2 755,1 Ade^{-0,218} 2 < c2 < 50$	

L'annexe 5 fournit le détail des résultats, ainsi que leurs moyennes.

Tableau 2 : Formules de méthodes globales d'estimation de volume

L'estimation des volumes permet le calcul de différents paramètres : débit, vitesse et distance de parcours (Rickenmann, 1999). Nous allons, pour compléter nos informations, réaliser une estimation du **débit maximal** associé aux événements à l'aide de la formule suivante adaptée au contexte alpin (Remaitre, 2006) : $Q_{max} = 0,135V^{0,78}$ (m^3/s)

Le résultat des estimations par bassin versant montrent une faible disparité au sein des calculs de volume moyen, tandis que les résultats de volumes maximaux ont une forte amplitude (annexes 4,5). Il apparaît pour toutes les zones sources que la formule de D'Agostino (1996) et Takei (1984) apportent les résultats les plus proches du volume moyen final. Concernant les estimations maximales, Kronfellner-Kraus (1985) et Rickenmann (1996) fournissent des résultats approchant le résultat maximal moyenné.

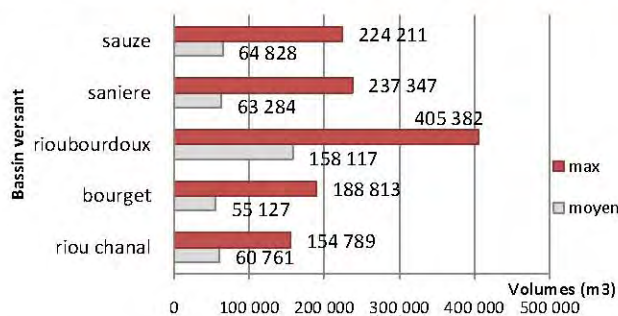


Figure 13 : Estimation des volumes par bassins versants

Les valeurs sont relativement regroupées (figure 13), excepté les résultats de Riou Bourdoux. Au contraire, le bassin versant le plus petit (Riou Chanal) et le moins actif historiquement est plus largement surestimé. Les propriétés concernant la superficie des bassins versants joue un rôle important dans ces estimations, et les aires des BV, excepté Riou Bourdoux et Riou Chanal sont proches, ce qui tend à harmoniser les résultats.

Ces estimations de volumes permettent alors d'obtenir des valeurs de débits associés (tableau 3).

Riou Chanal	Bourget	Riou Bourdoux	Saniere	Sauze
Q max	Q max	Q max	Q max	Q max
1509,5	1760,5	3193,7	2104,4	2011,8

Tableau 3 : Estimations de Qmoyen et Qmax ($m^3.s^{-1}$)

V.4 ETABLISSEMENT DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Les scénarios seront définis par des gammes de paramètres initiaux fixes déterminés pour tous les bassins versants.

Ils doivent comporter une variation de paramètres représentatifs de laves torrentielles issus de terrains comparables et d'obtenir des résultats, faisant abstraction de la notion de période de retour impliquant l'analyse statistique de données historiques précises ou d'échantillons de nombreux dépôts de laves distincts.

Il est délicat de déterminer les caractéristiques rhéologiques du matériau à partir des propriétés mécaniques des matériaux des zones sources du bassin versant, d'où la nécessité d'analyser les matériaux frais de lave torrentielle ayant coulé (Bianco, 2003).

Une étude a ainsi été réalisée sur les résultats issus d'échantillons de laves torrentielles boueuses prélevés dans la vallée de l'Ubaye (Remaître, 2006, Malet, 2003), d'autres torrents alpins (Bardoux, 2002, Martino, 2003) et mondiaux (Kaitna et al. 2007, Kang et Zang, 1980, Major et Pierson, 1992, Lui et Huang, 2003) afin de sélectionner nos gammes de variation.

Sept paramètres initiaux peuvent être configurés dans le modèle : Le **volume (V)**, le **seuil de contrainte (τ_c)**, la **viscosité (v)**, la **densité (ρ)**, les **angles de frottements internes (Φ_1)** et entre le flux et la base (**Φ_2**) (permettant de simuler une rugosité du lit), la **durée de l'événement (d)** et le **nombre de vagues (va)**. Les valeurs retenues sont présentées dans le tableau 4.

Volume (m3)	Seuil (PA)	k (PA.S)	Va	Tps (min)	ρ (Kg.m3)	Φ Angles/friction (°)	
20.000	100	30	2	10	2000	Flow/Base $\Phi_1 : 5^\circ$	Interne $\Phi_2 : 15^\circ$
50.000							
100.000			4	20			
200.000							
350.000	500	90					

Tableau 4 : Paramètres de modélisation et gammes de variation

Cette démarche permet donc d'effectuer des simulations comprenant des jeux de paramètres **considérés comme envisageables** pour l'ensemble des bassins versants étudiés. Il faut noter qu'un élargissement des possibilités (notamment pour Φ et ρ), peuvent affiner les résultats. Cependant, le nombre de combinaisons à simuler induisent des **contraintes de temps de calculs significatifs**, et les scénarios ici adoptés doivent permettre l'exploitation des résultats dans des délais appropriés.

Les modalités de déclenchement sont réalisés afin de simuler 2 vagues (D2), 4 vagues (D4), 6 vagues (D6) ayant chacune des volumes égaux (tableau 5).

VOLUME (m3)	D 2 (m3)	D 4 (m3)	D 6 (m3)
20.000	10.000	5000	3333
50.000	25.000	17500	8333
100.000	50.000	25.000	16666
200.000	100.000	50.000	33333
350.00	175.000	87500	5833

Tableau 5 : Volumes de dépôts par configuration de nombre de vagues

Nos paramètres induisent, **28 scénarios par volumes**, soit **140 simulations** par zones sources. Les **18 zones sources** amènent à un total de **2520 simulations** (annexe 6). En complément, nous allons initier un volume au niveau de l'apex sur les cinq bassins versants avec des jeux de paramètres réduits (2τ , 2ν) afin d'évaluer les éventuelles variations de paramètres ainsi que les conditions initiales nécessaires (notamment au niveau de la forme de la zone source) pour obtenir des résultats satisfaisants.

V.5 HYPOTHESES D'INITIATION

Le modèle MassMov2D prévoit de simuler la propagation et le dépôt d'un volume initialement creusé dans le MNT. Cette condition initiale pose deux problèmes : D'une part, le volume initial (1) soustrait à la surface ne reproduit pas correctement les conditions réelles de la **géométrie de la surface de rupture** (2) de la zone de déclenchement et conduit à une représentation simplifiée (3) (figure 14).

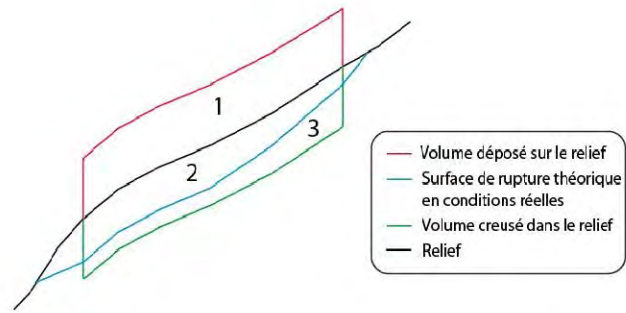


Figure 14 : Représentation des possibilités de conditions initiales

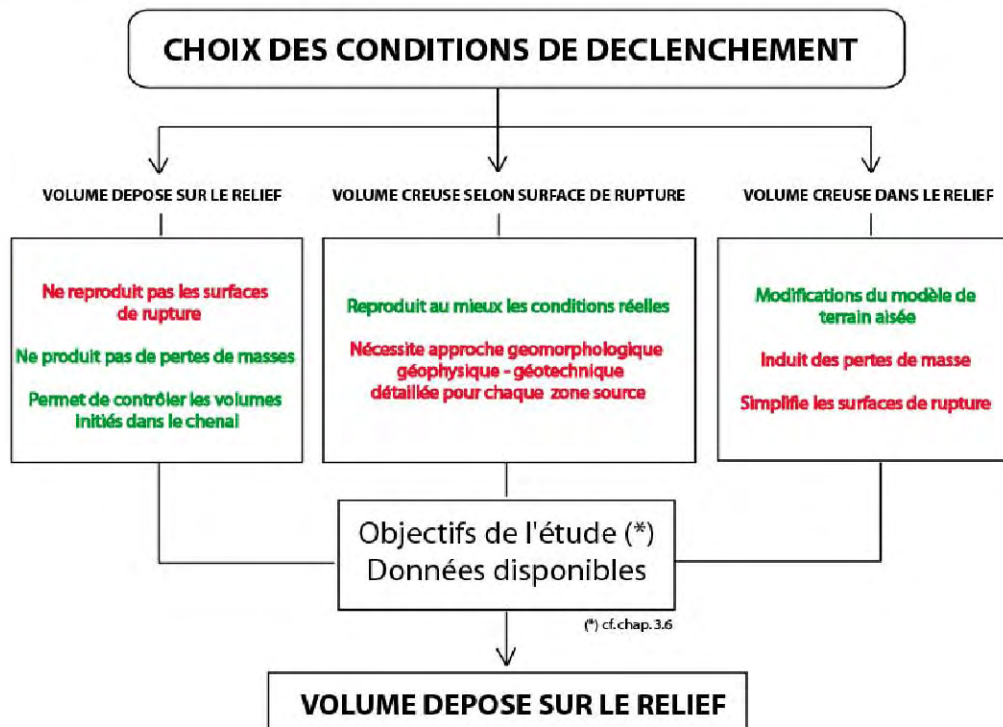


Figure 15: Logigramme de choix des conditions de déclenchement

Aussi, la reproduction de surfaces de ruptures précises, nécessitant des mesures géotechniques, n'est pas adaptée au nombre important de zones sources et aux objectifs.

Les tests réalisés dans les deux configurations (1 et 3) révèlent que, lorsque les volumes dépassent les 30.000 m³, des **dépôts résiduels** stagnent dans la zone de déclenchement, particulièrement au pied de la zone source (figure 16). Ces volumes seront alors manquants dans le chenal et induisent

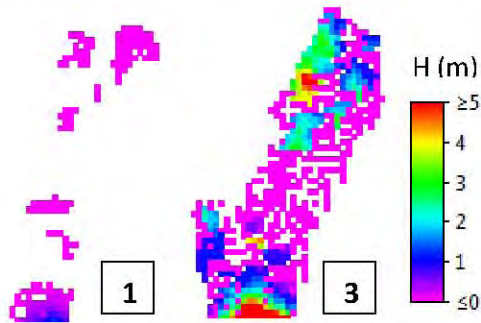


Figure 16 : Dépôts résiduels en zone d'initiation

des **pertes de masse**, perturbants les analyses de résultats. De petits dépôts sont dans certains cas observés dans la zone source en situation 1, mais ne représentent qu'une très faible part des volumes.

L'objectif étant d'initier un volume au sein du chenal d'écoulement, et non de représenter les surfaces de ruptures d'un glissement, nous avons alors pris part de déposer le volume initial **au dessus du MNT** (figure 15). De plus, les matériaux constitutifs d'une lave torrentielle étant issus principalement des

berges du chenal d'écoulement (cf 3.4), il s'agit alors d'initier un volume donné en différents points du torrent, représentatifs des zones potentiellement contributives réparties dans le bassin versant et d'en analyser les caractéristiques.

V.6 SIMULATIONS

Les simulations ont été réalisées après des tests de comportement du modèle aux variations de paramètres initiaux. Elles seront donc réalisées sur **18 zones sources** : 2, Sauze ; 3, Rioux-Chanal ; 3, Bourget ; 4, Sanières ; 6 Rioux-Bourdoux (référencées en annexe 1). Ne disposant pas d'une étude géomorphologique détaillée permettant d'estimer les volumes potentiellement mobilisables pour chacune d'entre elles, et dans l'objectif d'effectuer un traitement comparatif des résultats, les 5 volumes de départ ont ainsi été initiés pour chaque zone source. Nous pouvons maintenant réaliser les simulations à l'aide de MASSMOV2D.

V.6.1 Fonctionnement de MASSMOV2D

Pour cette étude, nous allons utiliser **MassMov2d** (Begueria et al., 2009). MassMov2d est un modèle appartenant au groupe « rhéologiques » qui considèrent l'écoulement d'une lave torrentielle comme un fluide monophasique homogène déformable (figure 17). Les lois de comportement de la lave sont moyennées sur la hauteur de l'écoulement et utilisent les équations de Navier-Stokes et de Saint-Venant, approche classique pour la modélisation des laves (Mangeney-Castelnau et al., 2005). Le système d'équations différentielles hyperboliques est alors résolu dans un maillage eulérien 2D. Le lancement d'une simulation est réalisée à partir d'une ligne de commande type : `oldcalc 2 2000 30 500 10 15 600`, ou **2** indique le choix de rhéologie (ici Bingham), **2000** la densité ρ (kg.m³) ; **30** la viscosité ν (Pa.s) ; **500** le seuil de contrainte τ_c (Pa) ; **10/15** les angles de frottement internes Φ_1 et externes Φ_2 ; **600** le nombre de pas de temps (t).

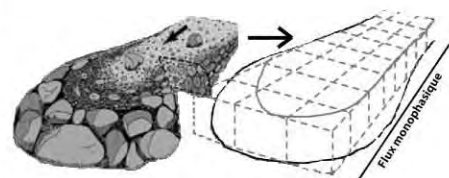


Figure 17 : Schématisation de la lave (Modifié de Begueria, 2009)

Le modèle nécessite pour son fonctionnement les fichiers de base suivants (au format .map) : MNT (*dem*), Volume source (*h_ini*), Volume découpé en pas de temps pour les déclenchements différés (*dist*), la zone d'extension de calcul (*outlet*) et enfin le *script* du modèle.

MASSMOV2D est implémenté dans le logiciel (SIG) PC Raster.

V.6.2 Présentation de Pc Raster

PC Raster est un outil de modélisation environnementale développé par l'université d'Utrecht (Karssenbergh, 2002). Le logiciel est utilisé pour réaliser les simulations, créer certaines cartes d'entrées du modèle et effectuer certains traitements et conversions sur les cartes de résultats.

V.7 TRAITEMENTS DES DONNEES

V.7.1 Objectifs

Les étapes du traitement des données des simulations ont pour objectif d'obtenir : **Une cartographie des laves torrentielles** pour chaque zone source et pour chaque volume initial, contenant les valeurs

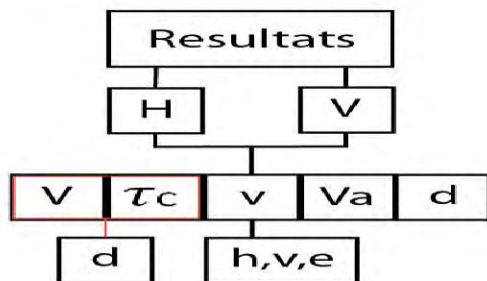


Figure 18 : Objectifs de traitements

maximales toutes simulations confondues par volumes.

Une analyse des paramètres de l'aléa selon deux approches :

- 1- Une quantification de l'influence de V et τ_c sur la **distance de parcours (d)**.
- 2- Une quantification des paramètres des scénarios sur la **hauteur**, la **vitesse** et l'**étalement**, permettant l'analyse des résultats en fonction des paramètres de simulation.

V.7.2 Méthode

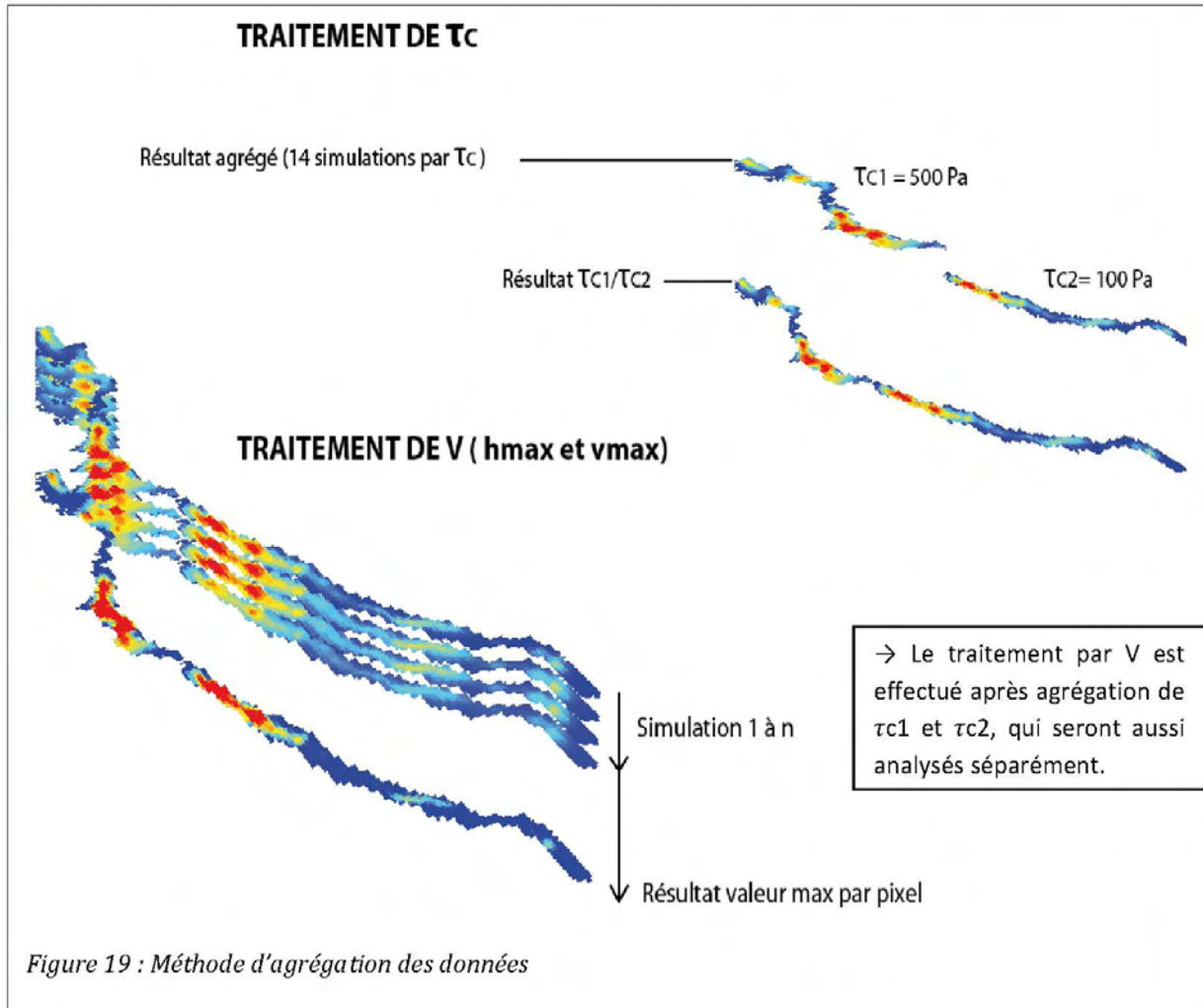
Après création d'une arborescence type, les fichiers nécessaires au fonctionnement du modèle (7 combinaisons de fichiers représentant l'ensemble des possibilités d'initiation par zone source) ont été répartis par l'écriture d'un **script de traitement** de fichiers Virtual Basic Script (VBS) (annexe 7).

Après le stade de simulation, le nombre important de résultats obtenus nécessite de coupler les simulations pour chaque zone source et chaque volumes par « lots » (annexe 8) représentatifs des caractéristiques types en fonction du paramètre à analyser (figure 18).

La méthode de traitement de l'information issue des modélisations constitue **la clé d'analyse des scénarios**.

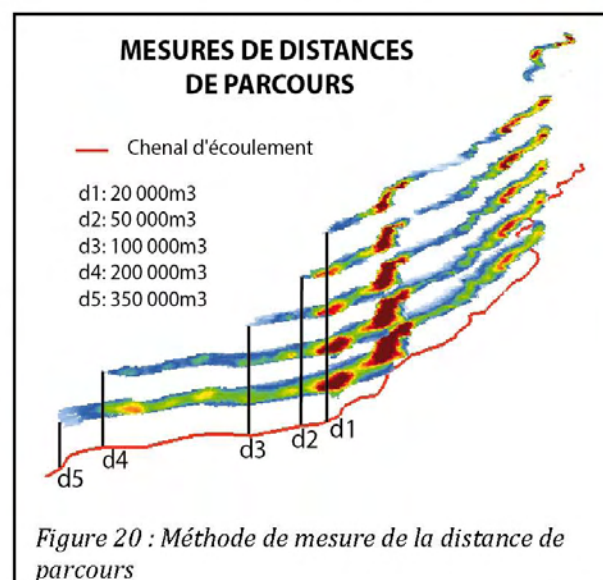
Ces traitements ont été réalisés à l'aide du logiciel MATLAB 7.5.0 (©Matworks) par l'écriture d'un script (annexe 9) comportant (pour la cartographie) 4 étapes : La définition des chemins d'accès, la création d'une matrice à trois dimensions (dont le nombre d'étages dépend du nombre de cartes impliquées par la requête), la comparaison de la valeur de chaque pixel sur l'axe (z), et l'écriture d'une carte de sortie à deux dimensions retenant pour chaque pixel, la valeur maximale de hauteur ou de vitesse (figure 19).

La quantification des paramètres d'entrée sera réalisée par une analyse de chaque résultat en 2D (avant agrégation), puis associée les valeurs et réalise l'analyse associée pour chaque type de paramètre de simulation.



V.7.3 Evaluation des distances de parcours

Les distances de parcours ont été évaluées le long du chenal d'écoulement, en partant du pied de la zone d'initiation, jusqu'au bout de la lave (figure 20). Réalisé à l'aide des résultats agrégés des hauteurs, un écrêtage des données a été réalisé à 0.3m afin de supprimer une majorité des dépôts de très faible hauteur présents dans et autour de la zone source ainsi que sur les bords et au pied de la lave simulée. Nous quantifierons la distance parcourue pour chaque volume initial, et variation de τ_c , sur les 18 zones sources. Nous pourrions alors déterminer l'influence de ces deux variables sur la distance parcourue par zone source et par bassin versant.



VI. RESULTATS

Les résultats présentent l'analyse des données des simulations, les cartes d'aléa sont fournies en annexe (17→22).

VI.1 ANALYSE DES VARIATIONS DE DISTANCE DE PARCOURS

VI.1.1 Influence du volume

→ Volume par zone sources

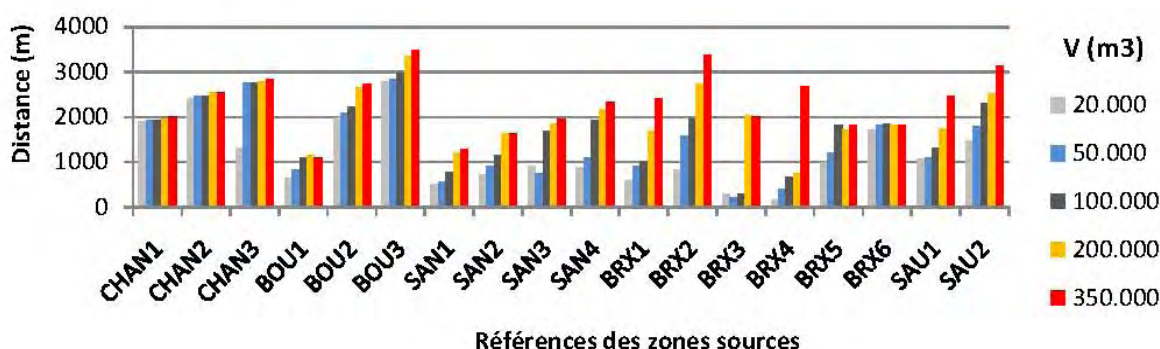


Figure 21 : Influence du volume sur la distance de parcours des zones sources

Les distances de parcours révèlent la morphologie des bassins versants et la localisation de la zone source. Les résultats obtenus peuvent être analysés et liés aux volumes initiaux :

Tout d'abord, les **bornes de variation** entre 20.000m³ et 350.000m³ (figure 21), tous bassins versants confondus, sont hétérogènes. Les croissances les plus importantes proviennent du torrent de Riou Bourdoux (BRX1, BRX2, BRX3, BRX4) (> 400%) et Sanières (> 200%), et les plus faibles de Riou Chanal (< 5%).

L'analyse **par bassin versant** montre que les variations de distance en fonction de V sont relativement homogènes (figure 22), à l'exception des sources BRX3 et BRX4 qui reflète **d'importantes variations**. Les simulations issues des sources SAU1, SAU2, BRX1, BRX2, SAN1, SAN2, SAN3, SAN4, BOU1, et BOU2 décrivent des hausses régulières par scénario de volume. Aussi, une augmentation significative (>25%) se produit à partir des seuils de 100.000m³ et 200.000 m³ pour les sources BRX5-SAN4-SAN3.

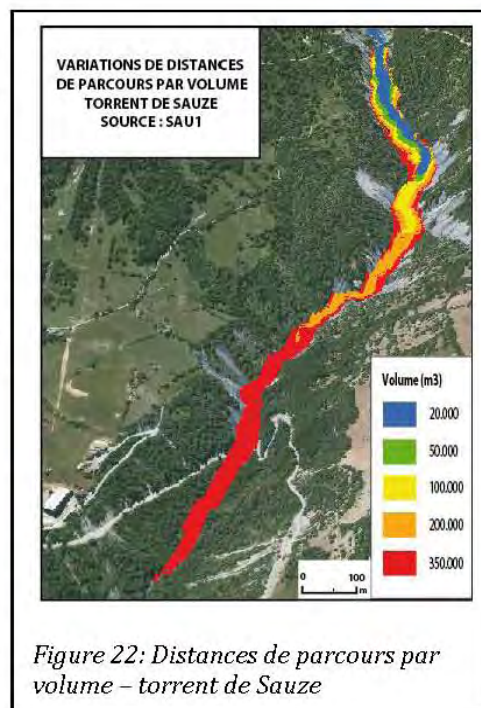


Figure 22: Distances de parcours par volume – torrent de Sauze

Certaines sources montrent **des irrégularités**, où un volume supérieur aura une distance de parcours moindre (20.000m³→50.000m³ SAN3, BRX3 - 200.000 m³→350.000 m³ BOU1, CHAN2, BRX3, BRX6). Les éléments explicatifs sont, **la pente de la zone d'initiation**, et la **morphologie du relief** sur lequel le volume est initié qui contribuent à une alimentation du chenal d'écoulement avec des vitesses

variables. Un volume plus élevé pourra donc, à pente égale, se répandre plus rapidement. Cependant, en raison de sa hauteur d'écoulement plus importante, les interactions entre la lave torrentielle et les versants sont plus nombreuses, et peuvent **perturber l'écoulement** en diminuant significativement la distance parcourue. Ce critère explique aussi les très faibles distances parcourues pour les sources BOU1, BRX3, BRX4.

→ Variations moyennes par bassin versant

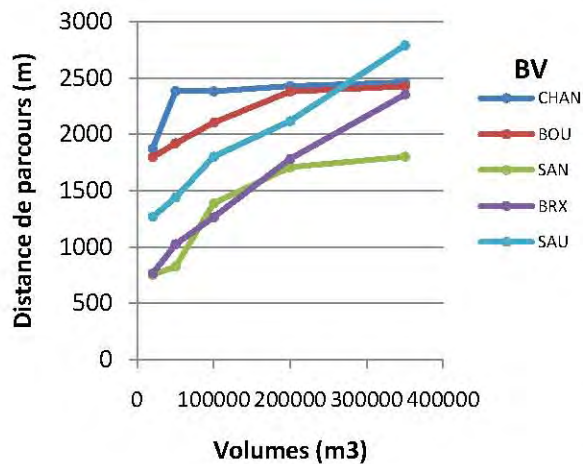


Figure 23 : Distance de parcours moyen par

avec $V > 50.000m^3$ révèlent un écrêtage important, ces simulations atteignent l'exutoire du torrent et sont bloquées sur le versant opposé.

Les tendances des distances de parcours par bassins versants à volumes égaux par bassins versants **toutes sources confondues** (figure 23) indiquent que :

- Les simulations de Sauze et Riou Bourdoux croissances fortement et sont relativement linéaires.

- Celles des Sanières et Riou Chanal parcourent des distances importantes depuis les plus petits volumes.

Enfin, les volumes de $350.000m^3$ et $20000m^3$ sont relativement stables sur les Bassins versants de Bourget, Sanières et Riou Chanal.

Les distances de parcours pour Riou Chanal

VI.1.2 Étalement des laves par bassin versant

L'étalement du fluide permet d'analyser la répartition des volumes et de compléter l'interprétation sur les distances de parcours. Nous constatons alors que les valeurs sont regroupées sur chaque gamme de volumes (figure 24). Entre $20.000m^3$ et $350.000m^3$, la valeur augmente de 575%, pour Riou Boudoux, 413% pour Sanières, 329% sur Bourget et 174% pour Sauze. La hausse de 635% pour Riou Chanal, et ses valeurs nettement plus importantes, sont en lien avec la distance parcourue. L'arrêt du fluide à l'exutoire est compensé par un étalement bien plus important que les autres simulations.

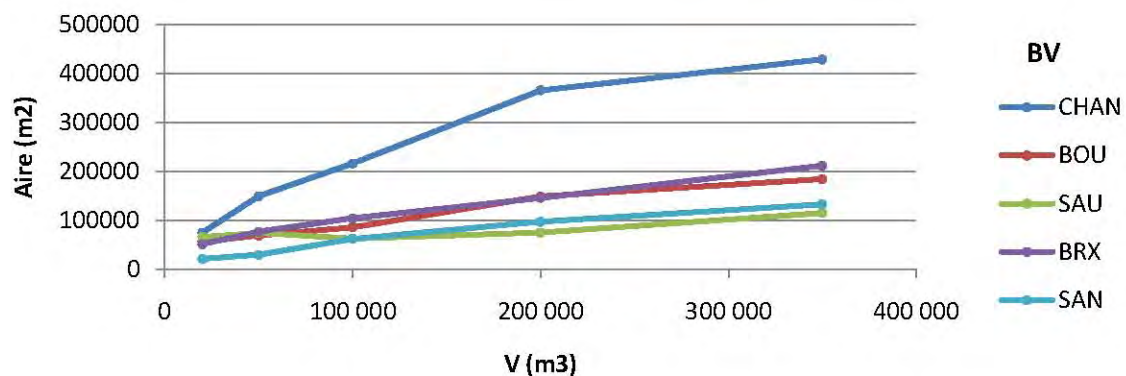


Figure 24 : Aire d'étalement par volumes

VI.1.3 Influence du seuil de contrainte (τ_c)

Le seuil de contrainte à une influence bien plus significative sur la distance de parcours que les gammes de volumes (43 % en moyenne). Les diminutions peuvent atteindre 75% (BRX2) entre les deux seuils de nos scénarios. L'influence de τ_c est fortement contributive de la zone source, on peut observer au sein du même BV d'importantes variations de comportement.

→ Variations par zone source

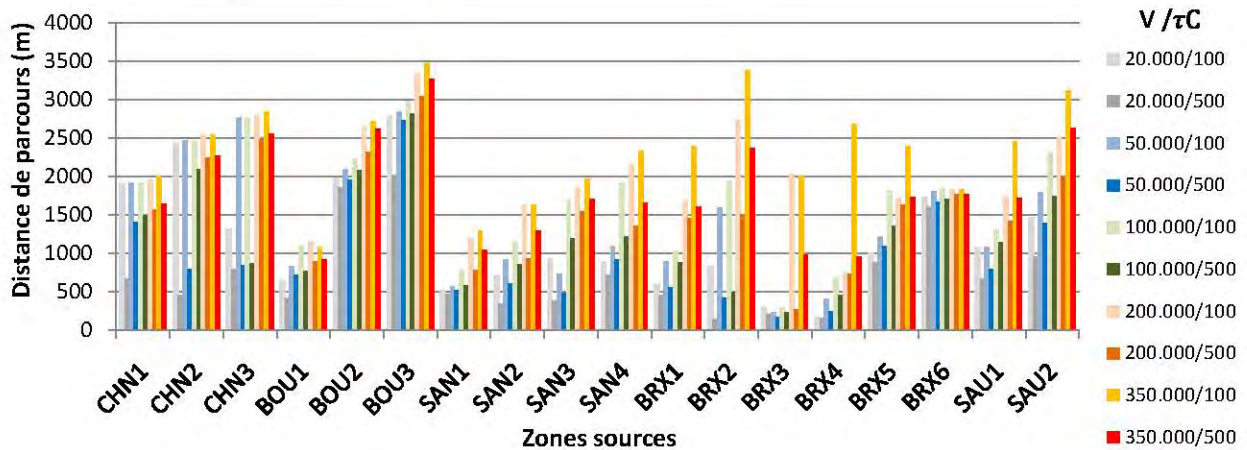


Figure 25 : Variation de la distance de parcours en fonction de τ_c , par zone source

Aussi, Les amplitudes de variations **ne sont pas liées aux volumes**, on observe de fortes disparités entre l'augmentation de la distance de parcours et l'augmentation de τ_c (figure 25). Le plus fort pourcentage de variation concerne BRX3, 200.000m³ (-83%), et le plus faible, BRX6, 350.000 m³ (-5%). Il est alors intéressant d'étudier l'influence de τ_c par bassin versant.

→ Comportement moyen par bassin versant

Les résultats montrent **trois types de comportements** en fonction τ_c (figure 26). BOU et SAN varient régulièrement avec les volumes alors que τ_c modifie fortement d dans les petits volumes sur Riou Chanal. Enfin, pour BRX et SAU, τ_c modifie plus fortement d sur les volumes importants. Les variations moyennes de (d) (figure 27) indique une **influence prépondérante pour les petits volumes** (-37%, pour 20.000m³ jusqu'à -19% pour 350.000m³) lorsque τ_c [100Pa→500Pa].

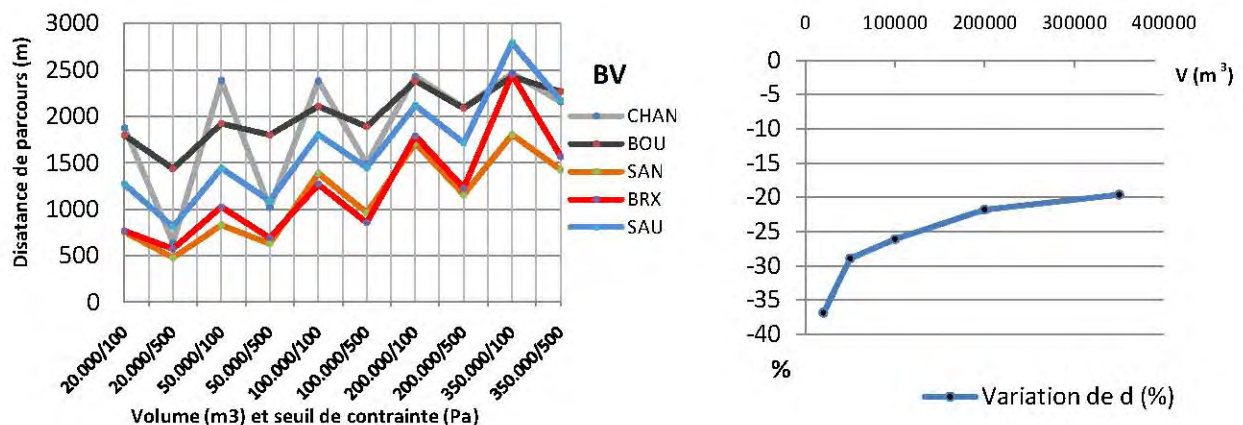


Figure 26 : Influence du seuil de contrainte sur (d)

Figure 27 : Variation moyenne par volumes de d (%) entre $\tau_c=100Pa/\tau_c=500Pa$

VI.2 INFLUENCE DES PARAMETRES DE SIMULATION SUR LA VITESSE, LA HAUTEUR ET L'ETALEMENT

VI.2.1 Approche sur les valeurs maximales par volumes

Les variations de gammes des scénarios peuvent être quantifiées en fonction de leur influence sur les paramètres permettant de caractériser l'aléa. Tout d'abord, les paramètres initiaux contribuent à des distributions fortement hétérogènes et très divergentes spatialement. Considérant que les

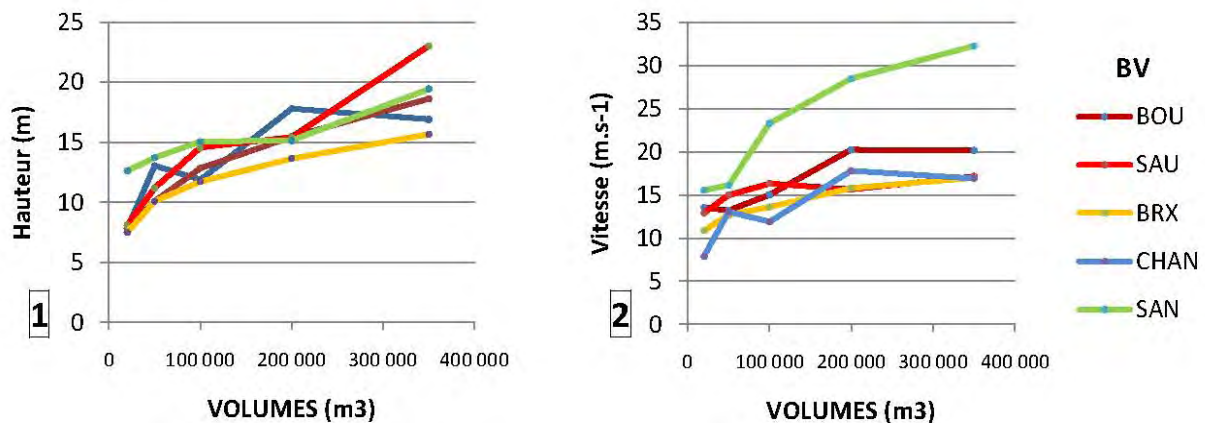


Figure 28 : Hauteurs (1) et vitesses (2) max par BV

valeurs maximales de vitesse et de hauteurs génèrent le plus de dégâts potentiels, l'analyse a été réalisée dans un premier temps sur ce seuil maximal.

Les résultats indiquent des hauteurs très élevées tandis que les vitesses le sont en moindre mesure et sont plus proches des valeurs caractéristiques [5-20m.s-1] (figure 28), excepté sur Sanières où les vitesses se démarquent nettement.

Concernant h , nous pouvons proposer un certain nombre de facteurs explicatifs. Tout d'abord, les paramètres d'entrée, étant des gammes « appropriées » pour ce type d'événement, la première source d'imprécision pour ce type d'utilisation provient de l'utilisation du modèle, et des conditions initiales. La morphologie, la rugosité et la pente du relief sur lesquels les zones sources sont initiées contribuent à une chenalisation du flux plus ou moins rapide et dont l'étalement peut contribuer à rencontrer des irrégularités topographiques hors chenal (pour les volumes importants).

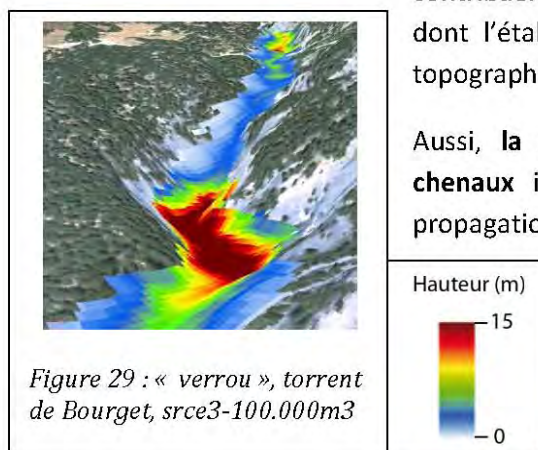


Figure 29 : « verrou », torrent de Bourget, srce3-100.000m3

Aussi, la **morphologie générale des bassins versants et des chenaux** influe considérablement sur l'écoulement lors de la propagation. Les fortes variations de trajectoire du chenal induisent des « **verrous** » où se concentrent les masses (Figure 29). Cette observation est commune à tous les bassins versants. Ces zones concentrent l'essentiel des valeurs maximales, dans des surfaces très réduite comparée à l'aire d'étalement total.

Concernant les **vitesse**s maximales, les résultats montrent que ces valeurs se localisent logiquement dans les zones où le gradient de pente augmente, mais aussi sur les versants bordant le lit des torrents. Le flux subit une forte augmentation de vitesse après le passage du bourrelet frontal, lorsqu'il rejoint le chenal, sur des pentes souvent > 15% (figure 30).

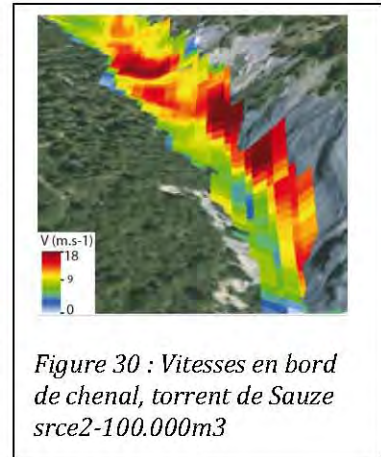


Figure 30 : Vitesses en bord de chenal, torrent de Sauze srce2-100.000m3

La **représentativité de ces valeurs maximales est faible** (figure 31), et ne concerne qu'un nombre très faible de pixels au sein de résultat final. La distribution des valeurs [0 – 1m] de h et v varie entre 60% et 80% pour les tous résultats de hauteur et de vitesse.

Les valeurs ordonnées suivent sur tous les bassins versants et pour tous les volumes une distribution très fortement désaxé sur les valeurs < 2m.

Les écarts types des distributions de valeurs de hauteur et de vitesse permettent de qualifier les dissymétries de distribution, et les variations de σ , par volumes suivent le même comportement, pour chaque BV. Aussi, σ est supérieur pour v pour tous les BV, hormis celui de Riou Chanal. La distribution des valeurs de Sanières est la plus dissymétrique, surtout sur les vitesses qui sont aussi quantitativement surestimés (cf4 .2.1). Enfin, ces écarts augmentent avec les gammes de volumes (figure32), entraînant des distributions de plus en plus excentrées sur les petites valeurs.

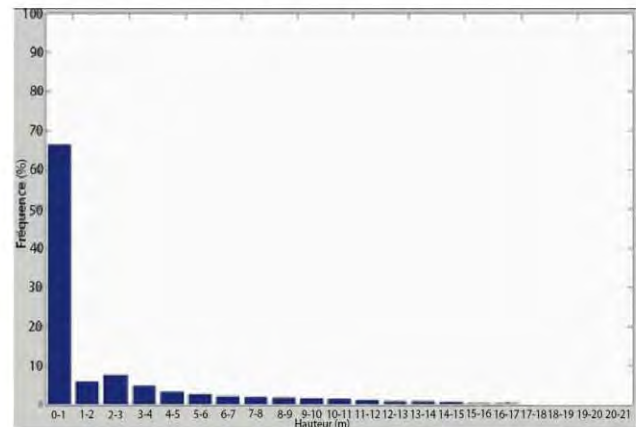


Figure 31 : Distribution des valeurs h dans un échantillon de simulation (Bourget-srce2-100.000m³)

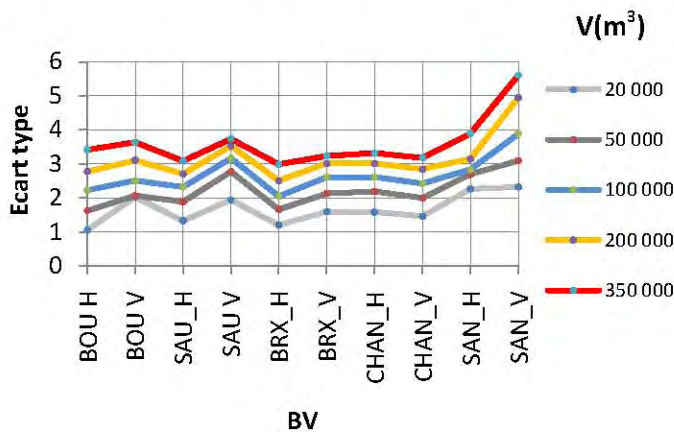


Figure 32 : Ecarts types pour h et v par bassin versant

L'analyse de l'influence des paramètres sur le **maximum d'endommagement potentiel**, utilisé pour la cartographie n'est donc **pas adapté** à caractériser l'écoulement global. Les traitements suivants, réalisés afin d'analyser la *valeur moyenne* (figure33), peuvent s'avérer plus aptes à caractériser les résultats obtenus. Ces nouvelles informations ont alors été extraites et corrélée aux paramètres initiaux.

VI.2.2 Résultats moyens

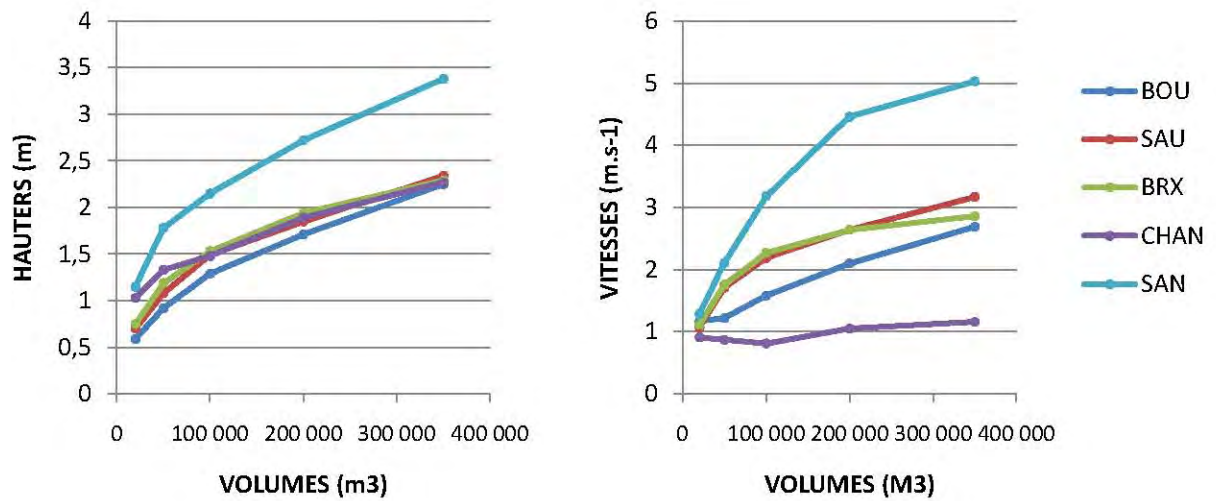


Figure 33 : Hauteurs et vitesses moyennes

Les résultats sur les moyennes de hauteurs sont semblables, sur chaque Bv, excepté pour Sanières et sont comprises dans des gammes de variations plus représentatives. Les vitesses, sur ces critères sont cependant relativement faibles, les valeurs maximales sont pour ce paramètre, plus significatifs d'évènements réels.

VI.2.3 Influence des paramètres de simulation sur hmax, hmoy, vmax, vmoy, et l'aire d'expansion (a)

L'influence de nos gammes de scénarios (cf. 4.4) sur nos résultats peut alors être quantifiée. Il s'agit de déterminer, pour chaque variation, son impact sur le résultat final. La figure 35 présente les résultats issus du torrent de Bourget, l'ensemble des données, et les graphiques sont fournis en annexe (10→ 15).

Les variations entre bassins versant, de chaque paramètre du fluide, montrent que l'impact de nos gammes est différent, tant concernant leurs valeurs que leurs types (augmentation ou diminution).

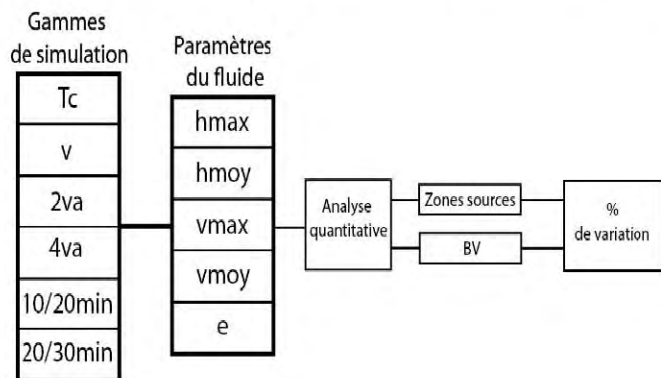


Figure 34: Logigramme d'analyse de tendances

L'exemple du bassin versant du Bourget indique un certain nombre de caractéristiques communes au cinq bassins versants. Cependant la significativité des paramètres initiaux ne peuvent être généralisés. τ_c et v modifient les résultats sur toute la gamme des volumes. Une forte diminution de l'aire, de V_{moyen} et en moindre mesure de V_{max} caractérise la variation de τ_c , alors que h_{moy} et h_{max} sont globalement en augmentation. La viscosité diminue V_{moy} , V_{max} ainsi que l'aire d'étalement. Les gammes de temps de simulation et du nombre de vagues indiquent que leurs

relation n'est pas la même avec les paramètres du fluide. On constate que, le passage d'un temps de simulation de 10 à 20 min augmente globalement la valeur des résultats alors que la deuxième gamme diminue l'aire et augmente les valeurs moyennes. Le passage de deux à quatre vagues présentera une diminution de l'étalement et une hausse des valeurs moyennes et maximales tandis que le passage de quatre à six vagues augmente la hauteur maximale et aura une influence plus significative sur les vitesses et hauteurs moyennes.

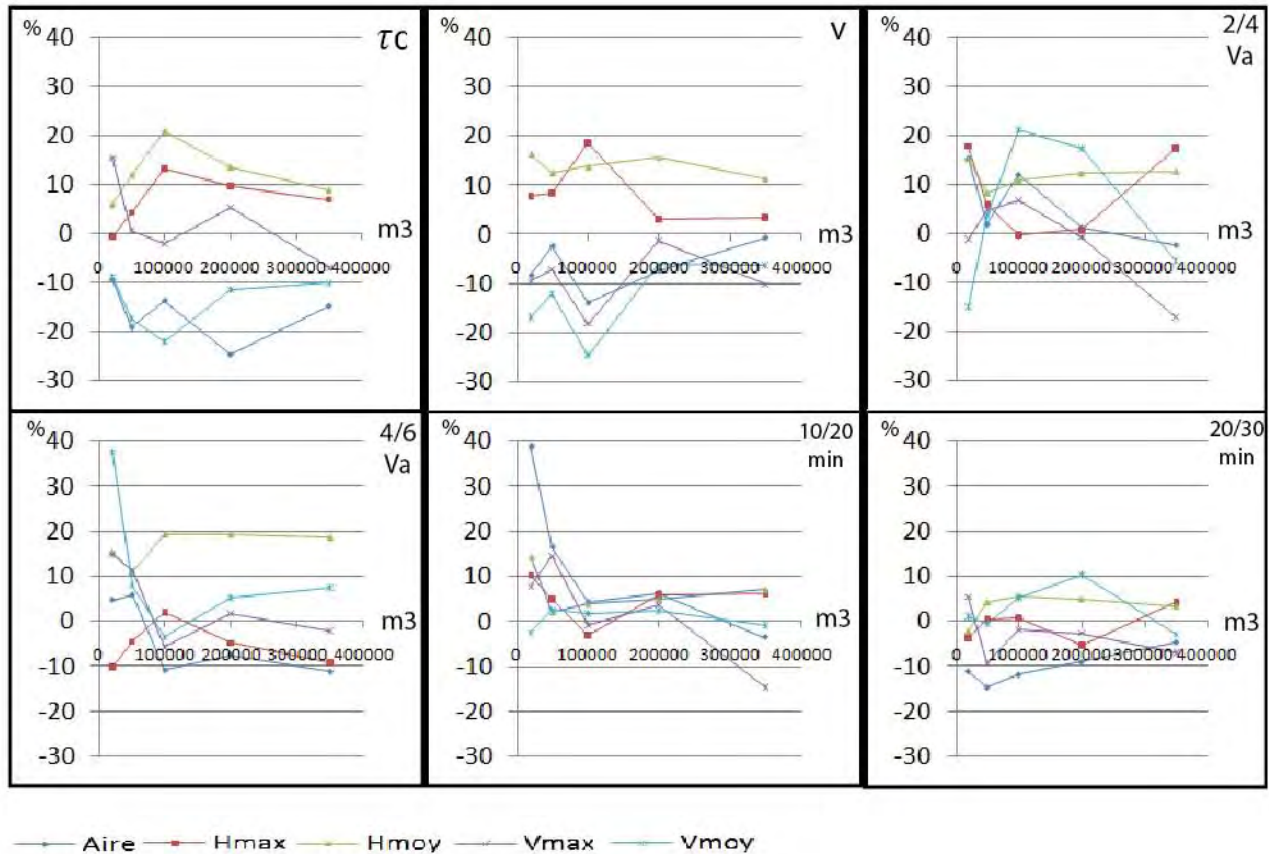


Figure 35: Influence des gammes de variation – Torrent du Bourget

VI.2.4 Discussion

L'ensemble des résultats indiquent que les paramètres du fluide sont dépendants des bassins versants et de leurs morphologies, mais aussi **des zones sources et de leurs localisations**. **L'angle d'insertion** du volume dans le chenal aura donc une forte influence sur les résultats finals. Nous avons ainsi observés qu'un angle trop important entre la trajectoire du flux après déclenchement et le chenal ainsi que la sinuosité de ce dernier sont un frein conséquent à la reproduction de l'aléa. Les vitesses du fluide dès son entrée dans le chenal et lors des premières minutes de son parcours seront alors primordiales.

Les fortes hauteurs maximales ne sont pas significativement réduites par les différents types de déclenchement. Ainsi, seule la modification de la forme de la zone source adaptée à chaque volume peut permettre d'influer sur ces valeurs maximales. La comparaison des résultats, ici réalisée, entre zones sources ayant des surface au sol semblable permet soutenir que leurs critères de formes et de

hauteur nécessiteraient une adaptation aux volumes initiaux, afin de limiter les hauteurs trop importantes des zones sources et les fortes valeurs d'accumulation dans le chenal.

L'application de cette méthode dans un autre contexte nécessiterais alors d'étudier avec soin la topographie et la morphologie du bassin versant afin d'éviter les faibles distances de parcours et conséquentes accumulations de volumes.

Nos résultats montrent qu'au delà de 10min de progression, la distance de parcours ne progresse plus ou se réduit. Le calage des scénarios sur des durées en conditions réelles ne sont alors pas adaptés pour ce type de méthodologie.

Nous constatons enfin que les distances de parcours, avec des volumes initiaux considérés comme extrêmes ne parviennent pas à s'éprendre dans le cône de déjection, quel que soit les paramètres des scénarios. Cela pose donc la question de l'application stricte de conditions réelles. Il serait alors approprié de quantifier les variations de paramètres des scénarios par calage sur des évènements suffisamment documentés.

VI.3 SIMULATIONS A L'APEX

Les simulations réalisées à l'apex posent certains problèmes quant à l'applicabilité de la méthode. L'apex, zone où débute le cône de déjection, induit une baisse importante de la pente du chenal. Les masses initiées peuvent alors difficilement prendre de la vitesse, et se reprendre (annexe 16). Les difficultés rencontrées tiennent aussi à la hauteur de la source initiée. De gros volumes nécessitent, soit d'étaler la zone initiale le long du chenal en amont, soit de réduire cette surface en augmentant considérablement la hauteur de la zone source. Ceci pose évidemment des problèmes liés à la pertinence des résultats ainsi qu'à la **représentativité de telles conditions initiales** comparées aux conditions réelles. Les volumes réduits ont quant à eux une faible extension, et ne parviennent pas à s'éprendre dans le cône de déjection.

L'application de notre démarche nécessite de fortes pentes d'initiation que l'état de surface de l'apex ne fournis généralement pas. L'adaptation de la méthode peut alors être envisagée, notamment en artificialisant les gradients de pente de MNT.

VI.4 MISE EN PLACE DE CARTES D'ALEA

Les cartes d'aléa (annexes 17→22) seront décomposées en cartes de hauteurs et de vitesses comportant chacune les informations de distances de parcours. Les valeurs maximales, non représentatives dans l'analyse des données, ont cependant été conservées pour la cartographie afin de représenter les valeurs exactes issues de l'utilisation de MASSMOV2D. Le manque d'informations, concernant les probabilités de retour des événements, indispensables à l'établissement de résultats qualitatifs ne permettent pas d'appliquer une matrice d'aléa.

Le risque est généralement cartographié à l'échelle 1 :25 000^{ème} ou 1 :50 000^{ème} (Flageollet, 1999). Les échelles utilisées seront cependant adaptés à la zone source et au bassin versant permettant la visualisation de **l'ensemble du parcours**, de la zone d'initiation, au pied de la lave, quelque soit la distance, tout en conservant une **précision de lecture** satisfaisante. Enfin, le format permet de compiler un **nombre important** de résultats et d'évaluer les variations de résultats sur des zones sources distinctes du même bassin versant. Enfin, les limites des bassins versants ont été représentés afin de situer chaque zone en se référant à la carte de localisation (cf. annexe 1).

VII. CONCLUSION

Le diagnostic de l'aléa lave torrentielle et des risques associés passe par une **interdisciplinarité indispensable**. La quantification de ses paramètres reste cependant un enjeu central, et les modèles de propagation et de dépôt sont alors un outil précieux d'aide à la décision. Nous avons, par notre démarche, observés des variations significatives de comportement du fluide liés aux conditions initiales. La finesse des résultats est alors liée à la connaissance du praticien ainsi qu'aux principes et lois utilisés dans les modèles, conditionnant en grande partie l'évaluation du risque associé.

Nous pouvons considérer que nos résultats participent à développer les perspectives d'application de ce type de méthode, à échelle régionale, par une approche appliquant la liquéfaction de masses. Ainsi, les applications de ce type de méthodologie peuvent être la simulation de l'aléa sur plusieurs bassins versants après spatialisation de zones préalablement identifiés comme susceptibles au déclenchement et à la propagation de laves torrentielles.

Les scénarios ici réalisés associent des valeurs extrêmes pour les propriétés physiques du flux permettent de réduire significativement les incertitudes face à l'évaluation du risque et d'approcher la complexité du phénomène naturel.

Nous pouvons cependant suggérer un certain nombre de **propositions d'amélioration de la démarche** : Le **déclenchement multi sources**, serait apte à reproduire les apports sédimentaires réels tout au long de la phase de propagation. La **remise en mouvement**, par une autre vague du matériel préalablement déposé dans le chenal permettrait d'accroître les volumes issus des vagues successives. Aussi, la possibilité **d'adapter les paramètres des scénarios** en fonction de leurs écarts avec des événements observés et suffisamment quantifiés, aboutirait à affiner les gammes de paramètres initiaux et les résultats obtenus.

Il reste nécessaire d'améliorer les connaissances concernant les processus hydro-géomorphologiques dans les zones de montagne, et contribuer à appliquer ces connaissances à la gestion des risques dans une approche holistique.

La modélisation n'a alors de sens, dans une démarche pluridisciplinaire, que si elle s'avère un outil adapté à la formalisation des phénomènes d'interface et du caractère hybride des phénomènes qu'ils produisent. (Herve, 2009). Elle doit être intégrée au cœur d'une gouvernance territoriale, alliant les structures et processus de décisions collectives rendues par des acteurs gouvernementaux et non gouvernementaux (Renn, 2008).

Enfin, rappelons que le point crucial pour comprendre la cause de la survenance de catastrophes est qu'elles ne sont pas uniquement causées par le phénomène naturel, mais sont aussi le produit de l'environnement social, politique, et économique. (Blaikie et al. 1994).

VIII. BIBLIOGRAPHIE

- Amiot, A. & Nexon, C (1995). Inventaire des aléas dans le Bassin de Barcelonnette depuis 1850. *Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur*. **173**
- Antoine, P., Giraud, A., Meunier, M. & Van Asch, Th.W.J (1995). Geological and geotechnical properties of the "Terres Noires" in southeastern France: Weathering, erosion, solid transport and instability. *Engineering Geology*, 40. **223-234**.
- Akbas, S. & Blahut, J (2009), Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows. *Landslide Processes, from geomorphologic mapping to dynamic modeling, edited by Malet J.P, Remître, A., Boogaard, T., CREG, Strasbourg, France*, **356**, 229-233.
- Bardou, E (2002). Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sr un bassin versant alpin. *Thèse de Doctorat de Sciences Techniques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*. **188**.
- Beguera, S., Van Asch, Th-W., Malet, J-P., & Gröndahl, S (2009). A GIS-based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain *Nat. Hazards Earth Syst. Science*. **9**, 1897–1909,
- Besson, L (1996). Les risques naturels en montagne. Traitement, prévention, surveillance. *Artès-Publiaip*, **438**.
- Bianco, G., Brochot, S., Laigle, D. & Ruberto, G (2001) Mise en commun des méthodes et des connaissances sur les processus des laves torrentielles pour la protection des zones habitées. *Dans: Zanolini F, Alzate L, Turrone E (eds) Proiet Interreg2 1994–1999 France-Italie-Connexion réseaux de données et mises en commun des connaissances et des expériences pour la gestion des risques d'inondations en région alpine, co-édition région Pie'mont/région Rhône-Alpes*. **39**, 133–172
- Blaikies, P., Cannon, T., Davis, I & Wister, B (1999). At Risk, natural hazards, people vulnerability, and disasters, *Routledge London and New York*, **284**, 3-15.
- Bonnet-Staub, I (1998). Mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans les alpes francaises, contribution à la maitrise du risque. *Thèse de doctorat, Ecole des mines de Paris*, **237**.
- Brochot, S., Marchi, L & Lang, M. (2002). L'estimation des volumes des laves torrentielles: méthodes disponibles et application au torrent du Poucet (Savoie). *Bulletin Engineering Geology Environment*. **61**, 389–402.
- Chen, H. & Lee, C.F. (1999). Numerical simulation of debris flows. *Can. Geotech. J.* **37**, 146–160.
- Childs, A 2004 , AcUsers, Developper's corner, July-September. **4**, 32-35
- Couarraze, G. & Grossidor J.L. (1983). Initiation à la rhéologie. *Paris - Lavoisier - Tec & Doc*. **73**.
- Coussot, P (1996). Les laves torrentielles, connaissances à l'usage du praticien. *Série Etudes et Equipements pour l'Eau et l'Environnement no 23, Cemagref*. **177**. Antony, L. J, Gap, imp.
- Coussot, P. & Meunier, M (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science. Review*. **40**, 209-227.
- CROSTA, G (2000). Risk scenarios for complex debris slump, debris flow phenomena. *In Landslide in research, theory and practice*. **536**, London, 2000, vol.1, 343-350.
- D'Ercole, R., Thouret, J. C., Dollfus, O. & Asté, J. P (2001). Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés: concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de Géographie Alpine, volume 82, numéro 4*, **9**, 87-96.

- Lefèvre, C. & Schneider, J. L (2003). Les Risques Naturels Majeurs. *Collection Géoscience*. **324**, Éditions GB Science Publisher.
- Garitte, G. & Lahousse, P (2002). Contribution à l'évaluation de l'aléa torrentiel dans le bassin versant de Riou Chanal. *Géomorphologie : relief, processus, environnement, n°1*. **6**, 61-67.
- Ghilardi, P., Natale, L. & Savi, F (2001). Modeling debris flow propagation and deposition *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science, Volume 26*. **9**, 651-656.
- Guariguata, M.R. & Larsen, M.C (1990), Preliminary map showing landslides in El Yunque quadrangle, Puerto Rico. *U.S. Geological Survey Open-file Report*. **162**, 89-257.
- Hungr, O., Morgan, G.C. & Kellerhals, R (1984). Quantitative analysis of debris torrent hazard for design of remedial measures. *Canadian Geotechnique J.* **677**, 21:663.
- Iverson, R.M (1997). The physics of debris flows, *Reviews of Geophysics*, **35**, 245-296.
- Kappes, S.M., Malet, J.P., Remaître, A., Horton, P., Jaboyedoff, M. & Bell, R (2010). Assessment of debris flow susceptibility at medium-scale in the Barcelonnette Basin, France. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **13**
- Kert, C (1995). Les techniques de prévision et de prévention des risques naturels : séismes et mouvements de terrain. *Rapport de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, n°2017*, Assemblée Nationale, Paris. **352**.
- Kronfellner-Kraus, G (1985). Quantitative estimation of torrent erosion. *In: Proc Int Symp on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, Tsukuba, Japan*. **3**, 107-110.
- Malet, J.-P., Laigle, D., Remaître, A. & Maquaire, O (2005). Triggering conditions and mobility of debris-flows associated to complex earthflows. *Geomorphology*, 215-235, **66**, 1-4.
- Malet, J-P., Remaître, A., Ancey, C., Locat, J., Meunier, M. & Maquaire, O (2002). Caractérisation rhéologique des coulées de débris et des laves torrentielles du bassin marneux de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France), Premiers résultats. *Rhéologie, Vol.1*, 17-25.
- Mangeney-Castelnau, A., F. Bouchut, J. P., Vilotte, E., Lajeunesse, A., Aubertin, & M. Pirulli (2005), On the use of Saint Venant equations to simulate the spreading of a granular mass. *J. Geophys. Res.*, **110**.
- Meunier, M (1991). Eléments d'hydraulique torrentielle. *Série Etudes Montagne n°1*, Cemagref. **278**.
- Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement (1999). Plan de prévention des risques naturels (PPR) - Risque d'inondation, guide méthodologique, *La documentation française*, Paris. **123**.
- Petrascheck, A. & Kienholz, H (2003). Hazard assessment and mapping of mountain risks in Switzerland. *Dans : D. Rickenmann, and C. Chen, Editors, 3rd Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation*, Millpress, Davos. 25-39.
- Pierson, T.C. & Costa J.E. (1987) - A rheologic classification of subaerial sediment-water flows, *Rew. Engin. Geol.*, vol3. 1-12
- Renn, O (2008) Risk Governance, coping with Uncertainty in a complex World. *Earthscan Risk in Society series, London*. **443**.
- Rickenmann, D (1997) Estimation des laves torrentielles. *Ing Archit Suisses*. **19**, 386-392
- Remaître, A., Malet, J.-P., Ancey, C., Locat, J. & Maquaire, O (2005). Flow behaviour and runout modelling of a complex debris flow in clay-shales basin. *Earth Surface Processes and Landforms* **30**, 479-488.
- Takahashi, T (1991). Debris Flow. *International Association for Hydraulic Research monograph*. A.A. Balkema, Rotterdam. 1- 24

Takei, A (1984). Interdependence of sediment budget between individual torrents and a river-system. *Internationales Symposium Interpraevent*, Villach, Österreich, Band 2 ; 35-48

Thiery, Y (2007). Susceptibilité du Bassin de Barcelonnette (Alpes du sud, France) aux 'mouvements de versant' : cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste. Thèse de Doctorat, Université de Caen. **445**.

Thiery, Y., Malet, J.-P., Sterlacchini, S., Puissant, A. & Maquaire, O. (2007). Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment. *Geomorphology*. **9**, 38-59.

Veyrat-charvillon, S (2005). Elaboration d'une méthode de prédiction du volume maximal d'une lave torrentielle. *Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand 2*. **192**.

Ghilardi, P., Natale, L. & Savi, F. (2001). Modelling debris flow propagation and deposition. *Physics and Chemistry of the Earth*. **26**. 651-656.

Hungr, O., Morgan, G.C. & Kellerhals, R (1984). Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal*. **21**, 663-667.

Vandine, D. F (1985). Debris flows and debris torrents in the Southern Canadian Cordillera. *Canadian Geotechnical Journal*, **22**, 44-68.

Flageollet, J.C (1999). Landslide hazard - a conceptual approach in risk viewpoint. *Springer-Verlag* 3-18.

Hutter, K., Svendsen, B. & Rickenmann, D (1996). Debris flow modelling : a review . *Continuum Mech. Therodyn*. **8**. Springer-Verlag. 1-35.

Yuanfan, T (2007). A debris flow simulation model for the evaluation of protection structures. *Journal of mountain science*. **4**. 193 – 200.

Guariguata, M.R. & Larsen, M.C (1990). Preliminary map showing landslides in El Yunque quadrangle, Puerto Rico. *U.S. Geological Survey Open-file Repor.* 89-257.

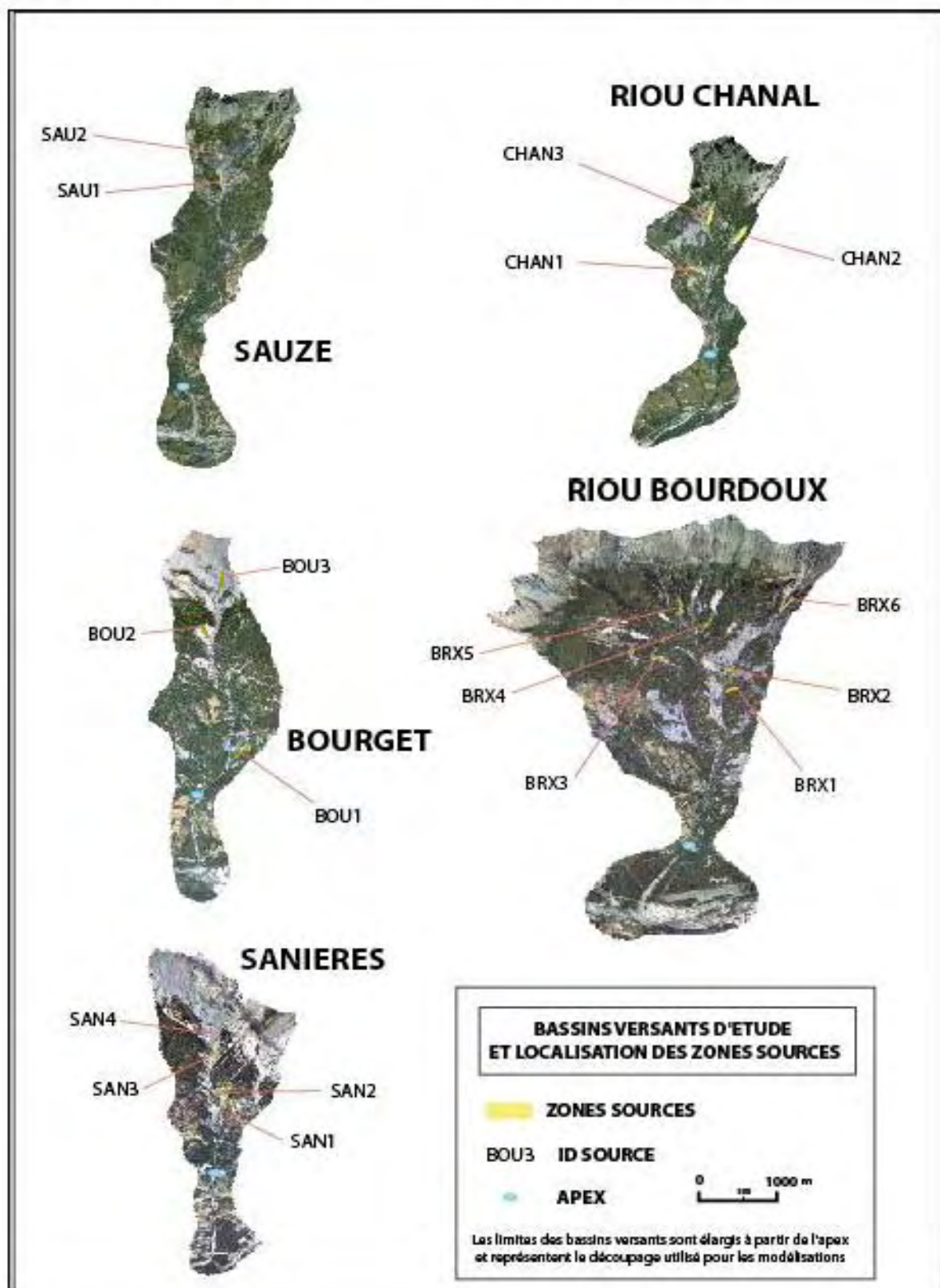
Zhou, G., Esaki, T., Mitani, Y., Xie, M. & Mori, J (2003). Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach. *Eng. Geol.* **68**, 373-386.

IX. LISTE DES ANNEXES

<i>Annexe 1 : Identification des bassins versants d'étude et des zones sources</i>	39
<i>Annexe 2 : Fiche de terrain</i>	40
<i>Annexes 3 : Photographies d'aménagements sur les cinq torrents</i>	40
<i>Annexe 4: Estimations des volumes par méthodes globales</i>	41
<i>Annexe 5: Tableau de résultats des estimations de volumes</i>	42
<i>Annexe 6 : Tableau type de simulations (par volume)</i>	42
<i>Annexe 7 : Script (VBS) de répartition des données initiales</i>	43
<i>Annexe 8: Tableau type des requêtes d'analyse pour un volume</i>	44
<i>Annexe 9 : Script de traitement (MATLAB) des résultats de simulation</i>	45
<i>Annexe 10 : Données d'influence des paramètres de simulation</i>	46
<i>Annexe 11 : Influence des paramètres de simulation, torrent des Sanières</i>	48
<i>Annexe 12 : Influence des paramètres de simulation, torrent de Riou Chanal</i>	49
<i>Annexe 13 : Influence des paramètres de simulation, torrent de Riou Bourdoux</i>	50
<i>Annexe 14 : Influence des paramètres de simulation, torrent de Sauze</i>	51
<i>Annexe 15 : Influence des paramètres de simulation, torrent de Bourget</i>	52
<i>Annexe 16 : Simulations à l'apex</i>	53
<i>Annexe 17 : Cartes d'aléa, torrent des Sanières</i>	54
<i>Annexe 18 : Cartes d'aléa, torrent de Riou Chanal</i>	55
<i>Annexe 19 : Cartes d'aléa, torrent de Sauze</i>	56
<i>Annexe 20 : Cartes d'aléa, torrent de Riou Bourdoux 1</i>	57
<i>Annexe 21 : Cartes d'aléa, torrent de Riou Bourdoux 2</i>	58
<i>Annexe 22 : Cartes d'aléa, torrent de Bourget</i>	59

X. ANNEXES

Annexe 1 : Identification des bassins versants d'étude et des zones sources



Annexe 2 : Fiche de terrain

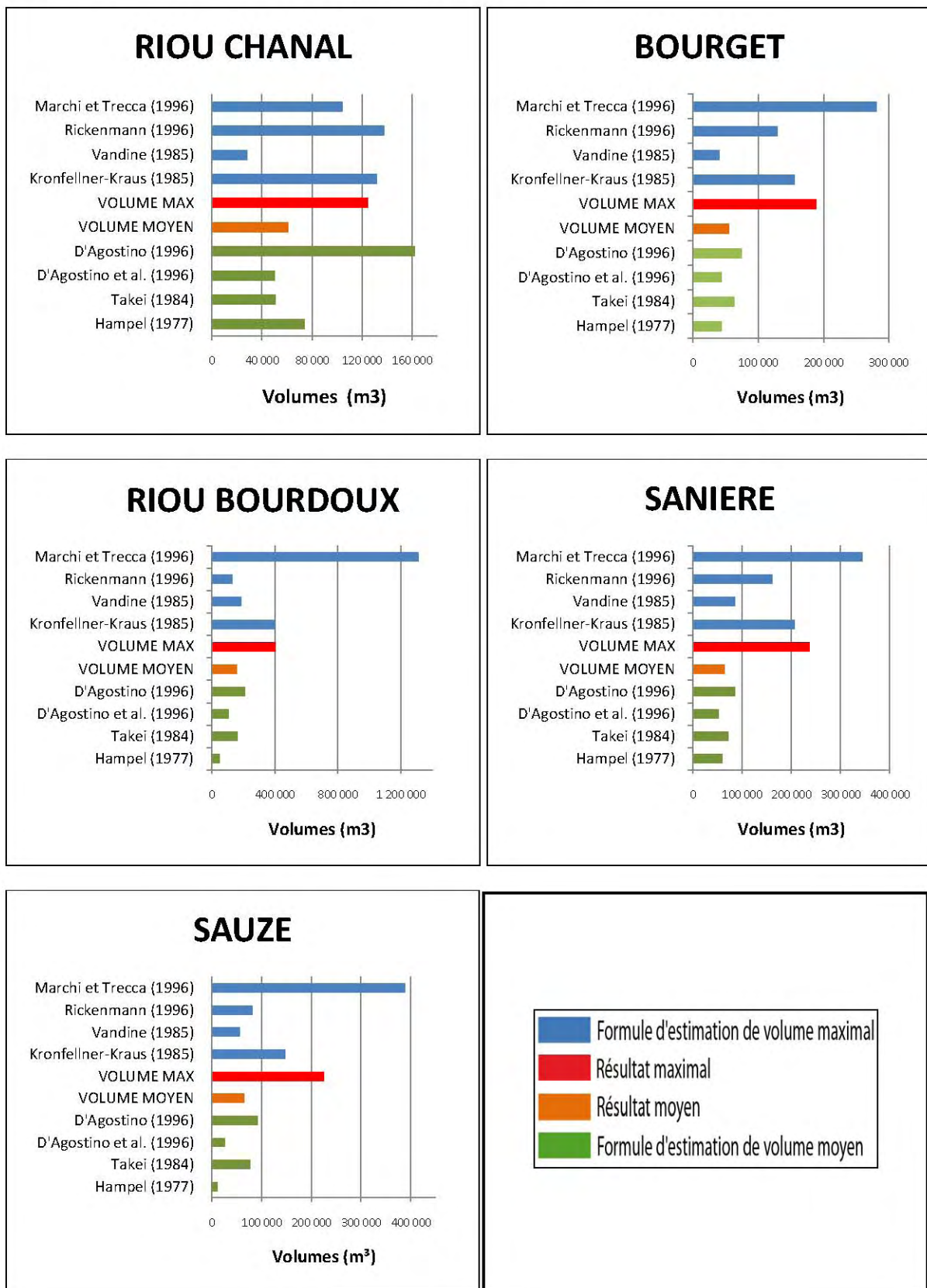
FICHE DE TERRAIN / UBAYE			<i>Commune</i>	Faucon de Barcelonnette	
24.04.2010 - 29.04.2010			<i>Torrent</i>	Saniere	
Cônes de déjection des torrents Bourget (BOU), Riou_chanal (CHN), Riou_bourdoux (BRX), Sanière (SAN), Sauze (SAU)			<i>Apex (X,Y)</i>	388103 - 833819	
			<i>Exutoire (X,Y)</i>	3831831 - 381397	
			<i>Longueur (l)</i>	1856 m	
			<i>Date</i>	24/05/2010	
Rive Gauche			Rive droite		
<i>N° section</i>	1	<i>Profil</i>	<i>Profil</i>	1	<i>N° section</i>
<i>Type</i>	A			C	<i>Type</i>
<i>(l)</i>	425			100	<i>(l)</i>
<i>N° photo</i>	1			10	<i>N° photo</i>
<i>Aval</i> ↓ <i>Amont</i>					<i>Aval</i> ↓ <i>Amont</i>
<i>N° section</i>	9	<i>Profil</i>	<i>Profil</i>	8	<i>N° section</i>
<i>Type</i>	B			B	<i>Type</i>
<i>(l)</i>	240			310	<i>(l)</i>
<i>N° photo</i>	9			26	<i>N° photo</i>

Annexes 3 : Photographies d'aménagements sur les cinq torrents

1 Dignes, torrent de Riou Bourdoux 2 Berges naturelles, Riou Chanal 3 Murs de rives, torrent de Saniere 4 Protection de zone d'habitat, torrent de sauze 5 Dignes cône, torrent du Bourget 6 Réhaussement de berges, torrent du Bourget



Annexe 4: Estimations des volumes par méthodes globales



Annexe 5: Tableau de résultats des estimations de volumes

REFERENCES	VOLUMES PAR TORRENT				
	<i>Riou Chanal</i>	<i>Bourget</i>	<i>Saniere</i>	<i>Riou Bourdoux</i>	<i>Sauze</i>
Hampel (1977)	73 943	43 571	59 304	47 622	10 022
Takei (1984)	50 750	63 554	71 800	162 697	77 372
D'Agostino et al. (1996)	50 233	43 464	51 616	104 108	25 370
D'Agostino (1996)	161 867	73 913	84 511	207 545	91 742
VOLUME MOYEN	60 761	55 127	63 284	158 117	64 828
VOLUME MAX	154 789	188 813	237 347	405 382	224 211
Kronfellner-Kraus (1985)	131 885	155 876	206 710	396 200	146 779
Vandine (1985)	27 900	40 200	84 511	187 700	55 500
Rickenmann (1996)	137 883	129 163	161 631	129 109	81 854
Marchi et Trecca (1996)	194 600	281 400	343 700	1 313 900	388 500
Brochot et al. (2000)	175 634	343 844	687 946	3 795 570	616 875

Annexe 6 : Tableau type de simulations (par volume)

n° de simu	V (m3)	SEUIL (PA)	K (PA.S)	VA	T (min)	D (Kg.m3)	Φ1 (°)	Φ2 (°)
1	20.000	100	30	2	10	2000	5	15
2	20.000	100	30	2	20	2000	5	15
3	20.000	100	30	4	10	2000	5	15
4	20.000	100	30	4	20	2000	5	15
5	20.000	100	30	4	30	2000	5	15
6	20.000	100	30	6	20	2000	5	15
7	20.000	100	30	6	30	2000	5	15
8	20.000	100	90	2	10	2000	5	15
9	20.000	100	90	2	20	2000	5	15
10	20.000	100	90	4	10	2000	5	15
11	20.000	100	90	4	20	2000	5	15
12	20.000	100	90	4	30	2000	5	15
13	20.000	100	90	6	20	2000	5	15
14	20.000	100	90	6	30	2000	5	15
15	20.000	500	30	2	10	2000	5	15
16	20.000	500	30	2	20	2000	5	15
17	20.000	500	30	4	10	2000	5	15
18	20.000	500	30	4	20	2000	5	15
19	20.000	500	30	4	30	2000	5	15
20	20.000	500	30	6	20	2000	5	15
21	20.000	500	30	6	30	2000	5	15
22	20.000	500	90	2	10	2000	5	15
23	20.000	500	90	2	20	2000	5	15
24	20.000	500	90	4	10	2000	5	15
25	20.000	500	90	4	20	2000	5	15
26	20.000	500	90	4	30	2000	5	15
27	20.000	500	90	6	20	2000	5	15
28	20.000	500	90	6	30	2000	5	15

Annexe 7 : Script (VBS) de répartition des données initiales

```

Const strURLList = "E:\Scripts\test\source2\urllist.txt"
Const ForReading = 1,ForAppending = 8,TristateTrue = -1,TristateUseDefault = -
2,TristateFalse = 0
Set fs = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
  Set f = fs.GetFolder("E:\Scripts\test\source2")
  Set fc = f.SubFolders
  For Each fl in fc
    Wscript.echo fl.name
    readURLList fl.name
  Next
Function readURLList(dossier_racine)
Set objTextFile = fs.OpenTextFile(strURLList, ForReading)
  Do Until True = objTextFile.AtEndOfStream
    arrStrInputLine = objTextFile.ReadAll

  Loop
    arrStrInputLine = Split(arrStrInputLine,VbCrLf)
  For Each strURL In arrStrInputLine
    Liste_src = Split(strURL,"|")
    i=0
    For Each source In Liste_src
      if i = 1 then
        Liste_dest = Split(source,";")
        'WScript.Echo "test"
        For Each destination In Liste_dest
          'WScript.Echo "Copy " +
current_src+"/"+ " + destination
          copy_files
dossier_racine+"/"+current_src,dossier_racine+"/"+destination
          'Wscript.Echo i
        Next
        i = 0
        exit for
      end if

      'Wscript.Echo "source :" + source
      'Wscript.Echo i
      if i = 0 then
        current_src = source
        'Wscript.Echo "current_src:" + current_src
        'Wscript.Echo i
        i = 1
      end if

      'Exit for
    Next
  Next
End Function
Sub copy_files (sOriginFolder, sDestinationFolder)
  Dim sFile, oFSO
  Set oFSO = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
'sOriginFolder = "c:\tp"
'sDestinationFolder = "c:\tp2"
For Each sFile In oFSO.GetFolder(sOriginFolder).Files
  If Not oFSO.FileExists(sDestinationFolder & "\" & oFSO.GetFileName(sFile)) Then
    oFSO.GetFile(sFile).Copy sDestinationFolder & "\" & oFSO.GetFileName(sFile),True
    WScript.Echo "Copying : " & Chr(34) & oFSO.GetFileName(sFile) & Chr(34) & " to "
& sDestinationFolder
  End If
Next
end sub

```

Annexe 8: Tableau type des requêtes d'analyse pour un volume

N° de requête	Volume	Distance	H max	V max	Paramètre étudié
(1 - 28)	20_000				Volume
(1 - 14)	20_000 / 100				Seuil de contrainte
(1-7)	20_000 / 100 / 30				Viscosité
(1.2)	20_000 / 100 / 30 / 2				Nbre Vagues
(3.4.5)	20_000 / 100 / 30 / 4				Nbre Vagues
(6.7)	20_000 / 100 / 30 / 6				Nbre Vagues
(1.3)	20_000 / 100 / 30 / 10				Tps simul
(2.4.6)	20_000 / 100 / 30 / 20				Tps simul
(5.7.12.14)	20_000 / 100 / 30 / 30				Tps simul
(8-14)	20_000 / 100 / 90				Viscosité
(8.9)	20_000 / 100 / 90 / 2				Nbre Vagues
(10.11.12)	20_000 / 100 / 90 / 4				Nbre Vagues
(13.14)	20_000 / 100 / 90 / 6				Nbre Vagues
(8.10)	20_000 / 100 / 90 / 10				Tps simul
(9.11.13)	20_000 / 100 / 90 / 20				Tps simul
(12.14)	20_000 / 100 / 90 / 30				Tps simul
(15-28)	20_000 / 500				Seuil de contrainte
(15-21)	20_000 / 500 / 30				Viscosité
(15.16)	20_000 / 500 / 30 / 2				Nbre Vagues
(17.18.19)	20_000 / 500 / 30 / 4				Nbre Vagues
(20.21)	20_000 / 500 / 30 / 6				Nbre Vagues
(15.17)	20_000 / 500 / 30 / 10				Tps simul
(16-18-20)	20_000 / 500 / 30 / 20				Tps simul
(19-21)	20_000 / 500 / 30 / 30				Tps simul
(22-28)	20_000 / 500 / 90				Viscosité
(22.23)	20_000 / 500 / 90 / 2				Nbre Vagues
(24.25.26)	20_000 / 500 / 90 / 4				Nbre Vagues
(27.28)	20_000 / 500 / 90 / 6				Nbre Vagues
(22.24)	20_000 / 500 / 90 / 10				Tps simul
(23.25.27)	20_000 / 500 / 90 / 20				Tps simul
(26-28)	20_000 / 500 / 90 / 30				Tps simul

Annexe 9 : Script de traitement (MATLAB) des résultats de simulation

```

sep='/';
part1='bourget';
part2a='source';
part5a='h.map';
part5b='v.map';

liste_volume=[ {'20_000'} {'50_000'} {'100_000'} {'200_000'} {'350_000'}];
liste_source=[ {'1'} {'2'} {'3'} ];
liste_num_simulation=[ {'5'} {'7'} ]
k=1;
for i=1:length(liste_source)    part2b=liste_source(i);

    for j=1:length(liste_volume)
        part3=liste_volume(j);
        name = strcat(part1,'-',part2a,'-',part2b,'-',part3);
        barre=waitbar(0,name);
        for m=1:length(liste_num_simulation)
            part4=liste_num_simulation(m);
            acces=strcat(part1,sep,part2a,part2b,sep,part3,sep,part4,sep,part5b); %
            filename = char(acces);
                [x,y,map] =read_pcr(filename);          S=size(map);

                Total(m,1:S(1),1:S(2))= map;
                clear map
                waitbar(m/28)
                end
            moy(k) = mean2(Total(~isnan(Total)));
            maxi(k) = max(max(max(Total(~isnan(Total)))));
            ecart(k)= std2(Total(~isnan(Total)));
            id(k)=i;

                value=reshape( Total(~isnan(Total)),1,[]);
                cla = 0:1:20; % définition des classes (taille et nombre)
                [n, bin]=histc(value, cla);
                n=n./sum(n).*100;% normalisation

                Carte_max= max(Total);
                H_max=squeeze(Carte_max(1, :, :));

                f = find(reshape(Carte_max(~isnan(Carte_max)),1,[]) > 0.1);
                L=length(f);
                Aire(k) = L*5*5;
                k=k+1;
                output=strcat(part2a,'_',part2b,'_',part3,'.map');
                D=char(output);
                %write_map(x,y,H_max,-9999,D)

                figure
                bar(cla,n)
                xlabel('Hauteur (m)')
                ylabel('Frequence (%)')
                title(D)
                axis([min(cla)-1 max(cla) 0 100])
                close(barre)
                clear Total

        end
    end
MoyMaxi=[id' moy' ecart' maxi' Aire'];
save moyenne.txt MoyMaxi -ASCII

```

Annexe 10 : Données d'influence des paramètres de simulation

BV	Volume (m ³)	SEUIL					VISCO					2/4 Vagues					4/6 Vagues					10MIN/20MIN					20MIN/30MIN				
		Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy
BOURGET	20000	23,85	8,44	10,53	-6,91	-7,10	-3,17	4,16	16,61	-1,20	19,61	-4,96	-3,21	3,75	36,35	6,58	12,64	10,70	14,12	-6,76	19,93	85,10	4,59	-7,16	20,90	0,60	21,88	-4,55	11,45	-4,81	32,20
	50000	13,62	4,94	14,17	-9,19	-7,52	49,61	1,30	9,09	13,59	-6,64	-3,37	-4,44	14,69	29,64	35,96	-4,49	5,08	4,53	-1,73	-4,06	-0,43	2,48	5,70	-1,64	-1,28	-0,72	10,71	8,15	-3,37	13,65
	100000	17,36	6,58	4,44	-0,45	11,98	29,85	3,12	11,67	11,35	12,43	-9,71	0,62	22,87	18,64	29,92	25,83	-5,03	3,65	-2,33	20,32	26,96	0,08	3,96	-7,08	9,07	20,41	1,17	8,05	-1,43	8,91
	200000	-2,59	-3,56	12,11	12,12	19,51	14,23	-5,19	12,92	21,06	15,86	15,12	-5,95	0,22	25,68	-8,93	-5,48	-1,07	8,58	4,65	-0,82	-8,23	11,73	-2,94	15,85	11,54	-6,15	6,32	-0,97	-6,79	-6,09
	350000	-3,03	4,63	8,31	-1,07	20,70	-5,38	7,10	9,00	-1,34	13,77	11,72	-4,37	11,09	11,79	7,19	-3,51	-5,32	4,52	-4,28	2,21	-2,87	-2,62	4,22	-1,30	1,03	-9,68	-4,03	4,88	-0,80	3,21

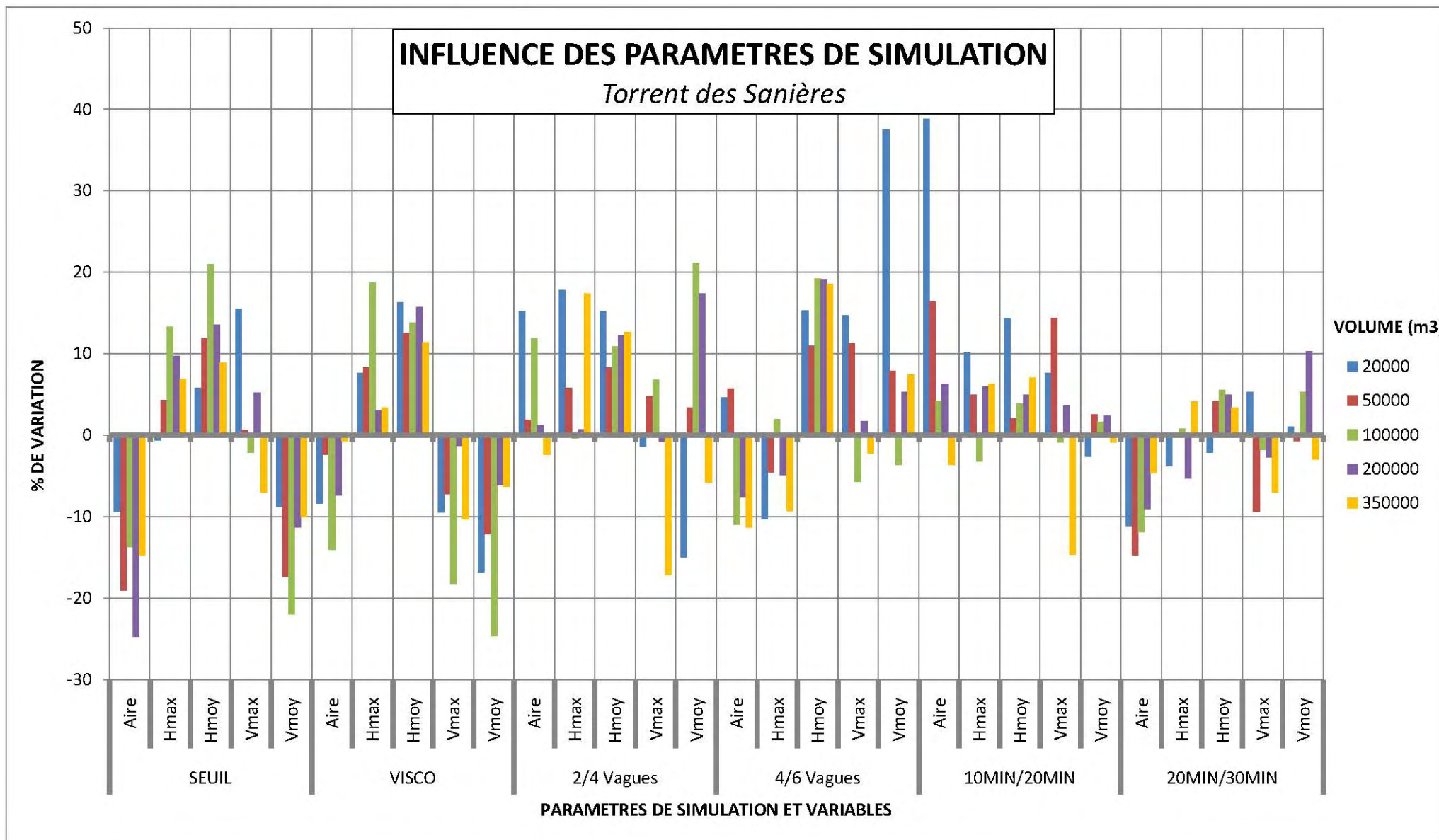
BV	Volume (m ³)	SEUIL					VISCO					2/4 Vagues					4/6 Vagues					10MIN/20MIN					20MIN/30MIN				
		Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy
SAUZE	20000	46,02	-6,68	48,50	16,09	4,09	41,00	8,45	9,95	10,55	26,53	24,10	7,10	11,77	-7,35	8,29	24,10	7,10	11,77	-7,35	8,29	29,06	54,20	156,56	-7,96	9,41	29,06	54,20	156,56	-7,96	9,41
	50000	60,10	5,62	6,55	0,47	29,39	27,89	14,40	12,24	-8,45	25,03	6,44	17,05	-1,17	-9,93	6,18	6,44	17,05	-1,17	-9,93	6,18	4,72	34,57	152,01	11,40	5,31	4,72	34,57	152,01	11,40	5,31
	100000	12,35	18,14	7,52	-8,56	40,04	17,69	16,64	12,17	-7,29	23,97	-3,27	15,02	9,09	-3,90	5,34	-3,27	15,02	9,09	-3,90	5,34	-4,36	33,45	137,96	-0,29	1,35	-4,36	33,45	137,96	-0,29	1,35
	200000	20,68	9,93	10,33	-2,58	29,99	-9,57	12,00	8,90	-7,31	19,74	-8,50	0,30	5,94	-4,55	2,54	-8,50	0,30	5,94	-4,55	2,54	12,34	23,66	107,76	-0,82	3,04	12,34	23,66	107,76	-0,82	3,04
	350000	22,15	200,85	10,41	12,77	28,72	-8,18	12,48	8,97	11,37	16,20	-7,05	-3,59	5,43	-3,63	3,54	-7,05	-3,59	5,43	-3,63	3,54	-6,97	29,72	91,85	2,56	2,41	-6,97	29,72	91,85	2,56	2,41

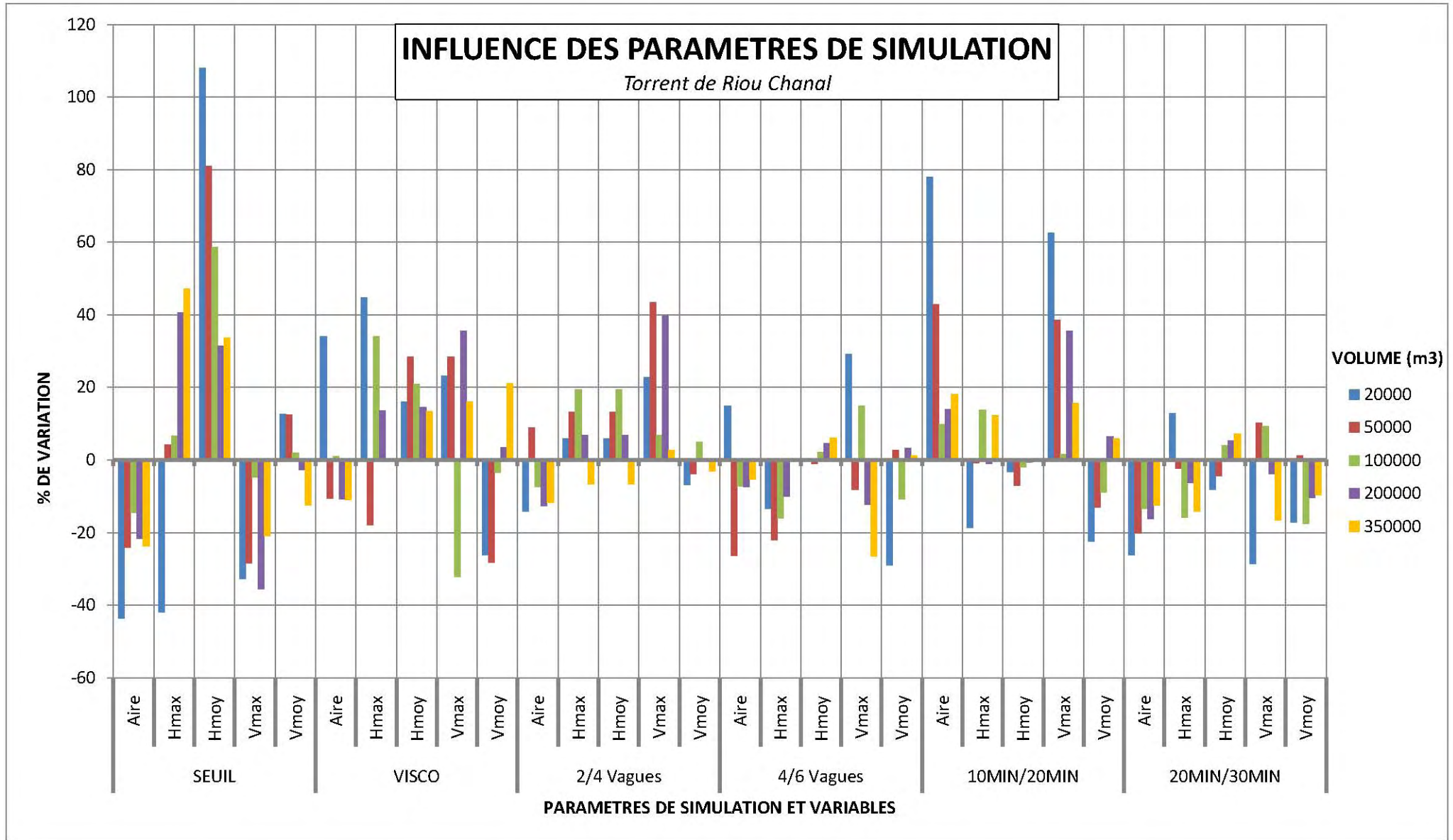
BV	Volume (m ³)	SEUIL					VISCO					2/4 Vagues					4/6 Vagues					10MIN/20MIN					20MIN/30MIN				
		Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy
RIOU BOURDOUX	20000	15,75	-2,60	35,06	14,59	7,47	5,25	17,03	6,00	-3,30	-9,11	16,79	4,50	5,11	4,19	-6,50	-2,61	-0,75	6,31	10,02	4,62	4,74	5,16	5,48	-4,37	-6,62	-3,60	-3,16	3,43	-7,46	4,59
	50000	-9,45	-0,40	23,76	16,28	22,18	17,86	6,38	12,57	-8,90	16,76	5,73	0,72	-0,55	3,36	7,19	10,45	-1,74	5,60	2,04	-2,25	4,03	5,25	3,87	-3,37	-3,06	-8,61	-5,44	-3,87	3,57	0,86
	100000	25,67	4,45	22,06	14,09	17,93	19,59	4,54	15,34	-9,79	17,77	-6,78	2,10	4,10	6,76	-3,40	16,16	-1,22	9,65	-0,48	-0,31	4,82	2,12	7,02	-0,88	-6,13	13,55	-6,14	2,22	-2,79	-3,09
	200000	19,84	4,88	27,87	16,89	11,03	16,06	2,69	13,98	1,20	-4,66	10,46	-0,03	12,01	12,34	15,31	15,65	-2,06	6,13	0,46	18,29	21,85	13,02	3,38	10,75	5,92	10,52	-9,63	6,83	2,39	5,30
	350000	12,56	5,35	11,95	11,37	13,11	16,09	3,11	6,91	5,36	12,78	-6,59	3,54	14,53	4,76	13,99	-4,83	-7,87	5,54	-0,90	5,68	6,05	-0,63	2,38	0,75	-2,03	-9,66	-1,25	8,70	-0,77	11,20

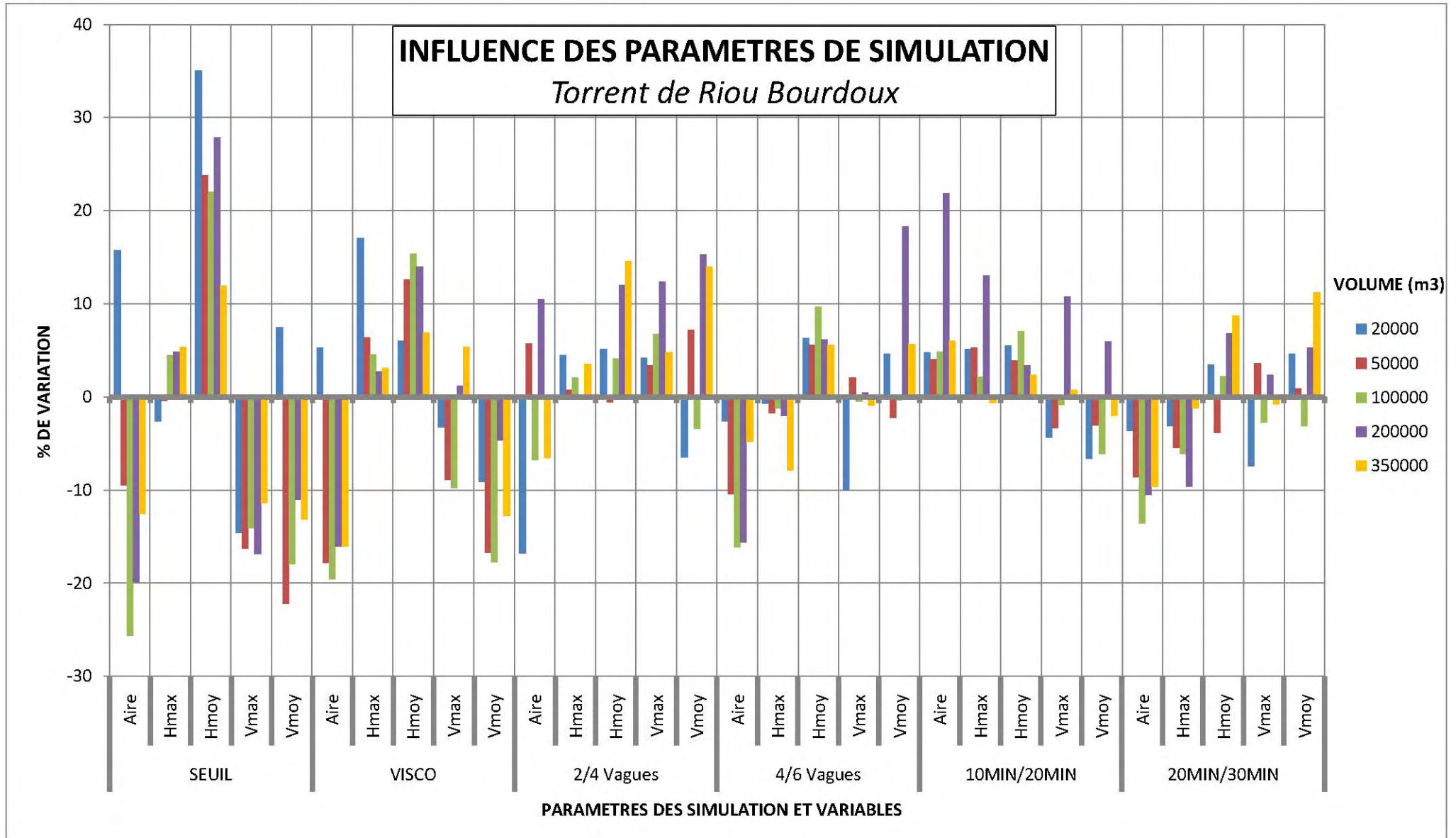
BV	Volume (m3)	SEUIL					VISCO					2/4 Vagues					4/6 Vagues					10MIN/20MIN					20MIN/30MIN				
		Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy
RIOU_CHANAL	20000	-43,76	-41,95	108,10	-32,72	12,62	34,13	44,70	16,11	23,08	-26,17	-14,29	5,96	5,96	22,69	-6,93	14,98	-13,52	0,12	729,22	-29,09	77,99	-18,68	-3,39	62,58	-22,49	-26,31	12,90	-8,18	-28,59	-17,17
	50000	-24,11	4,12	81,03	-28,43	12,51	-10,64	-18,05	28,46	28,43	-28,33	8,79	13,21	13,21	43,52	-3,89	-26,39	-22,18	-1,09	-8,21	2,73	42,91	-0,88	-7,02	38,62	-13,16	-20,21	-2,29	-4,51	10,15	1,09
	100000	-14,58	6,54	58,61	-4,75	1,89	1,01	34,05	20,82	-32,25	-3,53	-7,54	19,40	19,40	6,82	4,85	-7,22	-16,12	2,19	14,82	-10,82	9,75	13,86	-2,00	1,55	-8,93	-13,48	-15,83	4,06	9,32	-17,58
	200000	-21,81	40,70	31,39	-35,69	-2,72	-10,92	13,50	14,58	35,45	3,49	-12,76	6,79	6,79	39,65	-0,37	-7,47	-10,05	4,60	-12,28	3,22	13,98	-1,08	-0,61	35,63	6,36	-16,34	-6,35	5,38	-3,90	-10,39
	350000	-23,82	47,23	33,79	-20,99	-12,46	-11,02	-0,22	13,31	16,01	21,03	-11,72	-6,63	-6,63	2,64	-3,09	-5,43	-0,37	6,12	-26,59	1,13	18,06	12,26	0,17	15,69	5,80	-12,54	-14,23	7,15	-16,61	-9,80

BV	Volume (m3)	SEUIL					VISCO					2/4 Vagues					4/6 Vagues					10MIN/20MIN					20MIN/30MIN				
		Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy	Aire	Hmax	Hmoy	Vmax	Vmoy
SANIERE	20000	-9,33	-0,64	5,85	15,47	-8,81	-8,40	7,69	16,35	-9,46	-16,82	15,23	17,78	15,21	-1,32	-14,99	4,66	-10,26	15,34	14,72	37,59	39,83	10,18	14,34	7,65	-2,60	-11,08	-3,78	-2,15	5,34	1,06
	50000	-19,08	4,28	11,90	0,63	-17,37	-2,40	8,35	12,60	-7,18	-12,09	1,87	5,78	8,27	4,79	3,43	5,76	-4,54	11,00	11,32	7,87	16,42	5,00	2,09	14,39	2,53	-14,69	0,34	4,25	-9,34	-0,72
	100000	-13,67	13,33	20,97	-2,07	-21,96	-14,07	18,71	13,82	-18,23	-24,66	11,89	-0,35	10,88	6,81	21,17	-10,92	1,96	19,23	-5,72	-3,60	4,22	-3,18	3,91	-0,88	1,63	-11,85	0,77	5,57	-1,77	5,28
	200000	-24,73	9,70	13,56	5,27	-11,32	-7,41	3,07	15,70	-1,27	-6,15	1,21	0,70	12,23	-0,81	17,44	-7,58	-4,85	19,14	1,72	5,28	6,34	5,95	4,96	3,68	2,35	-9,03	-5,30	4,96	-2,66	10,30
	350000	-14,74	6,93	8,88	-7,01	-10,07	-0,69	3,43	11,39	-10,26	-6,29	-2,33	17,41	12,62	-17,11	-5,75	-11,26	-9,29	18,61	-2,20	7,51	-3,60	6,29	7,09	-14,61	-0,90	-4,58	4,18	3,40	-7,01	-2,97

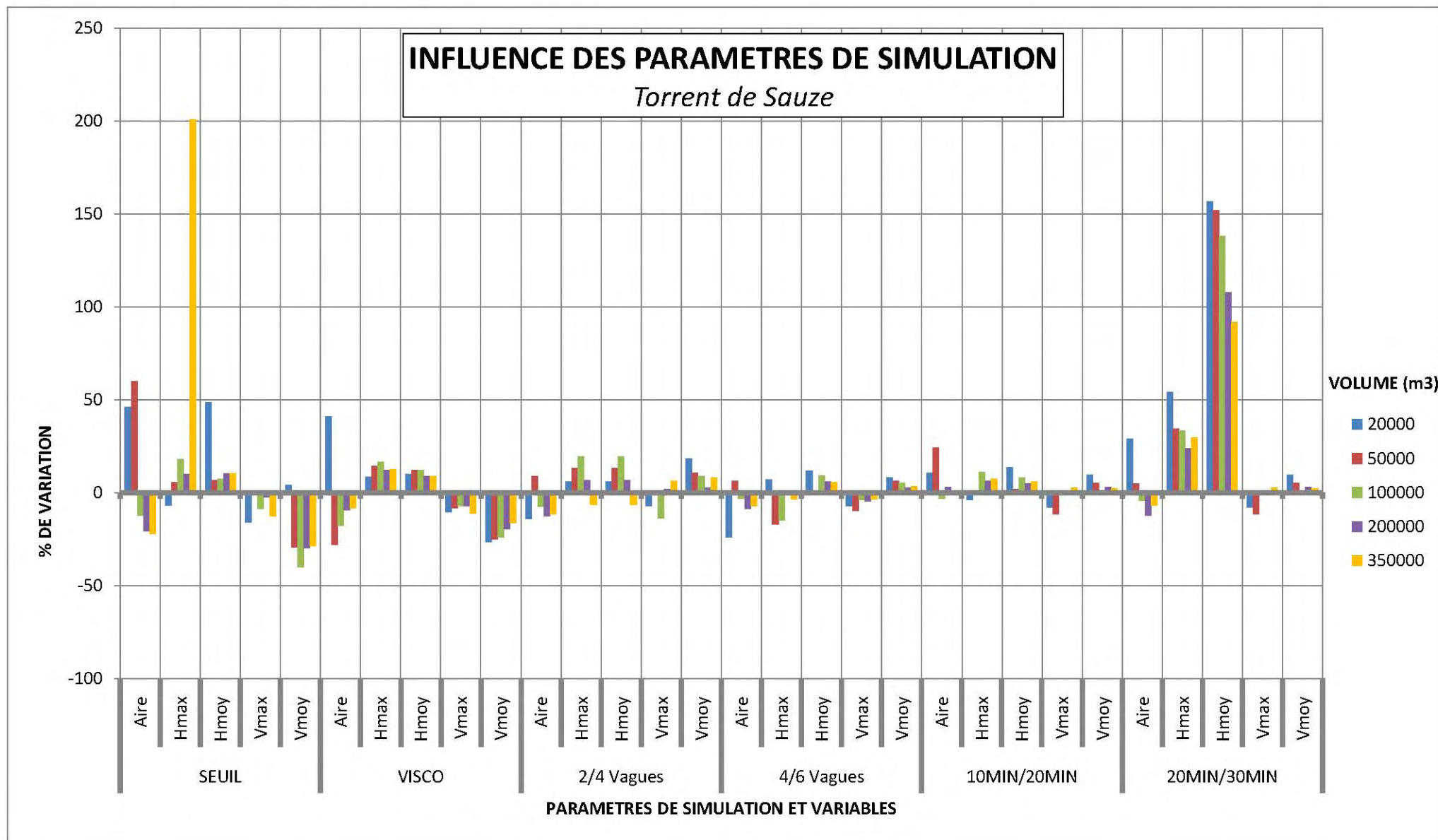
Annexe 11: Influence des paramètres de simulation, torrent des Sanières



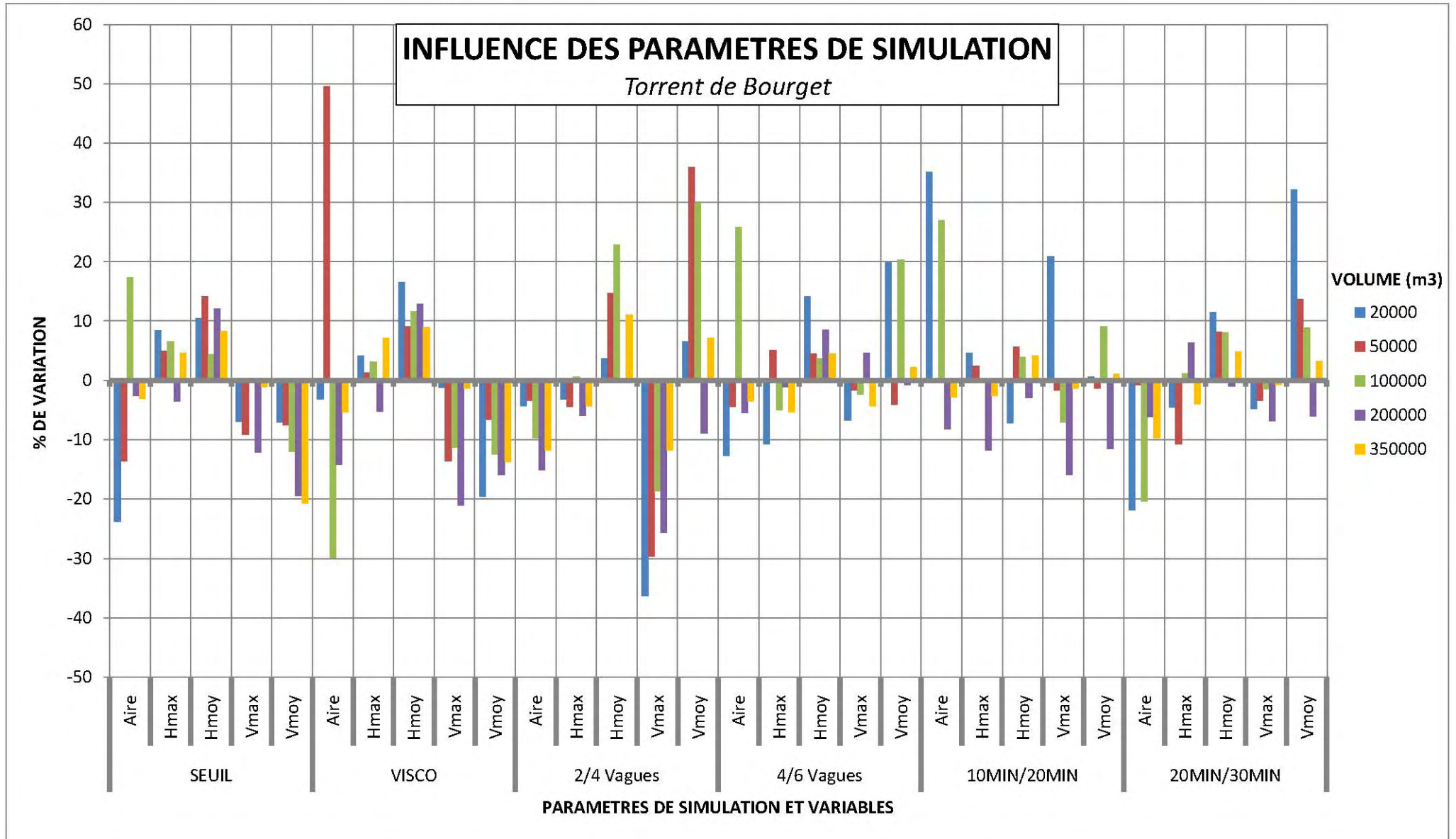




Annexe 14: Influence des paramètres de simulation, torrent de Sauze



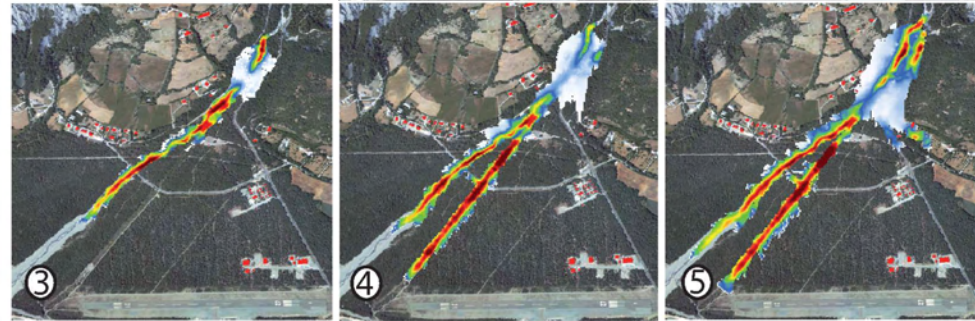
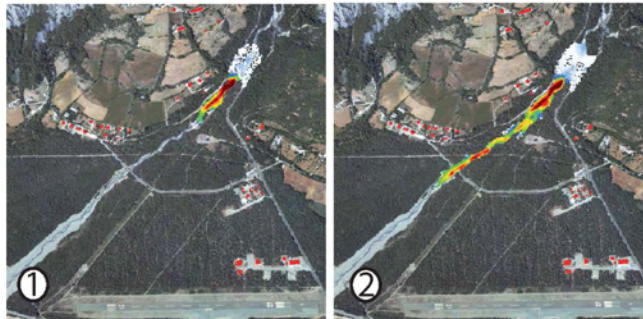
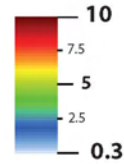
Annexe 15: Influence des paramètres de simulation, torrent de Bourget





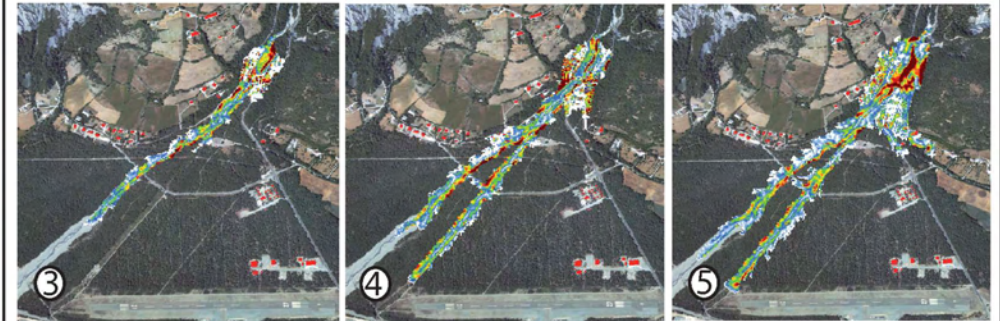
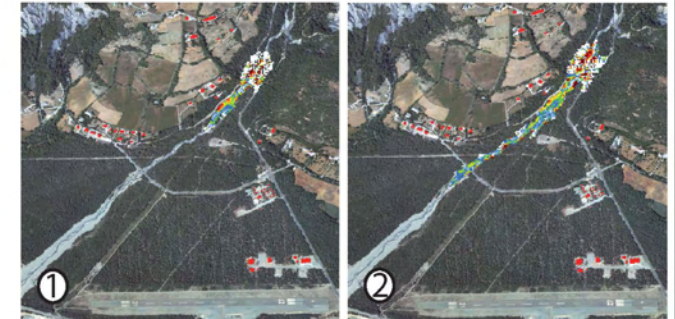
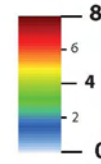
**CARTE DES HAUTEURS
Riou Bourdoux**

HAUTEUR (m)



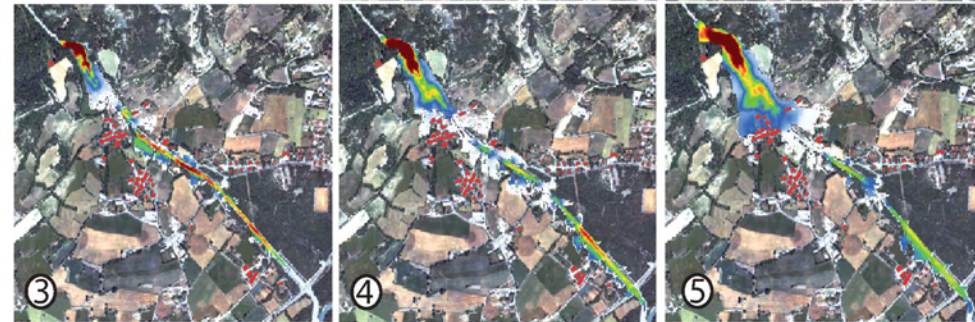
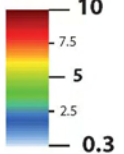
**CARTE DES VITESSES
Riou Bourdoux**

VITESSE (m.s-1)



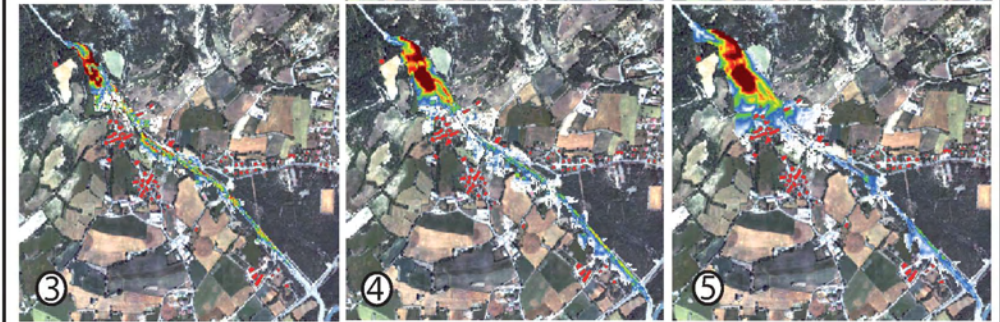
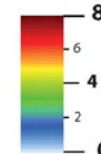
**CARTE DES HAUTEURS
SANIERE**

HAUTEUR (m)



**CARTE DES VITESSES
SANIERE**

VITESSE (m)



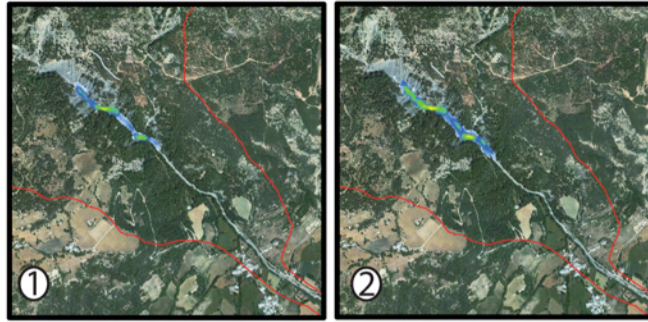
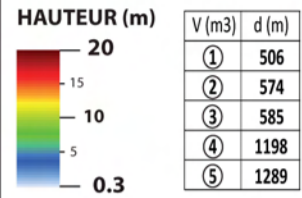
CARTES D'ALEA LAVE TORRENTIELLE

TORRENT DES SANIERES
1 : 80 000 ème

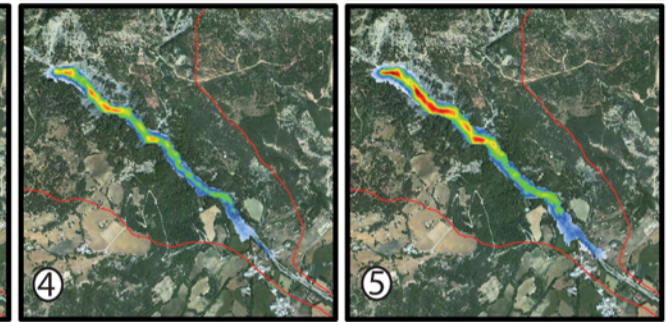
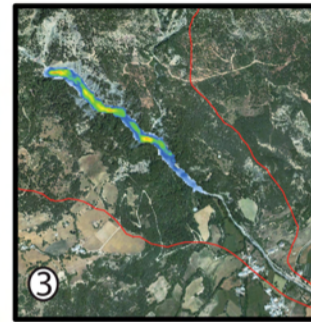
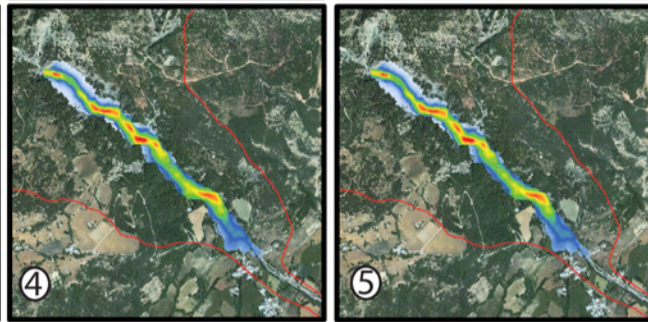
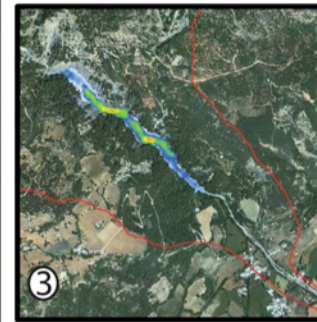
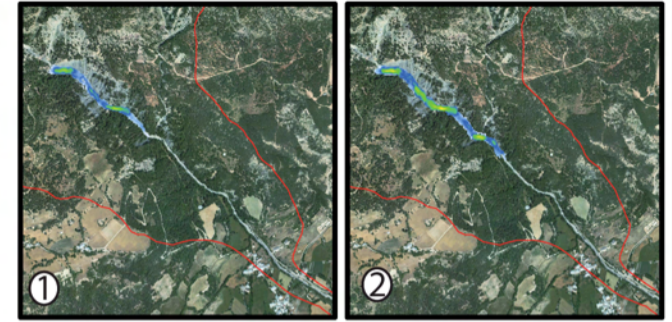
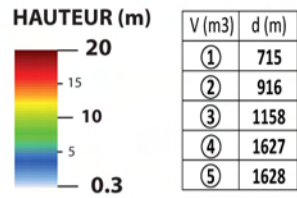


VOLUMES (m3) ① 20 000 ② 50 000 ③ 100 000 ④ 200 000 ⑤ 350 000

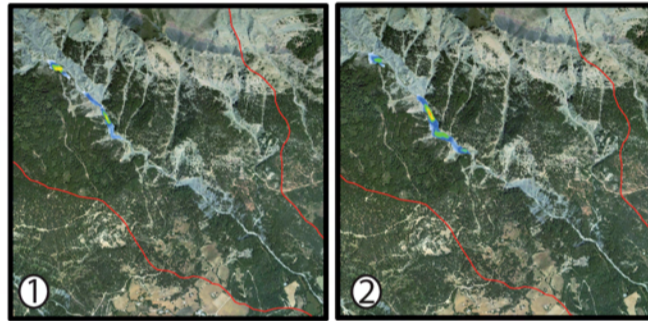
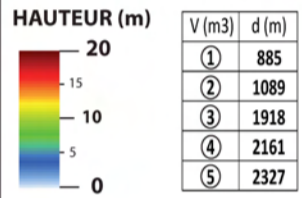
EXTENSION ET HAUTEURS SANIERE SOURCE 1



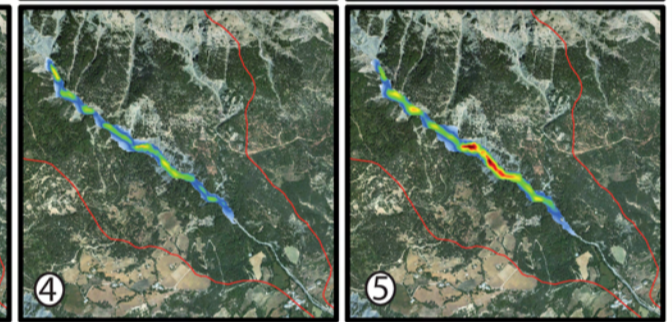
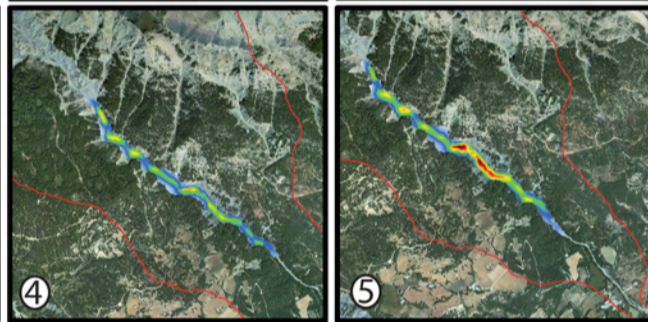
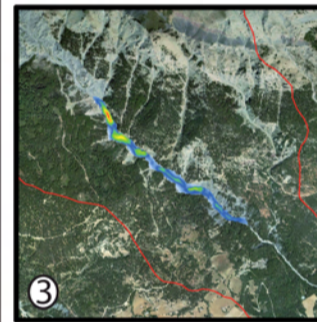
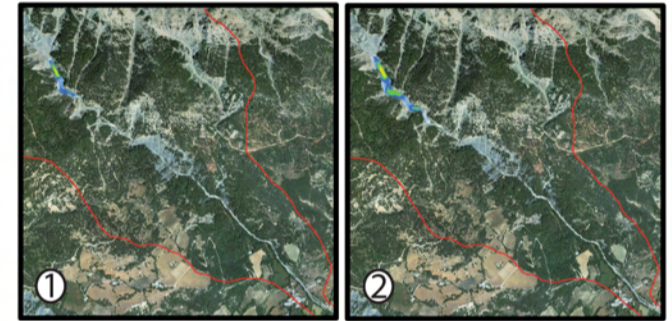
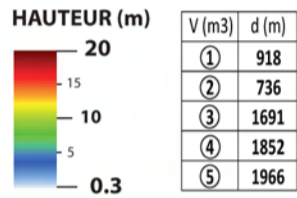
EXTENSION ET HAUTEURS SANIERE SOURCE 2



EXTENSION ET HAUTEURS SANIERE SOURCE 4



EXTENSION ET HAUTEURS SANIERE SOURCE 3

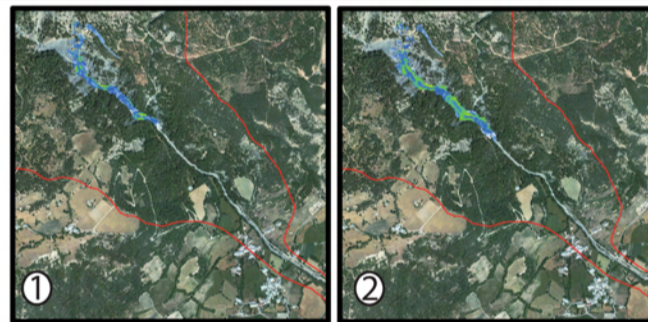
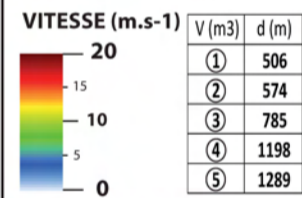


CARTES D'ALEA LAVE TORRENTIELLE TORRENT DES SANIERES

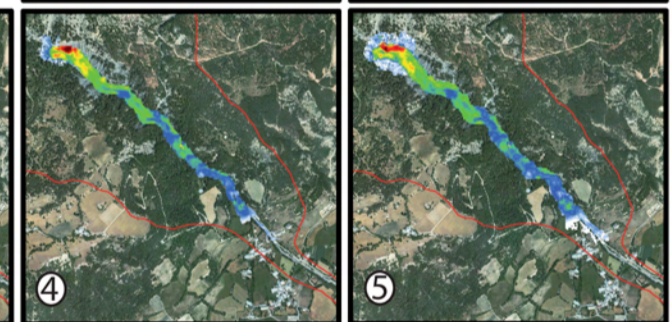
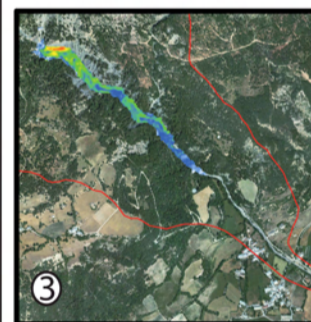
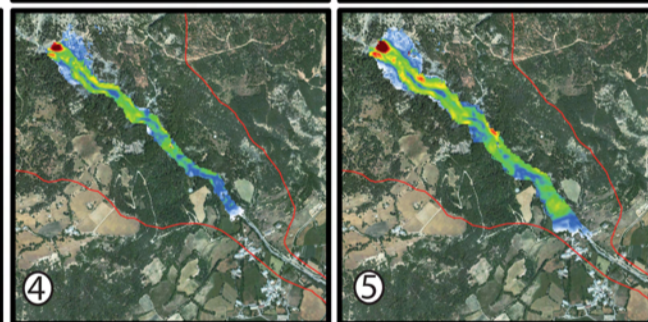
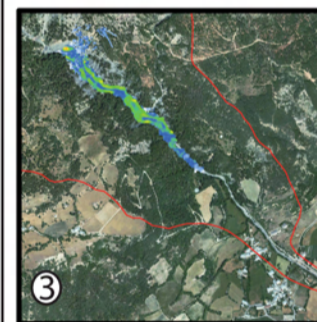
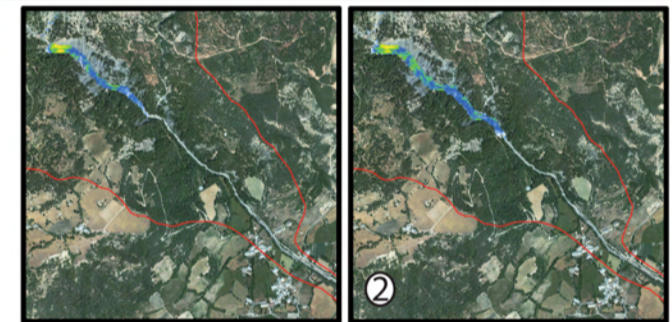
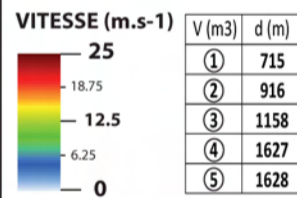


VOLUMES (m3) ① 20 000 ② 50 000 ③ 100 000 ④ 200 000 ⑤ 350 000

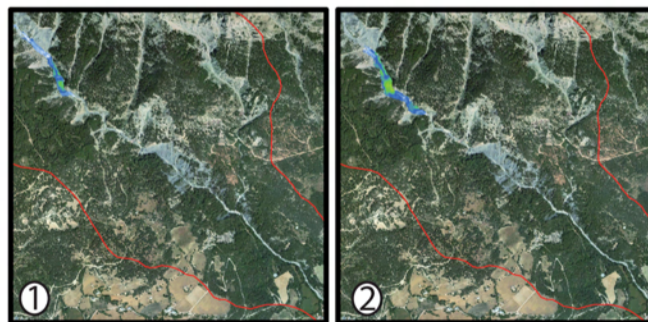
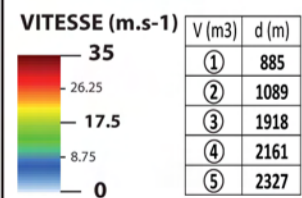
EXTENSION ET VITESSES SANIERE SOURCE 1



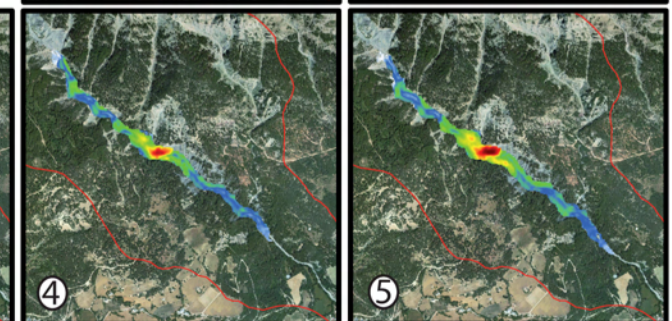
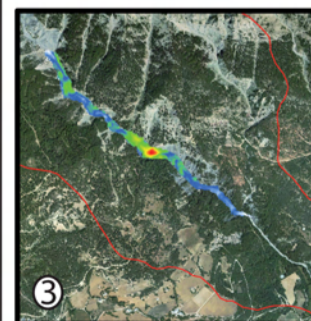
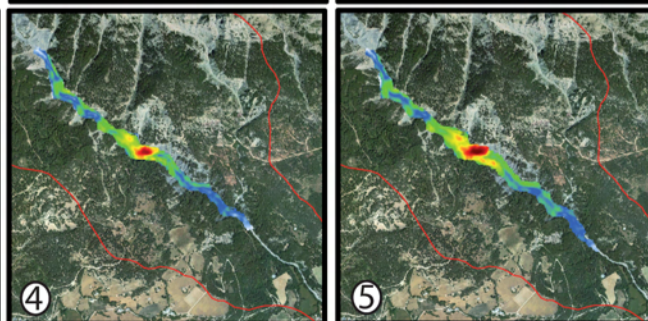
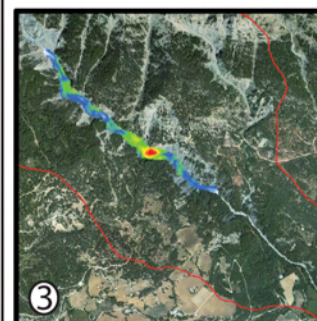
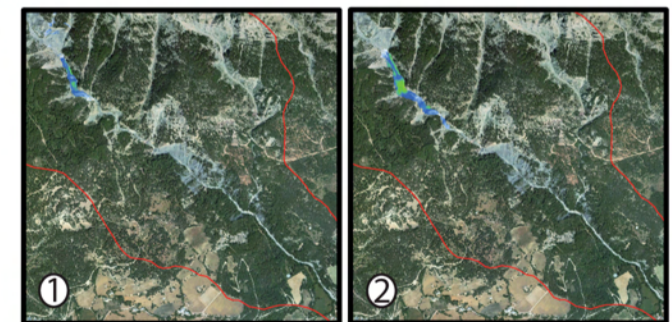
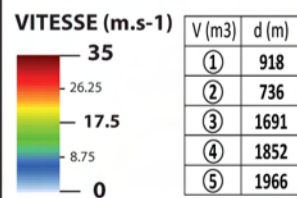
EXTENSION ET VITESSES SANIERE SOURCE 2

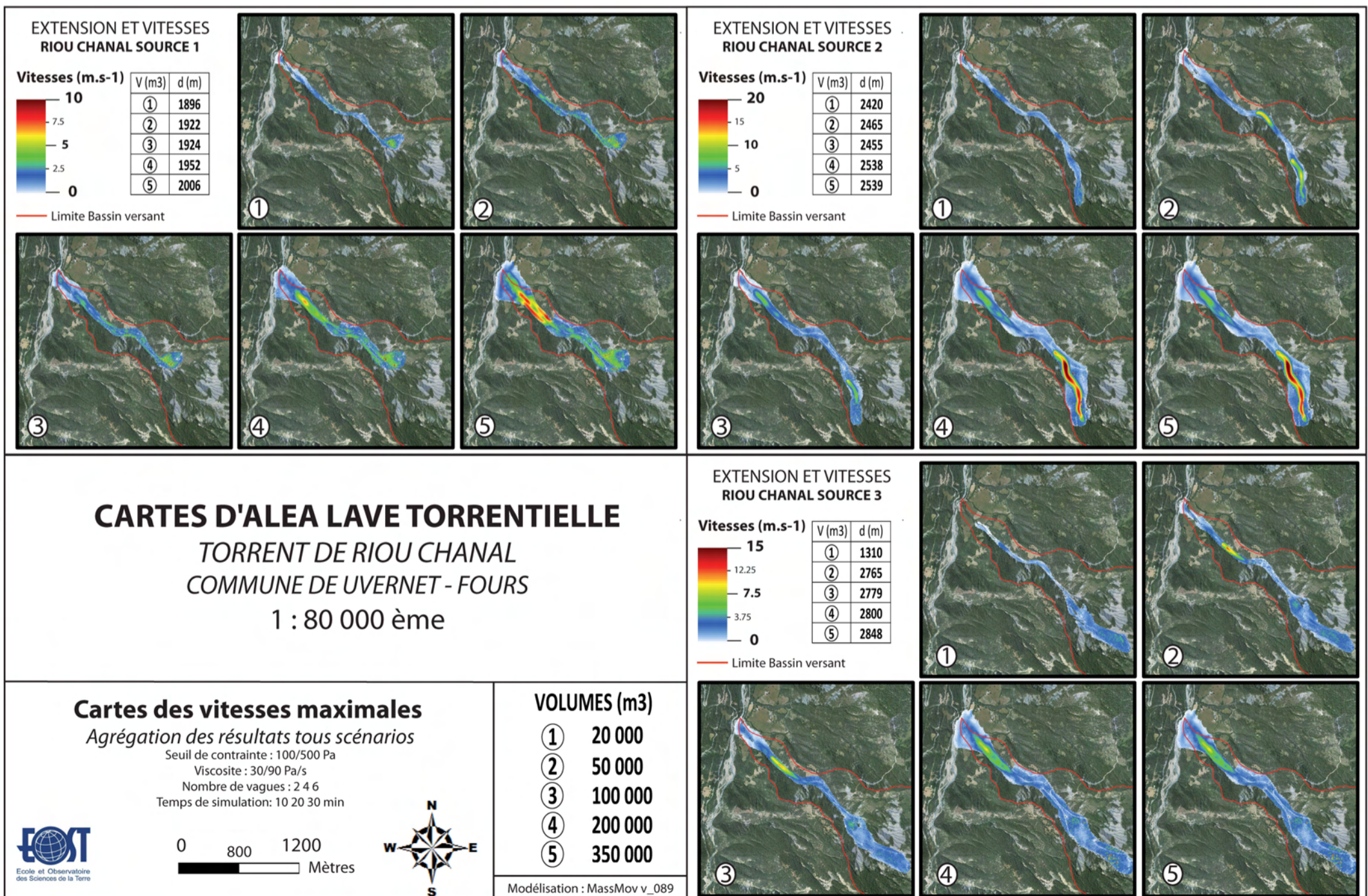
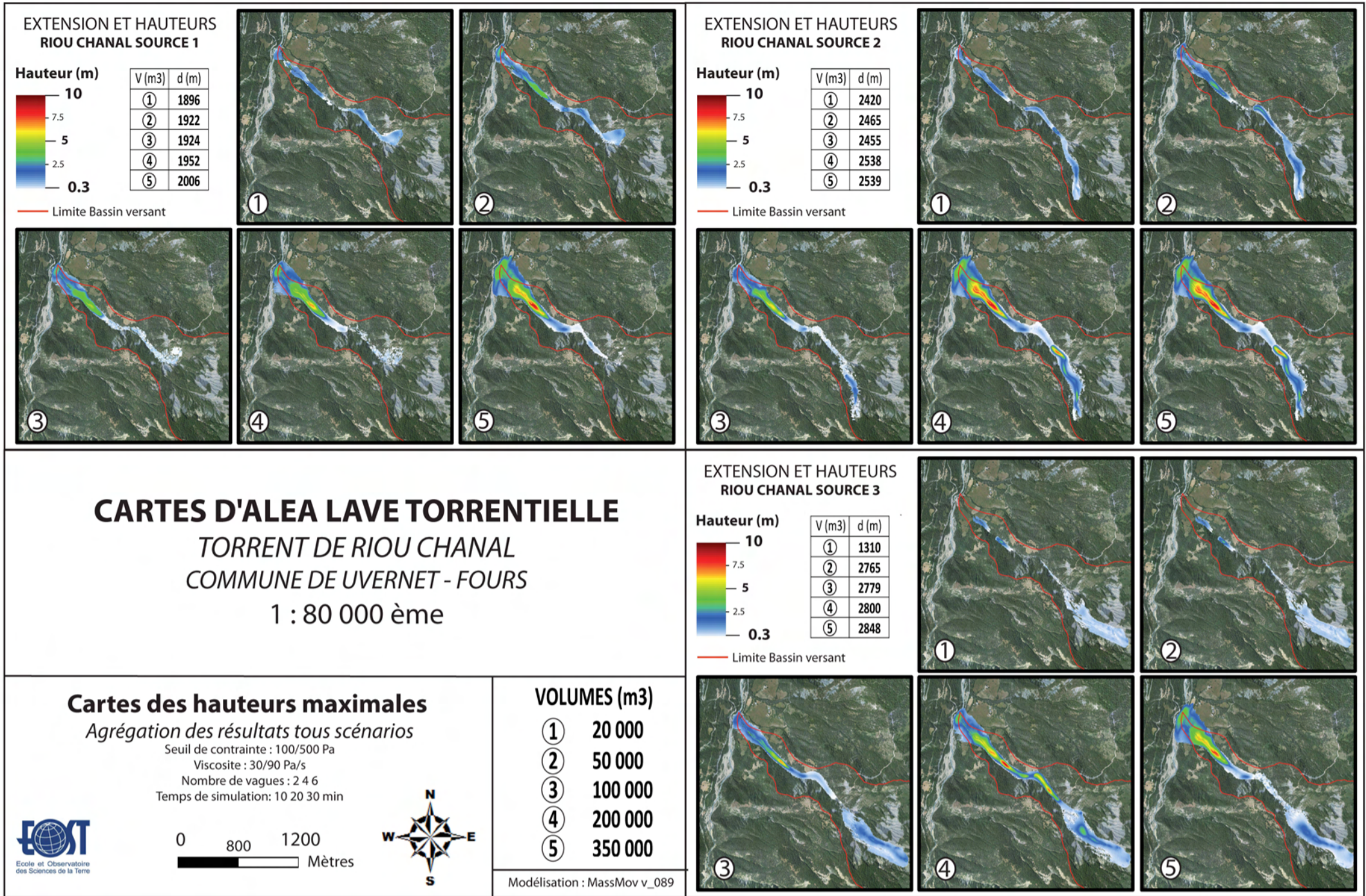


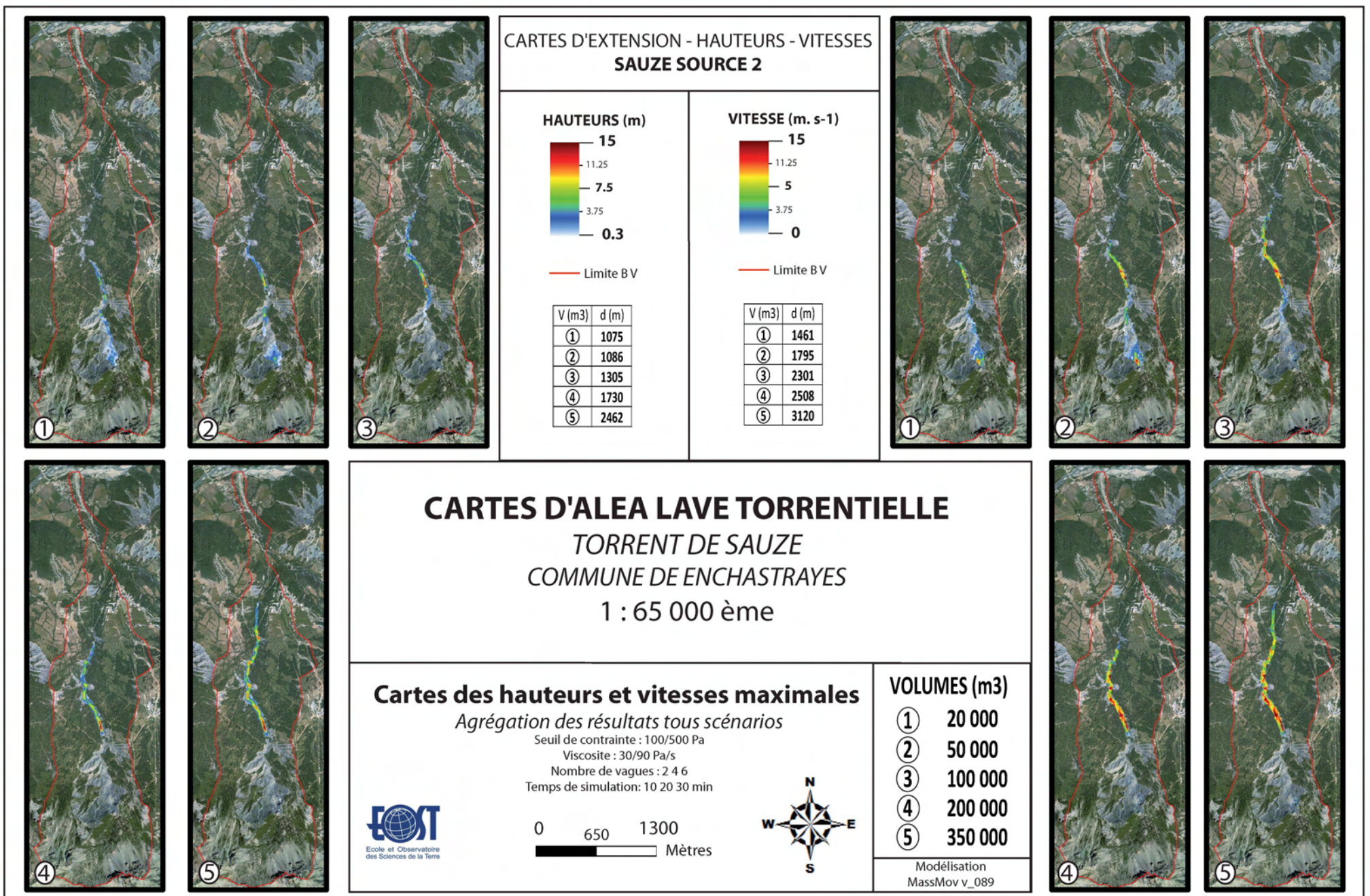
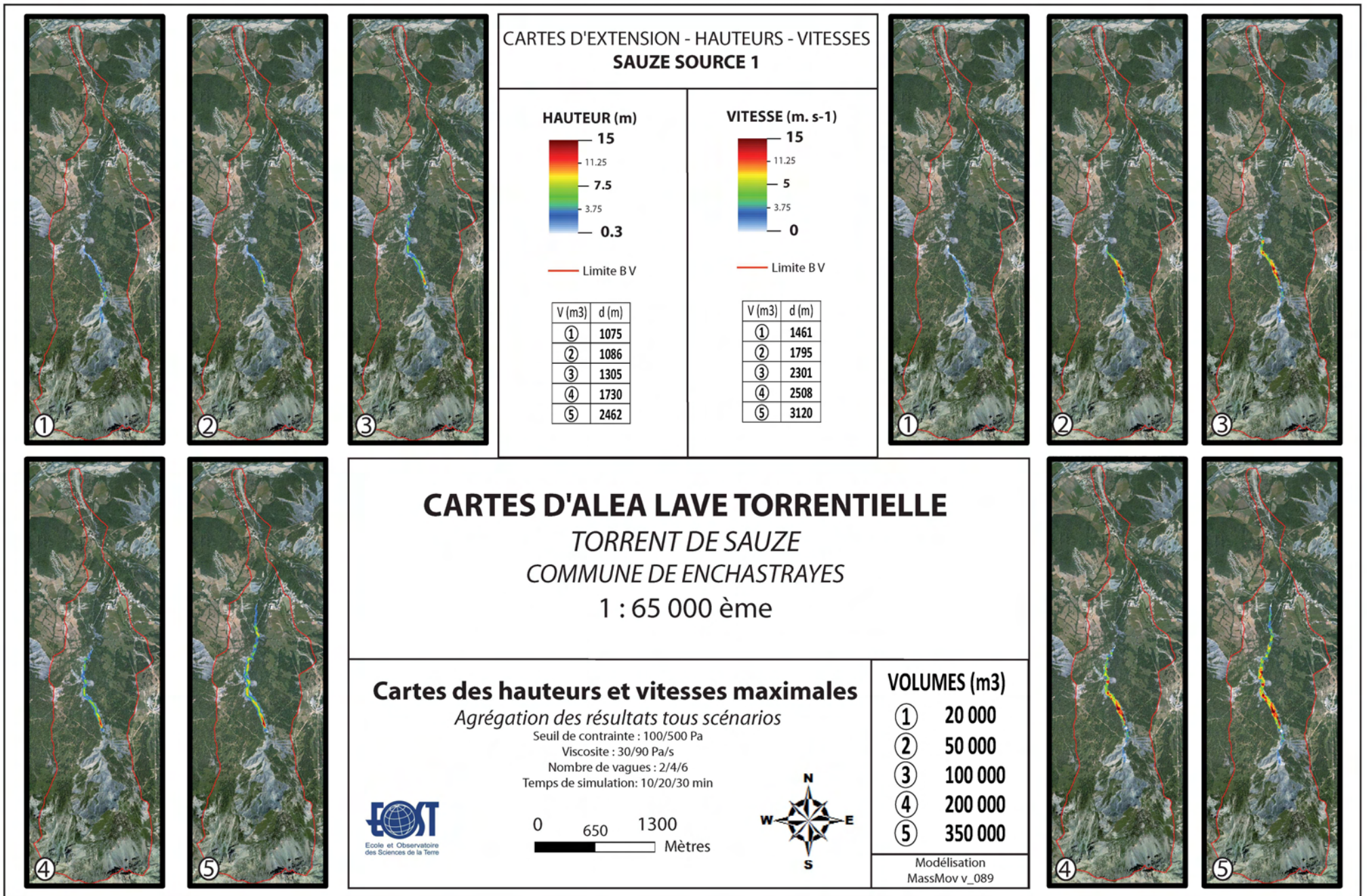
EXTENSION ET VITESSES SANIERE SOURCE 4

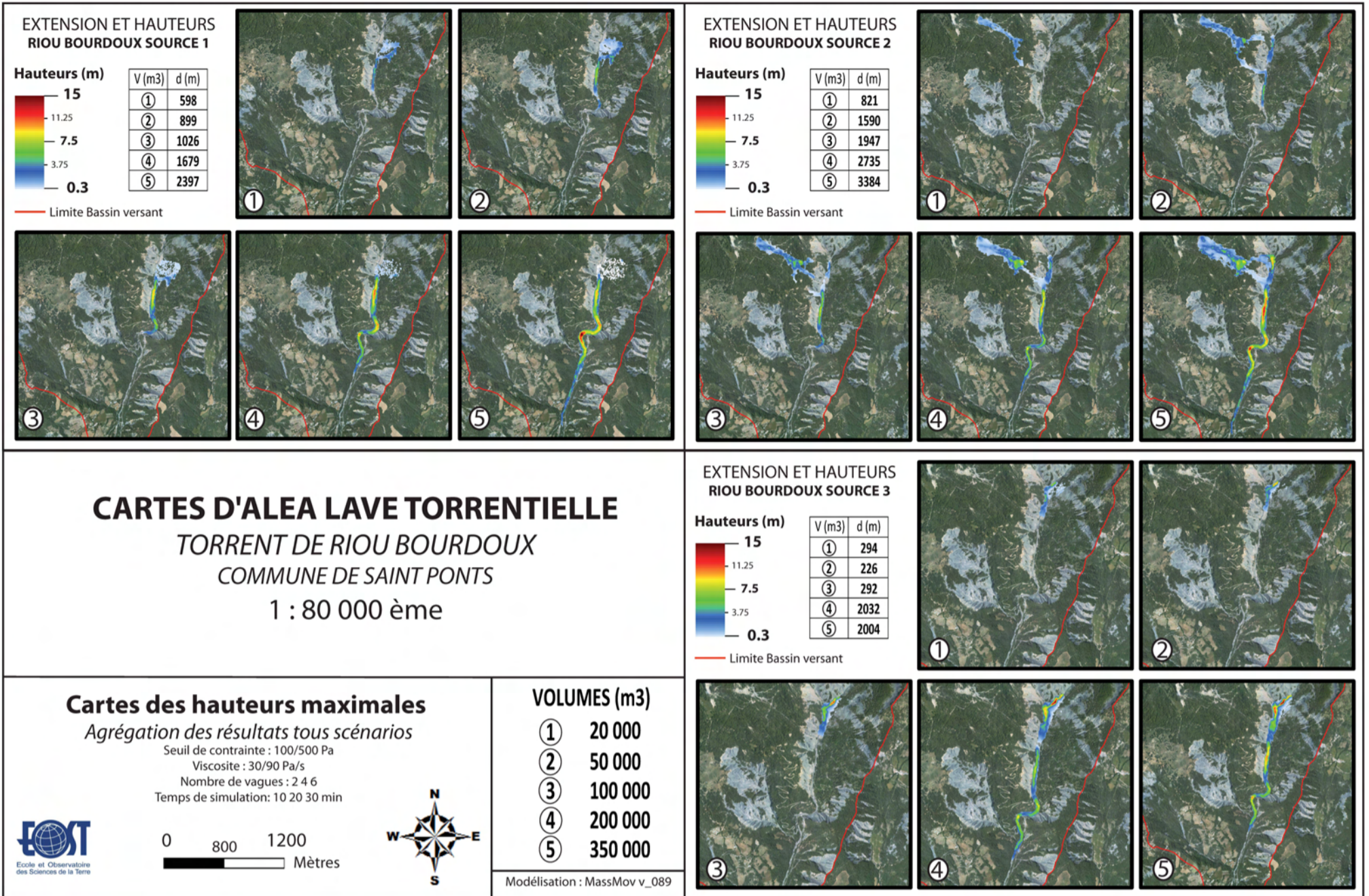


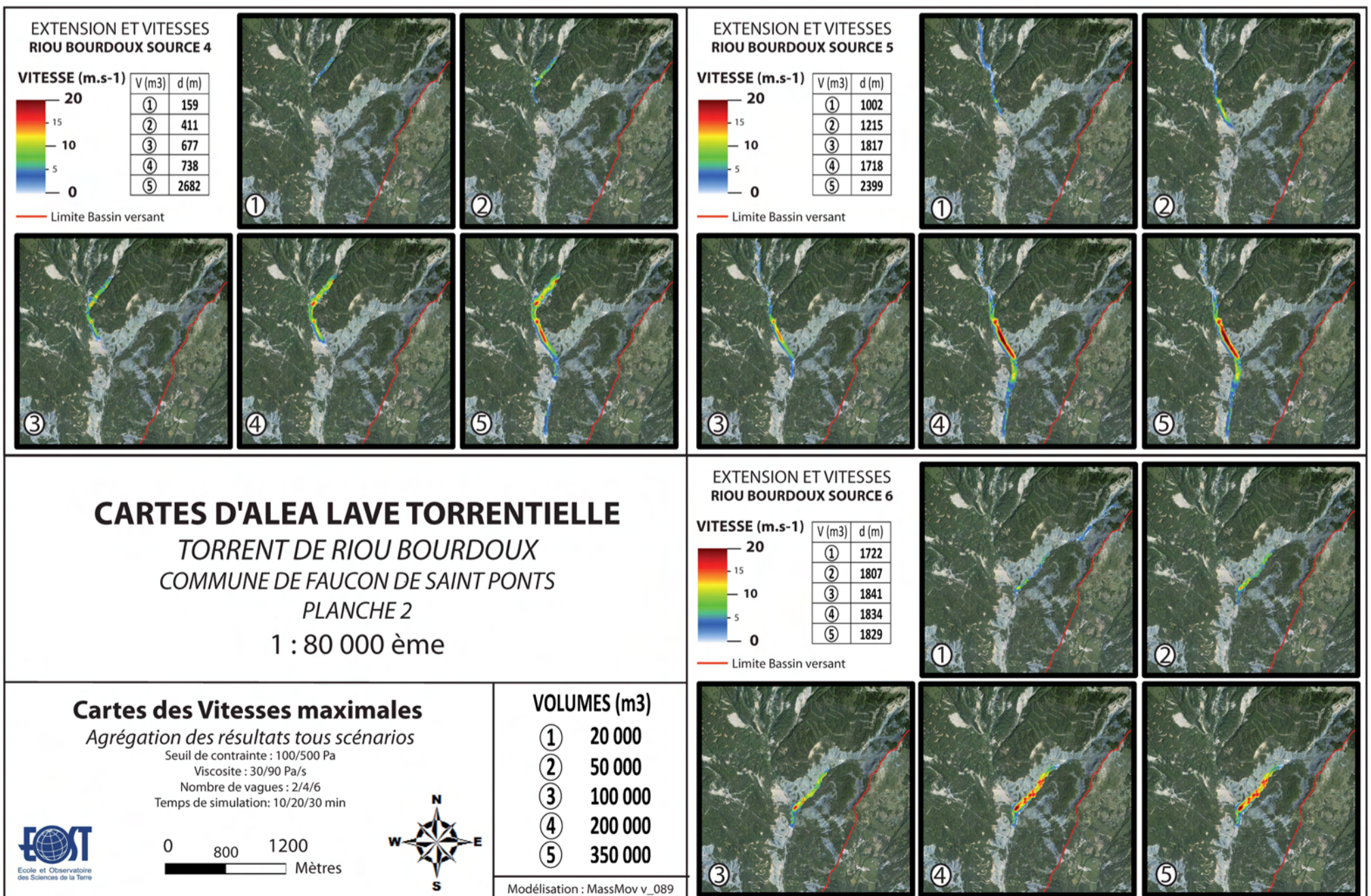
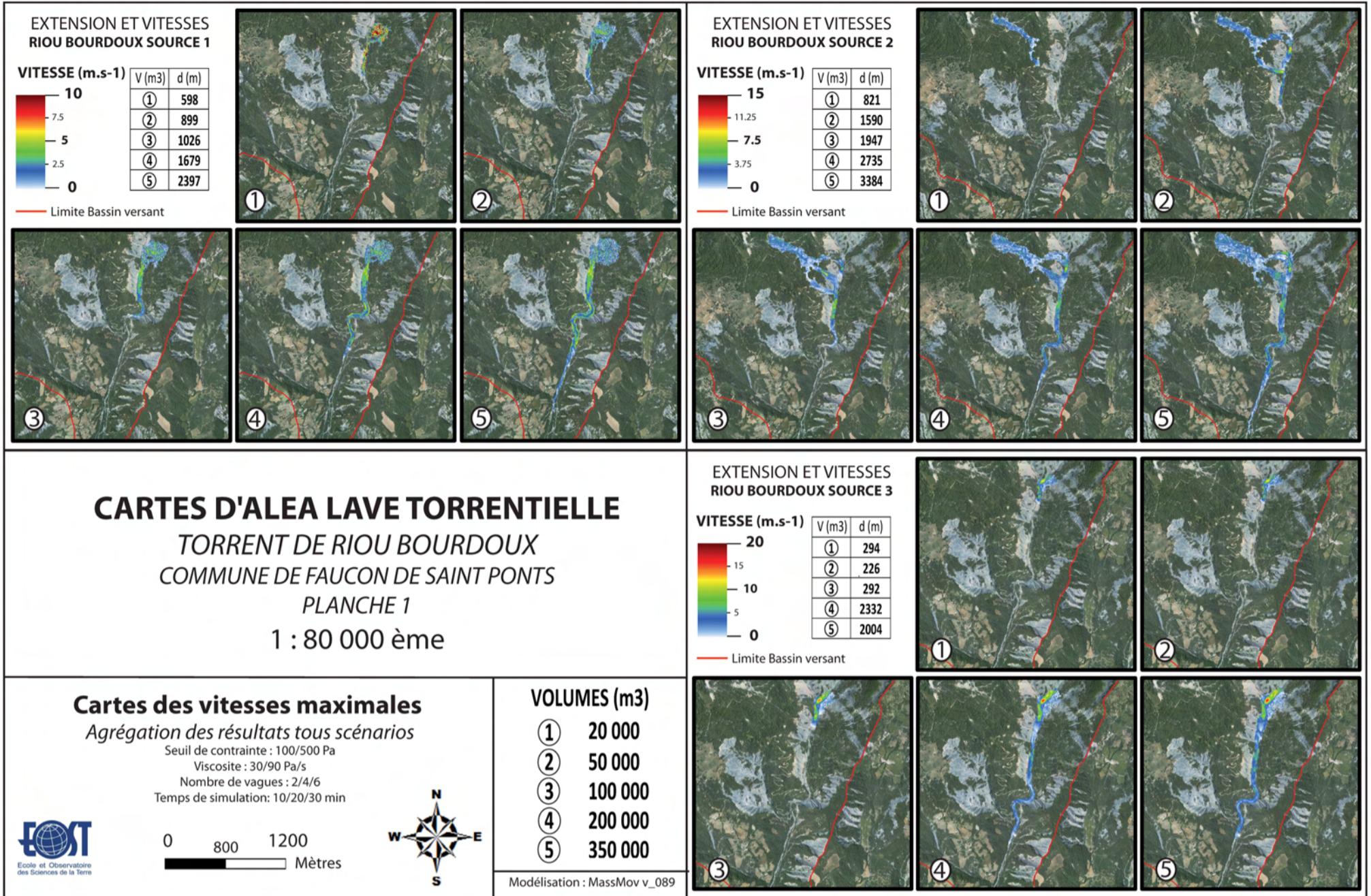
EXTENSION ET VITESSES SANIERE SOURCE 3

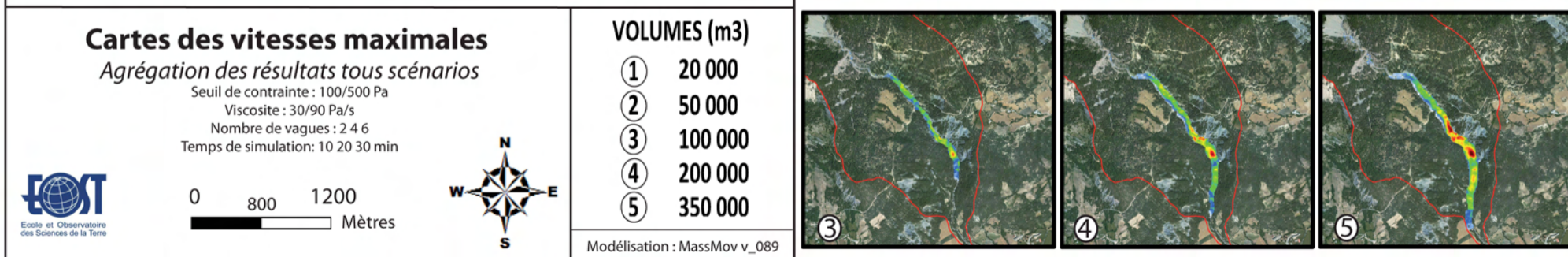
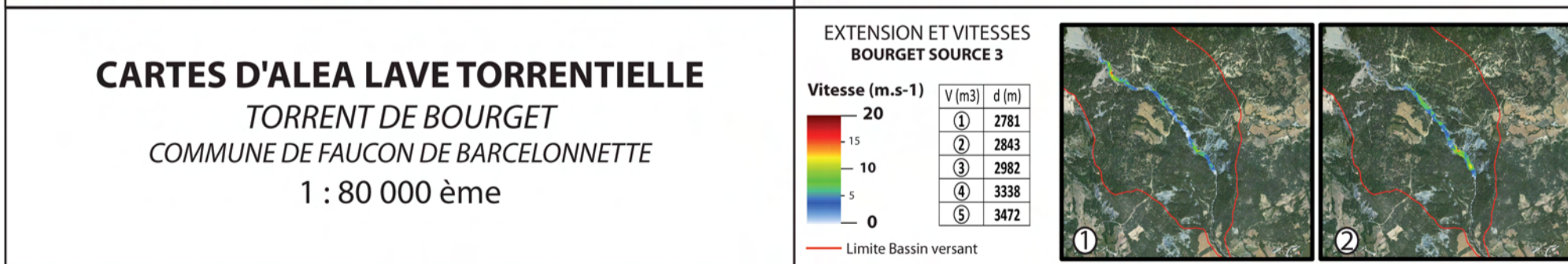
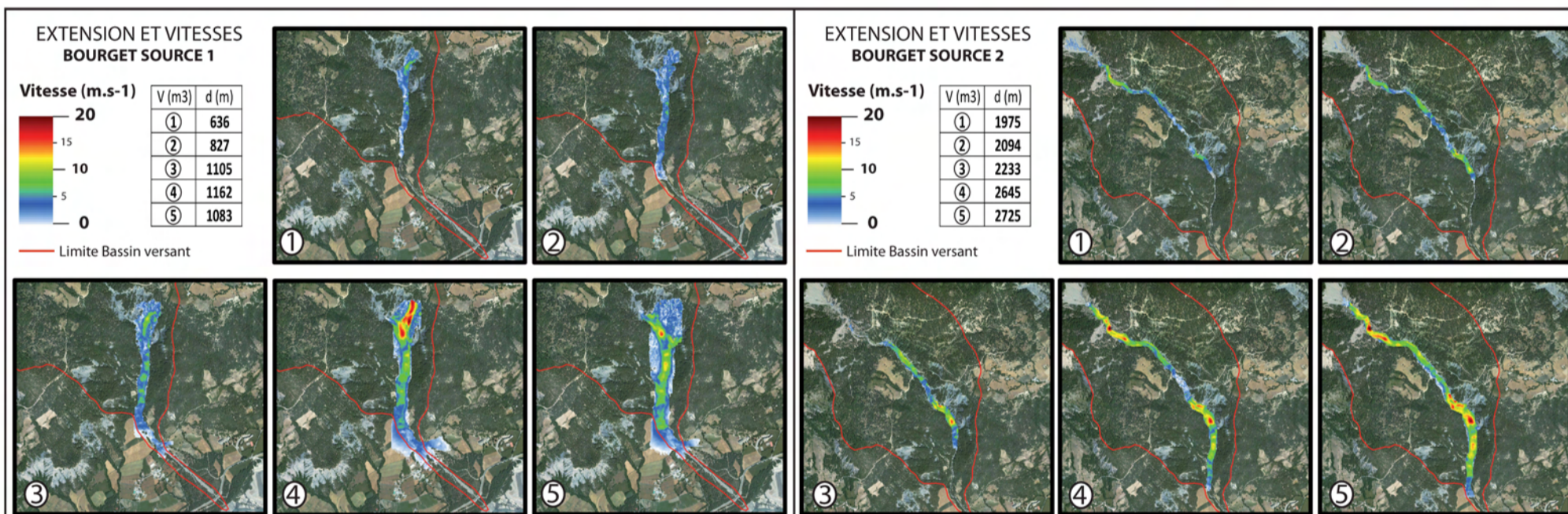
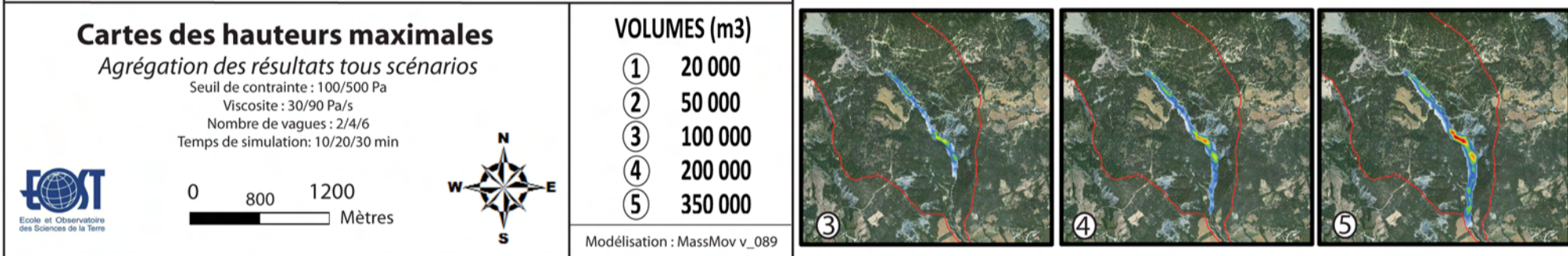
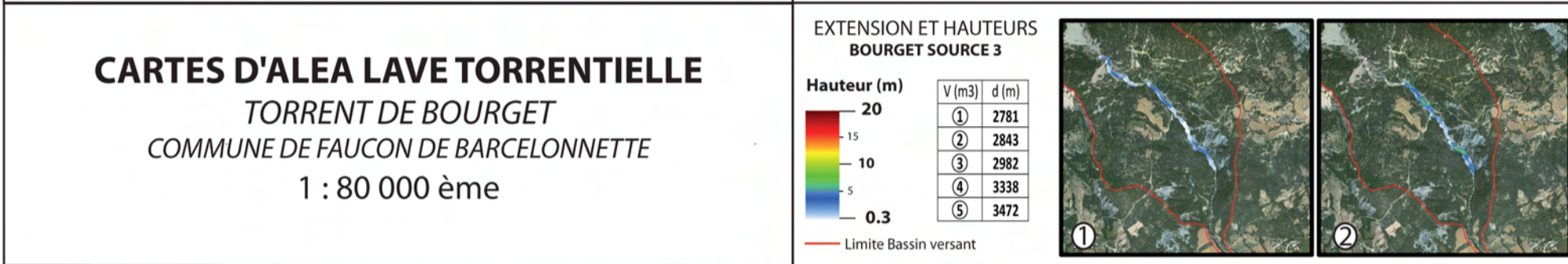
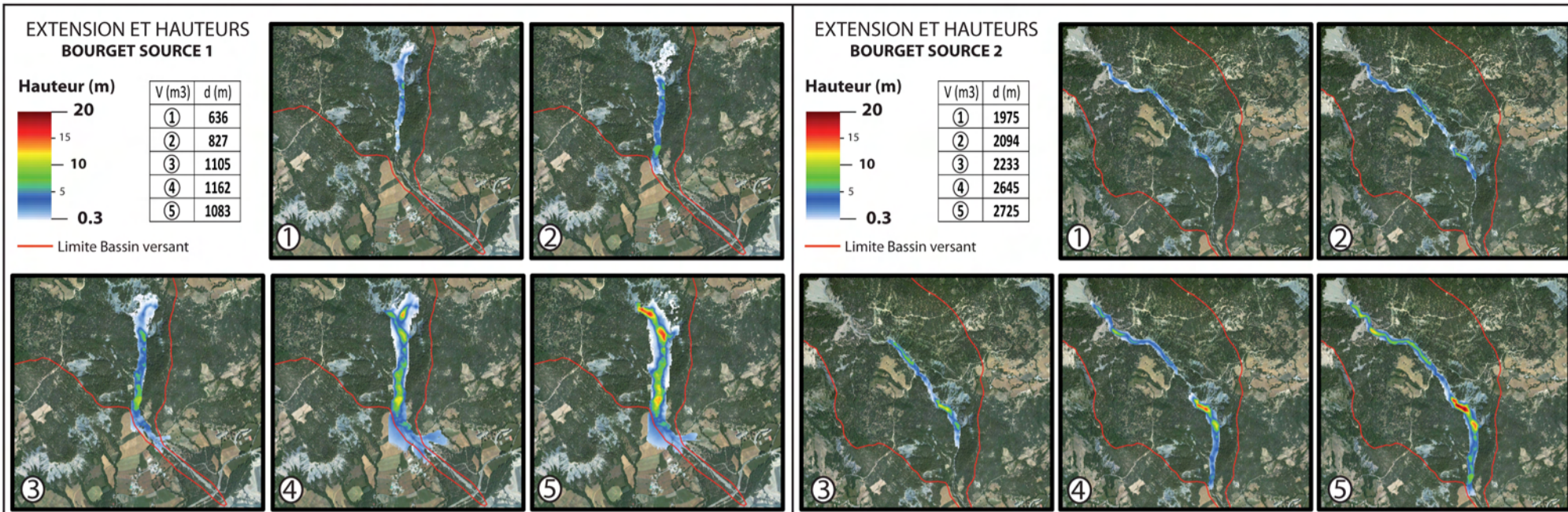












Université de Strasbourg
Ecole Nationale du génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEEES)
Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST)

Mémoire
Master 2 Ingénierie et Sciences de l'Environnement
EOST - ENGEEES
Année universitaire 2009/2010

Auteur :
Nicolas KELLER

Année de publication :
2010

Titre :

MODELISATION DE SCENARIOS D'ALEA LAVE TORRENTIELLE DANS LE BASSIN DE BARCELONNETTE (FRANCE)

Nombre de volume(s) :

1

Nombre de pages :

59

Nombre de références bibliographiques :

49

Structure d'accueil :

Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg
Institut de Physique du Globe de Strasbourg (UMR 7516)
5 rue René Descartes
67084 Strasbourg Cedex

Tuteur de Stage :

Jean-Philippe MALET
Chargé de recherche CNRS

Date de soutenance :

01/09/2010

Résumé :

Dans le contexte du bassin de Barcelonnette (04), fortement prédisposé à l'aléa lave torrentielle, notre objectif est d'utiliser le modèle MASSMOV2D pour simuler les phases de propagation et de dépôt, à l'échelle de cinq bassins versants de la vallée. Des scénarios d'aléa sont établis, appliquants multiples possibilités de conditions initiales et rhéologiques, à partir de nombreuses zones sources. Les résultats seront cartographiés et analysés, dans l'objectif de déterminer l'influence des gammes de variation du protocole expérimental sur les paramètres de l'aléa.

Mots clés :

Laves torrentielles - Scénarios - Massmov2d - Modélisation - Aléa - Rhéologie - Barcelonnette - Risque