



HAL
open science

**Évaluation des capacités du logiciel numérique
HEC-RAS 2D à modéliser la dynamique d'étalement et
de dépôts de laves torrentielles boueuses : application à
deux laves torrentielles observées sur le torrent du
Claret (73)**

Jade Leborgne

► **To cite this version:**

Jade Leborgne. Évaluation des capacités du logiciel numérique HEC-RAS 2D à modéliser la dynamique d'étalement et de dépôts de laves torrentielles boueuses : application à deux laves torrentielles observées sur le torrent du Claret (73). Géographie. 2022. dumas-03827081

HAL Id: dumas-03827081

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03827081>

Submitted on 24 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoire de recherche

Master 2 Géographie, Aménagement, Environnement et Développement (GAED)

Domaine : Sciences Humaines et Sociales

Parcours GEOSPHERES : GEOgraphie – eSPaces – Homme / Environnement – Ressources –
Systèmes en réseau

Évaluation des capacités du logiciel numérique HEC-RAS 2D à modéliser la dynamique d'étalement et de dépôts de laves torrentielles boueuses.

Application à deux laves torrentielles observées sur le torrent du Claret (73)

Stage réalisé au sein du bureau d'étude ARTELIA en collaboration avec l'organisme de
recherche INRAE et le service RTM Savoie de l'ONF

Par

Jade LEBORGNE

Soutenu le 08 Septembre 2022

Année 2021-2022

Membres du Jury :

Président de jury :

Sylvain BIGOT (Enseignant chercheur, Université Grenoble)

Directeur de mémoire :

Philippe SCHOENEICH (Enseignant chercheur, Université
Grenoble)

Expert du domaine :

Guillaume PITON (Chercheur, équipe ETNA, INRAE)

Etablissements partenaires :

Résumé

Ce travail de recherche vise à évaluer les capacités de modélisation bidimensionnelle du logiciel HEC-RAS à reproduire la dynamique d'étalement et de dépôts de deux laves torrentielles boueuses ainsi que de déterminer son domaine de validité en conditions de terrain. Cette application est basée sur deux cas de laves torrentielles qui se sont produites dans le torrent du Claret (vallée de la Maurienne), observées dans un bassin de rétention situé sur le cône de déjection : lave torrentielle du 14 juin 2017 et lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019. Le modèle numérique HEC-RAS 2D utilisé dans cette étude est principalement basé sur la résolution des équations de Barré de Saint-Venant (shallow water equation) et celle d'Herschel-Bulkley en ce qui concerne la loi de frottement. Une analyse critique des données d'entrée est réalisée et permet d'adapter ces dernières au contexte d'étude. Le calage du modèle réalisé à partir de la lave torrentielle du 14 juin 2017 montre de bonnes concordances avec le cas réel sur plusieurs indicateurs (niveaux atteints, dynamique de dépôts). Plusieurs jeux de paramètres rhéologiques cohérents avec cette dernière ont été testés sur la modélisation de la lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019, utilisée pour la validation du modèle. La phase de validation du modèle n'a pas abouti, les résultats des niveaux maximums atteints par les différents scénarios ne sont pas suffisamment élevés en comparaison avec les observations de terrain. Une hypothèse sur une obstruction temporaire du barrage filtrant est proposée afin d'expliquer ce constat. L'hypothèse d'une obstruction temporaire est actuellement impossible à reproduire pour le cas de la lave torrentielle de 2019 par manque de données. Après l'implantation de nouveaux capteurs au niveau de la plage de dépôts sur le torrent du Claret en 2020, permettant maintenant de savoir s'il se produit une obstruction du barrage, il serait intéressant de relancer une phase de validation sur le cas d'une lave torrentielle produite et observée après novembre 2020.

Mots clefs : Modélisation, Laves torrentielles, HEC-RAS 2D, Données d'entrée, Calage, Validation.

Abstract

This research work aims to evaluate the two-dimensional modeling capabilities of the HEC-RAS software to reproduce the spreading and deposition dynamics of two debris flows as well as to determine its validity domain in field conditions. This application is based on two cases of debris flows that occurred in the Claret torrent (Maurienne Valley), observed in a retention basin located on the alluvial cone : debris flow of June 14, 2019 and debris flow of July 1, 2019. The HEC-RAS 2D numerical model used in this study is mainly based on the solution of the Barré de Saint-Venant equations (shallow water equations) and the Herschel-Bulkley equation for the friction law. A critical analysis of the input data is performed and allows to adapt them to the study context. The model calibration performed from the June 14, 2017 debris flow shows good agreement with the real case on several indicators (levels reached, deposition dynamics). Several sets of rheological parameters coherent with the latter were tested on the modeling of the debris flow of July 1, 2019 used for the validation of the

model. The validation phase of the model was not successful, as the results for the maximum levels reached by the different scenarios are not sufficiently high in comparison with the field observations. A hypothesis on a temporary obstruction of the open check dam is proposed to explain this observation. The hypothesis of a temporary obstruction is currently impossible to reproduce for the case of the 2019 debris flow due to lack of data. After the implementation of new sensors at the level of the retention basin on the torrent of Claret in 2020 allowing now to know if an obstruction of the dam occurs, it would be interesting to relaunch a validation phase on the case of a debris flow produced and observed after November 2020.

Key words: Modeling, Debris flow, HEC-RAS 2D, Input data, Calibration, Validation.

Remerciements

Je tiens à remercier dans un premier temps **Arielle MASSON**, ma maîtresse de stage qui est à l'origine de la création de ce stage au sein du bureau d'étude ARTELIA. Je la remercie d'avoir pris en considération mes sujets d'intérêts et de m'avoir permis de travailler au sein de l'équipe HFO, de contribuer à certaines études en cours et de m'avoir fait confiance dans la réalisation de ce travail de recherche.

Je remercie particulièrement **Guillaume PITON** pour m'avoir proposé de travailler sur ce cas d'étude qui a été pour moi une vraie motivation et un challenge quant à l'approche de la modélisation numérique. Merci à lui de m'avoir encadrée et conseillée tout au long de cette étude.

Je souhaite remercier également **Clément MISSET** et **Damien KUSS** du service RTM Savoie et Isère de l'ONF pour tous les échanges qui ont enrichi les réflexions sur le sujet et m'ont permis d'avancer dans ce travail de recherche. Je remercie également Mathieu VALENTIN, stagiaire au service RTM Isère d'avoir expérimenté les premières simulations sur le torrent du Claret et d'avoir partagé ses connaissances en modélisation.

Je remercie également **Philippe SCHOENEICH** pour avoir accepté d'être mon directeur de mémoire et de m'avoir apporté ses conseils quant à la structure même de ce mémoire. Je tiens à remercier **Nathalie DUBUS**, responsable du Master GEOSPHERES à l'IUGA ainsi que les **jurés** qui auront lu ce mémoire et seront présents lors de ma soutenance.

En grand merci à toute l'**équipe HFO** d'ARTELIA pour la bonne ambiance de travail, les conseils et échanges constructifs tout au long de ces 6 mois de stage. J'aimerais remercier en particulier **Hervé DEKERMENDJIAN** pour m'avoir accueillie dans son bureau, de m'avoir partagé son savoir sur les outils SIG et de modélisation, sur le milieu montagnard et de m'avoir soutenue dans ces derniers mois notamment.

Enfin, je souhaite remercier toutes les personnes qui ont contribué de près comme de loin au bon déroulement de ce stage, à la réalisation de ce travail de recherche et à la rédaction de ce présent mémoire.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Résumé..... | 2 |
| Remerciements | 4 |
| Sommaire | 5 |
| Sigles et acronymes | 6 |
| Avant-propos | 7 |
| INTRODUCTION..... | 8 |
| CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART SUR LES CONNAISSANCES ACTUELLES DU PHENOMENE DE LAVE TORRENTIELLE ET DES APPROCHES DE MODELISATION..... | 10 |
| 1.1. Le phénomène torrentiel et le transport solide..... | 10 |
| 1.2. Approches de modélisation de la dynamique des laves torrentielles | 15 |
| 1.3. Choix et description détaillés du modèle HEC-RAS 2D..... | 18 |
| CHAPITRE 2 : TERRAIN D'ETUDE ET APPROCHE METHODOLOGIQUE..... | 21 |
| 2.1. Torrent du Claret..... | 21 |
| 2.2. Approche méthodologique | 28 |
| CHAPITRE 3 : PHASE DE CALAGE DU MODELE HEC-RAS 2D : LAVE TORRENTIELLE DU 14 JUIN 2017 | 30 |
| 3.1. Matériels et méthodes | 30 |
| 3.2. Résultats..... | 49 |
| 3.3. Analyses et interprétations | 62 |
| CHAPITRE 4 : PHASE DE VALIDATION DU MODELE HEC-RAS 2D : LAVE TORRENTIELLE DU 1ER JUILLET 2019 | 63 |
| 4.1. Matériels et méthodes | 63 |
| 4.2. Résultats..... | 70 |
| 4.3. Analyses et interprétations | 74 |
| CONCLUSION..... | 76 |
| Références | 78 |
| Table des figures | 80 |
| Table des tableaux | 82 |
| Table des matières | 83 |
| Table des annexes | 86 |
| Annexes | 86 |

Sigles et acronymes

CNR : Compagnie Nationale du Rhône

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

MASA : Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA)

masl : abréviation anglaise de l'unité altitudinale « mètre au-dessus du niveau de la mer »

MNT : Modèle Numérique de Terrain

RTM/ONF : Restauration des Terrain en Montagne/Office National des Forêts

B : hauteur de l'ouverture de la vanne [m]

C : coefficient de débit

C_v : concentration volumique des matériaux solides [%]

g : accélération de la pesanteur [m/s^2]

H : hauteur d'énergie en amont de la crête du déversoir ($Z_U - Z_{sp}$) [m]

K : consistance [$Pa \cdot s^n$]

n : indice d'écoulement [sans unité]

Q : débit [m^3/s]

Q_p : débit de point [m^3/s]

T : temps [s]

V : volume [m^3]

W : largeur de la vanne [m]

Z_D : élévation de la surface de l'eau en aval [m]

Z_{sp} : élévation de la crête du déversoir à travers la vanne [m]

Z_U : élévation de la ligne de niveau de l'énergie amont [m]

ρ_{eau} : masse volumique de l'eau [kg/m^3]

ρ_{lave} : masse volumique de la lave torrentielle [kg/m^3]

ρ_{solide} : masse volumique des matériaux solides [kg/m^3]

τ : contrainte de cisaillement [Pa]

τ_c : seuil de contrainte [Pa]

$\dot{\gamma}$: taux de cisaillement : $\dot{\gamma} = du/dz$ [s^{-1}]

Avant-propos

Lors de mon Master 2 GEOSPHERES, orienté recherche, à l'université de Grenoble, j'ai été amenée à effectuer un stage de fin d'étude d'une durée de 6 mois à compter du 1^{er} mars 2022. Ce stage a été réalisé au sein du bureau d'étude ARTELIA, dans l'équipe « Hydraulique Fluviale et Ouvrage » (HFO), situé à Echirolles (38130).

Objectifs initiaux du stage

- Réalisation d'un travail bibliographique sur 2 thématiques :
 - **Erosion hydrique** (Méthodes de diagnostic ; Mesures d'adaptations)
 - **Laves torrentielles** (Connaissances sur la dynamique des laves torrentielles ; Outils et méthodes de modélisations ; Aménagements et ouvrages de correction)
- Apporter un appui aux équipes de projet dans la réalisation des missions (recueil de données, analyse et production technique, rédaction de rapport).

Sujet de recherche

Initialement, je souhaitais que mon sujet de recherche porte sur la thématique des laves torrentielles et sur les capacités actuelles à modéliser leur dynamique. Malheureusement, je n'avais pas de cas concret à étudier à ARTELIA par manque de données et d'études en cours. Après avoir échangé, courant juin 2022, avec Guillaume PITON, chercheur à l'INRAE dans l'unité de recherche "Erosion torrentielle, neige et avalanches" (ETNA), le sujet de recherche sur l'analyse de la performance du logiciel HEC-RAS 2D dans la reproduction d'un évènement de lave torrentielle connu fut proposé et envisagé pour la suite du stage. Ce travail de recherche a abouti à une collaboration entre le bureau d'étude ARTELIA, l'INRAE, et le service RTM Savoie de l'ONF.

Révision des objectifs du stage

Dès lors, il a été décidé que les 2 mois et demi restant (mi-juin jusqu'à fin août 2022) allaient être majoritairement consacrés à ce travail de recherche, remplaçant en partie le travail bibliographique sur la thématique des laves torrentielles. En effet, le travail bibliographique réalisé dans le présent rapport reprend dans un grand ensemble les différents points d'analyse souhaités initialement par ARTELIA.

Apport du travail de recherche

Ce travail de recherche permet par apprentissage, d'améliorer les capacités à modéliser la dynamique des laves torrentielles avec des outils 2D. Il permet notamment d'améliorer les connaissances actuelles quant au potentiel et aux limitations du logiciel HEC-RAS 2D dans l'analyse d'un phénomène d'étalement et de dépôts des laves torrentielles boueuses.

Ce travail de recherche pourra aussi, *in fine*, servir à l'ingénierie vis-à-vis de la mise en évidence du potentiel et des limites du modèle HEC-RAS 2D, qui est voué à être largement utilisé dans un futur proche, notamment dans les études de risques torrentiels (PPR, PAPI).

INTRODUCTION

C'est lors de crues torrentielles que les torrents transportent des volumes considérables de matériaux et engendrent de nombreux dégâts au niveau des enjeux situés en aval. Les laves torrentielles transportent le plus de matériaux solides en comparaison avec le charriage (Recking *et al.*, 2013). Elles sont soudaines, rarement prévisibles et possèdent un grand potentiel de destruction par impact engendrant de nombreux dommages, tant sur le plan humain que sur le plan économique. Pour faire face à ce risque, il existe deux façons de se protéger : la première est de réduire la vulnérabilité, par exemple par restriction de l'urbanisation sur les territoires exposés aux laves torrentielles, ce qui n'est pas toujours possible et bien souvent les terrains sont déjà urbanisés. La seconde est de mettre en place des ouvrages de protection afin d'affecter les aléas, par exemple pour arrêter et dévier les écoulements de laves torrentielles (Givry et Peteuil, 2011). Dans cette seconde approche, le Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA) et l'ONF œuvrent depuis plus de 150 ans, au travers des actions du service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM), dans la reforestation des versants de montagne et la construction d'ouvrage de correction torrentielle afin de protéger les enjeux exposés. Pour agir de façon raisonnée et optimale, de nombreuses recherches sont menées sur les laves torrentielles afin de proposer des méthodes et des outils opérationnels capables d'apporter une meilleure compréhension et évaluation de ce phénomène. Ainsi, ces outils visent à prédire les territoires les plus exposés aux laves torrentielles et de concevoir des ouvrages de protection les plus adaptés possibles aux conditions locales.

La modélisation numérique est une approche bien connue et couramment utilisée dans le quotidien des bureaux d'études en hydraulique fluviale, pour modéliser les rivières ou cours d'eau dont les caractéristiques sont raisonnablement décrites par la théorie des fluides newtoniens. La modélisation numérique avec l'intégration du transport solide par charriage ou suspension est aussi utilisée en ingénierie, mais dans une moindre mesure parce qu'elle nécessite un degré d'expertise plus important et des données complémentaires. La modélisation de fluides non-newtoniens, comme les laves torrentielles, est par contre très peu utilisée à l'heure actuelle en ingénierie, en France. Le service RTM de l'ONF rassemble les rares ingénieurs ayant l'habitude de faire appel à des outils pour des études opérationnelles. Leur utilisation est basée sur de solides connaissances empiriques, l'utilisation d'analyses « à dire d'experts » et des calages très sommaires faites de données disponibles (extension de l'écoulement, éventuellement information locale sur l'épaisseur de dépôts, aucune information en général sur la dynamique de l'évènement). De ce fait, la modélisation de fluides non-newtoniens fait l'objet de recherches tant pour modéliser la propagation de l'écoulement en chenal confiné que pour la dynamique d'étalement en zone latéralement non contrainte. Toutefois, les travaux de recherche sur la modélisation de l'étalement des laves torrentielles ne sont majoritairement pas calés sur un évènement de terrain, malgré qu'il commence à y avoir un certain nombre de publications avec une rétro-analyse d'évènements passés via ces outils. Les travaux de recherches se concentrent encore souvent à reproduire des essais menés en laboratoire. Les phases de calage et de validation d'un modèle numérique

restent complexes puisqu'il peut y voir des variations importantes des paramètres constitutifs des laves torrentielles (plus ou moins fluides, front plus ou moins massif etc.) qui font qu'il n'est pas évident, contrairement à l'hydraulique en eau claire, de transférer d'un évènement à l'autre. De plus, l'adaptation des paramètres d'entrée aux conditions de chaque cas d'étude reste limitée. En effet, malgré le nombre important de laves torrentielles qui se produisent dans les Alpes françaises, il n'est compté que quelques stations de suivi et l'observation de ces dernières ainsi que l'acquisition de données suffisantes concernant le phénomène reste très limitée : les cas d'évènements bien documentés sont donc très rares.

Le logiciel de modélisation HEC-RAS a connu une nouvelle version en 2020 (Version 6.0 (Gibson et Sanchez, 2020)) qui permet la modélisation 2D d'écoulement de type lave torrentielle par intégration de lois de comportement spécifiques. Le Torrent du Claret, situé sur la commune de Saint-Julien-Mont-Denis en Savoie (France), a connu une lave torrentielle le 14 juin 2017. Grâce aux nombreux ouvrages de correction torrentielle ainsi qu'aux dispositifs d'observations et d'alerte présents sur le torrent, ce phénomène, qui s'est déroulé en journée, a bien été observé et de nombreuses données ont pu être récoltées. La plage de dépôts située sur le cône de déjection du torrent, et la station de suivi qui l'équipe, ont permis l'observation du phénomène d'étalement et de dépôts de la lave torrentielle (Piton *et al.*, 2018). Ainsi, il est intéressant d'analyser les capacités du modèle numérique HEC-RAS 2D à reproduire la dynamique d'étalement et de dépôts de laves torrentielles réelles et documentées dans un bassin de rétention. Pour ce faire, la lave torrentielle du 14 juin 2017 va permettre dans un premier temps de caler le modèle afin d'affiner et de réduire le jeu de paramètres de calage retenus. Une deuxième lave torrentielle s'est produite sur le torrent du Claret le 1^{er} juillet 2019. Moins documentée, mais pour laquelle il existe quelques éléments comparatifs pouvant être étudiés, cette lave torrentielle va permettre de tendre vers une démarche de validation du modèle précédemment calibré sur l'évènement de 2017. Cette démarche permet de vérifier (ou non) la capacité du modèle à reproduire un autre évènement basé sur des paramètres similaires entre les deux laves torrentielles.

Ce mémoire s'organise autour de quatre chapitres. Un premier chapitre fait l'état de l'art sur les connaissances actuelles du phénomène de laves torrentielles et sur les différentes approches de modélisation aujourd'hui utilisées afin de reproduire la dynamique des laves torrentielles. La zone d'étude sera ensuite décrite en deuxième chapitre ainsi que le protocole d'approche de ce travail de recherche. Les chapitres 3 et 4 sont respectivement consacrés à la phase de calage et de validation du modèle HEC-RAS 2D construit comprenant une analyse critique des données d'entrée disponibles. Chaque résultat et interprétation de ces deux phases seront présentés dans leur partie respective. Une conclusion viendra partager les critiques, avancées et limites rencontrées lors de cette étude ainsi que les perspectives envisageables.

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART SUR LES CONNAISSANCES ACTUELLES DU PHENOMENE DE LAVE TORRENTIELLE ET DES APPROCHES DE MODELISATION

Ce chapitre a pour intention de réaliser un état de l'art sur différents aspects essentiels abordés lors de l'étude bibliographique réalisée pendant ce stage. Dans un premier temps, il permet au lecteur de mieux appréhender la définition du phénomène torrentiel et du transport solide, ainsi que la nature et la compréhension actuelle du phénomène de lave torrentielle. Ce chapitre expose les avancées et compétences actuelles dans la capacité à reproduire ces événements au travers de la modélisation. Ainsi, il permet de positionner ce travail de recherche dans ce contexte actuel des connaissances.

1.1. Le phénomène torrentiel et le transport solide

En montagne, le terme de « phénomène » désigne la manifestation d'un agent naturel ou anthropique mettant en jeu des lois fondamentales de la physique comme la gravité, la thermodynamique, l'hydraulique, la géodynamique. Le phénomène de crues torrentielles représente un « aléa » naturel potentiellement dommageable. Le terme de « risque » torrentiel est utilisé pour refléter la probabilité pour les enjeux (humains, bâtis, infrastructures) d'être exposés à un aléa et de subir des dommages (notion de « vulnérabilité »).

Les crues torrentielles se distinguent des inondations et des crues de plaines par diverses caractéristiques spécifiques. La spécificité principale d'un torrent est le transport solide (Meunier, 1991). En effet, les torrents ont tendance à transporter des quantités importantes de matériaux solides (sédiments, blocs) ainsi que divers débris comme des troncs d'arbres, des morceaux d'ouvrages, etc. Les crues torrentielles se différencient alors des crues des rivières de plaines par la charge solide grossière plus conséquente. De ce fait, les crues des rivières de plaines sont qualifiées de crues « liquides » (Givry et Peteuil, 2011), moins riches en matériaux solides. Cette quantité de charge solide dans les crues torrentielles leur confère leur aspect plus dangereux et dévastateur pouvant causer de forts impacts sur les enjeux exposés (personnes, habitations, etc). En fonction de plusieurs paramètres, comme la géologie du bassin versant, le débit des crues, la quantité de matériaux solides mobilisés, la pente du torrent, les écoulements torrentiels vont transporter des quantités de matériaux plus ou moins importantes et concentrées en matériaux solides. Il en résulte deux principaux types de transport solide en fonction de la teneur en matériaux : le **charriage** et les **laves torrentielles**.

1.1.1. Le charriage

Le charriage est le mode de transport des sédiments sur le fond du lit par roulement ou saltation (rebond des particules sur le fond du lit) (Cf. Figure 1). Ce transport concerne les

matériaux de quelques millimètres à quelques dizaines de centimètres (Recking et al., 2013). Pour les matériaux plus fins, ils seront principalement transportés en suspension. Le charriage est un transport bi-phasique, c'est-à-dire qu'une phase liquide et une phase solide de vitesses de transport différentes sont clairement dissociées.

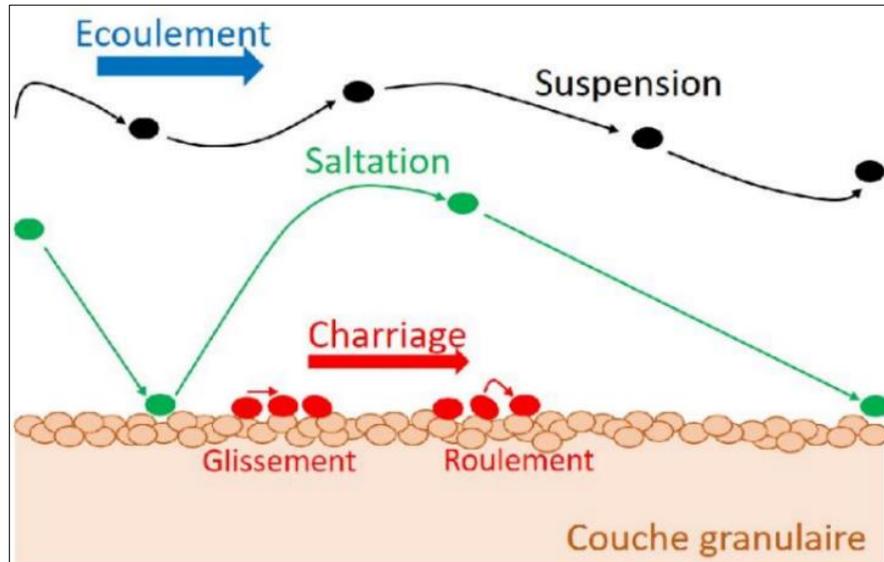


Figure 1 : Représentation schématique du transport par charriage. Source : (Vah, 2019).

1.1.2. Les laves torrentielles

Les laves torrentielles sont spécifiques aux torrents. En anglais, les termes de « mudflow » et « debris-flow » sont utilisés pour refléter ces écoulements torrentiels (Jakob et Hungr, 2005). Bardou (2002) propose une définition plutôt phénoménologique pour décrire ces écoulements, mais reste toutefois une référence dans la littérature. Ainsi, d'après Bardou (2002), les laves torrentielles sont des : « *écoulements subaériens granulaires lubrifiés, d'apparence cinématiquement monophasique* ».

Les laves torrentielles peuvent être décrites comme des écoulements transitoires par « bouffées » et sont composées d'un mélange homogène et d'apparence monophasique d'eau et d'une forte concentration en matériaux solides généralement de l'ordre de 75% de solide pour 25% d'eau, en volume. Elles présentent une large gamme de granulométrie (des argiles à des blocs de plusieurs mètres de diamètre). Les laves torrentielles sont des événements soudains, violents et pratiquement imprévisibles. Leur déclenchement résulte d'une multitude de facteurs. Elles se forment généralement lors d'intenses événements pluvieux, sur des pentes importantes et sur un site dégradé où une quantité importante de matériaux meubles est disponible (Sobol, 2016). Elles peuvent générer des dommages considérables, tant sur le plan humain que sur le plan économique.

1.1.2.1. Les entités fonctionnelles d'une bouffée de lave torrentielle

Lors de son écoulement, une bouffée de lave torrentielle peut être décomposée morphologiquement en quatre entités distinctives (Cf. Figure 2) :

- **Un front granulaire** : constitué de gros blocs et de débris divers emportés sur son passage (arbres, morceaux d'ouvrages...). Il est poussé par le corps de la coulée. Au niveau du front se situe généralement la section d'écoulement la plus importante de chaque bouffée. Il est également appelé le lobe frontal lorsque la lave torrentielle a cessé de s'écouler.
- **Un corps** : plus boueux, il est constitué de blocs baignant dans une matrice plus ou moins riche en éléments fins (argiles et sables). Le corps constitue l'essentiel du volume de la bouffée de lave torrentielle.
- **Des bourrelets latéraux** : ils représentent les abords du corps et sont composés de matériaux plus grossiers assez similaires à celui du front puisqu'ils proviennent majoritairement de ce dernier, s'échappant et formant ces dépôts latéraux le long du chenal d'écoulement.
- **Une queue de coulée** : qui tend progressivement vers un écoulement dit « hyperconcentré », plus turbulent et bi-phasique composé de blocs de diamètre généralement plus petit.

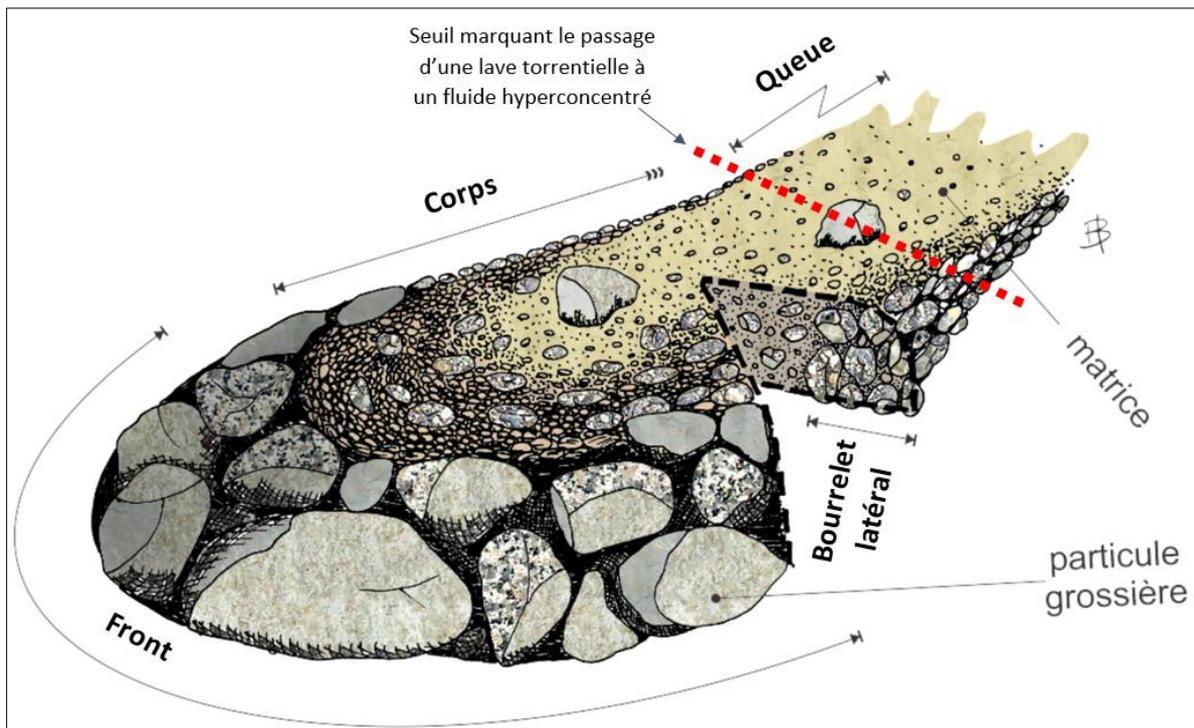


Figure 2 : Représentation schématique des entités morphologiques d'une bouffée de lave torrentielle. Source : Bardou (2002), Modifications et traduction : Leborgne (20022).

1.1.2.2. Classification des laves torrentielles

Ancy (1999) propose de séparer les laves torrentielles en 3 grandes familles :

- Lave torrentielle boueuse
- Lave torrentielle granulaire

- Lave torrentielle de type « Lahar »

Chaque famille peut être associée à des caractéristiques morphologiques et granulométries de matériaux spécifiques (Cf. Tableau 1).

Tableau 1 : Classification de Ancey (1999) des laves torrentielles en 3 grandes familles. Source : Chambon et Laigle (2013).

| | | | | |
|---|------------------------------------|--|--|--|
| Nom scientifique | | Lave torrentielle à comportement viscoplastique | Lave torrentielle à comportement frictionnel-collisionnel | Lave torrentielle à comportement frictionnel-visqueux |
| Nom commun | | Lave torrentielle boueuse | Lave torrentielle granulaire | Lave torrentielle de type Lahar |
| Caractéristiques de terrain | Forme et nature des dépôts | Régulier, avec des limites assez bien définies, encore fluide quand saturé d'eau, très cohésif quand sec | Chaotique avec des limites pas nécessairement franches, pas de cohésion des dépôts | En forme de terrasse alluvionnaire, cohésion suffisante pour supporter le poids d'un homme |
| | Formes des bourrelets et des lobes | Forme arrondie | Faces planes | Pas de bourrelet |
| | Pentes de la zone d'arrêt | > 5% | > 15% | > 0,1% |
| Caractéristiques mises en évidence en laboratoire | Granulométrie | Matrice fine important avec quantité importante d'argiles | Matrice fine faible, peu d'argiles | Matrice fine importante avec peu d'argiles et beaucoup de silts |
| | Essai d'identification des sols | Sols argileux | Sols grossiers | Sols limoneux, le plus souvent d'origine volcanique |

Les **laves torrentielles boueuses** sont les plus fréquentes dans les Alpes françaises (Chambon et Laigle, 2013). Ce sont ces dernières qui sont spécifiquement étudiées dans ce présent mémoire. C'est pourquoi, les paragraphes suivants seront principalement ciblés sur la description et les spécificités des laves torrentielles boueuses.

1.1.2.3. Loi de comportement des laves torrentielles boueuses

Afin de reproduire la dynamique de lave torrentielle au travers de la modélisation, il est important de définir et de comprendre les lois de comportements associées.

D'après les travaux de Coussot (1992), les laves torrentielles boueuses peuvent être caractérisées comme un écoulement à surface libre et à comportement **viscoplastique**. Ce sont des écoulements **non-Newtoniens** qui correspondent à des fluides « à seuil de contrainte » (τ_c), c'est-à-dire qu'ils ont besoin d'atteindre une certaine contrainte avant leur mise en mouvement reflétant de ce fait une limite entre un comportement solide et un comportement liquide. C'est ce comportement qui confère aux laves torrentielles leur possibilité de former des bourrelets et de provoquer l'arrêt de l'écoulement sur des pentes plus ou moins raides. Les laves torrentielles boueuses sont aussi qualifiées de fluides à seuil

rhéofluidifiant, ce qui signifie que lorsque le cisaillement augmente, la viscosité apparente du matériau diminue (Schaer, 2018).

Le modèle viscoplastique le plus couramment utilisé pour représenter les laves torrentielles boueuses est le modèle d'**Herschel-Bulkley** (Coussot, 1992). Il s'exprime en cisaillement simple par la relation suivante :

$$\tau = \tau_c + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad \text{si } \tau \geq \tau_c$$

Où :

τ : contrainte de cisaillement [Pa]

$\dot{\gamma}$: taux de cisaillement : $\dot{\gamma} = du/dz$ [s^{-1}]

Paramètres rhéologiques d'Herschel-Bulkley :

τ_c : seuil de contrainte [Pa]

K : consistance [$Pa \cdot s^n$]

n : indice d'écoulement [sans unité] (comportement rhéofluidifiant si $n < 1$)

La Figure 3 permet une représentation graphique du modèle Herschel-Bulkley. La relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement est non linéaire. Il n'y a écoulement que lorsque le seuil de contrainte (τ_c) est atteint, en dessous il s'agit d'un régime solide rigide.

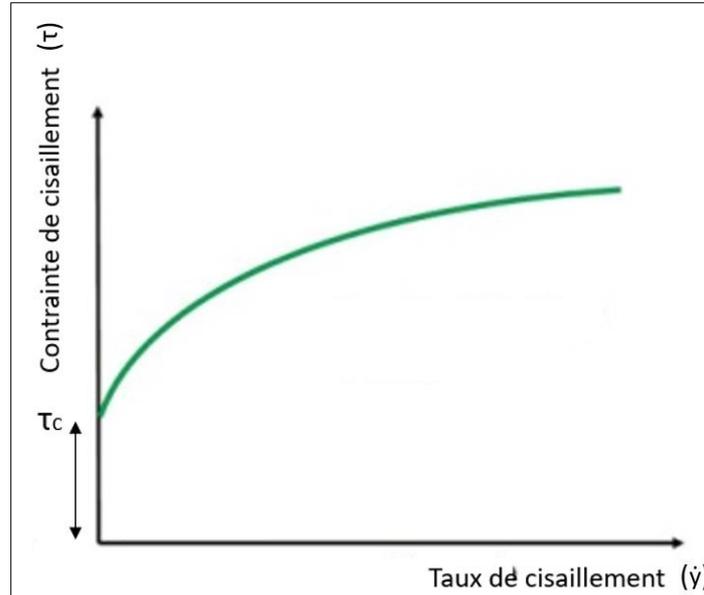


Figure 3 : Représentation graphique du modèle Herschel-Bulkley. Réalisation : Leborgne (2022).

Il existe dans la littérature des intervalles de valeurs des paramètres rhéologiques typiques pour les laves torrentielles boueuses proposés par Coussot (1996) (Cf. Tableau 2).

Tableau 2 : Valeurs typiques des paramètres rhéologiques de Herschel-Bulkley pour les laves torrentielles boueuses, d'après Coussot (1996). Source : Chambon et Laigle (2013).

| Symbole | Nom [unité] | Valeurs typiques |
|----------|-----------------------------------|------------------------|
| τ_c | Contrainte seuil [Pa] | 500 – 10 000 |
| K | Consistance [Pa.s ⁿ] | $K/\tau_c = 0,1 – 0,5$ |
| n | Indice d'écoulement [pas d'unité] | 0,3 |

τ_c a une plage de valeur conséquente et dépend fortement de la concentration solide. Le rapport τ_c/ρ s'étend sur l'intervalle de 0,25 – 4,0 m².s⁻² mais est souvent compris entre 0,5 et 2,0 (Chambon et Laigle, 2013). La valeur du rapport K/τ_c peut varier dans l'intervalle de 0,1 – 0,5 sⁿ (0,3 est souvent la valeur utilisée comme 1^{ère} approche).

1.2. Approches de modélisation de la dynamique des laves torrentielles

Les laves torrentielles représentent un risque important selon la localisation des torrents où elles se produisent et les enjeux à proximité. C'est pourquoi la cartographie des zones à risques torrentiels est primordiale, autant pour protéger les personnes et les biens exposés, que pour le choix et l'emplacement des ouvrages de protection sur le torrent afin qu'ils soient les plus adaptés aux conditions locales. Pour ce faire, il existe différentes méthodes de modélisation consacrées à la **prédétermination** ou la **reconstruction** des caractéristiques hydrauliques des laves torrentielles comme par exemple : la vitesse et l'épaisseur de l'écoulement, l'extension totale de la lave et les épaisseurs des dépôts (Chambon et Laigle, 2013). Plusieurs modèles à base physique ou numérique tentent de reproduire ou d'anticiper la dynamique de laves torrentielles.

1.2.1. Modèles physiques

Les modèles physiques vont essayer de reproduire des conditions d'écoulement réelles à une échelle réduite, soit reproduire la géométrie physique de l'écoulement. Le choix du type de matériaux à utiliser est très important afin qu'il puisse représenter au mieux la granulométrie de la lave étudiée ainsi que la mécanique du phénomène. La modélisation physique s'applique généralement à l'étude d'une zone relativement locale de l'écoulement torrentiel. Plusieurs organismes comme des bureaux d'étude (ex : ARTELIA), des organismes de recherche (ex : INRAE), ont au sein de leurs locaux un laboratoire afin de réaliser des modèles physiques spécifiques à l'étude des laves torrentielles. Pour citer un exemple récent, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) et son Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques (CACOH) ont récemment remporté un appel d'offre pour l'étude sur modèle physique de la plage de dépôt du torrent du Manival en Isère (38). Cette étude a pour objectif de mieux comprendre le fonctionnement et les réaménagements possibles de la plage de dépôts. Ils doivent pour ce faire, simuler aussi fidèlement que possible la dynamique des

coulées de laves torrentielles grâce à leur modèle réduit et la plateforme hydro-sédimentaire 3D du CACOH.

Observer en direct un phénomène de lave torrentielle et tenter de le reproduire en laboratoire reste difficile (Remaître, 2006). Divers chercheurs ont développé des modèles numériques afin d'essayer de reproduire ces écoulements complexes, de prévoir leurs trajectoires, leur extension, etc. Aussi, la modélisation numérique reste une méthode plus abordable techniquement et financièrement et plus facile à manipuler pour les organismes comme les bureaux d'études qui ont besoin d'outils opérationnels pour leurs études. Aussi, la modélisation numérique permet d'obtenir des résultats généralement plus rapidement puisqu'elle n'a pas besoin de temps de manutention et de construction des modèles qui en modélisation physique peuvent demander plusieurs mois.

1.2.2. Modèles numériques

Il est recensé dans la littérature que les premiers travaux sur la modélisation numérique des laves torrentielles datent des années 1970, notamment par Johnson (1970) (Remaître, 2006). Depuis lors, plusieurs avancées se sont produites en la matière. Aujourd'hui, la modélisation numérique des laves torrentielles peut être abordée à travers deux approches : en considérant les laves torrentielles comme un fluide monophasique ou en considérant les laves comme un fluide bi-phasique selon si l'objectif est de reproduire dans le premier cas plutôt des laves torrentielles boueuses (mécanique des fluides), ou dans le second cas des laves torrentielles plutôt granulaires (mécanique des sols) (Remaître, 2006). Il y a toutefois plus de travaux ayant étudié la modélisation des laves torrentielles boueuses que pour des laves torrentielles granulaires qui sont encore plus complexes à appréhender. Les modèles peuvent être utilisés soit en prédétermination, soit en reconstitution des phénomènes de laves torrentielles.

- **Modèles 1D**

Les modèles 1D, monodimensionnels, furent la première approche d'investigations numériques afin de simuler la propagation des laves torrentielles, fondés sur une dimension d'espace (Schaer, 2018). Les équations 1D de Saint-Venant sont ici utilisées afin de calculer des quantités moyennes sur une section en travers de l'écoulement (Laigle, 2008). Les modèles de propagation peuvent être regroupés en deux grands groupes : les modèles mécaniques et les modèles rhéologiques. Les paramètres d'entrée de ces modèles peuvent différer légèrement mais des paramètres de bases communs restent toutefois nécessaires comme le choix de la loi de comportement, l'entrée d'une donnée topographique, d'un hydrogramme et/ou d'un solidigramme (conditions aux limites du modèle), et de la concentration volumique de la lave torrentielle étudiée (Remaître, 2006). Les modèles les plus utilisés et développés en 1D s'appuient sur des lois de comportement viscoplastiques avec comme exemple le modèle VIFLOW 1-D, le modèle Cemagref 1D, le modèle DAN, le modèle BING, le modèle MODDS, ou le modèle J-DFM 1-D.

Les modèles 1D sont ainsi pour la plupart spécifiques à la simulation de la propagation de laves torrentielles. Afin de modéliser l'étalement des laves torrentielle sur un cône de

déjection ou dans une plage de dépôts, il est nécessaire d'utiliser des modèles bidimensionnels (Remaître, 2006).

- **Modèles 2D**

Les modèles bidimensionnels sont utilisés afin de reconstituer ou de prédire l'étendue du passage de la lave torrentielle permettant ainsi de délimiter les zones soumises à un aléa, de prédire la hauteur d'écoulement, l'épaisseur des dépôts et la vitesse de propagation (Schaer, 2018). En fonction de plusieurs paramètres comme la concentration volumique, la viscosité de l'écoulement, le choix des lois de comportements des modèles 2D vont différer (fluide newtonien, fluide à seuil, fluide granulaire, turbulent, etc.) (Remaître, 2006). Les lois de comportement s'appuient dans la plupart des cas sur les équations de Barré de Saint-Venant déduites des équations de conservation de la quantité de mouvement et de conservation de la masse (Remaître, 2006; Schaer, 2018). Les équations de Saint-Venant sont applicables dans un contexte d'« eau peu profonde » (Shallow Water) et les calculs sont réalisés grâce à la création d'un maillage de cellules rectangulaires ou triangulaires adaptées à des données topographiques 3D. Comme pour les modèles 1D, il est nécessaire d'intégrer des données d'entrée comme les conditions aux limites du modèle (hydrogramme, solidigramme) et les paramètres rhéologiques spécifiques à l'écoulement étudié (concentration volumétrique, viscosité). Afin de reconstituer un écoulement par modélisation 2D, les valeurs des paramètres rhéologiques comme données d'entrée sont généralement supposées ou rétro-estimées selon des observations de terrain (Rickenmann, 2016). Parmi les modèles les plus utilisés, basés pour la majorité sur des lois de comportement viscoplastiques (fluides boueux), il peut être cités : Flo2D (O'Brien *et al.*, 1993), Lave2D (Laigle *et al.*, 2003), et HEC-RAS 2D Version 6.0 (Gibson et Sanchez, 2020).

Le modèle Flo2D a été développé par O'Brien *et al.*, (1993). Il est le modèle 2D payant le plus connu et le plus utilisé (Chambon et Laigle, 2013; Schaer, 2018; Jakob *et al.*, 2022). Il est également appelé « modèle quadratique » et repose sur une loi de comportement de Bingham (soit une loi d'Herschel Bulkley avec un indice $n = 1$; Marchi *et al.*, 2010 ; Schaer, 2018). Il permet la simulation de crues d'eaux claires, d'écoulements boueux et de laves torrentielles mais reste actuellement et majoritairement utilisé pour représenter les laves torrentielles boueuses. Des tests ont été faits concernant la simulations des laves torrentielles granulaires mais sa capacité et sa performance pour ces laves restent discutables (Chambon et Laigle, 2013). Les équations utilisées sont l'équation de continuité et l'équation de mouvement bidimensionnelle. Il peut être intégré des conditions aux limites du modèle, des entrées d'eau à partir d'hydrogrammes d'entrée, des coefficients de rugosité de Manning pour toutes les cellules du modèle, ainsi qu'une concentration de sédiments modifiable en fonction des densités apparentes sélectionnées. Le module *Mud Flow* dans le logiciel FLO-2D permet d'ajouter la concentration de sédiments à l'hydrogramme d'entrée qui reste fixe sur toute la durée de l'hydrogramme. En effet, il est encore difficile d'estimer avec des modèles les fluctuations de la concentration des sédiments (Jakob *et al.*, 2022). Les paramètres rhéologiques sont également des variables indispensables à spécifier. Le modèle utilise un modèle numérique de terrain (MNT) afin de créer un maillage de cellules carrées. Le modèle FLO-2D reste cependant à utiliser avec précaution notamment pour les laves torrentielles à

forte concentration volumique. En effet, le modèle de Bingham utilisé pour simuler la viscosité d'un écoulement peut être une limite d'utilisation lorsque la concentration volumique est trop importante (Schaer, 2018; Jakob et Hungr, 2005).

Le modèle Lave2D du Cemagref (Laigle *et al.*, 2003) est également utilisé majoritairement pour la modélisation d'écoulement de laves torrentielles boueuses. Ce modèle se base sur la loi de comportement de Herschel-Bulkley en y intégrant la loi de résistance de Coussot (1994) (Chambon et Laigle, 2013). Comme pour les autres modèles, les deux types de données d'entrée principales sont un hydrogramme spécifique à l'écoulement étudié et la définition des paramètres rhéologiques du matériau en écoulement (Laigle et Peteuil, 2010). Le modèle Lave2D a déjà pu être utilisé afin de reproduire des événements de laboratoires et de terrains (Chambon et Laigle, 2013). Toutefois, il est souligné dans la littérature et comme pour le modèle Flo-2D, l'importance du calage avec des événements de référence ainsi que de l'adaptation des paramètres d'entrée aux conditions de chaque cas d'étude (topographie et hydrographie) (Schaer, 2018). Aussi, ce modèle n'intègre pas de module permettant l'implantation d'ouvrages en charge.

Pour beaucoup de modèles bidimensionnels, le calage et/ou la validation sur des événements réels restent encore délicats et limités (Remaître, 2006; Schaer, 2018). Il est ainsi important de continuer les expérimentations sur des cas concrets et bien documentés avec des modèles 2D qui font l'objet de nouvelles mises à jour et de recherches sur leurs capacités et leurs performances à modéliser des laves torrentielles afin d'aboutir à des outils 2D opérationnels et fiables. Ce travail de recherche permet de poursuivre cette optique quant à l'analyse des capacités du modèle HEC-RAS 2D à reproduire la dynamique d'étalement et de dépôts de deux cas de laves torrentielles observées et documentées sur le torrent du Claret. Le choix d'expérimenter le modèle HEC-RAS 2D et sa description détaillée sont explicités dans la partie suivante.

1.3. Choix et description détaillés du modèle HEC-RAS 2D

Le logiciel HEC-RAS a été développé par le United States Army Corps of Engineers. C'est un outil utilisé dans le monde entier et familier à de nombreux bureaux d'étude. C'est à partir de la version 6.0 Beta 3 (Gibson et Sanchez, 2020) avec l'ajout des modules « Mud » et « Débris » qu'il est possible de modéliser en 2D le transport des sédiments et les écoulements de fluides non-newtoniens par l'intégration de plusieurs équations. Le modèle HEC-RAS 2D est depuis l'un des modèles le plus fréquemment utilisé pour la modélisation d'écoulement viscoplastique d'autant plus qu'il est gratuit et en libre-service sur internet (Jakob *et al.*, 2022).

En modèle 2D, HEC-RAS utilise un maillage irrégulier avec des cellules rectangulaires mais pouvant varier de forme jusqu'à avoir 8 faces. Cette spécificité permet notamment de préciser et de raffiner le maillage sur des zones topographiques où une résolution plus importante est nécessaire, ou bien encore à des endroits où la topographie change brusquement (digue, berge, route). L'objectif est de définir un modèle de précision et de

bonne résolution afin d'optimiser les capacités et le temps de calcul du modèle. HEC-RAS produit des données sur la hauteur et la vitesse d'écoulement pour chaque cellule et pour chaque pas de temps du calcul. La topographie 3D peut être introduite dans HEC-RAS et la rugosité est représentée par des coefficients de rugosité de Manning. Selon le terrain d'étude, il faudra spécifier un coefficient de Manning pour chaque entité spatiale. Un hydrogramme et sédigramme peuvent être spécifiés dans les conditions aux limites du modèle. Afin de représenter au mieux le type d'écoulement étudié, plusieurs méthodes peuvent être sélectionnées, ce qui va changer les termes, variables et paramètres non-newtoniens nécessaires. HEC-RAS propose six méthodes :

- Newtonian Assumptions
- Only Bulking
- Bingham
- O'Brien Equation (Quadratic)
- Clastic Grain-Flow
- Herschel-Bulkley

La méthode par défaut est celle des hypothèses newtoniennes (Newtonian Assumptions) : c'est une méthode newtonienne qui utilise les équations standards des « eaux claires ». Only Bulking est également une méthode newtonienne puisqu'elle ne modifie que le volume du fluide (Manuel d'utilisation, Gibson et Sanchez, 2020). Les quatre autres méthodes sont quant à elles des méthodes non newtoniennes. Les modèles et les calculs composant ces six méthodes sont décrits en détail dans le Manuel de référence technique. Ici, il sera spécifié simplement l'utilisation et le paramétrage de la méthode de **Herschel-Bulkley** puisque c'est cette méthode qui est utilisée pour les simulations dans ce mémoire. Il est aujourd'hui le modèle qui reflète le mieux ces écoulements non-newtoniens.

La Figure 4 permet la visualisation de la fenêtre du logiciel HEC-RAS avec les différents paramètres non newtoniens à renseigner. La **concentration volumique** (C_v) de la lave torrentielle étudiée est la première variable à spécifier [%]. HEC-RAS conserve une valeur de concentration volumique fixe dans le temps et l'espace. Les équations non newtoniennes sont sensibles aux concentrations volumiques (Gibson et Sanchez, 2020). Il est possible d'incorporer le volume des solides de la lave torrentielle aux données d'écoulement en choisissant « Do Not Bulk ». Le volume des solides sera alors inclus directement dans le flux du mélange (débit). Au contraire, il est possible de définir seulement le débit d'eau et ensuite d'ajouter le volume des solides pendant la simulation en choisissant « Bulk Fluid Volume » (ajout d'un hydrogramme et d'un sédigramme séparés). Il est également nécessaire de spécifier une contrainte **seuil** (« yield stress » terme anglais utilisé dans HEC-RAS), noté « τ » dans HEC-RAS ou « τ_c » dans la littérature et dans ce présent rapport. τ est renseigné en Pa. HEC-RAS comprend 3 approches pour déterminer la contrainte seuil :

- Exponential
- Use Coulomb
- User Yield

La méthode empirique exponentielle est l'approche par défaut et suppose que le seuil d'élasticité est une fonction exponentielle de la concentration volumique. « Use Coulomb » permet d'utiliser la théorie de Coulomb pour calculer ce seuil. L'utilisateur peut également rentrer directement et manuellement la valeur du seuil avec « User Yield » ce qui sera le cas dans ce travail afin de pouvoir tester plusieurs valeurs différentes.

Figure 4 : Fenêtre des méthodes et paramètres non-newtoniens du logiciel HEC-RAS.

Les approches mathématiques développées dans HEC-RAS suivent une approche monophasique et peut faire appel à trois types d'équations d'écoulement non newtoniens :

- Equations 1D de Saint-Venant
- Equations 2D de Saint-Venant
- Equations 2D d'onde diffusive

L'équation 2D d'onde diffusive (Diffusive Wave Equation (DWE)) est celle retenue par défaut. Pour ce travail de recherche, il a été utilisé l'équation 2D de Barré de Saint-Venant (**Shallow Water Equation (SWE)**) qui est une réduction en 2D des équations 3D de Navier-Stokes. SWE résout les équations de conservation du volume et de la quantité de mouvement et, contrairement au modèle DWE, inclut les accélérations temporelles et spatiales ainsi que le mélange horizontal (manuel d'utilisation, Gibson et Sanchez, 2020).

CHAPITRE 2 : TERRAIN D'ETUDE ET APPROCHE METHODOLOGIQUE

2.1. Torrent du Claret

2.1.1. Description générale du bassin versant

Le torrent du Claret se situe à 44,689° N, 6,009° E, au nord de la commune de Saint-Julien-Mont-Denis en Moyenne-Maurienne, Savoie (73) (Cf. Figure 5). Il est un affluent de la rive droite de l'Arc. D'une surface totale d'environ 2,63 km², le bassin versant est surplombé par le Pic du Génie (2 510 m), délimité à l'ouest par le Crêt de la Pare (2 183 m) et à l'est par le massif de la Croix des Têtes (2 491 m). Il est composé des quatre sous-bassins versant : la Branche du Claret ; Le Bonnant ; le Ravin du Milieu et la Combe Mouillée (Cf. Figure 6). Il présente une dénivelée de 1415 m et un indice global de pente de 0,40 m/m. Le Tableau 3 apporte de plus amples détails sur les caractéristiques propres au bassin versant du Claret.

C'est un torrent très actif caractérisé par un fort potentiel sédimentaire avec une superficie en érosion active connectée au réseau hydrographique représentant 41% de la surface du bassin versant (Etude de Bassin Versant, RTM/ONF Savoie, 2013). Ce fort apport sédimentaire est fourni par les différentes formations géologiques présentes sur le bassin. En rive droite, il est retrouvé majoritairement les flysch schisto-gréseux des écaillles externes sub-briançonnaises, des gypses et des cargneules, tandis qu'en rive gauche, se sont principalement des calcaires du Jurassique qui composent les escarpements rocheux dans la partie supérieure. Le contexte géologique et les forts processus d'érosion expliquent la répartition hétérogène de la forêt dans le bassin versant du Claret (Hugerot, 2020).

Le torrent du Claret connaît en moyenne des crues et laves torrentielles tous les 2 à 3 ans avec des volumes d'apport solide décennal de l'ordre de 25 000 m³ et des volumes d'apport solide centennal de 60 000 m³ (Rapport d'évènement, (RTM/ONF Savoie 2019)). D'après un recensement historique des évènements, le torrent produit un plus grand nombre de laves torrentielles majoritairement boueuses entre les mois de juin et septembre lors d'orages estivaux très intenses. Comme pour beaucoup de crues et de laves torrentielles, le facteur principal de déclenchement de laves dans le torrent du Claret est l'accumulation de plusieurs évènements pluvieux ou des orages intenses localisés dans le bassin de réception (Hugerot, 2020). La petite taille du bassin versant du torrent provoque une mobilisation rapide et concentrée des matériaux disponibles accentuant davantage l'apparition et la fréquence des laves torrentielles comme le montre l'occurrence des laves torrentielles dans ce torrent (Chahrour, 2021).

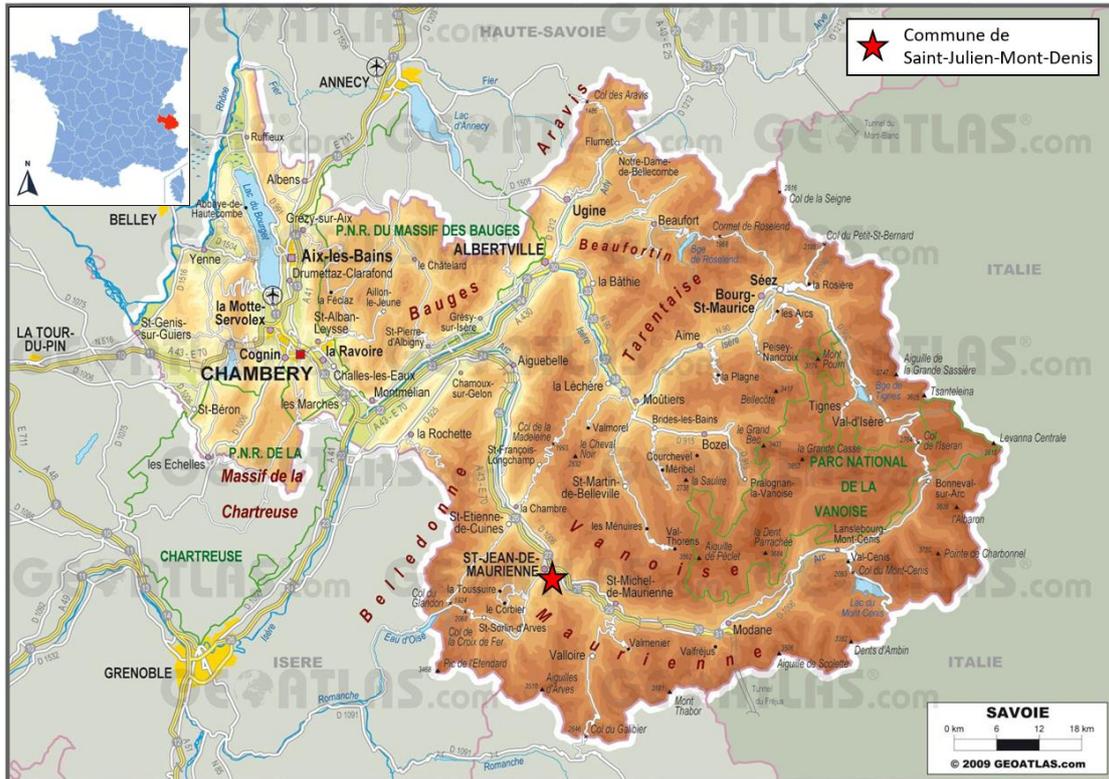


Figure 5 : Localisation de la commune de Saint-Julien-Mont-Denis dans le département de la Savoie.
Sources : GEOATLAS (2009). Modifications : Leborgne (2022).

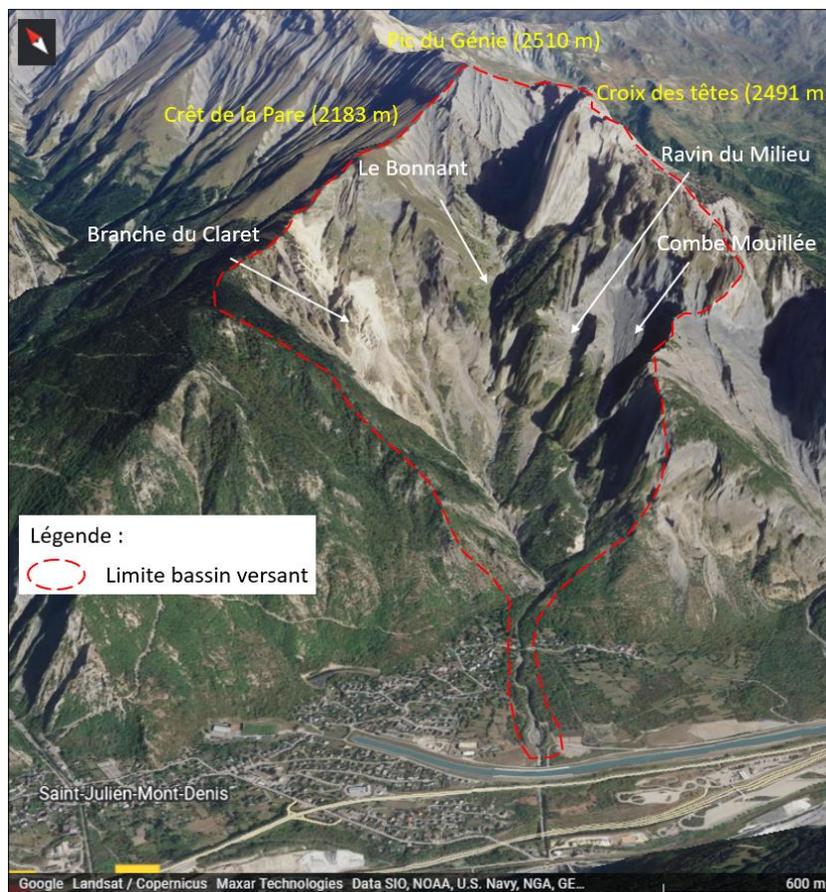


Figure 6 : Bassin versant du torrent du Claret et ses quatre sous-bassins. Source figure : GoogleEarth ;
Source données : Etude de Bassin Versant, RTM/ONF Savoie, (2013).

Tableau 3 : Caractéristiques spécifiques du bassin versant du Claret. Source : Etude de Bassin Versant, RTM/ONF Savoie (2013).

| Paramètres | Valeurs |
|-------------------------------|----------------------|
| Surface BV | 2.63 km ² |
| Périmètre | 8 552 m |
| Altitude max | 2 510 m |
| Altitude min | 620 m |
| Altitude moyenne H50% | 1 650 m |
| H5% | 2 325 m |
| H95% | 910 m |
| Longueur du plus long talweg | 4 487 m |
| Dénivelée cours d'eau | 1 890 m |
| Pente moyenne du cours d'eau | 0,53 m/m |
| Pente pondérée du cours d'eau | 0,26 m/m |
| Indice global de pente | 0,40 m/m |
| Dénivelée | 1 415 m |
| Dénivelé spécifique | 650 m |
| Coefficient de Gravelius | 1,47 - |

2.1.2. Corrections torrentielles sur le torrent du Claret

Le torrent du Claret est un torrent très actif comme vu précédemment. Le bassin versant du torrent a été acquis à la fin du 19^{ème} siècle par l'Administration des Eaux et Forêts au titre de la politique RTM. Il est recensé que les premiers travaux de correction torrentielle apportés sur le torrent remontent à l'année 1895 par la stabilisation de la combe de Fayard (Hugerot, 2020). Depuis, de nombreux travaux de génie civil et de reboisement ont été opérés afin de corriger le torrent, stabiliser et réduire les zones de production sédimentaire mais aussi afin de remplacer les nombreux barrages de retenues qui n'ont pas résisté aux divers épisodes de laves torrentielles.

Dans les prochains paragraphes, il sera majoritairement décrit les ouvrages de correction torrentielle composant le dispositif « plage de dépôts » (ainsi nommé dans la base de données RTM). En effet, c'est dans la plage de dépôts, aussi appelée « bassin de rétention » que le phénomène d'étalement de laves torrentielles a été observé et sera étudié par modélisation numérique avec le logiciel HEC-RAS. Pour de plus amples informations concernant l'historique des aménagements apportés sur le torrent du Claret, se référer par exemple aux travaux de Hugerot (2015) et Chahrour (2021) qui précisent les différents travaux de correction depuis 1895 à nos jours. La Figure 7 suivante, permet toutefois de se rendre compte du nombre important de dispositifs de restauration présents sur le torrent ainsi que leur période d'implantation.

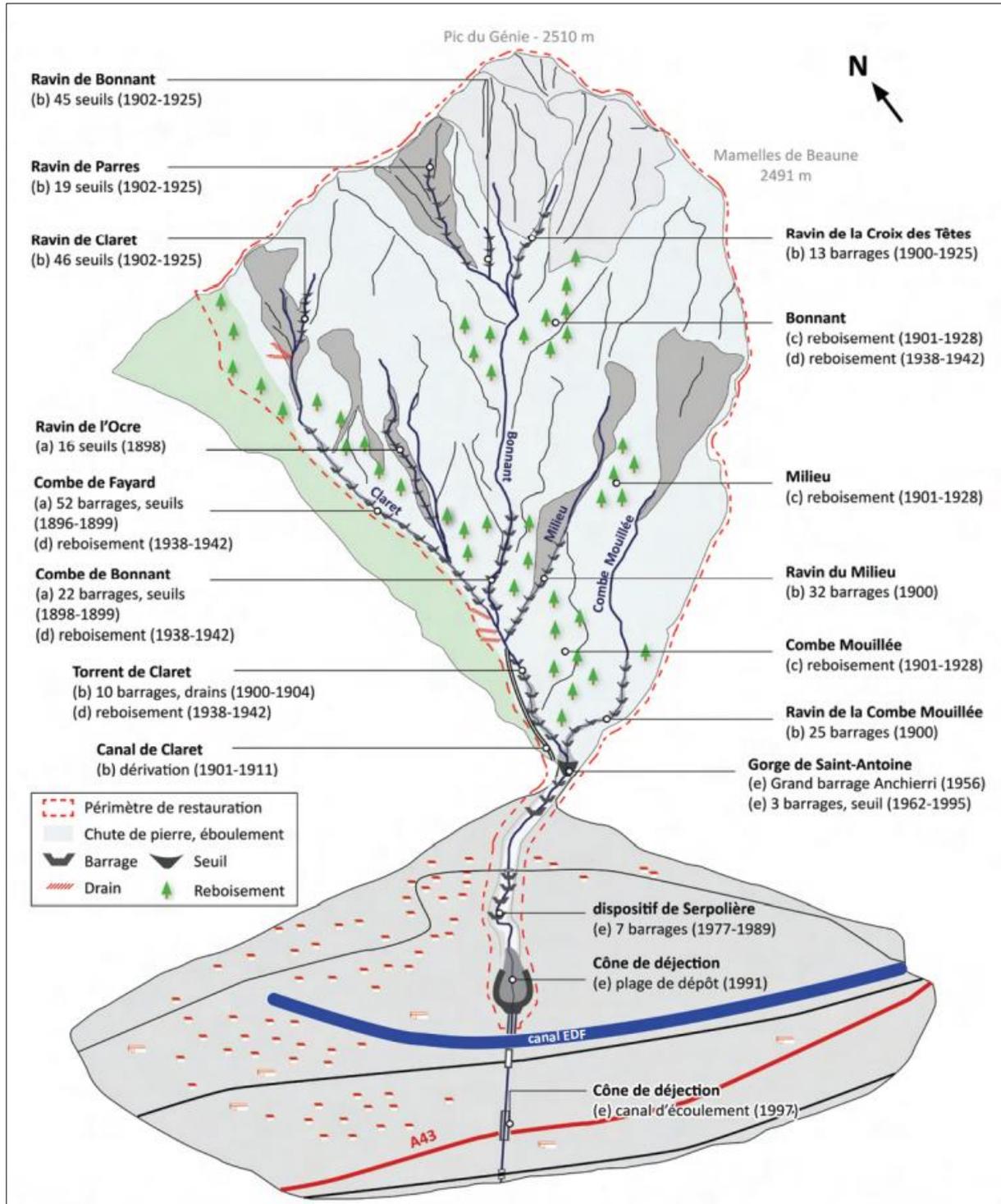


Figure 7 : Etapes et localisation des principaux travaux RTM dans le bassin versant de Claret. Les étapes de la restauration sont figurées par les lettres (a) à (g). Source : Hugerot (2020).

2.1.2.1. Dispositifs « plage de dépôts »

Le dispositif appelé « **Plage de dépôts** » dans la base RTM est un bassin de rétention construit en 1991 juste en amont du canal EDF afin de protéger les enjeux exposés en aval des laves torrentielles. Il fait 120 m de long et est d'une capacité d'environ 18 000 m³. Ce bassin de rétention a un rôle de filtration par le tri et le stockage des matières solides ainsi qu'un rôle

régulateur de transport solide. Ce bassin de rétention est composé, de l'amont vers l'aval, de (Cf. Figure 8) :



Figure 8 : Ouvrages de protection torrentielle composant le dispositif « plage de dépôts » du torrent du Claret. Réalisation : Leborgne (2022), Données : RTM73.

- **Deux barrages de retenue** en pierres sèches sont situés à l'entrée de la plage de dépôts. Leur objectif est de diriger les écoulements entrants et de stabiliser le profil en long en créant un point fixe.
- **Des enrochements** en pieds de digues à l'entrée de la plage de dépôts afin de renforcer et protéger les berges.
- **Six dents freineuses**, aussi appelées « briseurs de laves » sont implantées dans la partie amont de la plage de dépôts. Ce sont des blocs triangulaires en béton armé organisés en triangle, chacun mesurant 3 m de long sur 4 m de haut (plans de travaux, archives RTM/ONF Savoie, 1991). Leur objectif est de casser l'énergie des laves torrentielles et de favoriser les dépôts dans la partie amont du bassin de rétention. Elles ont été implantées à titre expérimental et ont été retirées en 2018.
- **Un bassin sédimentaire** offrant une zone d'étalement et de stockage de dépôts.
- **Des digues latérales** en enrochements bétonnés sur les deux rives du barrage filtrant pour protéger les berges et renforcer le barrage de fermeture.
- **Un barrage de fermeture** ouvert ou barrage filtrant avec un contre barrage et un radier en béton armé en aval, permettant de stocker les matériaux et de trier et réguler les

flux torrentiels. La géométrie du barrage filtrant a notamment évolué lors des travaux de 2018 à partir d'une volonté du RTM dès 1995¹.

- **Une piste d'accès** afin de permettre aux engins de chantier d'accéder au bassin pour les travaux de curage et d'entretien.

2.1.2.2. Dispositif de mesures et d'observations

Les deux évènements de laves torrentielles de 2017 et 2019 observés sur le torrent du Claret ont pu être étudiés dans ce présent mémoire grâce aux données disponibles, obtenues en partie par les différents outils de mesures présents à ce moment-là, sur le torrent :

- **Un géophone** localisé à l'entrée de la plage de dépôts en rive droite (rôle de détecteur par signaux sismiques) ;
- **Une centrale d'acquisition** de type NI CR1000 (enregistre, traite et déclenche) ;
- **Un pluviomètre** sur le barrage filtrant ;
- **Une station d'imagerie** comprenant une caméra de type RECONYX Trail PC900 implantée sur le barrage filtrant sur l'aile droite.

Le géophone permet le déclenchement automatiquement de la caméra (une photo par seconde) après le dépassement d'un seuil de 250 mV. Un seuil est également ajouté à 12 mm/h pour l'intensité de pluie enregistrée par le pluviomètre (Fontaine, 2017).

2.1.2.3. Géométrie du barrage filtrant avant les travaux de 2018

Le barrage filtrant de la plage de dépôts est un barrage en béton armé de 9,2 m de haut. La géométrie et l'ouverture du barrage ont connu des modifications en 2018. Initialement, le barrage filtrant a été façonné avec deux fentes rectangulaires (Cf. Figure 9). La fente inférieure, située au pied du barrage faisait 5 m de largeur sur 1 m de hauteur. Sa conception avait pour objectif de faire traverser les faibles débits (événements récurrents) vers l'aval et d'arrêter les blocs de diamètre supérieur à 1 m. La fente supérieure faisait 3 m de largeur sur 1,5 m de hauteur et n'était activée que lorsque la hauteur des écoulements atteignait 4 m de haut au droit du barrage. Le barrage est également composé d'un déversoir trapézoïdal de 2 m de haut avec une base d'une largeur de 5 m, consacré à la surverse des écoulements extrêmes de plus de 7 m de haut.

¹ La volonté de revoir l'ouvrage de fermeture émane du service RTM dès 1995, suite à la crue de 1993. Elle a nécessité une concertation avec les gestionnaires des infrastructures linéaires exposées à l'aval, puis une étude de faisabilité de modification du pertuis (CEMAGREF). Une étude d'un tiers expert indépendant, Mr Koulinski, a confirmé l'opportunité de modifier le pertuis faisant suivre une procédure réglementaire entre 2012 et 2017 avant d'être mise en œuvre en 2018.

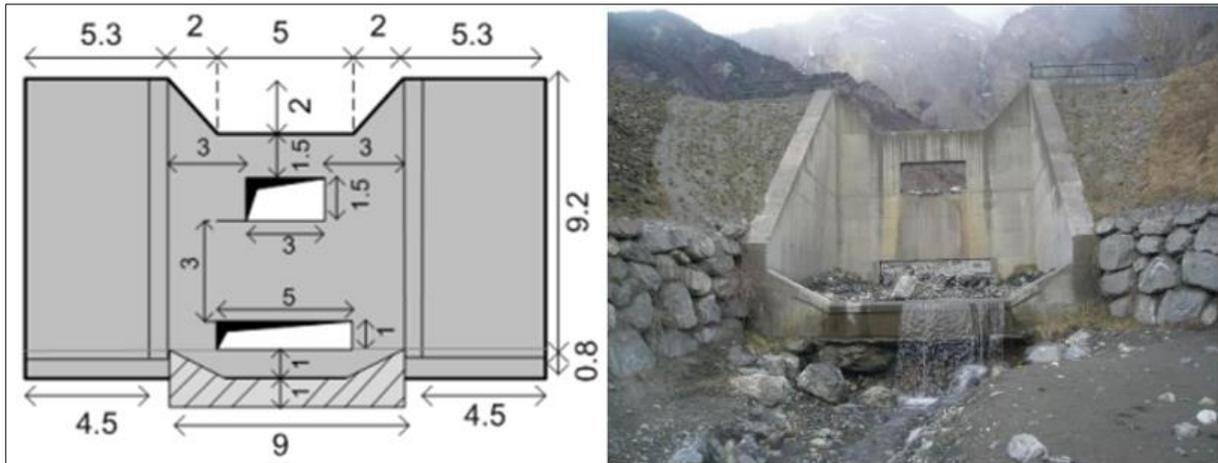


Figure 9 : A gauche : Dimensions du barrage de fermeture de la plage de dépôts du Claret avant les travaux de 2018. Source : Chahrou (2021). A droite : Photo du barrage de fermeture au 01 mars 2013. Source : RTM/ONF Savoie (2013).

Cette géométrie initiale a montré plusieurs limites et plusieurs problèmes ont été relevés. Lors de la crue du 7 mai 1993 et celle du 14 juin 2017, la plage de dépôts a été remplie et la fente inférieure du barrage filtrant a été obstruée par de gros blocs ne permettant pas un auto-curage des matériaux. Dans ces situations, tous les matériaux sont retenus dans le bassin, même ceux transportés par les petites crues, créant en aval un déficit sédimentaire déjà présent sur le secteur aval de la confluence avec l'Arc (Etude de Bassin Versant, ONF/RTM73, 2013). De ce fait, le dimensionnement de la fente inférieure du barrage de fermeture n'était pas suffisamment grand pour permettre le passage des plus gros blocs des laves torrentielles les plus fréquentes, nécessitant ainsi des travaux de curage réguliers et coûteux de la plage de dépôts. De plus, l'organisation et la préparation aux travaux de curage est assez long, ce qui ne permet pas au système de rétention de fonctionner de manière optimale. C'est pourquoi, en 2018, un nouveau design de l'ouverture du barrage de fermeture a été réalisé.

2.1.2.4. Géométrie du barrage filtrant après les travaux de 2018

Le barrage de fermeture est représenté actuellement avec une seule et grande ouverture de 4 m de large sur 5 m de haut, protégée par des bords en plaques anticorrosion d'une épaisseur de 20 mm (Cf. Figure 10). Aussi, lors de ces travaux, il a été décidé de supprimer les six briseurs de lave en béton armé implantés à l'entrée du bassin de rétention. Ces derniers n'étaient pas adaptés aux plages de dépôts (Etude de Bassin Versant, ONF/RTM73, 2013) et ils se dégradaient très rapidement après chaque passage de laves torrentielles. Aussi, ces dents freineuses provoquaient presque systématiquement l'arrêt d'une partie des matériaux en amont de la plage de dépôts, augmentant ainsi le temps et les dépenses pour le curage de la plage (Chahrou, 2021). Pour rappel, ces six dents ont été mises en place à titre expérimental. En effet, leur implantation a été une première sur les plages de dépôts RTM. Elles ont toutefois permis d'améliorer la connaissance du fonctionnement d'une plage de dépôts (Etude de Bassin Versant, ONF/RTM73, 2013).

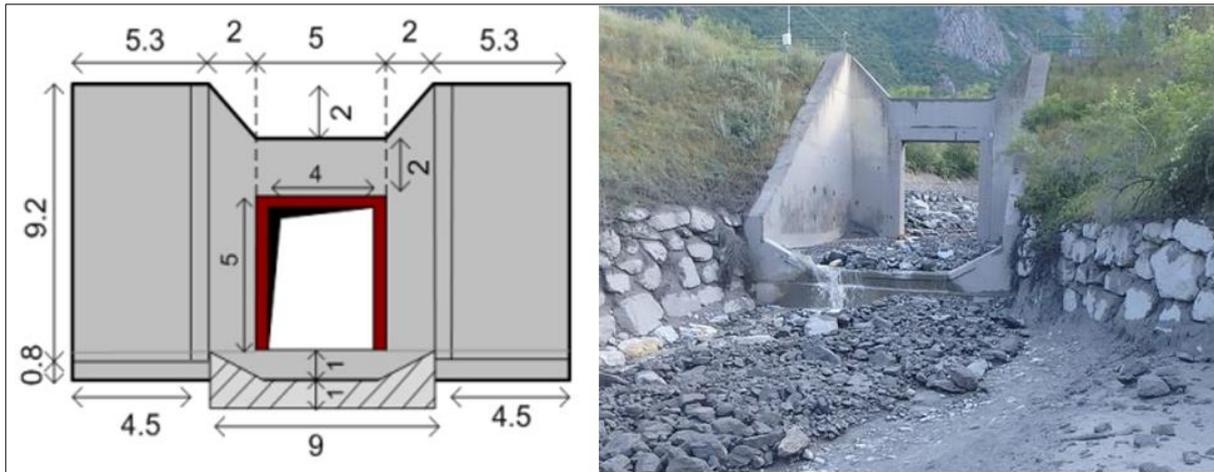


Figure 10 : A gauche : Dimensions du barrage de fermeture de la plage de dépôts du Claret après les travaux de 2018 (Source : Chahrour (2021)). A droite : Photo du barrage de fermeture au 02 juillet 2019 (Source : INRAE).

2.2. Approche méthodologique

En modélisation numérique, trois grandes étapes sont nécessaires afin d'aboutir à la validation d'un modèle. La première étape consiste en la construction même d'un modèle au sein d'un logiciel de modélisation reflétant la zone d'étude en question. Il est question ici de reproduire la zone d'étude dans son état initial avant l'évènement en prenant en compte les conditions aux limites du modèle, l'implantation des ouvrages et des entités spécifiques ainsi que la création d'un maillage adapté. La deuxième étape représente le calage du modèle en caractérisant un jeu de paramètres de calage et en adaptant le modèle sur la base des données disponibles (évènement observé). Une étude de sensibilité sur les paramètres de calage est aussi possible. La troisième étape est la validation du modèle, souvent réalisée par la reproduction d'un autre évènement observé dans un même contexte géographique et géologique.

La lave torrentielle du 14 juin 2017 a fait l'objet de plusieurs observations et représente un cas rare avec autant de données disponibles. Ainsi, cet évènement va servir pour la phase de calage du modèle, permettant dans un premier temps d'affiner et de réduire le jeu de paramètres de calage retenu. Il s'agira ici d'analyser plus particulièrement la durée de traversée des laves simulées, l'effet de l'auto-curage avec les niveaux maximaux atteints par les laves torrentielles simulées, ainsi que les niveaux des dépôts finaux en fonction des différents paramètres rhéologiques, des coefficients de rugosité de Manning et des débits (associés indirectement au volume de la lave) sélectionnés.

La lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019 qui est moins documentée mais pour laquelle il existe suffisamment d'éléments comparatifs pour être étudiée, permet de tendre vers une démarche de validation du modèle qui serait précédemment calibré par l'évènement de 2017. Cette démarche permet de vérifier ou non la capacité du modèle à reproduire un autre évènement basé sur des paramètres similaires entre les deux laves torrentielles. En effet, l'objectif pour la lave de 2019 est de retenir les paramètres rhéologiques et/ou des coefficients

de rugosité de Manning les plus représentatifs de la lave torrentielle du 14 juin 2017, en émettant l'hypothèse qu'ils peuvent être transposables à la lave du 1^{er} juillet 2019 puisqu'il s'agit du même torrent, de la même géologie et donc provoquant vraisemblablement les mêmes types de laves torrentielles en terme de paramètres rhéologiques (viscosité, concentration volumétrique). Pour cette lave, il s'agira d'analyser les niveaux maximaux atteints par la lave ainsi que les niveaux et la répartition spatiale des dépôts résiduels.

CHAPITRE 3 : PHASE DE CALAGE DU MODELE HEC-RAS 2D : LAVE TORRENTIELLE DU 14 JUIN 2017

3.1. Matériels et méthodes

3.1.1. Caractéristiques de la lave torrentielle du 14 juin 2017

3.1.1.1. Conditions climatiques

Le pluviomètre du torrent du Claret a enregistré le 14 juin 2017 un cumul de 14 mm en 15 minutes. Il reste toutefois à supposer que l'intensité et le cumul des précipitations ont peut-être été plus importants dans les zones de déclenchement du fait de l'altitude plus élevée (Piton *et al.*, 2018). L'intensité maximale enregistrée fut de 39 mm/h en 5 minutes avec un cumul de 9 mm (Cf. Figure 11).

Les torrents situés à proximité, côté ouest, n'ont pas connu d'activité notable et un pluviomètre situé à 3,5 km au nord dans la vallée, n'a mesuré que 6 mm de pluie cumulée. Ces informations laissent donc penser que la cellule orageuse était assez localisée.

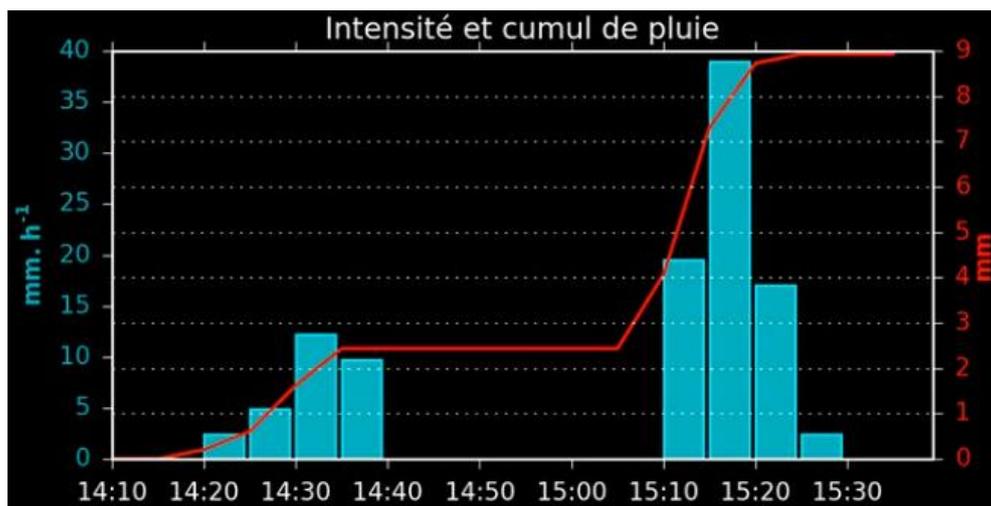


Figure 11 : Intensité et cumul de pluie du 14 juin 2017. Source : INRAE.

La lave torrentielle est partie de la branche de la Combe. Le volume total de la lave torrentielle du 14 juin 2017 a été estimé aux alentours de 15 000 m³ dont 10 000 m³ de matériaux déposés dans la plage de dépôts (données estimées après curage de la plage de dépôts en 2018). Le reste des matériaux (5 000 m³) a continué son chemin vers l'aval par auto-curage de la plage de dépôts au travers de la fente centrale. Ces derniers n'ont laissé que quelques traces et presque aucun dépôt en aval transitant jusqu'à la confluence avec l'Arc (Rapport d'évènement, RTM/ONF Savoie, 2019).

3.1.1.2. Dynamique de remplissage

Le temps de traversée de la lave torrentielle dans la plage de dépôts est un paramètre de validation pour le calage du modèle HEC-RAS sur son aptitude à reproduire l'évènement de lave torrentielle. Ce temps de traversée a été déterminé par analyse de photos acquises par la caméra située sur le barrage filtrant en aval de la plage de dépôts, prises vers l'amont (photos retenues pour déterminer la durée de traversée de la lave torrentielle, Annexe 1). Ces photos ont également servi pour la création de la vidéo de l'évènement. Une première photo a été sélectionnée montrant le passage de la lave torrentielle au niveau de la 1^{ère} dent freineuse à 3:21:01. N'ayant pas en visuel le barrage filtrant dans le champ de vision de la caméra, une estimation de l'atteinte de la lave sur ce dernier a dû être faite à partir d'une photo montrant le dépassement de la lave du champ de vision de l'appareil à 3:21:48, et une photo montrant le 1^{er} indice de recirculation de l'écoulement dans la plage de dépôts, à 3:22:10. L'atteinte du barrage se situant entre ces deux périodes, elle fut estimée à 3:21:55. Ainsi, la lave torrentielle a traversé la plage de dépôts, à partir de la 1^{ère} dent freineuse en amont jusqu'au barrage filtrant en 54 secondes avec une incertitude de plus ou moins 5 secondes. L'évènement total (passage de la bouffée de la lave torrentielle) a duré environ 5 minutes (temps enregistré par la caméra et durée de signal intense sur le géophone).

La dynamique de remplissage de la plage de dépôts en interaction avec le barrage de retenue ouvert a fait l'objet d'une première analyse qualitative par Piton, *et al.* (2018). La Figure 12 et le Tableau 4 décomposent en plusieurs étapes la traversée de la lave et du remplissage de la plage de dépôts avec des photos de l'évènement prises par la caméra, leur temps et durée ainsi qu'un croquis synthétique de chaque étape décomposée. La Figure 13 permet quant à elle, une visualisation plus synthétique du phénomène par 3 grandes phases. La première (1) consiste en l'avancée et le dépôts probablement homogène de la lave torrentielle sur la quasi-totalité de la largeur de la plage de dépôts avec quelques blocs du front de lave déposés au niveau des dents freineuses. La fente inférieure du barrage est obstruée dès l'arrivée de la lave. La seconde phase (2) représente le remplissage et l'auto-curage de la lave par la fente centrale avec un effet de recirculation (ou de remous) de l'écoulement après avoir atteint le barrage filtrant. La lave torrentielle est montée jusqu'à 1,1 m au-dessous du niveau de la fente centrale, soit une profondeur maximale de 5,1 m. Enfin, la troisième phase (3) reflète la situation post-crue, une fois l'auto-curage terminé. La profondeur totale des dépôts finaux est de 4m au droit de la base de la fente centrale du barrage filtrant (à 694 masl²).

² masl : abréviation anglaise de l'unité altitudinale « mètre au-dessus du niveau de la mer ».

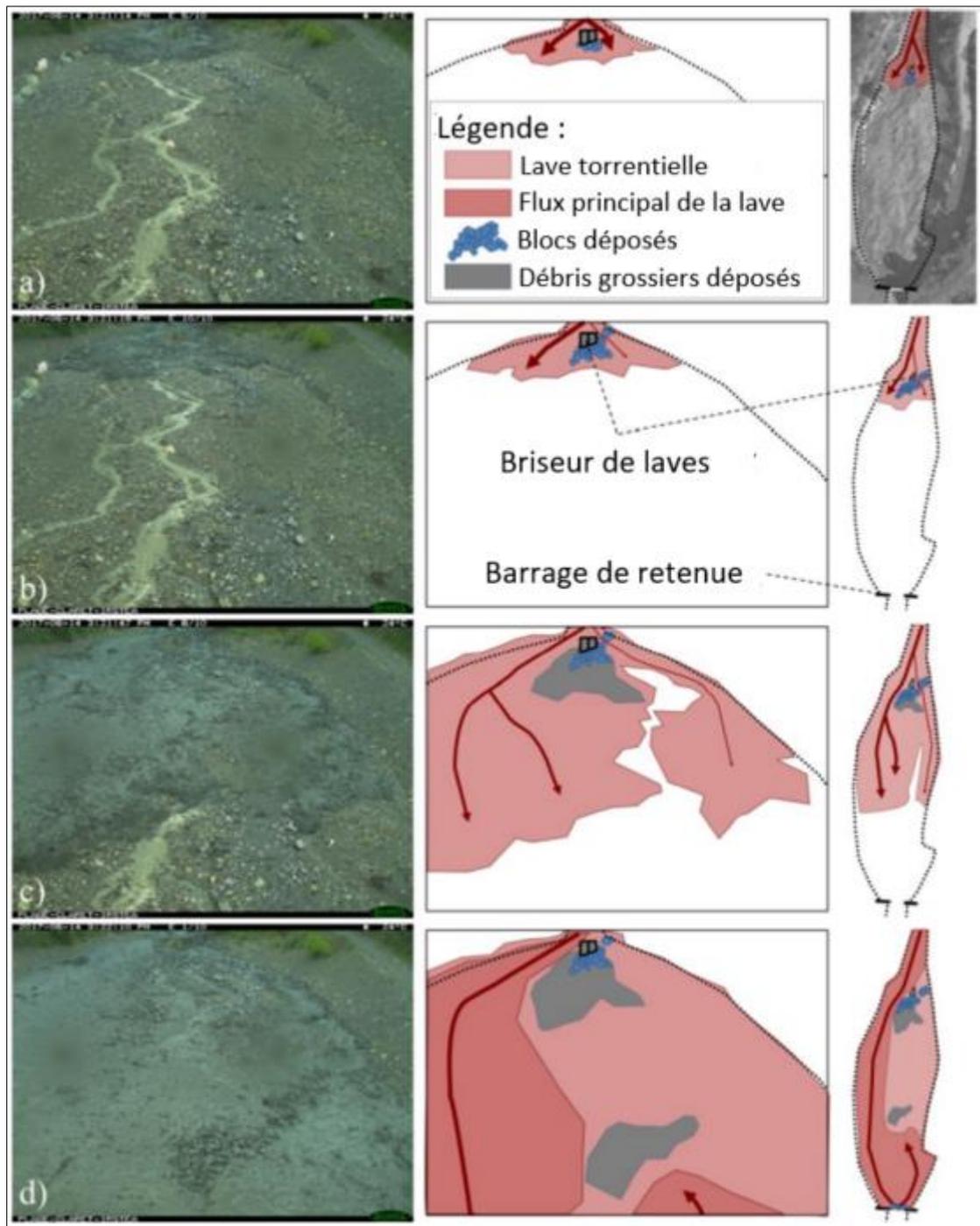


Figure 12 : Photos de caméra et croquis de synthèse clés des dépôts de la lave torrentielle : (a) $T=20$ s après que les coulées de débris aient atteint l'entrée, quelques blocs rocheux se sont arrêtés derrière les dents freineuses ; (b) $T=25$ s, tout le front granulaire de la coulée de débris a été déposé ; (c) $T=53$ s, la plupart du flux passait en rive droite du dépôt, s'étendant rapidement sur toute la largeur du bassin ; (d) $T=76$ s, la plupart du flux passe toujours en rive droite, en aval un flux de recirculation s'est déposé et est apparu sur la caméra car les flux ont atteint le barrage filtrant, bouchant la fente inférieure et remplissant la partie aval du bassin. Cette recirculation a remblayé le bassin jusqu'à ce que l'épaisseur du dépôt atteigne la fente supérieure. Source : Piton et al. (2018), Traduction française : Leborgne (2022).

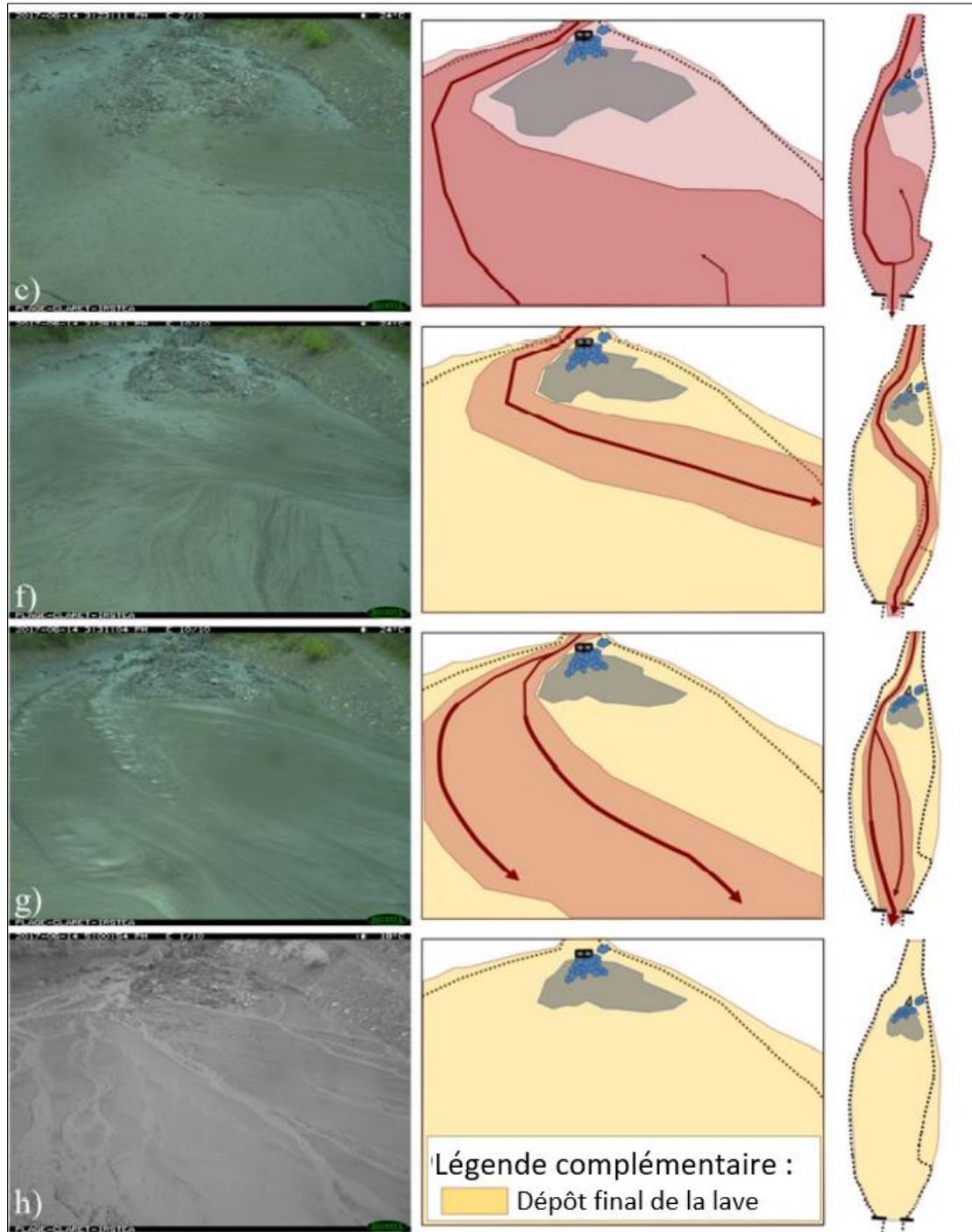


Figure 12 (suite) : (e) $T=137$ s, le flux de recirculation a ralenti probablement parce que la majeure partie du flux est alors passé par la fente supérieure ; (f) $T=297$ s, le remplissage du bassin est alors maximum, la majeure partie du flux est concentré sur le dépôt à l'intérieur d'une veine fluide évidente ; (g) $T=610$ s, l'auto-curage est en cours, deux chemins d'écoulement évidents drainent le flux restant venant de l'amont mais globalement le niveau de remplissage diminue. La baisse de l'activité de transport à l'entrée a fait passer l'activité du géophone (géophone situé en amont de la plage de dépôts) sous le seuil d'acquisition des images : arrêt de la caméra ; (h) $T=6000$ s, quelques images sont prises d'un dépôt drainé et inactif depuis un moment. Source : Piton et al. (2018), Traduction française : Leborgne (2022).

Tableau 4 : Principales étapes et durées dans le piégeage de la lave torrentielle observée dans la Figure 13. Sources : Piton et al. (2018), traduction française : Leborgne (2022).

| Heure | Durée | Observations | Figure 12 |
|---------|---------|--|-----------|
| 3:20:54 | 0:00:00 | Le front de la lave a atteint l'entrée du bassin, la propagation du front de blocs rocheux a commencé. | a |
| 3:21:14 | 0:00:20 | Les premiers blocs sont arrêtés derrière le briseur de lave. | b |
| 3:21:19 | 0:00:25 | Les blocs du front de la lave sont entièrement déposés, le corps de la lave a commencé à se déposer au centre du bassin derrière le dépôt du front de lave. | |
| 3:22:03 | 0:01:09 | L'écoulement a probablement atteint le barrage filtrant, obstruant la fente inférieure avec des blocs, le dépôt du corps de lave a atteint son extension maximale. | |
| 3:22:10 | 0:01:16 | L'effet de refoulement du barrage est visible, un écoulement de recirculation ou de remous remplit progressivement le bassin. | d |
| 3:23:11 | 0:02:17 | La recirculation s'est ralentie, la fente supérieure a probablement été activée ; la majeure partie du flux est progressivement passée par la fente supérieure. | e |
| 3:26:51 | 0:05:57 | Niveau maximum atteint par la lave dans le bassin. Début de l'auto-curage. | f |
| 3:31:04 | 0:10:10 | Auto-curage en cours, arrêt de la caméra (activité sismique insuffisante au géophone). | g |
| 5:00:54 | 1:40:00 | Première photo suivante, dépôt complètement inactif pendant quelques temps. | h |

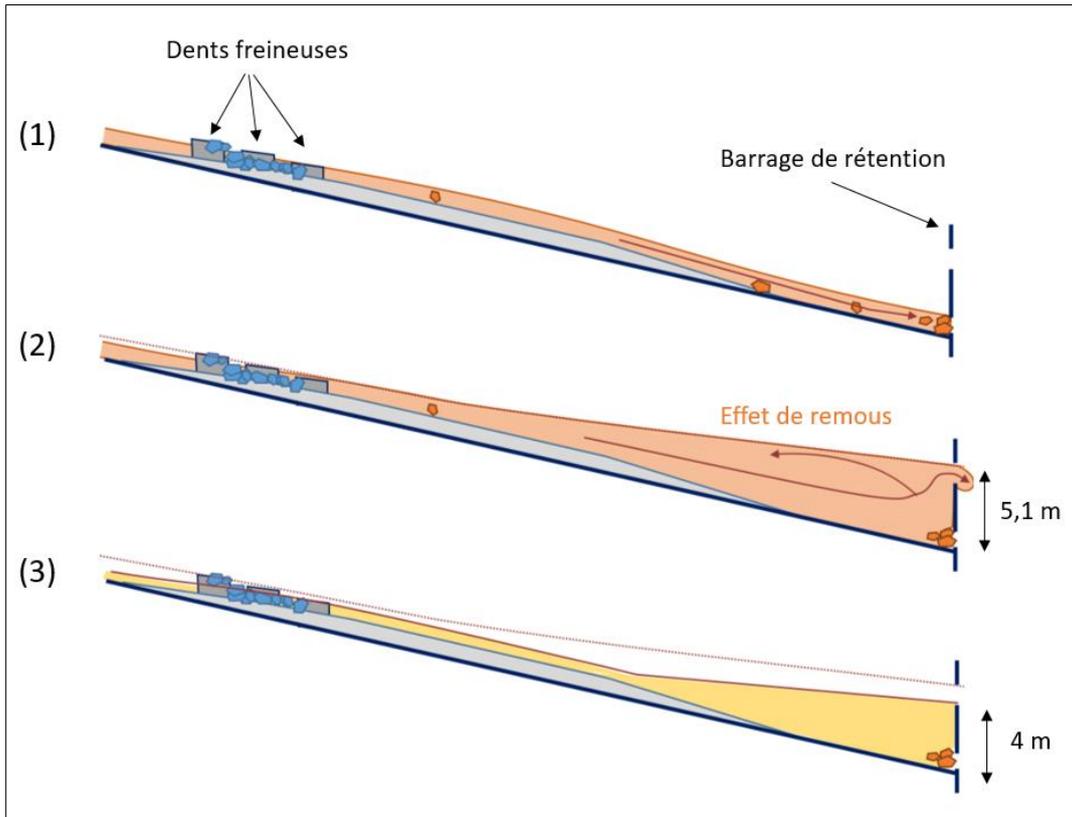


Figure 13 : Synthèse de l'évènement en 3 situations : (1) Dépôts homogènes dans la plage de dépôts et obstruction de la fente inférieure du barrage ; (2) remplissage et auto-curage par la fente centrale avec une profondeur maximale atteinte par la lave de 5,1m ; (3) situation après crue avec une profondeur des dépôts de 4m (par rapport à la base de la fente centrale). Sources : Piton et al. (2018), Modifications et traduction française : Leborgne (2022).

3.1.2. Données d'entrée pour la lave torrentielle du 14 juin 2017

3.1.2.1. Données topographiques

3.1.2.1.1. Etat antécédent

Dans le but de reproduire par modélisation numérique l'étalement et le dépôt de la lave torrentielle du 14 juin 2017 observés dans la plage de dépôts du torrent du Claret, il est nécessaire d'intégrer dans le logiciel HEC-RAS 2D une topographie 3D de l'emprise du terrain à étudier. Dans un premier temps, il a été question d'utiliser un MNT issu de relevés topographiques datant de 2001. Il a été supposé que l'état initial, avant le passage de la lave torrentielle du 14 juin 2017, pouvait être vraisemblablement représenté par ce dernier. Cependant, après une analyse des photos de l'INRAE avant le passage de la lave torrentielle de 2017, il a été constaté que la topographie initiale (MNT 2001) sous-estimait les dépôts déjà présents : les dents freineuses n'étaient pas assez enterrées sur le levé topographique. En effet, plusieurs évènements de charriage et de laves torrentielles se sont produits avant le passage de la lave du 14 juin 2017, rehaussant de ce fait le niveau des dépôts, ce qui n'est pas pris en compte sur le MNT de 2001.

Ainsi, une correction de la topographie a dû être effectuée en estimant les altitudes des dépôts avant le passage de la lave. Pour ce faire, les altitudes de dépôts sont déterminées à partir des altitudes maximales des dents freineuses en soustrayant la hauteur encore émergée de ces dernières. Sur les photos réalisées par le déclenchement de la caméra située sur le barrage filtrant en aval de la plage de dépôts, juste avant le passage de la lave, il est clairement visible que la 3^{ème} rangée de dents freineuses (la plus en aval) et la dent (côté rive gauche) de la 2^{ème} rangée étaient déjà entièrement ensevelies par des dépôts provenant d'épisodes précédents. Ainsi, les altitudes des dépôts avant le passage de la lave sont déterminées simplement au droit du 1^{er} rang de dents ainsi qu'au droit de la dent côté rive droite du 2^{ème} rang. Des données topographiques permettent de valider avec précision l'altitude maximale de la dent la plus en amont (702,00 masl). Pour les altitudes du 2^{ème} et 3^{ème} rang, il a été nécessaire de retrouver les plans des travaux de 1991 des dents freineuses dans les archives RTM/ONF Savoie. Les altitudes maximales des dents n'y sont pas figurées mais le pourcentage de pente du terrain lors des travaux a été spécifié et localisé au niveau des dents. Les altitudes maximales du 2^{ème} et 3^{ème} rang sont alors calculées avec une légère incertitude (± 10 cm) et correspondent respectivement à 699,50 masl et 697,00 masl.

La Figure 14, ci-dessous, représente le profil en long synthétique modifié de la plage de dépôts avec les nouvelles altitudes des dépôts déterminées (du barrage filtrant en aval (distance horizontale = 0m) jusqu'au 1^{er} barrage en amont de la plage de dépôts (distance horizontale = 120m)). Il est constaté qu'il n'y a pas de rupture de pente (confirmable également par les photos INRAE) et que le profil peut être simplifié à partir de 2 pentes principales : une pente représentative des dépôts amont (du 1^{er} barrage en amont de la plage de dépôts jusqu'au 2^{ème} rang de dents (distance horizontale = 86,5m)) d'environ **9,5%** et une pente représentative des dépôts aval (partant du 2^{ème} rang de dents au barrage filtrant) d'environ **10%**.

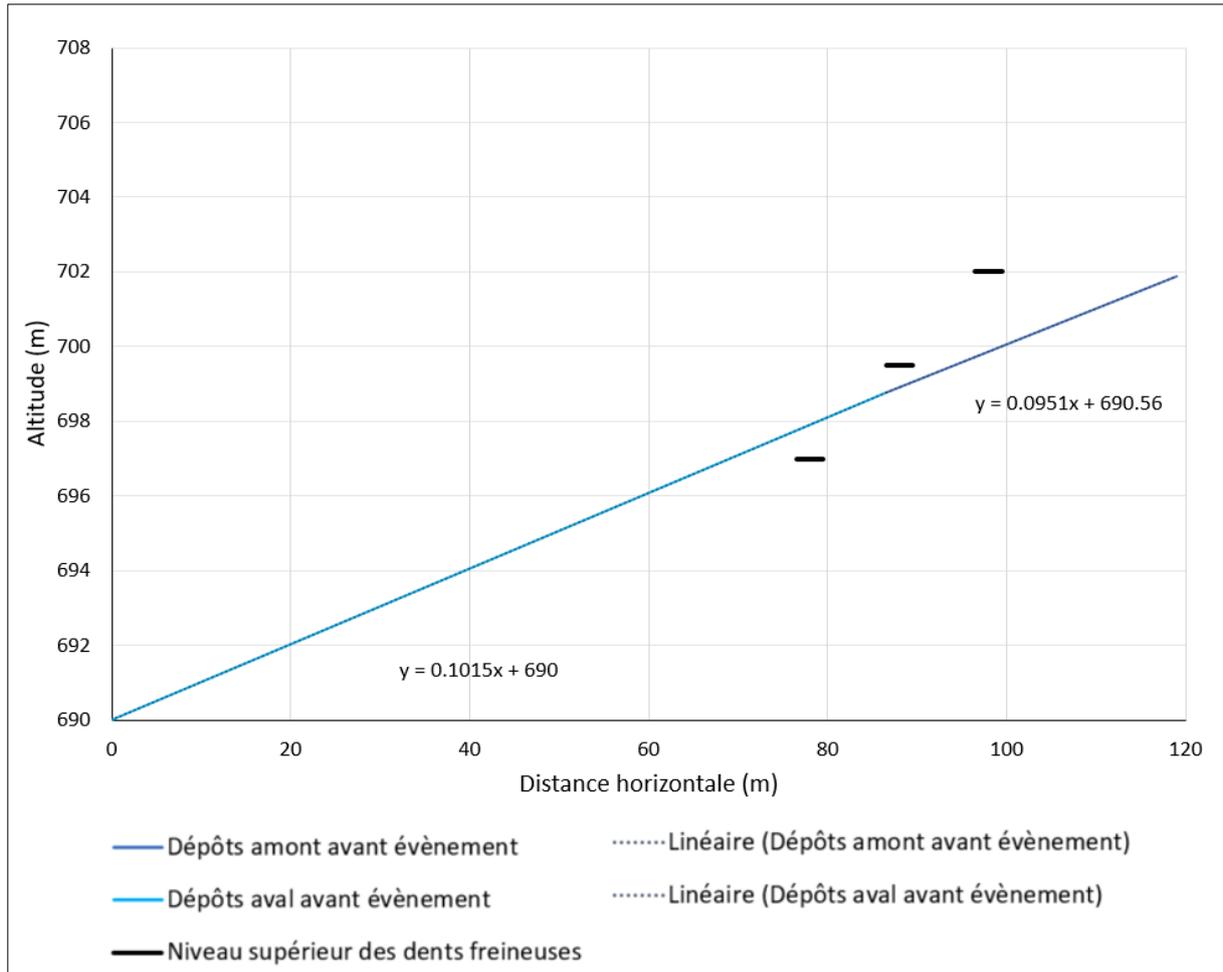


Figure 14 : Nouveau profil en long synthétique avant la lave torrentielle de 2017. Réalisation : Leborgne (2022).

Ces deux pentes ainsi déterminées sont extrapolées à partir d'outils SIG (logiciel QGIS) sur toute la largeur de la plage afin de recréer une topographie 3D plus représentative de l'état initial avant le passage de la lave torrentielle, et qui sera utilisée comme donnée d'entrée dans le logiciel HEC-RAS. Les niveaux topographiques des berges et digues de la plage de dépôts n'ayant pas été affectés par le passage de la lave, ces derniers ont été conservés à partir du MNT de 2001 et ont été intégrés au nouveau MNT par fusion des deux, réalisée à partir du logiciel GlobalMapper.

La Figure 15 permet de visualiser plus facilement, la sous-estimation des niveaux des dépôts par le MNT 2001 comparé aux niveaux de dépôts déterminés.

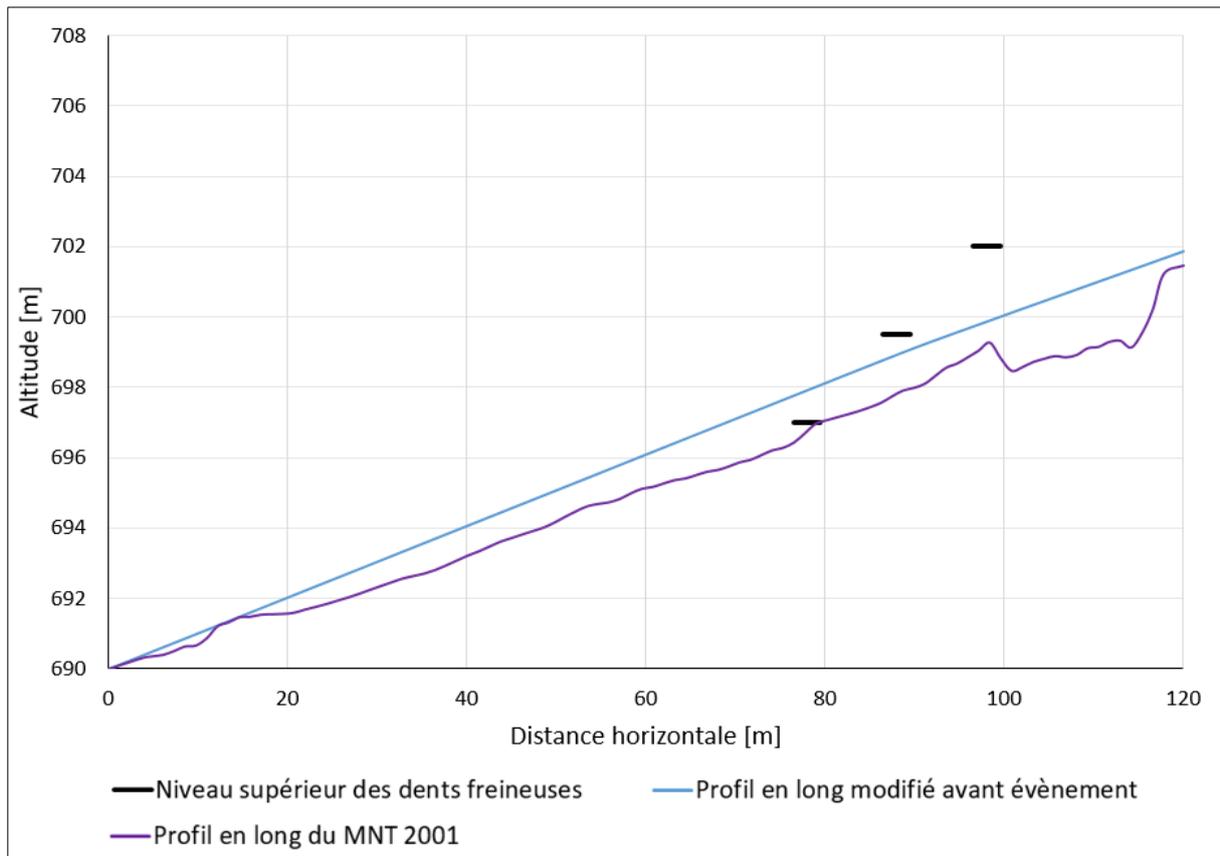


Figure 15 : Sous-estimation des dépôts du MNT 2001 par rapport aux nouveaux niveaux de dépôts déterminés. Réalisation : Leborgne (2022).

3.1.2.1.2. Etat post crue

Le MNT à disposition reflétant les niveaux de dépôts après l'évènement date de septembre 2018 à partir de relevés topographiques, juste avant le curage de la plage (extraction des matériaux au sein de la plage de dépôts afin de lui redonner sa pleine efficacité). La même hypothèse a été initialement faite comme quoi ce MNT serait représentatif du niveau des dépôts juste après le passage de la lave. Cependant, après analyse des photos de l'INRAE et de la caméra implantée sur le barrage filtrant, il a été constaté que le MNT de septembre 2018 avant curage surestimait les niveaux de dépôts. En effet, plusieurs évènements de charriage et de laves torrentielles se sont produits après le passage de la lave torrentielle le 14 juin 2017 et avant le curage de septembre 2018.

La même méthodologie de détermination des altitudes des dépôts que pour les données topographiques initiales a été adoptée. Grâce aux photos de l'INRAE prise le lendemain de la lave torrentielle et les photos de la vidéo de l'évènement, le niveau des dépôts post-crue a été déterminé. Ainsi, un nouveau profil en long synthétique a pu être défini (Cf. Figure 16).

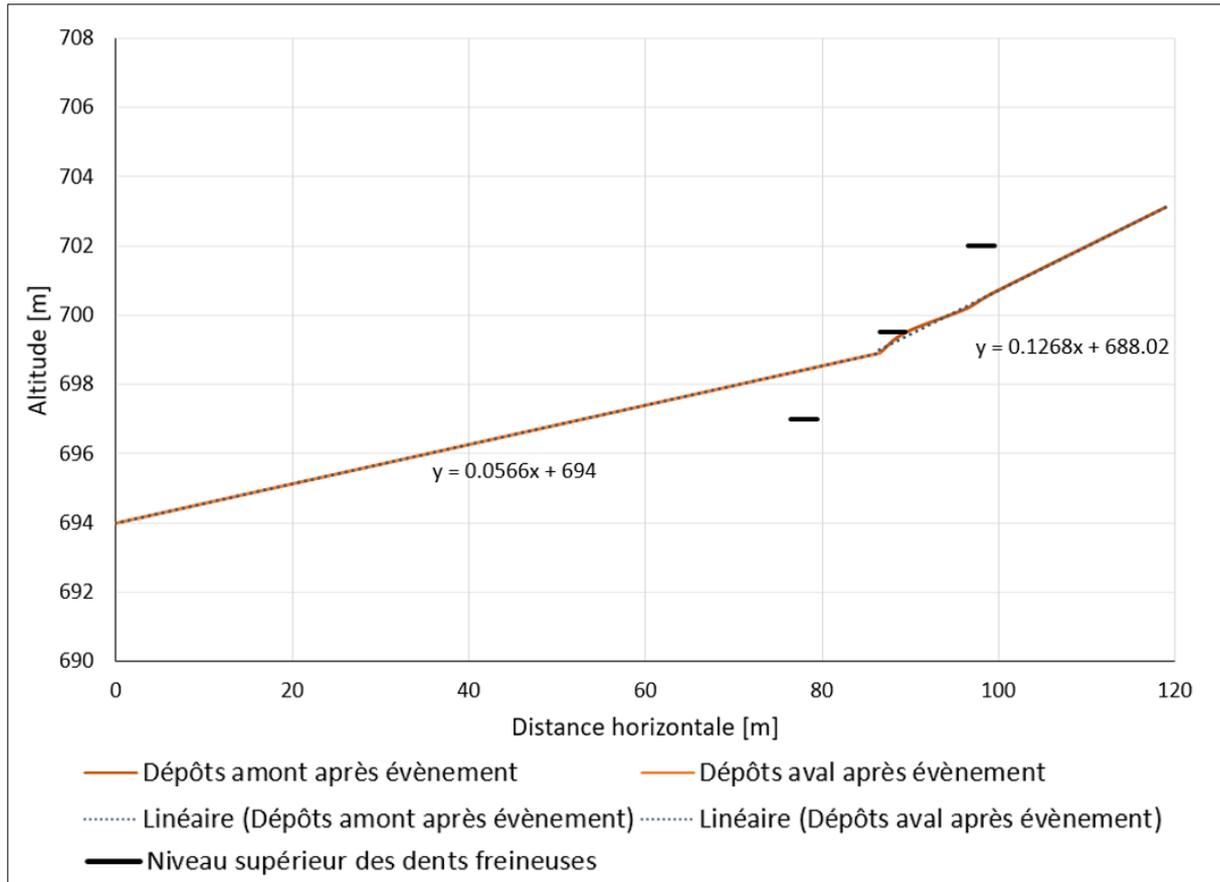


Figure 16 : Nouveau profil en long synthétique post événement. Réalisation : Leborgne (2022).

Il est constaté une rupture de pente entre les dépôts amont et les dépôts aval. Comme précédemment, le profil peut être simplifié à partir de deux pentes principales : une pente représentative des dépôts amont d'environ **12,7%** et une pente représentative des dépôts aval d'environ **5,7%**. Les données disponibles dans la zone amont sont peu nombreuses et le niveau de remplissage ainsi que la pente de dépôt doivent être considérés comme incertains.

La Figure 17 permet de visualiser plus facilement, la surestimation des niveaux des dépôts par le MNT de 2018 avant curage comparé aux nouveaux niveaux de dépôts déterminés. Il peut être constaté que la courbe de tendance reflétant les dépôts aval entre les deux profils en long sont plus ou moins similaires (aux alentours de 5,7%) jusqu'au 2^{ème} rang de dents. Cela s'explique notamment par l'auto-curage des matériaux au-travers de la fente centrale du barrage filtrant. La surestimation des dépôts est principalement observée en amont du bassin de rétention. Elle correspond aux dépôts associés aux événements ayant eu lieu postérieurement à l'évènement étudié.

Enfin, la Figure 18, regroupe les profils en long modifiés des nouveaux MNT à intégrer dans le logiciel HEC-RAS 2D, avant et après le passage de la lave torrentielle du 14 juin 2017.

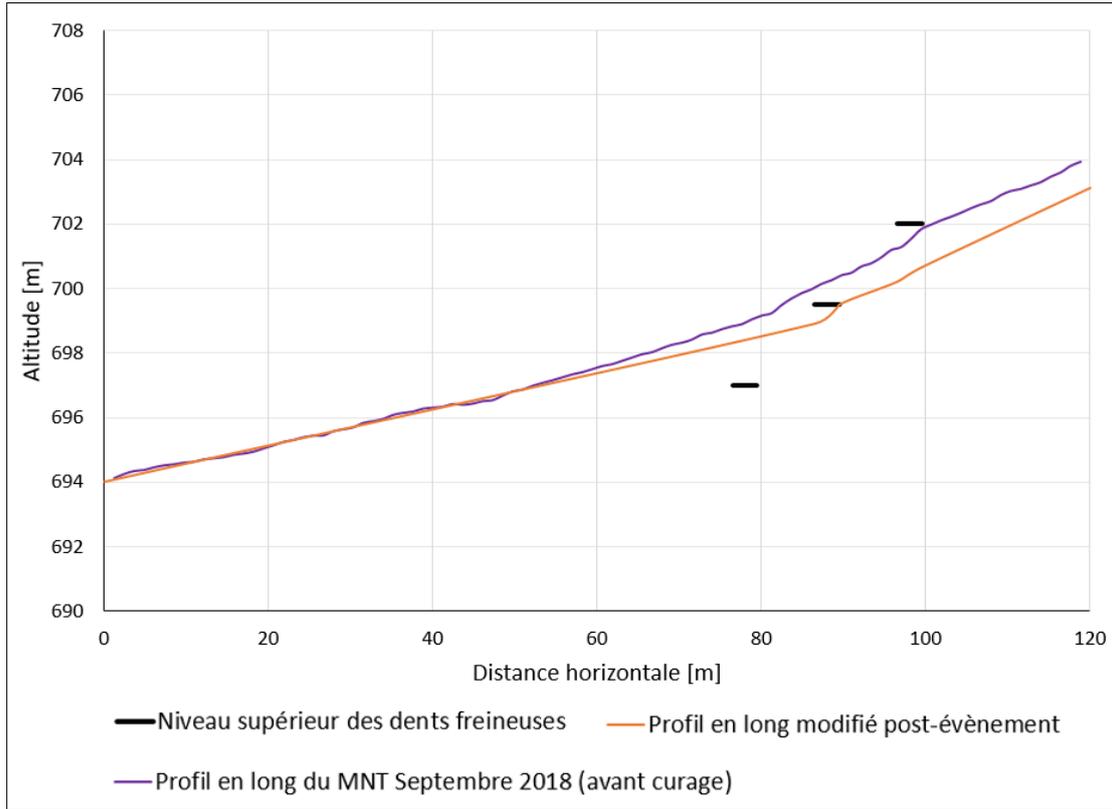


Figure 17 : Comparaison du profil en long du MNT de septembre 2018 avec le profil en long modifié.
Source : Leborgne (2022).

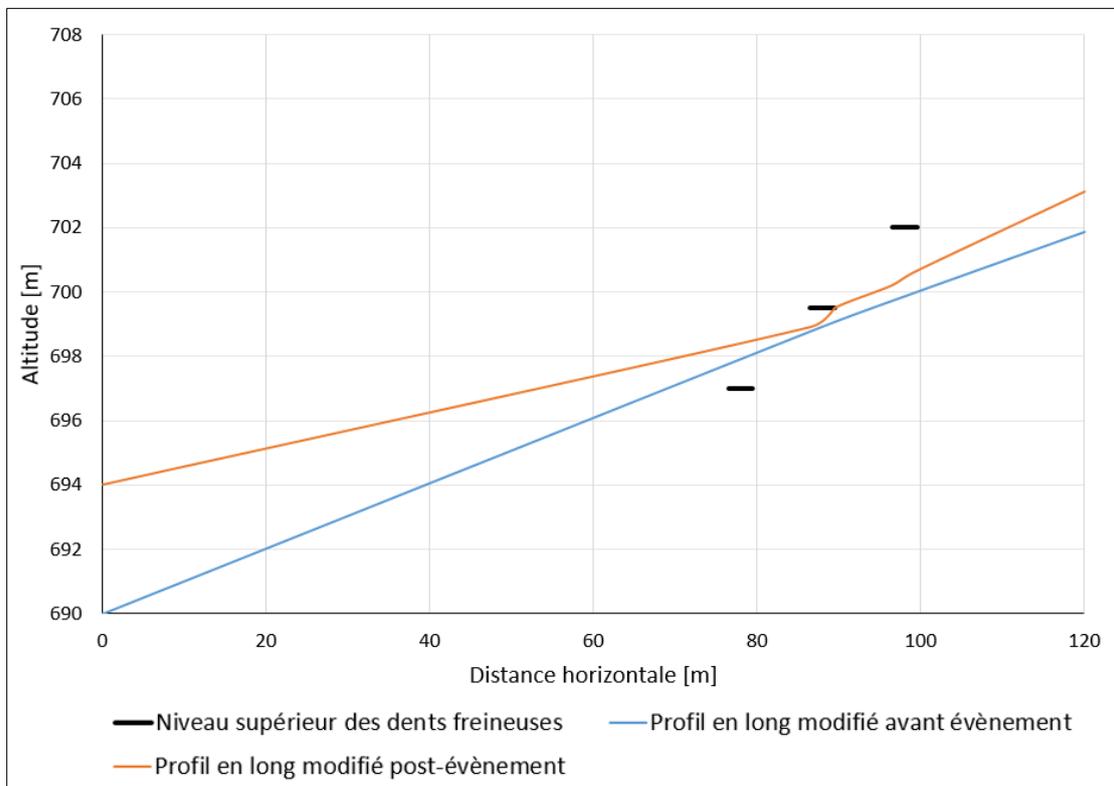


Figure 18 : Comparaison des profils en long modifiés avant et après évènement. Source : Leborgne (2022).

3.1.2.1.3. Conclusion sur l'analyse des données topographiques

La compréhension du phénomène en question et l'analyse des données d'entrée à disposition sont une première étape primordiale avant la modélisation numérique à proprement parler via le logiciel HEC-RAS. Ils représentent un point clef dans la critique de données d'entrée et des directions dans lesquelles les simulations vont être orientées. Cette étude préliminaire a donc permis de modifier et de tendre vers une meilleure représentation des conditions topographiques initiales et finales de la lave torrentielle du 14 juin 2017. C'est sur ces nouveaux MNT modifiés que la modélisation sera réalisée et les résultats comparés et critiqués.

Il est important de rappeler que les altitudes des dépôts initiaux et finaux ainsi que le jeu de calage sont déterminés partiellement par photo-interprétation et à dire d'expert. Ainsi, des incertitudes persistent et il est essentiel d'avoir un certain recul et un avis critique lors de l'analyse des résultats.

3.1.2.1.4. Coefficient de rugosité de Manning

Le coefficient de rugosité de Manning représente la résistance que le terrain oppose au passage de l'écoulement. Il reflète le rôle des forces de frottement externes dues à la rugosité du sol. Même lorsque la loi d'Herschel Bulkley est utilisée, le logiciel HEC-RAS intègre une composante de frottement associée à l'équation de Manning Strickler (les tests menés avec un coefficient très faible minimisant ce frottement montraient des incohérences, il a donc été décidé d'intégrer ce coefficient à l'étude paramétrique). HEC-RAS propose par défaut un coefficient de Manning de 0,06. Pour un modèle en 2D il est possible d'intégrer une couche CorineLandCover afin de préciser les différents coefficients de Manning selon les différentes occupations des sols des zones couvertes par l'emprise du modèle HEC-RAS. Dans ce travail, une couche de polygones a été créée à partir du logiciel QGIS permettant de différencier quatre zones distinctes (Cf. Figure 19) :

- Le fond du lit du torrent/de la plage de dépôt : trois valeurs sont explorées afin de représenter la rugosité du lit avant le passage de la lave torrentielle de juin 2017 : **0,04** ; **0,05** et **0,08** (Cf. Tableau 5).
- Les zones ayant une présence d'arbres avec un coefficient de Manning de 0,18.
- La piste d'accès à la plage de dépôts et les routes avec un coefficient de Manning de 0,025.
- Les terrains agricoles avec un coefficient de Manning de 0,04.

Dans le modèle HEC-RAS 2D construit, cette couche de Manning est d'une résolution de 0,5 m sur 0,5 m.

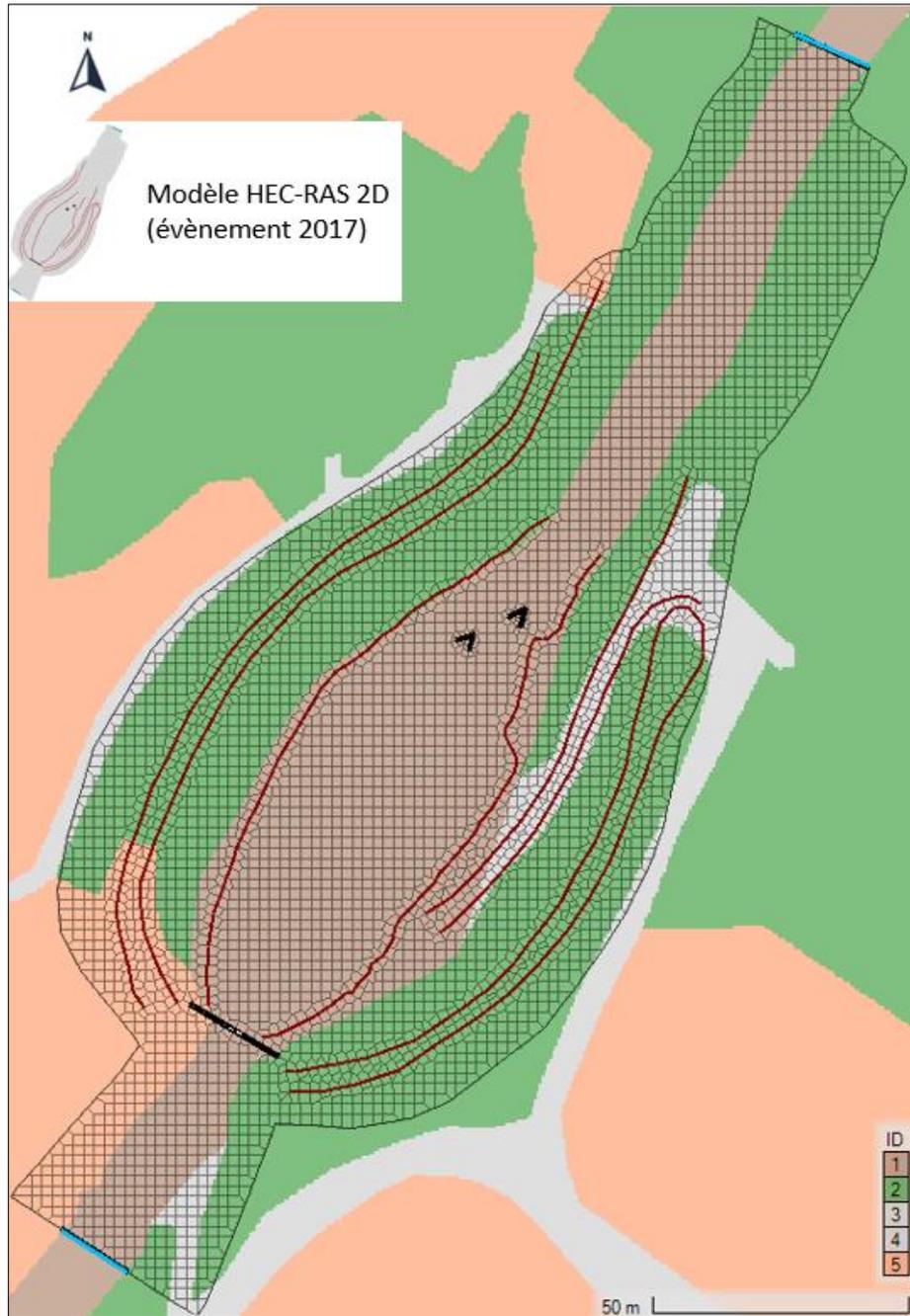


Figure 19 : Couche CorineLandCover importée dans HEC-RAS. ID : 1 : lit du torrent (Manning = 0,04 / 0,05 / 0,08) ; 2 : présence d'arbres (Manning = 0,18) ; 3 et 4 : piste et route (Manning = 0,025) ; 5 : terrains agricoles (Manning = 0,04). Réalisation : Leborgne (2022).

Tableau 5 : Coefficients de Manning retenus pour les simulations reflétant la rugosité du lit du torrent et du fond de la plage de dépôts. M1 à M3 : coefficient de Manning 1 à 3. Source : Leborgne (2022).

| | Coefficient de Manning retenus pour le lit du torrent |
|-----------|--|
| M1 | 0,04 |
| M2 | 0,05 |
| M3 | 0,08 |

3.1.2.2. Données hydrologiques

Des données hydrologiques doivent être intégrées dans le logiciel HEC-RAS afin de renseigner les conditions aux limites du modèle. C'est par un hydrogramme que le débit, entrant en amont de la plage de dépôts, est indiqué. N'ayant pas directement l'hydrogramme de crue du 14 juin 2017 spécifique à la lave torrentielle, le débit de pointe a donc dû être déduit indirectement. Il peut être associé au volume total estimé de la lave torrentielle en considérant une hypothèse d'hydrogramme triangulaire à partir de l'équation suivante :

$$Q_p = V \cdot 2/T \quad (1)$$

Où :

Q_p : débit de point [m^3/s]

V : volume totale de la lave torrentielle [m^3]

T : Durée de l'évènement [s] (ici = 5 min, soit 300 s)

Le volume total de la lave torrentielle a été estimé par modélisation 0D (modèle réservoir de Piton, Goodwin, *et al.*, 2022) à partir des niveaux maximums atteints par la lave torrentielle au droit du barrage de fermeture (695,1 masl) connus grâce aux laisses de crues. Il a été fait l'hypothèse que le pertuis du bas du barrage filtrant était bouché dès l'arrivée de la lave torrentielle. Ce volume est estimé à environ 11 000 m^3 , donnant donc un débit de pointe de 73 m^3/s .

Le géophone a enregistré un signal à partir des vibrations et ondes sismiques, provoqué par le passage de la lave torrentielle sur le fond du lit et l'entrechoquement des blocs et cailloux entre eux. Ce signal sature immédiatement puis redescend progressivement (Cf. Figure 20). Il a été supposé un hydrogramme triangulaire avec un temps de montée au débit de pointe fixé arbitrairement à 5 secondes pour une durée d'évènement de 5 minutes (exemple d'hydrogramme pour un débit de pointe (Q_p) de 73 m^3/s , Figure 21).

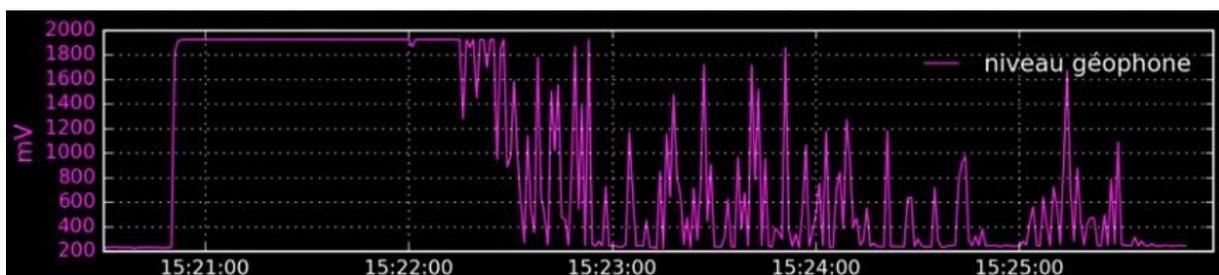


Figure 20 : Signal géophone enregistré lors du passage de la lave du 14 juin 2017. Source : Données RTM et INRAE (2017).

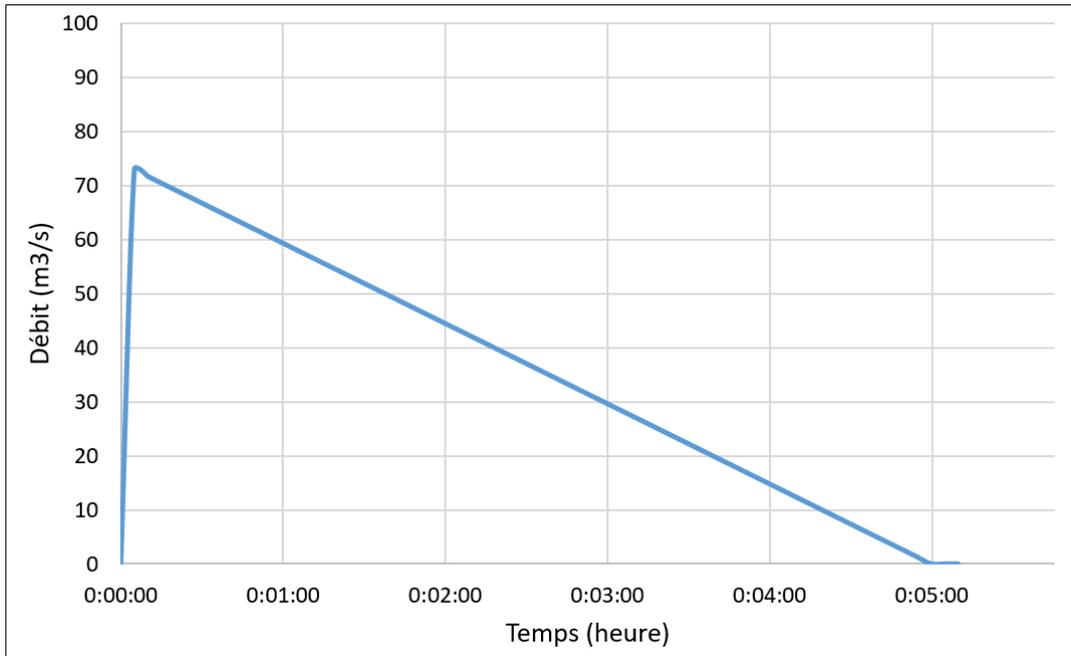


Figure 21 : Hydrogramme triangulaire pour un débit de pointe (Q_p) de $73 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un volume de $11\,000 \text{ m}^3$.

Le débit de pointe de la lave torrentielle intégré dans un hydrogramme est un paramètre de calage du modèle. Ainsi, il a été choisi de sélectionner trois valeurs différentes associées au volume de l'évènement ($9\,000 \text{ m}^3$, $11\,000 \text{ m}^3$ et $13\,000 \text{ m}^3$) via l'équation (1) afin d'analyser leur influence sur les niveaux de dépôts maximums et finaux (Cf. Tableau 6). De ce fait, trois hydrogrammes sont finalement retenus correspondant à ces trois volumes.

Tableau 6 : Paramètres des volumes et débits de pointe (Q_p) retenus pour les simulations HEC-RAS (lave torrentielle 2017) . V1 à V3 : volume 1 à 3. Source : Leborgne (2022)

| | Volume [m^3] | Q_p [m^3/s] |
|-----------|----------------------------|------------------------------------|
| V1 | 9 000 | 60 |
| V2 | 11 000 | 73 |
| V3 | 13 000 | 87 |

3.1.2.3. Données rhéologiques

Plusieurs choix de méthodes non-newtoniennes faisant référence à différentes lois de comportement peuvent être retenus dans HEC-RAS depuis la version 6.0. Ici c'est la méthode de **Herschel-Bulkley** qui a été choisie, spécifique à un comportement viscoplastique, représentatif d'un écoulement d'une lave torrentielle boueuse (Recking *et al.*, 2013). Dans ce travail, la concentration volumique (C_v) est fixée à **60%**, déduite de la masse volumique de la lave torrentielle (ρ_{lave}) estimée à partir de la vidéo de l'évènement et dire d'expert. La concentration volumique ne varie pas selon les différentes simulations. La masse volumique de la lave torrentielle a estimée à **$2\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$** mais n'est pas à renseigner directement dans

le logiciel HEC-RAS puisqu'elle est calculée indirectement à partir de la concentration volumique (C_v) de la lave torrentielle par l'équation suivante :

$$\rho_{lave} = C_v \cdot \rho_{solide} + (1-C_v) \cdot \rho_{eau}$$

Où :

C_v : concentration volumique des matériaux solides [%]

ρ_{lave} : masse volumique de la lave torrentielle [kg/m^3]

ρ_{solide} : masse volumique des matériaux solides [kg/m^3] (valeur globale de 2 650 kg/m^3)

ρ_{eau} : masse volumique de l'eau [kg/m^3]

Pour rappel, le seuil de contrainte noté « τ » dans le logiciel, ou « τ_c » dans la littérature et dans ce présent mémoire [Pa], peut être calculé selon deux équations (équation exponentielle et équation de Coulomb) ou rentré manuellement par l'utilisateur. C'est de façon manuelle que ce paramètre est renseigné ici afin de pouvoir le faire varier selon les différentes rhéologies retenues. Les paramètres spécifiques de Herschel-Bulkley, K : la consistance [$\text{Pa}\cdot\text{s}^n$] et n : l'indice d'écoulement [sans unité] sont également renseignés manuellement. L'indice d'écoulement « n » est un paramètre fixé à une valeur de **0,33** (valeur de référence donnée dans la littérature) et reste constant pour toutes les simulations.

Après des premières simulations exploratoires réalisées par Mathieu Valentin (2022) du RTM Isère, une première orientation concernant les valeurs attribuées aux paramètres rhéologiques a été prise. De plus, le choix des valeurs attribuées aux rapports τ_c/ρ et de K/τ_c a été guidé par une analyse de ces derniers dans l'étude de Bassin Versant du RTM Savoie, (2013). Déterminés par des mesures sur d'autres sites aux alentours du torrent du Claret, ils montraient que le rapport K/τ_c se trouvait entre 0,1 et 0,3, en étant plus proche de la valeur de 0,3 et que le rapport τ_c/ρ variait entre 1 et 1,5. De ce fait, trois classes de rhéologie ont été initialement retenues pour les simulations, avec des valeurs de τ_c/ρ égales à 1,18 ; 1,33 ; 1,43. L'exploration de ces valeurs via le logiciel HEC-RAS 2D à travers l'analyse des résultats convergeait vers une trop grande viscosité en comparaison à la lave torrentielle réellement observée le 14 juin 2017 par vidéo. Des ratios plus faibles de τ_c/ρ , préconisés par les connaissances empiriques des RTM après une réunion d'échange, ont été explorés afin de tendre vers une viscosité plus fluide et donc plus représentative de l'évènement passé (ratio de τ_c/ρ égal à : 0,5 ; 0,75 et 1). Après une ré-analyse des évènements historiques et des quelques observations disponibles sur le torrent Saint Julien, voisin du Claret, il est possible d'attribuer des valeurs du rapport τ_c/ρ selon la viscosité d'une lave torrentielle :

- Lave torrentielle boueuse fluide : 0,5 à 0,7 $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$
- Lave torrentielle boueuse à viscosité moyenne : 0,7 à 0,9 $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$
- Lave torrentielle boueuse visqueuse : > 1 $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$

Il reste important de garder à l'esprit que ces valeurs ne sont pas directement transposables au torrent du Claret, qu'elles reflètent donc une part d'incertitude. A des fins de comparaison, les ratios de K/τ_c initialement utilisés dans les premières simulations (et mal connus sur le terrain), ont été conservés (Cf. Tableau 7).

Tableau 7 : Paramètres rhéologiques retenus pour les simulations HEC-RAS 2D. R1 à R6 : jeux de paramètres rhéologiques 1 à 6. Source : Leborgne (2022).

| | K/τ_c [s ⁿ] | τ_c/ρ [m ² .s ⁻²] | τ_c [Pa] | K [Pa.s ⁿ] |
|-----------|---------------------------------|---|------------------|---------------------------|
| R1 | 0.1 | 1.18 | 2360 | 236 |
| R2 | 0.2 | 1.33 | 2660 | 532 |
| R3 | 0.3 | 1.43 | 2850 | 855 |
| R4 | 0.1 | 0.5 | 1000 | 100 |
| R5 | 0.2 | 0.75 | 1500 | 300 |
| R6 | 0.3 | 1 | 2000 | 600 |

Dans ce mémoire, il a été fait le choix de ne pas explorer les paramètres K et τ_c indépendamment. En effet, de manière générale, pour des laves fluides, la consistance (K) est relativement forte tandis que le seuil de contrainte (τ_c) reste faible et inversement pour les laves visqueuses, la consistance est faible et le seuil de contrainte fort. Ainsi, il a été défini directement quelques types de laves torrentielles selon les ratios K/τ_c et τ_c/ρ , dont leur variation conjointe ne permet pas d'isoler l'effet d'un de ces paramètres.

3.1.2.4. Géométrie du barrage filtrant dans HEC-RAS 2D pour la lave de 2017

Comme vu précédemment, la géométrie du barrage filtrant a été modifiée lors des travaux en 2018. Il s'agit ici de reproduire la géométrie de l'ouvrage lors de la crue du 14 juin 2017, ainsi c'est l'ancien design du barrage qui doit être reproduit dans HEC-RAS (avec les deux pertuis et le déversoir de surverse). Il a été volontairement choisi de ne pas représenter le pertuis du bas, car comme vu précédemment, dès l'arrivée de la lave, ce pertuis inférieur a été très probablement immédiatement obstrué. Ainsi, pour simplifier la conception de la géométrie de l'ouvrage, ce pertuis inférieur n'a pas été représenté dans le logiciel HEC-RAS mais simplement le pertuis central par lequel la lave traverse, permettant un effet d'auto-curage de la plage de dépôts.

Le logiciel HEC-RAS propose de représenter le barrage filtrant sous différents types de géométrie comme par exemple avec l'implantation d'un pont (« Bridge » terme anglais utilisé dans HEC-RAS), d'un dalot (« Colvert »), etc. Le manuel d'utilisation HEC-RAS Version 6.0 (Gary, 2021) décrit en détail les différentes possibilités et a permis de sélectionner le type d'ouvrage le plus représentatif. La géométrie finalement retenue est un barrage à vannes avec un déversoir de crue (« Gâte Spill ay and Weir »). Ce sont des vannes à levage vertical (« Slice gâtes ») avec un déversoir à large crête (« Broad ceste silla/Weir ») (Cf. exemple schématique de vanne, Figure 22). La Figure 23 est une capture d'écran du profil en travers du barrage filtrant tel qu'il a été construit dans le logiciel HEC-RAS.

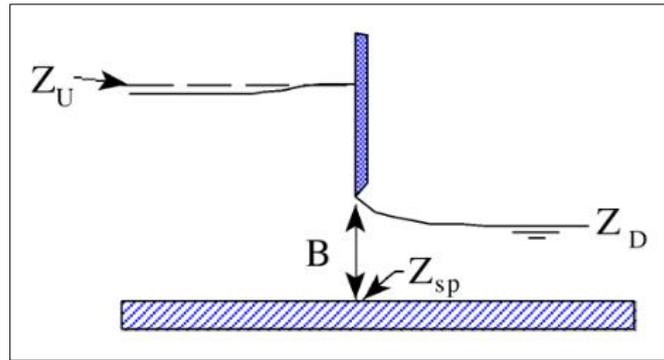


Figure 22 : Exemple de vannes à levage vertical (« Slice gâtes »). Z_U : élévation de la ligne de niveau de l'énergie amont ; Z_D : élévation de la surface de l'eau en aval ; Z_s : élévation de la crête du déversoir à travers la vanne ; B : hauteur de l'ouverture de la vanne [m]. Source : Gary W. (2021).

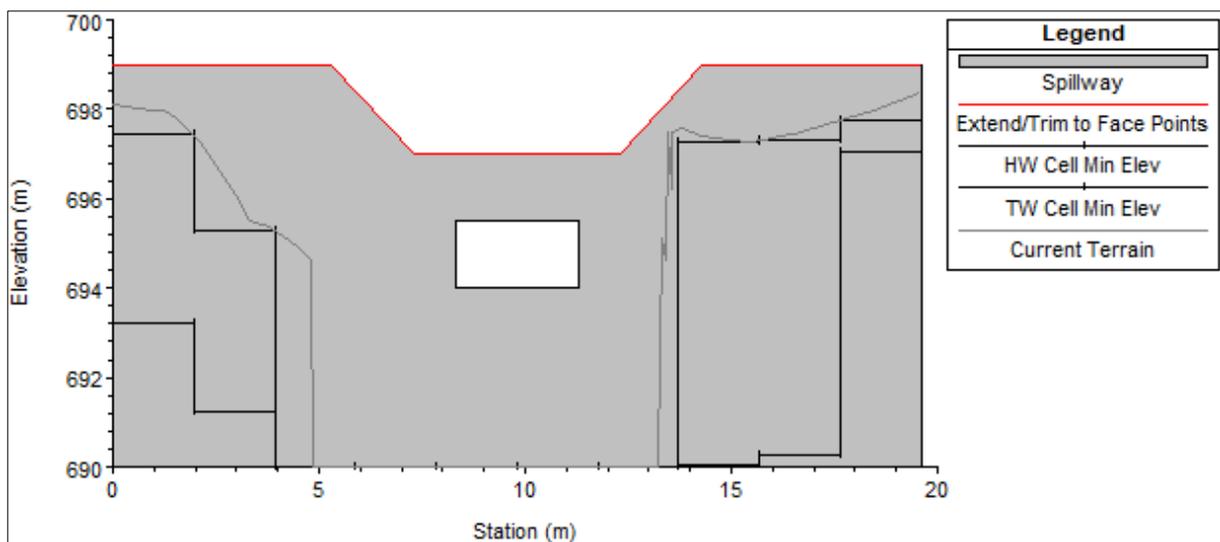


Figure 23 : Profil en travers représentant la géométrie du barrage filtrant dans le logiciel HEC-RAS 2D pour la lave torrentielle de 2017. Réalisation : Leborgne (2022).

Pour une géométrie de type « Colvert » il est utilisé les équations de Saint-Venant pour un écoulement à surface libre qui calculent des forces de frottements sur un ponceau d'une longueur d'ouvrage généralement de plusieurs mètres. Cette géométrie ne représente pas le cas du barrage filtrant de la plage de dépôts dont la structure est d'une épaisseur de 0,50 m, faible devant l'épaisseur du fluide. Les calculs pour un barrage à vanne de vidange sont basés sur la loi hauteur/débit et permettent de prendre en compte le gabarit plus petit de cette singularité via une loi d'orifice. L'équation pour un écoulement libre à travers une vanne utilisée par HEC-RAS est la suivante :

$$Q = C \cdot W \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Où :

Q : Débit [m^3/s]

C : Coefficient de débit

W : Largeur de la vanne [m]

B : Hauteur de l'ouverture de la vanne [m]

g : Accélération de la pesanteur [m/s^2]

H : Hauteur d'énergie en amont de la crête du déversoir ($Z_U - Z_{sp}$) [m]

Z_U : Élévation de la ligne de niveau de l'énergie amont [m]

Z_{sp} : Élévation de la crête du déversoir à travers la vanne [m]

Le coefficient de débit (C) est estimé à dire d'expert à 0,68. Il n'est pas discuté dans ce présent mémoire. Il peut toutefois avoir un effet potentiel important sur les niveaux atteints au droit du barrage filtrant.

3.1.2.5. Construction d'un modèle HEC-RAS 2D pour la lave de 2017

La construction d'un modèle 2D permet de reproduire la zone d'étude initiale représentative de l'état initial de la plage de dépôts avant le passage de la lave torrentielle de 2017. Pour se faire, le nouveau MNT précédemment construit est introduit dans le logiciel HEC-RAS. Une petite modification de ce MNT a été apportée directement sur le logiciel HEC-RAS afin de résoudre un problème topographique constaté au travers des simulations sur l'effet d'auto-curage des matériaux. Le nouveau MNT modifié intègre l'obstacle créé par le barrage filtrant : ainsi avec l'intégration de l'ouvrage sur le logiciel HEC-RAS, il est représenté deux barrages faisant face aux écoulements (celui dans la topographie et l'élément ouvrage de HEC-RAS). Cela ne permet pas d'observer un effet d'auto-curage. Pour pallier ce problème, un lissage du MNT a été réalisé en aval du barrage filtrant (construit sur HEC-RAS) afin de supprimer la topographie du barrage filtrant prise en compte sur le MNT (Cf. Figure 24).

Par la suite, l'emprise du modèle est créée ainsi qu'un maillage d'une résolution de 2 m sur 2 m. Des lignes de contrainte (« breaklines » en anglais) sont ajoutées au modèle afin d'appuyer la topographie, notamment les ruptures de pente ou les obstacles (ex : digues, dents freineuses) : elles sont représentées par des lignes rouges sur la Figure 24. Elles permettent d'adapter l'orientation des mailles et donc des échanges réalisés à leur niveau. Les mailles éloignées de ces lignes de contraintes ne sont pas forcément alignées avec l'axe de l'écoulement, ce qui peut apporter de potentiels effets sur les modélisations. Les conditions aux limites (« boundary conditions » terme anglais utilisé dans HEC-RAS) sont par la suite intégrées à chaque extrémité de l'emprise du modèle (deux linéaires bleus sur la Figure 24 : « Up Stream » et « Down Stream »). C'est pour les conditions aux limites « Up Stream », que les différents hydrogrammes seront pris en compte par les simulations. Pour les conditions aux limites « Down Stream », il a été sélectionné une condition de type « Normal Depth » supposant que le passage de la lave torrentielle se fait dans des conditions d'écoulement normales (niveau uniforme) à la limite aval du modèle.

Pour finir la construction du modèle, il a fallu créer et implanter dans le modèle les ouvrages présents dans la plage de dépôts, soit : le barrage filtrant en aval de la plage et les deux dents freineuses encore émergées en amont. Pour rappel, la durée de l'évènement total est de 5 minutes. Afin de bien visualiser l'effet d'auto-curage et de permettre à l'écoulement de totalement s'arrêter, les simulations de laves torrentielles sont menées sur une durée de 25 minutes.

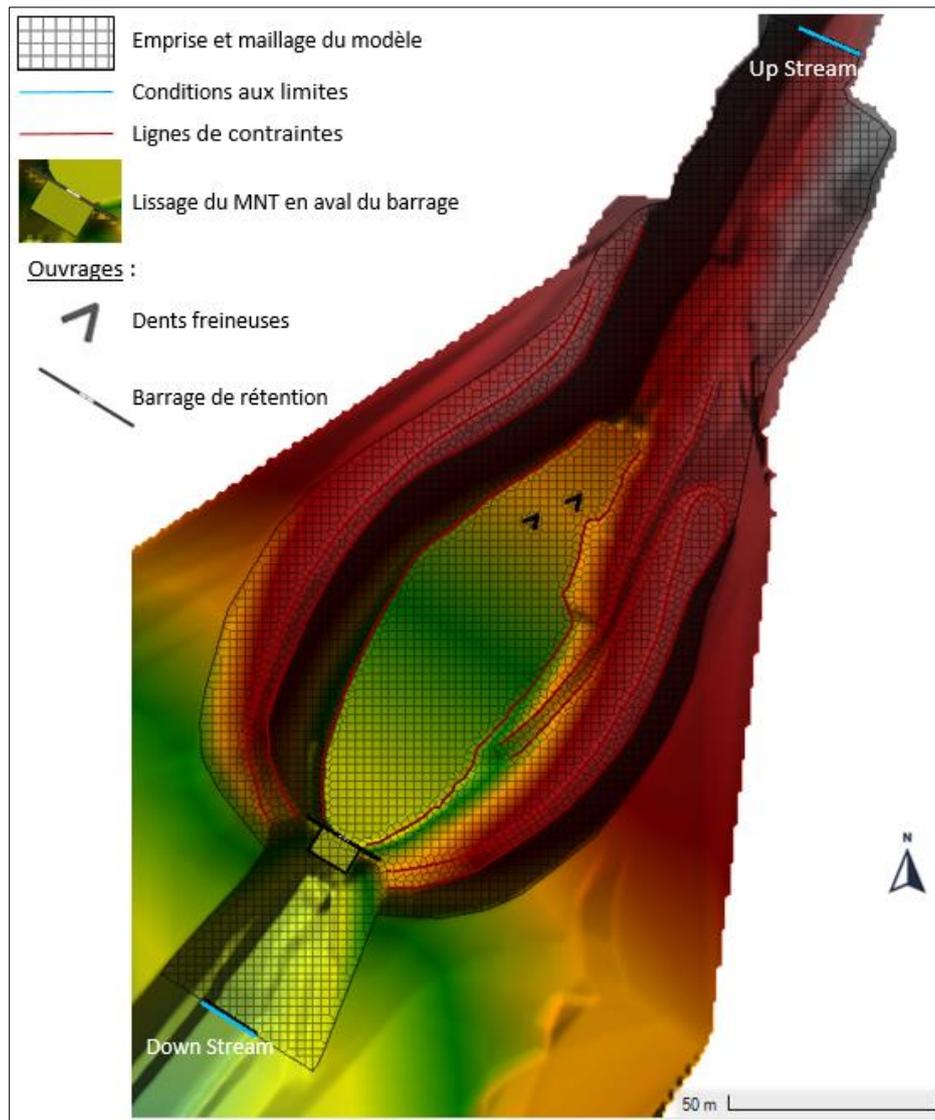


Figure 24 : Modèle HEC-RAS 2D construit sur fond topographique modifié (lave torrentielle 2017).
Réalisation : Leborgne (2022).

3.2. Résultats

3.2.1. Description conceptuelle

Cette première partie des résultats permet de réaliser une comparaison visuelle entre l'analyse qualitative réalisée par Piton et al., (2018) sur les différentes phases de remplissage de la plage de dépôts observées au travers de la vidéo de l'évènement, et les rendus cartographiques d'une modélisation HEC-RAS 2D (identiques pour n'importe quelle lave torrentielle simulée). La cartographie de la Figure 25 représente les vitesses d'écoulements (avec des vecteurs de vitesses représentés par des flèches noires) et les profondeurs (avec des lignes de courants représentées par les lignes blanches) modélisées pour la lave torrentielle comprenant un τ_c/ρ de $1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; un débit de $87 \text{ m}^3/\text{s}$ et un coefficient de Manning de 0,08, et à des temps de simulation différents :

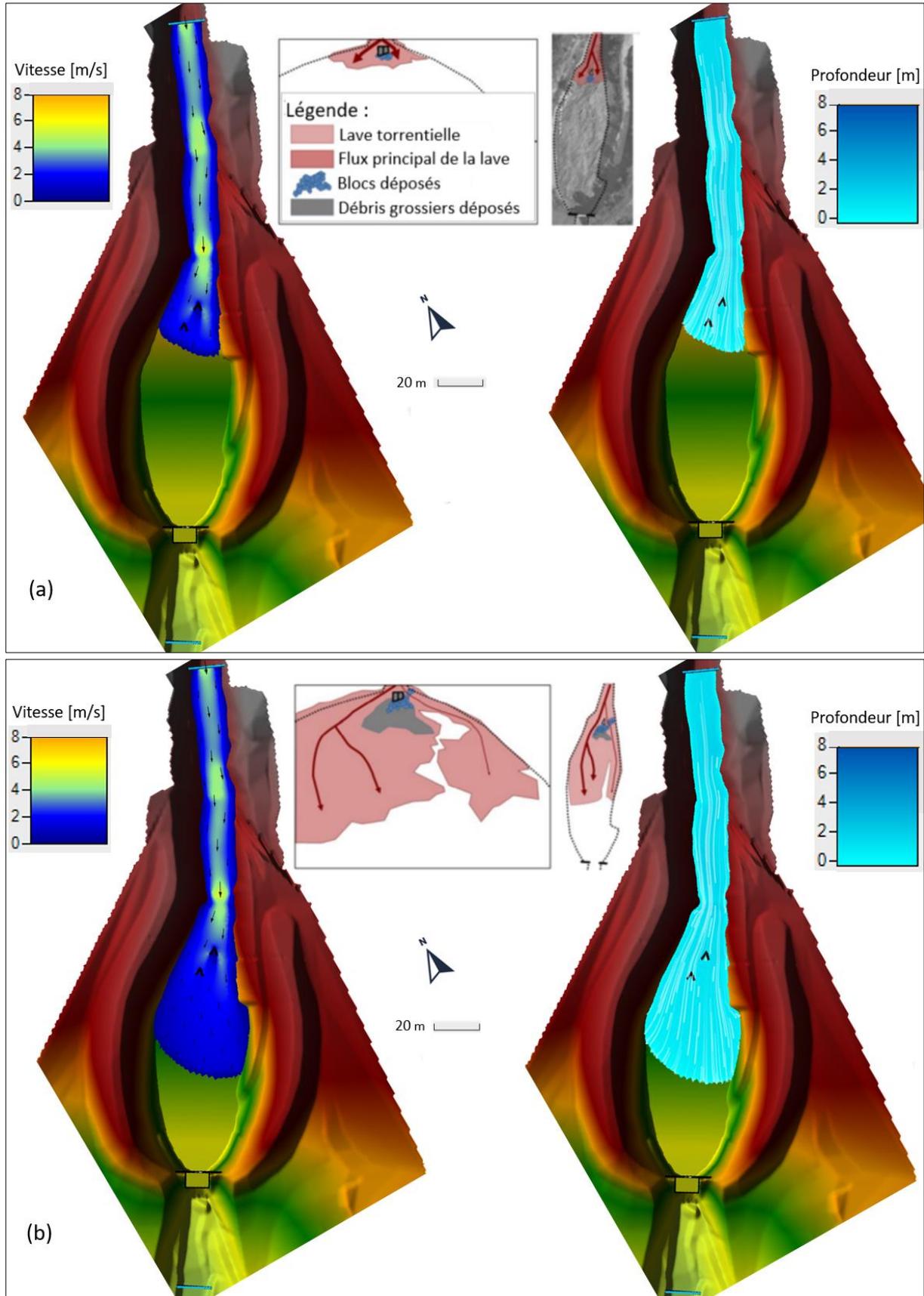


Figure 25 : Comparaison de l'analyse schématique par Piton, et al., (2018) avec le cas de la modélisation 2D par HEC-RAS pour une lave torrentielle comprenant un $\tau_c/\rho = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; un débit = $87 \text{ m}^3/\text{s}$ et un coefficient de Manning = 0,08. (a) : Similitudes observées quant à l'effet séparateur des

dents freineuses mais absence de la modélisation du dépôt du front granulaire au niveau des dents.
 (b) : Observation d'un flux plus important côté rive gauche, à l'inverse de l'analyse schématique.

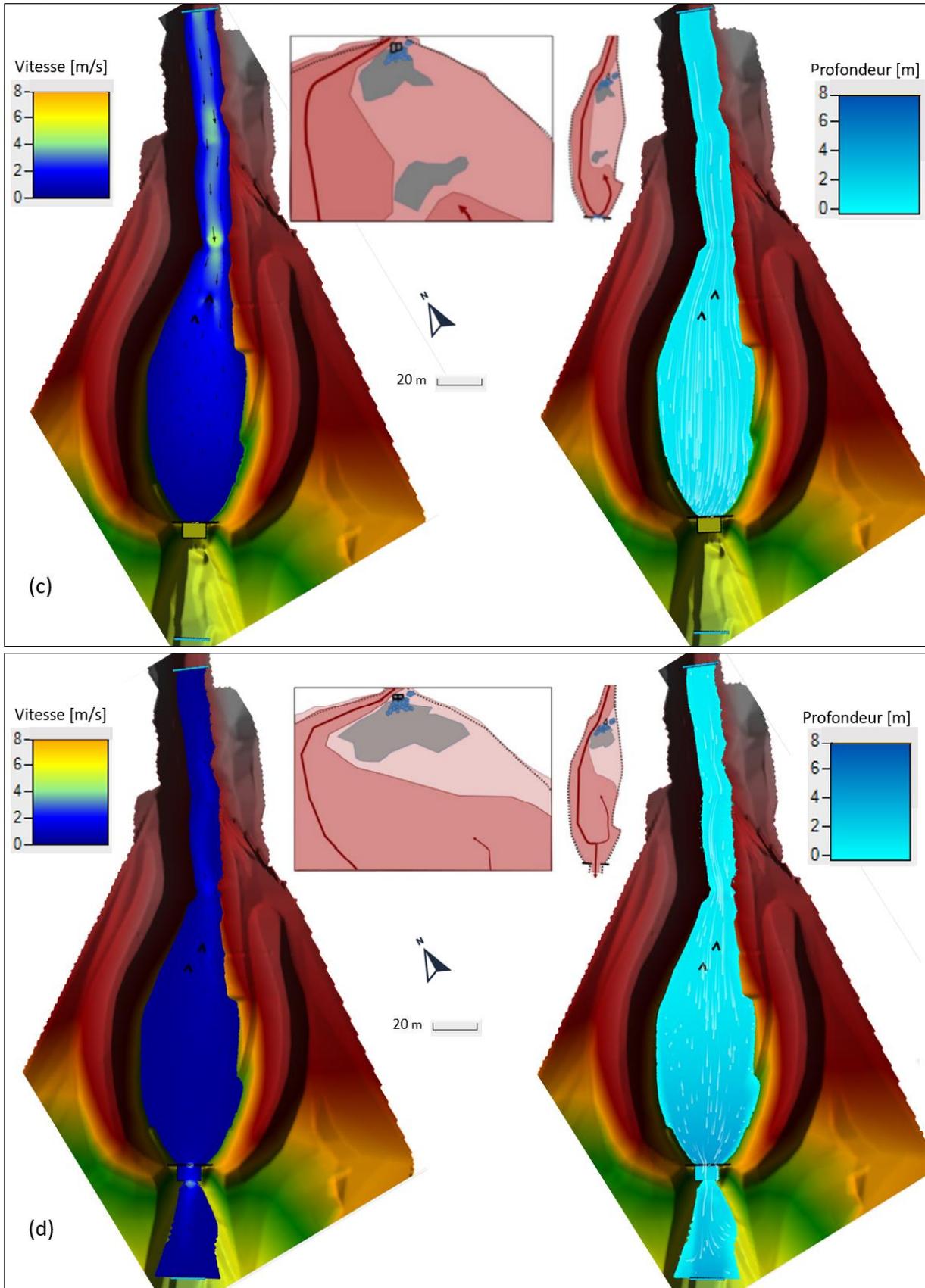


Figure 25 (suite) : (c) et (d) : Aucun chemin préférentiel d'écoulement, ni de recirculation observé par modélisation 2D. Réalisation Leborgne (2022).

- (a) Temps à 48 s : Entrée de la lave torrentielle dans la plage de dépôts. Des similitudes sont constatées entre l'analyse schématique et la modélisation par HEC-RAS 2D avec la séparation de la lave torrentielle en deux flux par les dents freineuses. Cependant, aucun dépôt du front granulaire ou de quelques blocs n'est modélisé par HEC-RAS qui n'intègre pas ces éléments (modèle fluide pure).
- (b) Temps à 1 min 12 s : le chemin préférentiel emprunté par la lave torrentielle en rive droite ainsi que la recirculation observée sur la vidéo, et représentés schématiquement, ne sont pas observés par la modélisation par HEC-RAS 2D. Ces constats peuvent être expliqués par le fait que la topographie du fond de la plage de dépôts, modifiée et intégrée dans HEC-RAS, a été interpolée sur toute la largeur de la plage à partir des niveaux de dépôts déterminés au droit des dents freineuses. Si la topographie induite par le dépôt du front granulaire avait été rajoutée manuellement dans HEC-RAS, il se pourrait qu'une visualisation de ces phénomènes soit possible.
- (c) Temps à 2 min 10 s : Juste avant le déversement de la lave par le pertuis central, aucune recirculation n'est observée. Une perte de vitesse est notée au droit du barrage. Cela peut s'expliquer par un potentiel effet de remplissage homogène et par l'absence d'apport préférentiel issu de la rive droite.
- (d) Temps à 5 min : Les vitesses d'écoulement sont également plus faibles, ce ralentissement peut s'expliquer probablement par le passage de la majeure partie du flux par la fente centrale. Aucune recirculation n'est observée sur la modélisation 2D comme c'était le cas sur les images de terrain. Il est constaté une alimentation homogène plutôt qu'une veine fluide principale.

Les différences observées dans cette comparaison pourraient faire l'objet d'études approfondies. Une piste hypothétique peut être avancée sur l'utilisation, par HEC-RAS 2D, des équations de Barré de Saint-Venant moyennant le comportement sur toute l'épaisseur de l'écoulement. Peut-être qu'en différenciant l'épaisseur de la lave torrentielle en deux phases : une phase solide sur les premiers mètres de profondeur et une phase fluide sur l'écoulement surnageant, il serait possible d'observer cette recirculation au droit du barrage. L'écoulement modélisé est alors tridimensionnel, sortant de ce fait, du domaine d'application des équations de Barré de Saint-Venant. Cette hypothèse mettrait alors en avant une limite potentielle dans l'utilisation des équations de Barré de Saint-Venant dans ce cas précis de modélisation de lave torrentielle impactant un ouvrage barrant l'ensemble du chenal.

La suite de l'analyse vise à mener une étude paramétrique permettant de sélectionner le ou les jeux de paramètres les plus représentatifs de l'évènement étudié.

3.2.2. Niveaux des dépôts atteints au droit du barrage filtrant et de la 1^{ère} dent freineuse

Les résultats des simulations avec les trois coefficients de rugosité de Manning, les trois débits de pointe et les 6 jeux de paramètres rhéologiques retenus sont représentés sous forme graphique. Pour ne pas surcharger le corps du mémoire, les résultats sous formes de tableaux sont consultables en Annexe 2.

Pour la lave torrentielle du 14 juin 2017, il est question d'analyser l'influence des coefficients de rugosité de Manning, des débits et des différentes rhéologies des laves torrentielles notamment sur les niveaux des **dépôts maximums** ainsi que les **dépôts finaux** atteints par les différentes laves torrentielles simulées au droit de la **dent n°1** (dent la plus en amont) et au droit du **barrage filtrant**. Les **durées de traversée** des laves sont également comparées à celle déterminée pour la lave du 17 juin 2017, soit 54s (\pm 5s) pour une distance de 99,60 m (du barrage filtrant à la dent n°1 en amont du bassin de rétention).

Les valeurs des dépôts obtenues au droit du barrage filtrant sont extraites des simulations à 1 m en amont du barrage. En effet, il a été constaté grâce aux profils en long exportés du logiciel HEC-RAS, une chute des profils sur environ 1 m au niveau du barrage (exemple d'un profil en long d'une lave torrentielle simulée, Cf. Figure 26). Après vérification des données d'entrée et des différents paramètres de construction du modèle, il n'a pas été trouvé d'explication à cette chute qui donne au niveau du barrage (distance = 0m) des valeurs inférieures à la cote de la base du puits central (694,00 masl). Les valeurs retrouvées par les simulations tournent aux alentours de 693,80 masl. Les dépôts finaux des différentes simulations ne devraient pas se situer en-dessous de la cote du puits. Il a donc été supposé un problème interne spécifique au logiciel HEC-RAS puisque le barrage est une singularité dans le modèle, une entité à part entière ajoutée à la topographie avec des cotes bien identifiées.

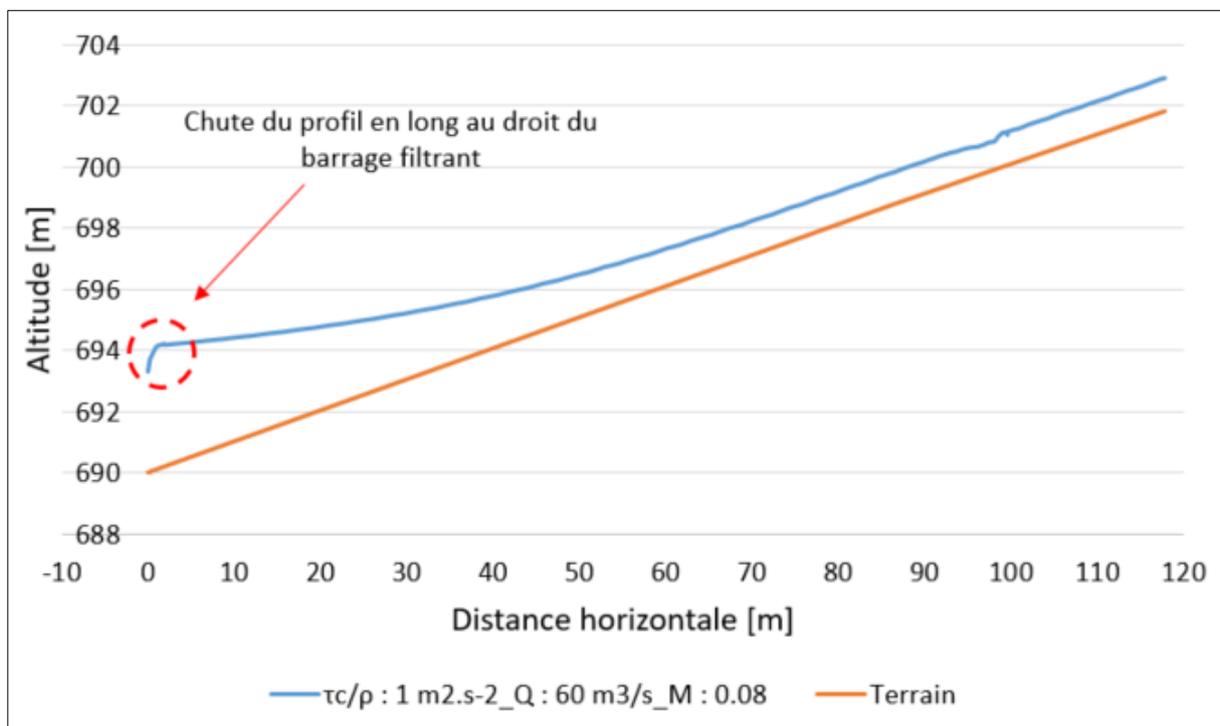


Figure 26 : Exemple de profil en long des dépôts finaux montrant la chute du profil au droit du barrage filtrant. Source : Leborgne (2022).

3.2.2.1. Niveaux des dépôts au droit du barrage filtrant

3.2.2.1.1. Niveaux maximums des dépôts atteints au droit du barrage filtrant

Cette comparaison peut être réalisée puisque le niveau maximum atteint par la lave torrentielle de 2017 est connue grâce aux laisses de crue visibles sur les parois en amont du barrage. Ce niveau de référence est de 695,10 masl.

La Figure 27 montre tous les niveaux maximums atteints par les 54 laves torrentielles simulées. Il peut être constaté dans un premier temps que c'est la rhéologie des laves torrentielles, représentée par le rapport de τ_c/ρ sur l'axe des abscisses, qui influence le plus les niveaux maximums atteints par les dépôts au droit du barrage. Une différence maximale de 1,5 m est relevée entre le rapport de τ_c/ρ le plus faible ($0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) et le plus élevé ($1,43 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) et pour un débit de $60 \text{ m}^3/\text{s}$. Les résultats montrent que plus la valeur de τ_c/ρ est petite (lave plus fluide), plus les niveaux atteints sont importants et inversement, plus la valeur de τ_c/ρ est grande, plus les niveaux sont faibles. Ce constat semble contre intuitif, et aucune explication n'a pu être apportée afin de comprendre cette tendance qui est observable simplement en aval de la plage de dépôts au droit du barrage filtrant : l'origine de ce résultat est vraisemblablement à rechercher du côté du fonctionnement de la singularité numérique formée par le barrage.

Les débits de pointe retenus ($60 \text{ m}^3/\text{s}$, $73 \text{ m}^3/\text{s}$ et $87 \text{ m}^3/\text{s}$), influencent dans un second ordre les niveaux maximums des dépôts. Il est observé que plus le débit est élevé, plus le niveau maximum atteint par la lave est grand. Une différence maximale de 1,43 m est observée entre le débit à 60 et $87 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un rapport de τ_c/ρ de $1,43 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.

Enfin, les coefficients de rugosité de Manning utilisés n'ont pour ainsi dire, aucune influence sur les niveaux maximums atteints par les diverses laves torrentielles simulées au droit du barrage. Une différence maximale de 0,01 m est relevée entre les différents niveaux obtenus, ce qui est insignifiant. Ce coefficient caractérisant le frottement dans le bassin, ce résultat est cohérent avec l'intuition.

De par ces résultats, il n'est pas possible de faire ressortir un jeu de paramètres le plus représentatif du niveau final atteint par la lave torrentielle du 14 juin 2017. Toutefois, il semblerait que ce sont les laves torrentielles avec les rapports de τ_c/ρ les plus élevés et les débits les plus faibles qui permettraient de se rapprocher de la valeur de référence.

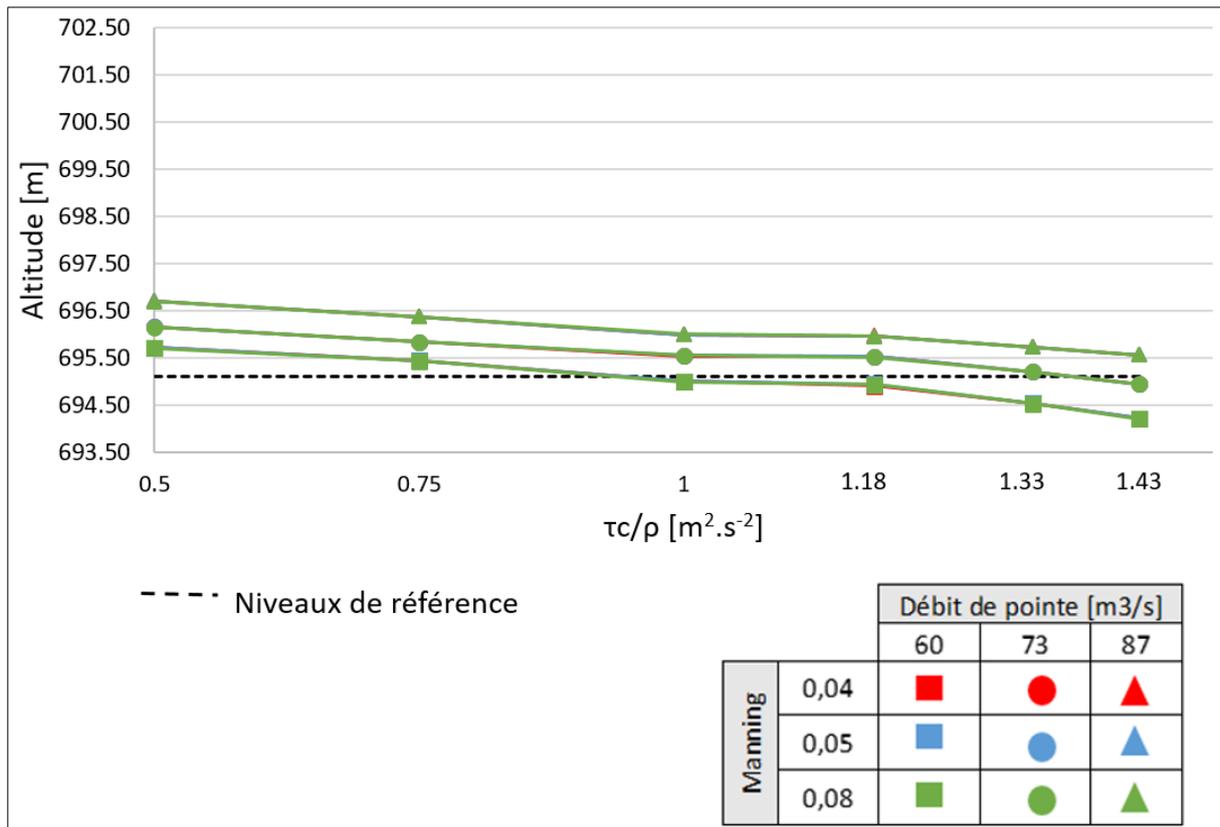


Figure 27 : Niveaux maximums atteints par les laves torrentielles au droit du barrage filtrant pour les simulations HEC-RAS 2D, lave torrentielle 2017. Réalisation : Leborgne (2002).

3.2.2.1.2. Niveaux finaux des dépôts au droit du barrage filtrant

Le niveau de référence des dépôts finaux au droit du barrage pour la lave de 2017 se situe à 694,0 masl (base de la fente intermédiaire). Les trois paramètres étudiés n'ont quasiment aucune influence sur les simulations réalisées. Une différence maximale de 0,01 m entre les simulations est relevée pour les coefficients de rugosité de Manning, de 0,40 m pour les rapports τ_c/ρ et de 0,39 m pour les différents débits. Cette dernière différence, observable sur la Figure 28, correspond aux simulations suivantes :

- Manning = 0,04 ; Débit = 60 m³/s ; $\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \rightarrow 694,10 \text{ masl}$.
- Manning = 0,04 ; Débit = 87 m³/s ; $\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \rightarrow 694,49 \text{ masl}$.

Une vérification des données d'entrée et des paramètres de construction du modèle a été faite sans pour autant expliquer cet écart spécifique à ces simulations.

Ainsi, toutes les laves torrentielles simulées donnent des niveaux finaux très proches de la valeur de référence au droit du barrage filtrant peu importe leur coefficient de Manning, leur débit spécifique ou leur rhéologie.

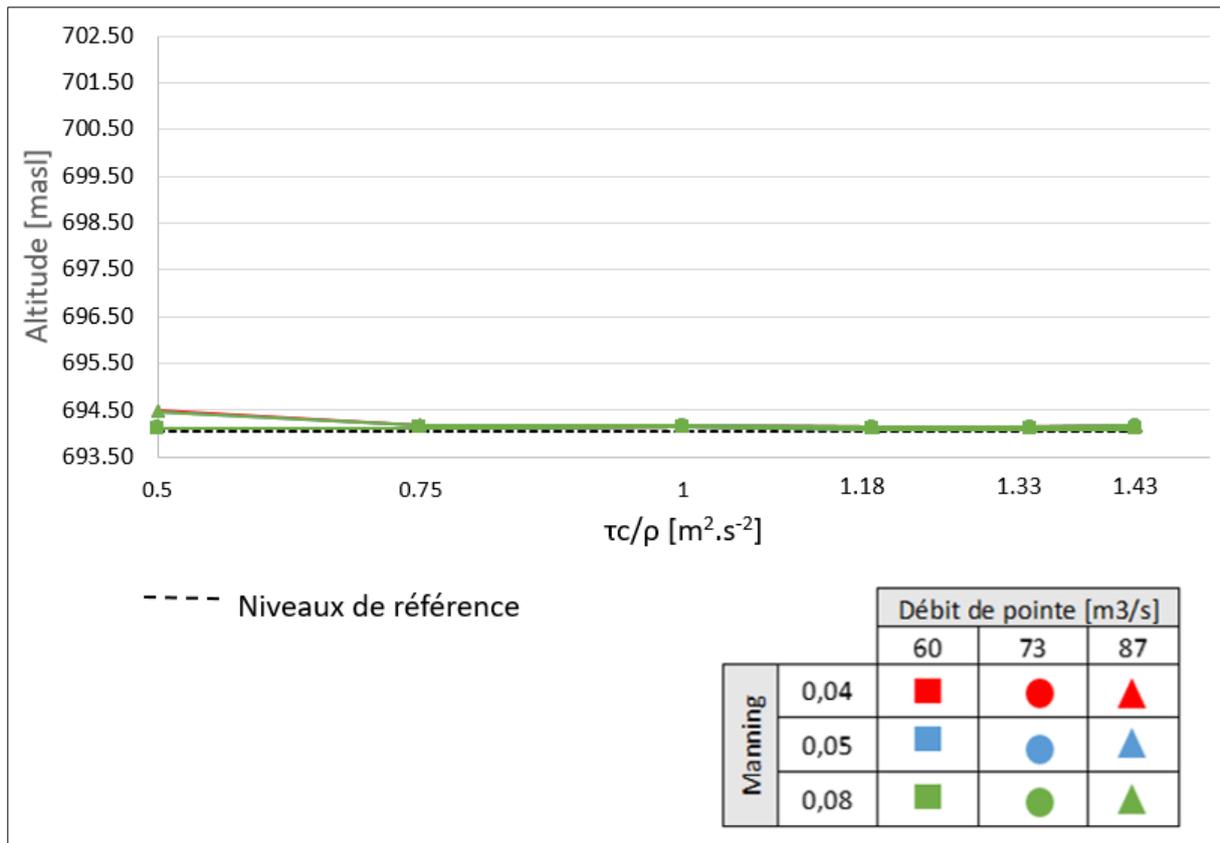


Figure 28 : Niveaux finaux des dépôts au droit du barrage filtrant pour les simulations HEC-RAS 2D, lave torrentielle 2017. Réalisation : Leborgne (2002).

3.2.2.2. Niveaux des dépôts au droit de la dent n°1

3.2.2.2.1. Niveaux maximums des dépôts au droit de la dent n°1

Ne connaissant pas précisément le niveau de référence maximal des dépôts au droit de la dent n°1 sur laquelle comparer les valeurs des niveaux maximums des laves simulées, il peut être toutefois constaté que le niveau d'écoulement approchait le niveau supérieur (702,0 masl) de la 1^{ère} dent freineuse d'après les images acquises pendant et après l'évènement. Il est donc intéressant de regarder les résultats des simulations afin d'évaluer les influences des trois paramètres étudiés sur les conditions maximales d'écoulement en amont de la plage de dépôts et pour pouvoir écarter potentiellement certains jeux de paramètres.

Les résultats de cette comparaison, visibles sur la Figure 29 montrent que l'ensemble des résultats sont proches et encadrent la cote supérieure de la 1^{ère} dent freineuse à 702,0 masl. Elles permettent aussi de relever que les paramètres rhéologiques influencent le plus les niveaux maximums, avec une différence maximale constatée de 0,80 m pour un débit de 60 m³/s et un Manning de 0,04. Dans un second ordre ce sont les débits qui influencent les niveaux maximums avec 0,52 m de différence maximale constatée pour un τ_c/ρ de 1,18 m².s⁻² et un Manning de 0,04. Enfin, les coefficients de rugosité de Manning n'influencent que légèrement les niveaux maximums atteints avec une différence maximale de 0,24 m entre les simulations.

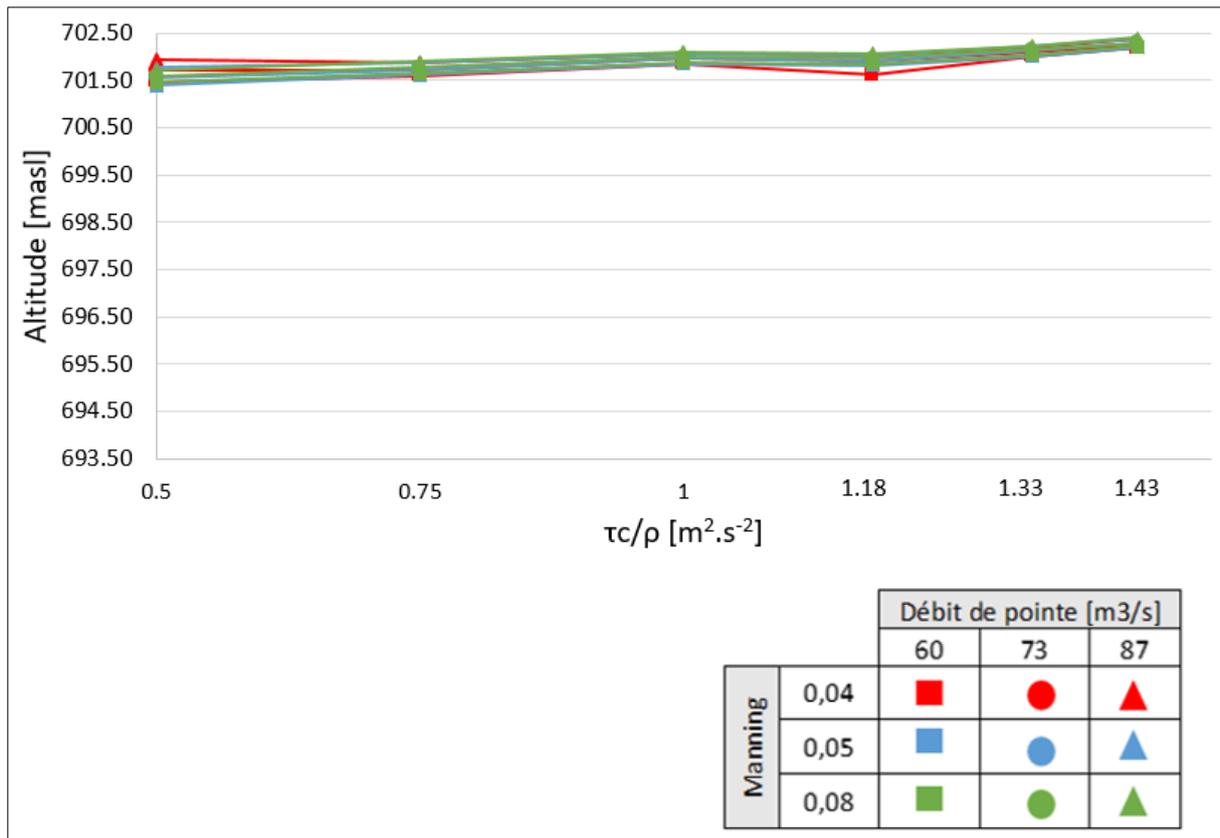


Figure 29 : Niveaux maximums atteints par les laves torrentielles au droit de la dent n°1 pour les simulations HEC-RAS 2D, lave torrentielle 2017. Réalisation : Leborgne (2002).

3.2.2.2.2. Niveaux finaux des dépôts au droit de la dent n°1

Le niveau des dépôts finaux au droit de la 1^{ère} dent a pu être déterminé à 700,65 masl par photo-interprétation. Ici, le coefficient de rugosité de Manning ainsi que les débits n'influencent pas les niveaux finaux des laves simulées (Cf. Figure 30). En revanche, les rapports de τ_c/ρ joue sur ces dernières de façon proportionnelle à leur valeur avec 1,02 m de différence maximum entre la plus petite valeur de τ_c/ρ ($0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) et sa valeur la plus élevée ($1,43 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) pour n'importe quel débit et coefficient de Manning.

Ici, la valeur des niveaux finaux des laves torrentielles avec un rapport de τ_c/ρ de $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (700,62 masl), correspondant à la lave la plus fluide modélisée, est celle qui se rapproche le plus du niveau de référence suivie du rapport de τ_c/ρ de $0,75 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (700,89 masl), peu importe leurs valeurs de coefficients de rugosité de Manning ou de débits des laves torrentielles simulées.

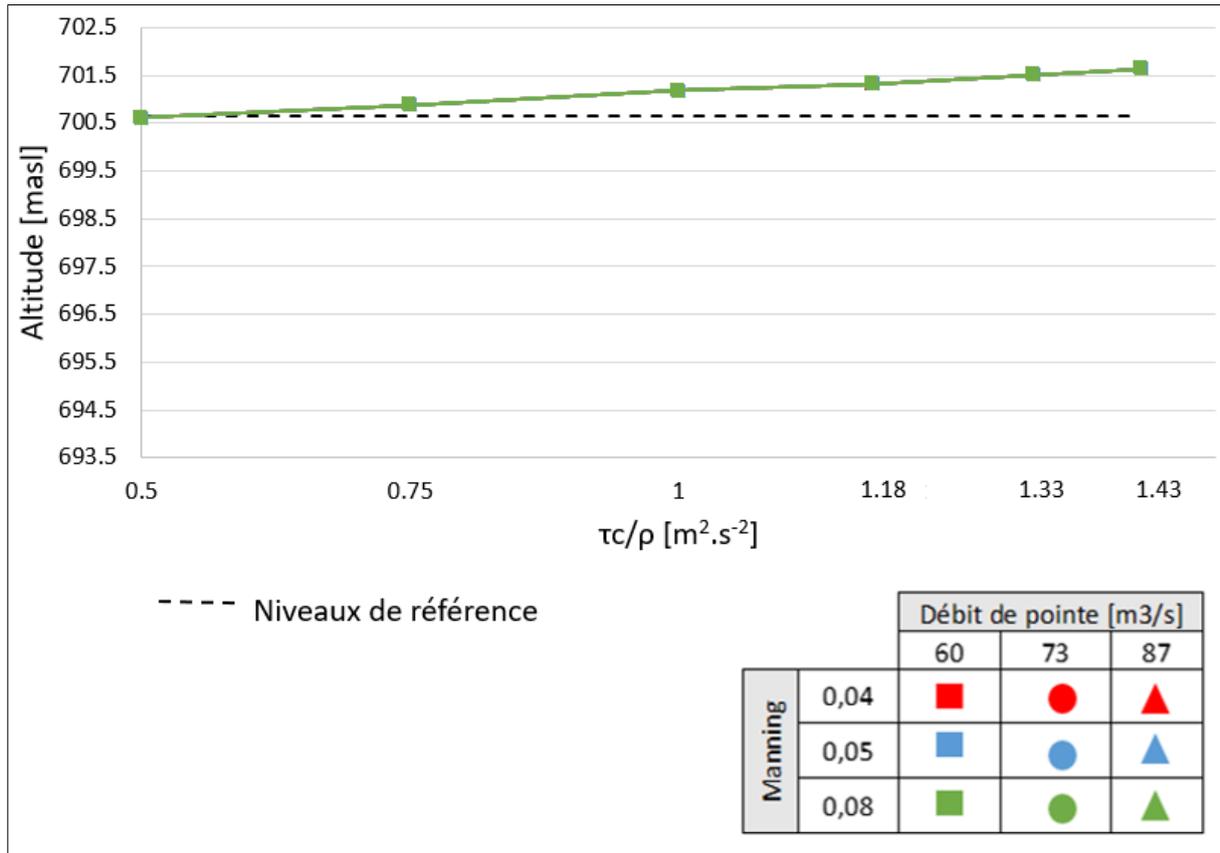


Figure 30 : Niveaux finaux des dépôts au droit de la dent n°1 pour les simulations HEC-RAS 2D, lave torrentielle 2017. Réalisation : Leborgne (2002).

3.2.3. Profils en long représentant les niveaux finaux

La Figure 31 représente tous les profils en long représentant les niveaux des dépôts finaux de toutes les laves torrentielles simulées. Il peut être constaté que tous ces profils sont regroupés en six catégories de profils. En aval de la plage de dépôts toutes les valeurs se rassemblent pour donner des valeurs de dépôts finaux plus ou moins similaires avec les niveaux finaux de référence. Cependant, c'est en amont que les six catégories de profils en long sont différentes. Les profils en long des Figure 32 et Figure 33 permettent de comprendre et d'appuyer le constat des résultats précédents quant à l'origine de l'influence sur les différents profils en long.

Sachant que les coefficients de rugosité de Manning n'ont aucune influence sur les résultats des niveaux finaux, que ce soit au droit du barrage ou au niveau de la dent n°1, la Figure 32 représente quatre laves torrentielles simulées avec une même rhéologie mais avec les trois valeurs de débits différentes. Il est constaté que les profils en long se superposent ce qui signifie que ce ne sont pas les différents débits qui influencent majoritairement les niveaux de dépôts finaux en amont de la plage de dépôts : le phénomène d'auto-curage permet une convergence des simulations vers des états finaux similaires. La Figure 33 montre quant à elle six laves torrentielles avec un même débit (73 m³/s) mais des paramètres rhéologiques différents. Il peut être retrouvé sur cette figure les six types de profils en long représentant

des variations de niveaux en amont de la plage de dépôts, influencées donc par la rhéologie des laves torrentielles.

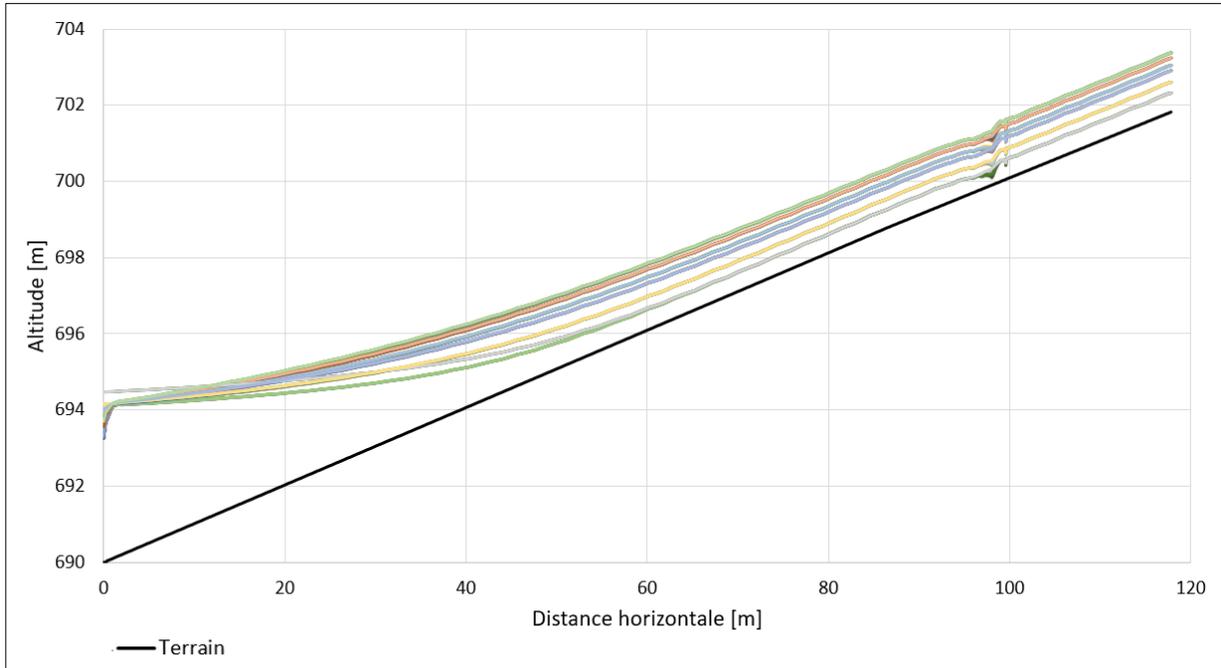


Figure 31 : Profils en long des 54 laves torrentielles simulées représentant les dépôts finaux. Profils en long regroupés en six ensembles. Réalisation : Leborgne (2022).

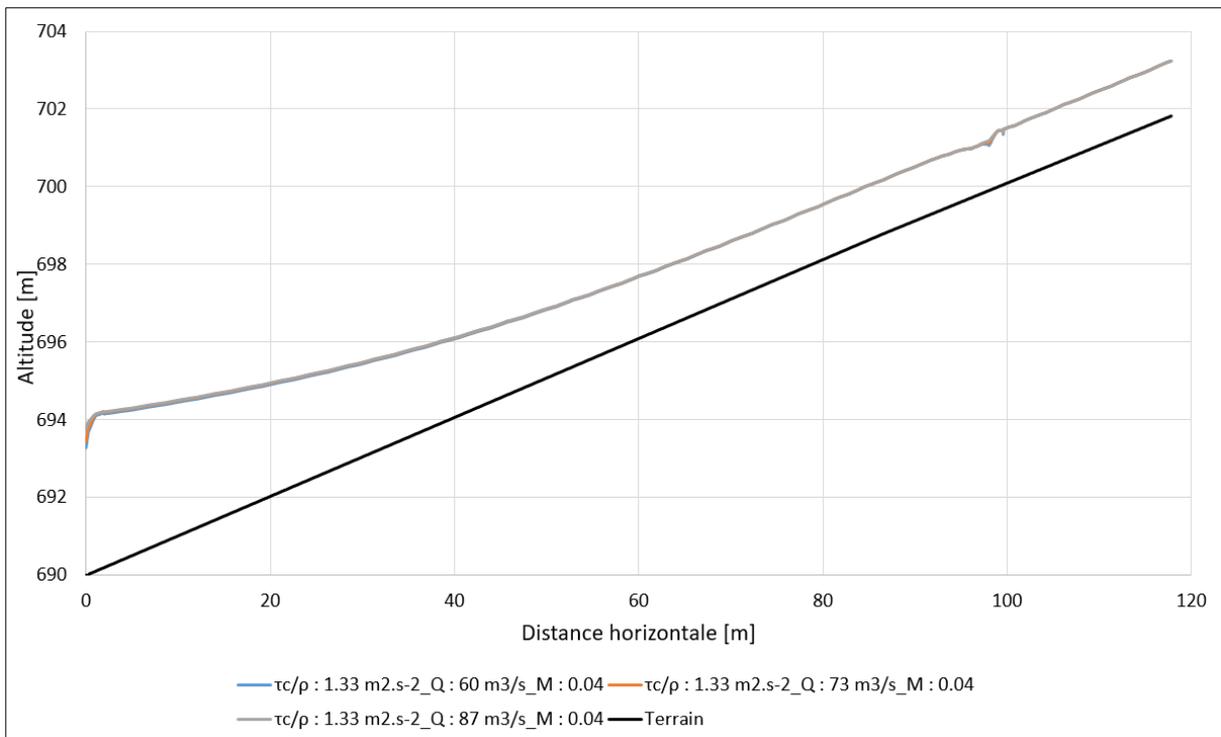


Figure 32 : Profils en long de 4 laves torrentielles simulées avec le même coefficient de rugosité de Manning (0.04), le même rapport de τ_c/ρ ($1.33 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) mais des débits différents (60, 73 et 80 m^3/s). Réalisation : Leborgne (2022).

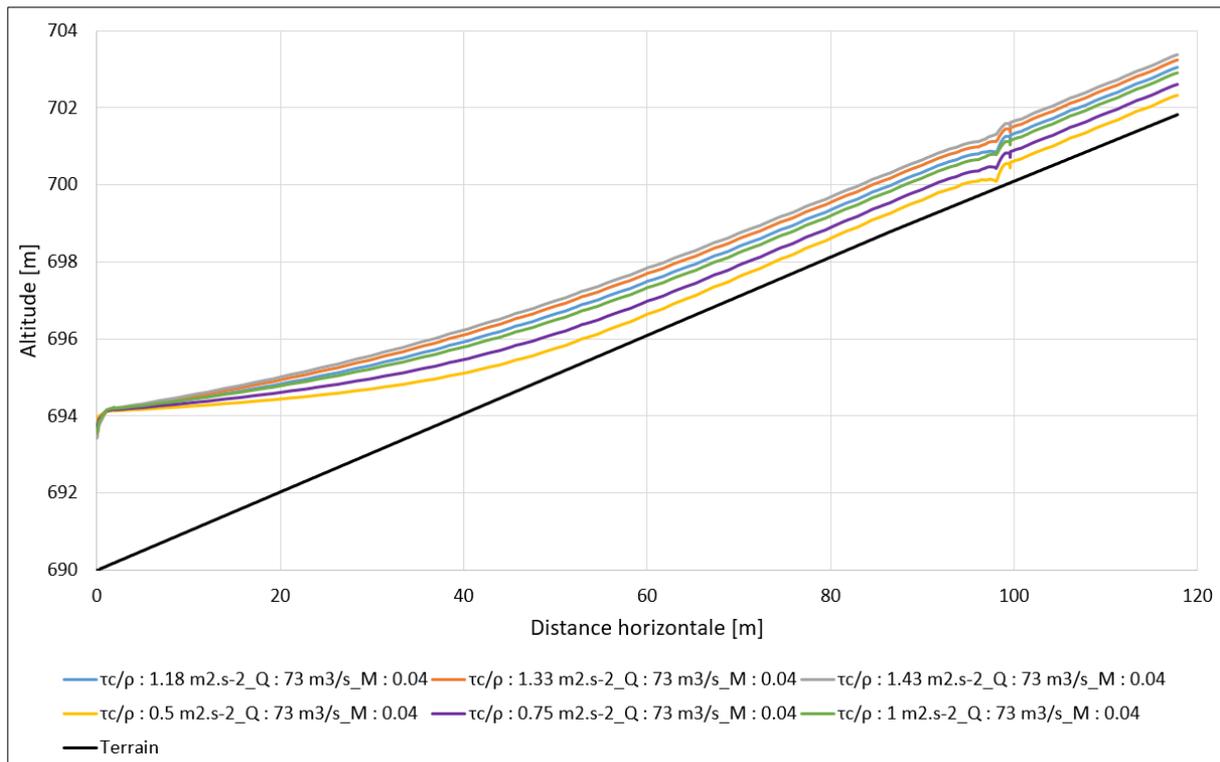


Figure 33 : Profils en long de 6 laves torrentielles simulées avec le même coefficient de rugosité de Manning (0.04), le même débit ($73 \text{ m}^3/\text{s}$) mais des rapports de τ_c/ρ différents (0.5, 0.75, 1, 1.18, 1.33 et $1.43 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$). Réalisation : Leborgne (2022).

3.2.4. Temps de traversée des laves torrentielles simulées

Le temps de traversée de la lave torrentielle de 2017 a été déterminé à $54 \text{ s} (\pm 5 \text{ s})$ sur un profil en long, allant de la 1^{ère} dent amont au barrage filtrant. Il est intéressant de regarder si le temps de traversée des laves torrentielles simulé par le logiciel HEC-RAS 2D est du même ordre de grandeur que le temps de traversée de référence.

La Figure 34, permet une visualisation de toutes les vitesses de traversée des 54 laves torrentielles simulées. Il est constaté que 8 laves torrentielles se situent dans l'intervalle des $54\text{s} \pm 5\text{s}$. Plusieurs points de similitudes caractérisent ces laves torrentielles.

Premièrement, elles appartiennent à trois types de paramètres rhéologiques sur les six expérimentés dont trois laves torrentielles ont un rapport de $\tau_c/\rho = 0,75 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$, deux laves torrentielles ont un rapport de $\tau_c/\rho = 1 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ et trois laves torrentielles ont un rapport de $\tau_c/\rho = 1,18 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$. Aucune autre rhéologie testée n'a permis d'obtenir des temps de traversée proches de celle de la lave torrentielle de 2017. Les temps de traversée les plus lents sont majoritairement représentés par des laves ayant des τ_c/ρ les plus élevés ($1,33$ et $1,43 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$) et inversement, les temps de traversée les plus rapides sont représentés ici par des laves plus fluides ayant le rapport τ_c/ρ le plus faible (soit $0,5 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$). Il peut être également observé que les laves torrentielles avec un $\tau_c/\rho = 1,18 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ peuvent avoir des temps de traversée proches des ceux avec un rapport de $\tau_c/\rho = 1 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$. Ceci peut s'expliquer par les différentes valeurs de K/τ_c attribuées aux laves. Les laves ayant un $\tau_c/\rho = 1,18 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ ont un rapport de K/τ_c plus faible que les laves avec un $\tau_c/\rho = 1 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$, soit respectivement $0,01 \text{ s}^n$ et $0,03 \text{ s}^n$.

Ces huit laves torrentielles regroupent les trois différents débits expérimentés au travers des simulations. Toutefois, quatre laves sur huit ont un débit de $87\text{m}^3/\text{s}$ (soit un volume de $13\,000\text{m}^3$), deux laves sur huit ont un débit de $73\text{m}^3/\text{s}$ (soit un volume de $11\,000\text{m}^3$) et deux laves sur huit ont un débit de $60\text{m}^3/\text{s}$ (soit un volume de $9\,000\text{m}^3$).

Concernant les coefficients de rugosité de Manning, ils ont une légère influence sur la durée de traversée des laves torrentielles dans la plage de dépôts. Sur les huit laves torrentielles se situant dans l'intervalle d'incertitude, trois laves ont un coefficient de Manning de 0,04, trois laves également ont un coefficient de Manning de 0,05 et deux laves ont un coefficient de Manning de 0,08.

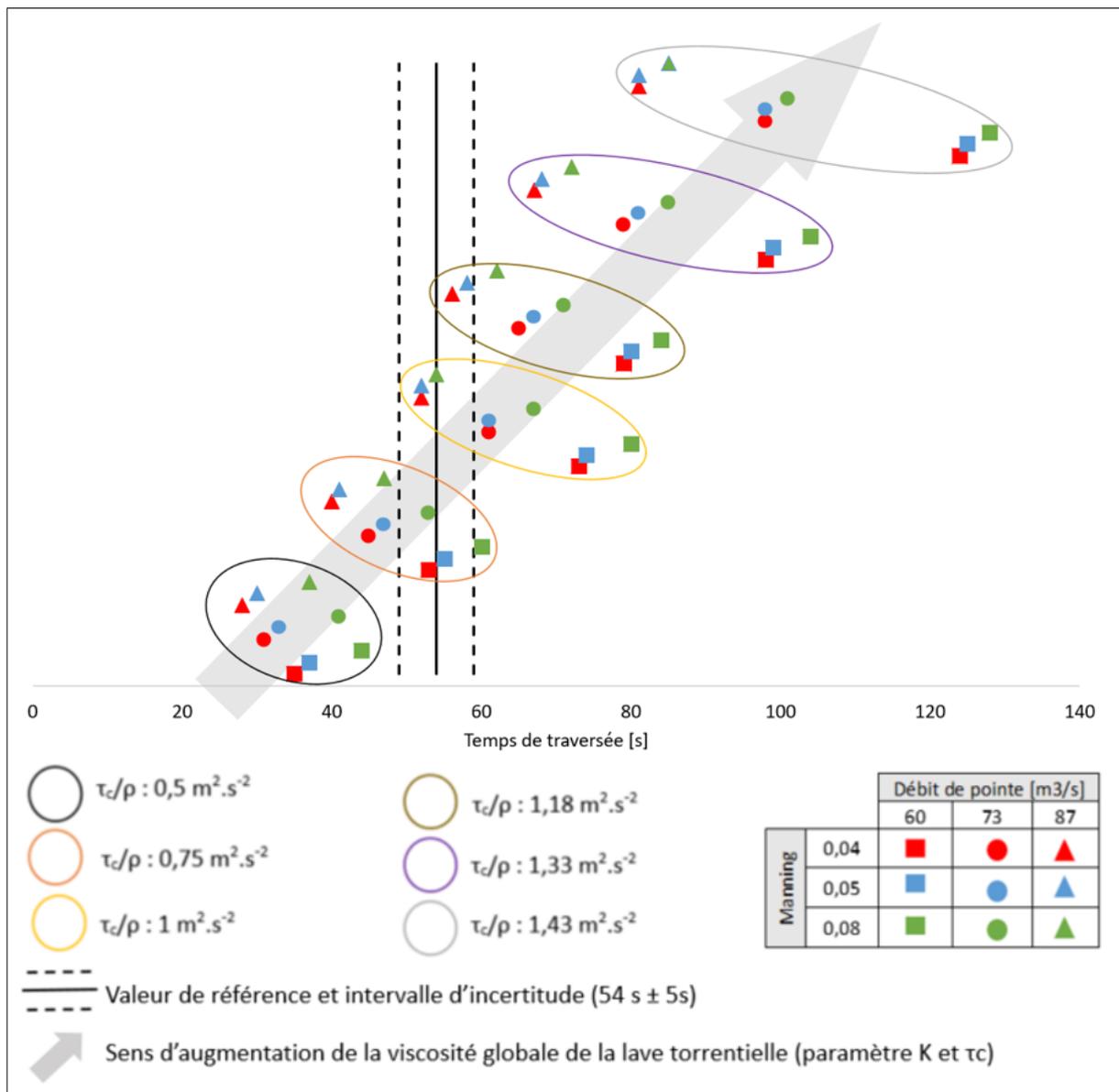


Figure 34 : Temps de traversée des 54 laves torrentielles simulées. Réalisation : Leborgne (2022).

3.3. Analyses et interprétations

Le fait de ne trouver aucune ou peu de différence selon l'application des différents coefficients de rugosité de Manning et des débits de pointe et paramètres rhéologiques sur les niveaux des dépôts finaux au droit du barrage filtrant peut être expliqué en partie par ce dernier. En effet, c'est la singularité de l'ouvrage qui contrôle l'écoulement en aval de la plage dépôts et donc les niveaux des dépôts atteints. La force de contrainte ne joue pas au droit du barrage même avec de fortes contraintes de seuil τ_c . Ce constat est fait simplement au droit du barrage puisqu'en amont de la plage de dépôts ce sont les paramètres rhéologiques qui influencent au premier ordre les niveaux de dépôts finaux et au second ordre les débits puis les coefficients de rugosité de Manning. En amont du bassin il y a beaucoup de contraintes du fait de l'élargissement du chenal d'écoulement provoquant l'étalement des laves lors de leur arrivée dans la plage, suivi d'une perte de vitesse sur une pente légèrement moins raide. De ce fait, il peut être observé un arrêt d'une partie des matériaux, plus particulièrement de gros blocs comme observé sur la vidéo de l'évènement, et donc des plus grosses épaisseurs de dépôts en amont du bassin.

Finalement la question de la possibilité de caler le modèle sur la lave torrentielle du 14 juin 2017 et de faire ressortir un jeu de paramètres représentatif se pose. En ne se focalisant que sur l'analyse des niveaux de dépôts finaux atteints par les laves torrentielles simulées, il n'est pas possible de mettre en avant un jeu de paramètres unique car les coefficients de rugosité de Manning, la rhéologie et les débits de pointe n'ont pas de grande influence sur l'écoulement en aval de la plage de dépôts (influence par le barrage filtrant). En amont, il est montré que ce sont plutôt les paramètres rhéologiques qui vont influencer l'épaisseur des dépôts et les laves torrentielles les plus fluides semblent s'approcher d'avantage des valeurs de références observées. Toutefois, la différence de niveaux des dépôts n'excède pas le mètre. Pour une modélisation bidimensionnelle pour des fluides non-newtoniens, cette différence ne permet pas d'exclure avec certitude les autres paramètres rhéologiques.

L'analyse des niveaux maximums atteints par les laves réalisées à partir des données de laisse de crue permet davantage d'écarter certains paramètres rhéologiques (écartant le rapport de τ_c/ρ le plus faible et le plus élevé). Les profils en longs reflétant les dépôts finaux de toutes les laves torrentielles simulées permettent également d'appuyer le fait que ce sont les paramètres rhéologiques qui influencent avant tout les niveaux de dépôts.

Enfin, l'analyse des durées de traversée des laves torrentielles simulées permet d'écarter certains jeux de paramètres et d'en conforter d'autres. Dans ce travail, c'est la cohérence entre ces trois analyses qui permet de sélectionner les paramètres les plus représentatifs de la dynamique d'étalement et de dépôts de la lave torrentielle du 14 juin 2017. Ainsi, les laves torrentielles simulées les plus représentatives ont comme caractéristiques prépondérantes un rapport de τ_c/ρ de **0,75 ; 1** et **1,18 m².s⁻²**, dans un second ordre un débit de pointe de **87m³/s** (soit un volume de **13 000 m³**) et sans forcément avoir un coefficient de rugosité de Manning spécifique puisque ces derniers ne montrent aucune réelle influence sur les niveaux de dépôts.

CHAPITRE 4 : PHASE DE VALIDATION DU MODELE HEC-RAS 2D : LAVE TORRENTIELLE DU 1ER JUILLET 2019

4.1. Matériels et méthodes

4.1.1. Caractéristiques de la lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019

Depuis les travaux d'adaptation du barrage filtrant de 2018, la lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019 fut la deuxième lave torrentielle du torrent. Le premier évènement fut la lave torrentielle du 17 juin 2019. Cette première lave fut de très faible intensité, caractérisée de crue « transparente », les dépôts de cette lave torrentielle restent non significatifs (Rapport d'évènement, RTM/ONF Savoie, 2019).

La crue du 1^{er} juillet 2019 représente de ce fait le 1^{er} évènement d'importance notable depuis la modification du barrage filtrant en 2018. L'origine de la cette crue provient d'un orage violent situé sur le massif des Ecombre (Croix des Têtes) apparu vers 20h30-21h00. Le détecteur de lave torrentielle SFTRF (Société Française du Tunnel Routier du Fréjus) du torrent du Claret s'est déclenché à 22h13 le 1^{er} juillet 2019 donnant ainsi l'alerte d'un phénomène de lave torrentielle. Cette lave torrentielle provient principalement du Ravin du Milieu et de la combe Mouillée et s'est propagée jusqu'à la confluence avec l'Arc sans encombre notable, si ce n'est la déstabilisation de la passerelle métallique située sous le pont SNCF par arrachement de son appui amont (Rapport d'évènement, RTM/ONF Savoie, 2019).

De par l'heure tardive du passage de la lave torrentielle et donc de l'obscurité présente à ce moment-là, il existe peu de données sur l'évènement. En effet, et contrairement à la lave torrentielle du 14 juin 2017, il n'y a pas de vidéo ou de photo exploitable du passage de la lave, ni de signal géophone dû à un dysfonctionnement de la station. Les seules photos disponibles sont celles post-évènement, datant du lendemain, le 02 juillet 2019.

Les visites de terrain et les photos post-évènement réalisées par le RTM73 et l'INRAE, ont permis de constater que le barrage filtrant s'est mis en charge lors de l'évènement (constaté par les laisses de crue sur le dessus de la cuvette du barrage) avec un niveau maximal atteint par la lave à 697,1 masl (Cf. Figure 35). La quasi-totalité de la lave torrentielle est passée à travers le barrage filtrant. Quelques dépôts latéraux résiduels en amont du barrage de fermeture sont présents dans la plage de dépôts (Cf. Figure 36). Par photo-interprétation sommaire, les niveaux de ces dépôts latéraux sont estimés à environ 694,0 masl en rive droite et 693,0 masl en rive gauche (Cf. Figure 37). Il a été estimé, à dire d'expert par le service RTM Savoie, que la plage de dépôts a arrêté et stocké un volume de 1 000 à 2 000 m³, dont des blocs allant de 2 à 5 m³. Le volume total de matériaux mobilisés par la lave torrentielle de juillet 2019 a été estimé avec une forte incertitude à un volume entre 10 000 et 20 000 m³ (Rapport d'évènement, RTM/ONF Savoie, 2019).



Figure 35 : Laisses de crue apparentes sur le barrage filtrant et sur les digues latérales en enrochements (photo RTM73, 02/07/2019).



Figure 36 : Etat final de la plage de dépôts après le passage de la lave torrentielle du 1er juillet 2019 (photo RTM73, 02/07/2019).



Figure 37 : A gauche : dépôts latéraux résiduels en rive gauche après le passage de la lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019 (photo RTM73, 02/07/2019). A droite : dépôts latéraux résiduels en rive droite (photo RTM73, 02/07/2019).

4.1.2. Données d'entrée pour la lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019

4.1.2.1. Données topographiques

4.1.2.1.1. Etat antécédent

La lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019 est la première lave torrentielle conséquente depuis les travaux de la plage de dépôts et du changement de géométrie du barrage filtrant en octobre 2018 par le service RTM Savoie. Juste après ces travaux, un relevé topographique de récolement a été effectué donnant ainsi le niveau de base de la plage de dépôts. Ces données topographiques ont été supposées représentatives de l'état initial avant le passage de la lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019, et ont permis la création d'un nouveau MNT. L'emprise des données topographiques post curage représente simplement le fond du bassin de rétention. De ce fait, il a été nécessaire de fusionner ces données topographiques avec un autre MNT ayant dans son emprise les berges et les zones alentours. Comme pour l'évènement de 2017, il est repris ici pour la fusion des MNT, le MNT de 2001 puisque les berges et digues n'ont pas été impactées par la lave torrentielle. La Figure 38 permet de visualiser le profil en long du nouveau MNT créé par fusion reflétant ainsi l'état initial avant le passage de la lave du 1^{er} juillet 2019.

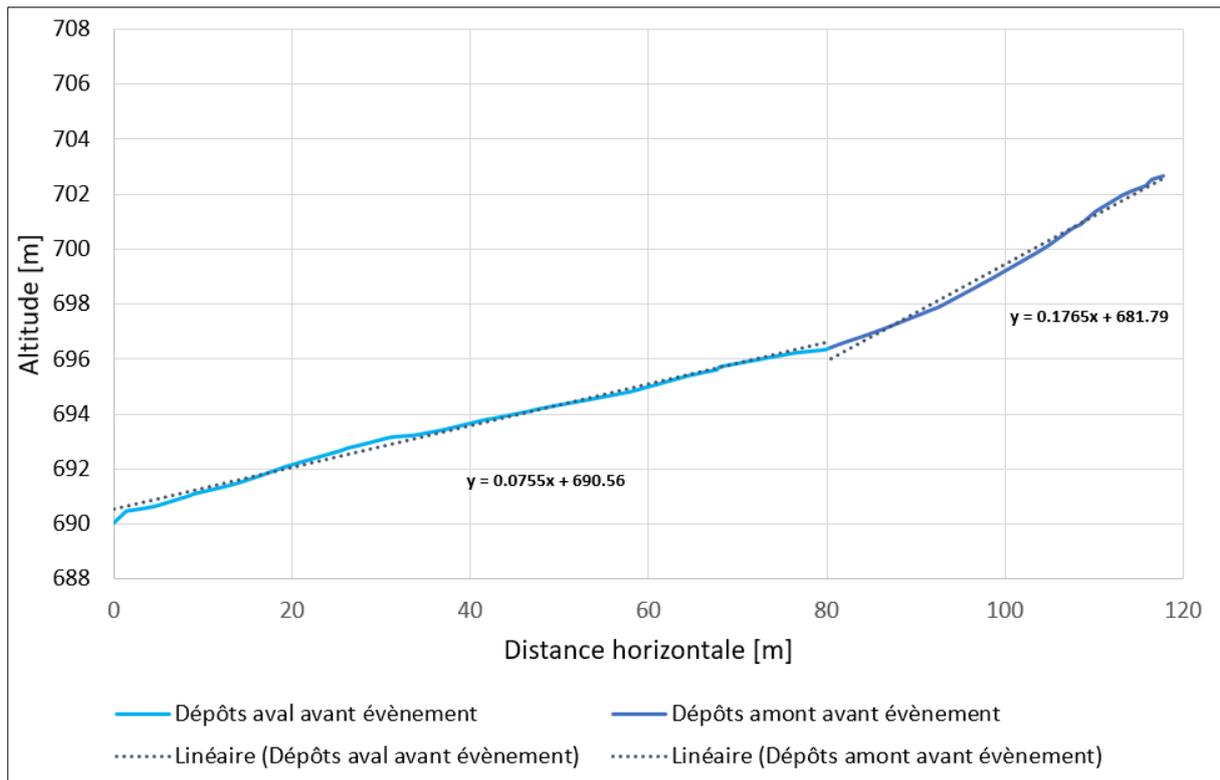


Figure 38 : Profil en long reflétant l'état initial, avant la lave torrentielle de 2019. Réalisation : Leborgne (2022), Sources des données : ONF/RTM73 : relevé topographique post récollement, octobre 2018.

4.1.2.1.2. Etat post crue

Aucun relevé topographique n'a été effectué suite à la lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019. Toutefois, il est constaté que la quasi-totalité de la lave est passée au travers du barrage de fermeture et que les seuls dépôts résiduels retenus dans le bassin de rétention sont des dépôts latéraux (Cf. Figure 37, partie 4.1.1.). De ce fait, il n'a pas été nécessaire de créer un MNT reflétant l'état final après le passage de la lave.

4.1.2.1.3. Coefficient de rugosité de Manning

Ici, il a été choisi de conserver une seule valeur de coefficient de rugosité de Manning précédemment expérimentée, soit un coefficient de **0,04**. En effet, les résultats de la phase de calibration ont montré que les coefficients de rugosité de Manning n'ont que très peu d'influence sur les niveaux de dépôts et qu'aucun d'entre eux ne peut être spécifiquement représentatif de la lave torrentielle de juin 2017.

4.1.2.2. Données hydrologiques

Comme pour le cas de la lave torrentielle du 14 juin 2017, il n'existe pas d'hydrogramme spécifique à la lave du 1^{er} juillet 2019. De ce fait, le débit de pointe a donc dû être déduit indirectement. Il a à nouveau été associé au volume total estimé de la lave torrentielle à partir de l'équation (1).

Le volume total mobilisé par la lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019 a été estimé avec une forte incertitude par les experts du service RTM Savoie entre 10 000 et 20 000 m³. Cette estimation vient du fait qu'il a été retrouvé dans le lit du torrent entre 6 000 et 8 000 m³ et qu'environ 5 000 m³ de matériaux grossiers étaient présents dans l'Arc, le volume de fraction fine qui avait déjà été lessivé par l'Arc étant inconnu. N'ayant pas de signal géophone disponible donnant la durée du passage de la lave, il a été fait l'hypothèse que la durée de l'évènement est la même que celle de la lave de 2017, soit 5 min, avec une montée au pic de 5s. L'hypothèse de trois hydrogrammes triangulaires est également conservée pour ce phénomène. Il a été choisi de sélectionner trois débits de pointe selon trois volumes différents. Les trois volumes expérimentaux sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Paramètres des volumes et débits de pointe (Qp) retenus pour les simulations HEC-RAS (lave torrentielle 2019). V1' à V2' : volume 1 à 2. Source : Leborgne (2022).

| | Volume [m3] | Qp [m3/s] |
|-----|----------------|--------------|
| V1' | 10 000 | 67 |
| V2' | 15 000 | 100 |
| V3' | 20 000 | 133 |

4.1.2.3. Données rhéologiques

Pour les données rhéologiques spécifiques à la lave torrentielle de 2019, et dans l'optique d'une validation du modèle, il a été choisi de reprendre les 3 paramètres rhéologiques les plus représentatifs de la lave torrentielle de 2017, afin de tester leur transposition à la lave de 2019. Il reste important d'avoir à l'esprit que les paramètres calés sur l'évènement de 2017 ne sont pas forcément transposables à l'évènement de 2019 en particulier concernant leur rhéologie (les deux laves torrentielles peuvent avoir quelques différences concernant leur viscosité, le front de lave plus ou moins marqué etc.). Après avoir analysé les résultats des simulations de calibrage avec la lave torrentielle du 14 juin 2017, trois rhéologies parmi les six expérimentées permettaient de reproduire de façon similaire la lave torrentielle de 2017, correspondant à un τ_c/ρ de 1,18 m².s⁻² ; 0,75 m².s⁻² et 1 m².s⁻² (jeux de paramètres R1, R5 et R6 respectivement). Toujours à des fins de comparaison, les ratios de K/τ_c initialement utilisés dans les premières simulations ont été conservés (Cf. Tableau 9).

Tableau 9 : Paramètres rhéologiques retenus pour les simulations HEC-RAS 2D. R1, R5 et R6 : jeux de paramètres rhéologiques 1, 5 et 6. Source : Leborgne (2022).

| | K/τ_c [s ⁿ] | τ_c/ρ [m ² .s ⁻²] | τ_c [Pa] | K [Pa.s ⁿ] |
|----|---------------------------------|---|------------------|---------------------------|
| R1 | 0.1 | 1.18 | 2360 | 236 |
| R5 | 0.2 | 0.75 | 1500 | 300 |
| R6 | 0.3 | 1 | 2000 | 600 |

L'indice d'écoulement « n » fixé à une valeur de **0,33** ainsi que la concentration volumétrique (Cv) à **60 %** sont conservés pour les simulations reflétant l'évènement de 2019.

4.1.2.4. Géométrie du barrage filtrant dans HEC-RAS 2D pour la lave de 2019

Pour rappel, la géométrie du barrage de fermeture a été modifiée lors des travaux de 2018. Dès lors, il s'agit ici de reproduire la géométrie du nouveau design, soit une seule et grande fente de 4 m de largeur sur 5 m de haut.

Le type de géométrie sélectionné dans HEC-RAS pour la lave torrentielle de 2019 reste le même que pour le barrage filtrant de la lave torrentielle du 14 juin 2017, mais en modifiant les dimensions de l'ouverture de la vanne pour celles du nouveau design. Ainsi, la géométrie retenue reste un barrage à vannes avec un déversoir de trop plein (« Gated Spillway and weir »). Il s'agit d'une vanne à levage vertical (« Sluice gates ») avec un déversoir à large crête (« Broad crested spillway/weir ») (Cf. exemple schématique de vanne, Figure 22). La Figure 39 est une capture d'écran du profil en travers du barrage filtrant tel qu'il a été construit dans le logiciel HEC-RAS pour la lave torrentielle du 1er juillet 2019.

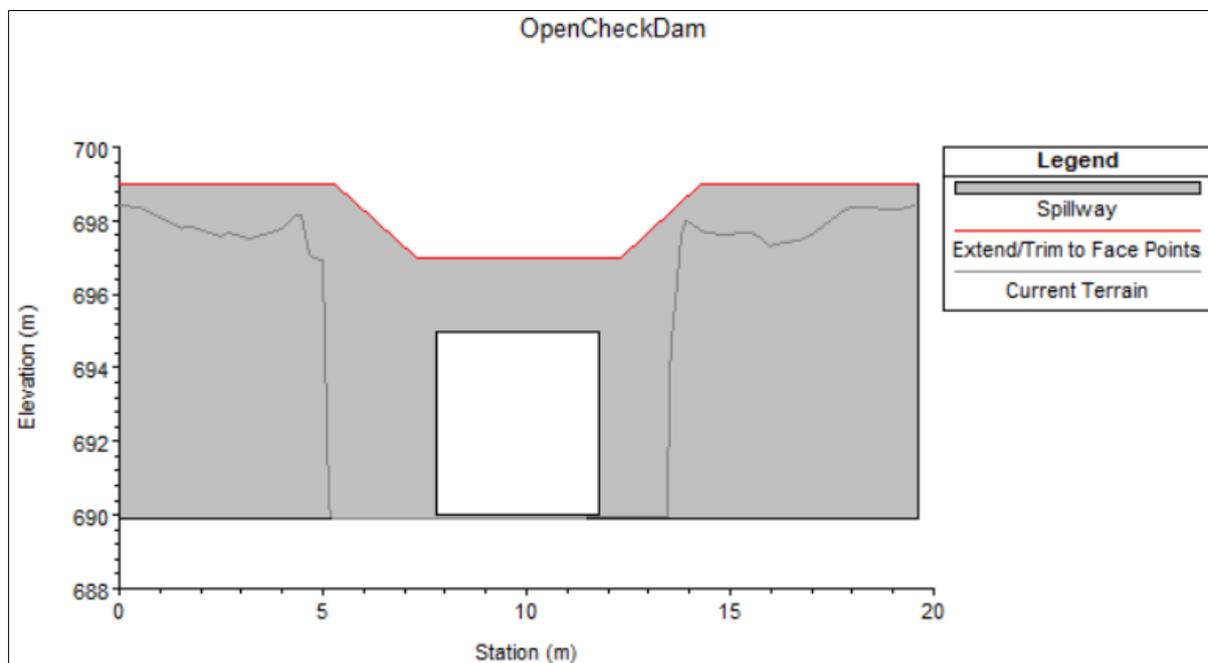


Figure 39 : Profil en travers représentant la géométrie du barrage filtrant dans le logiciel HEC-RAS 2D pour la lave torrentielle de 2019. Réalisation : Leborgne (2022).

4.1.2.5. Construction d'un modèle HEC-RAS 2D pour la lave de 2019

Ayant déjà un modèle HEC-RAS 2D construit pour les simulations de la lave torrentielle de 2017, ce dernier a été conservé mais une nouvelle « géométrie » (au sens du langage HEC-RAS) a été réalisée afin d'apporter les modifications spécifiques à l'évènement 2019, soit :

- L'implantation du nouveau MNT représentant l'état initial avant le passage de la lave torrentielle ;
- La suppression des 2 dents freineuses en amont de la plage de dépôts ;
- Le remplacement de la géométrie de l'ouvrage de fermeture ;
- La mise à jour du maillage.

Les nouveaux hydrogrammes sont par la suite intégrés au modèle dans les conditions aux limites amont « UpStream ». Pour les conditions aux limites aval « Down Stream », il avait

été choisi une condition de type « Normal Depth » pour la lave torrentielle de 2017. Après avoir réalisé les premières simulations pour 2019, il a été constaté que ce choix ne permettait pas l'écoulement naturel observé par la lave torrentielle de juillet 2019. La pente plus douce au niveau du canal d'EDF, générant une augmentation du niveau de la lave en aval du modèle avec la condition de type « Normal Depth », niveau élevé qui influençait les niveaux de dépôts dans le bassin de rétention. Pour les simulations de 2017, cette influence n'a pas été observée puisque les débits passant l'ouvrage étaient faibles et les niveaux influencés en aval n'atteignaient pas le niveau de base du pertuis central. Ainsi, afin de contrer ce problème et de ne plus avoir d'influence au niveau du barrage filtrant, il a été choisi d'imposer une loi de tarage à la condition aval du modèle (Rating Curve) calée en considérant une condition d'écoulement critique (nombre de Froude = 1).

De plus, le lissage du MNT précédemment réalisé pour le modèle de 2017, provoquait une trop forte rupture de pente qui laisse observer un effet de seuil bloquant une petite partie des matériaux influençant également les niveaux de dépôts de la plage de dépôts. Ainsi, sur le nouveau MNT il a été interpolé une pente régulière en continuité avec la pente en aval du barrage afin de palier à cet effet (modification visible sur la Figure 40 représentant le modèle HEC-RAS 2D construit pour reproduire numériquement la lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019).

Les trois types de paramètres rhéologiques sélectionnés sont introduits (R1, R5, R6). Le zonage du coefficient de rugosité de Manning est préservé avec la couche CorineLandCover. Le temps de simulation des laves torrentielles reste également le même que précédemment, soit une durée de 25 min afin de permettre d'observer l'auto-curage de la plage de dépôts.

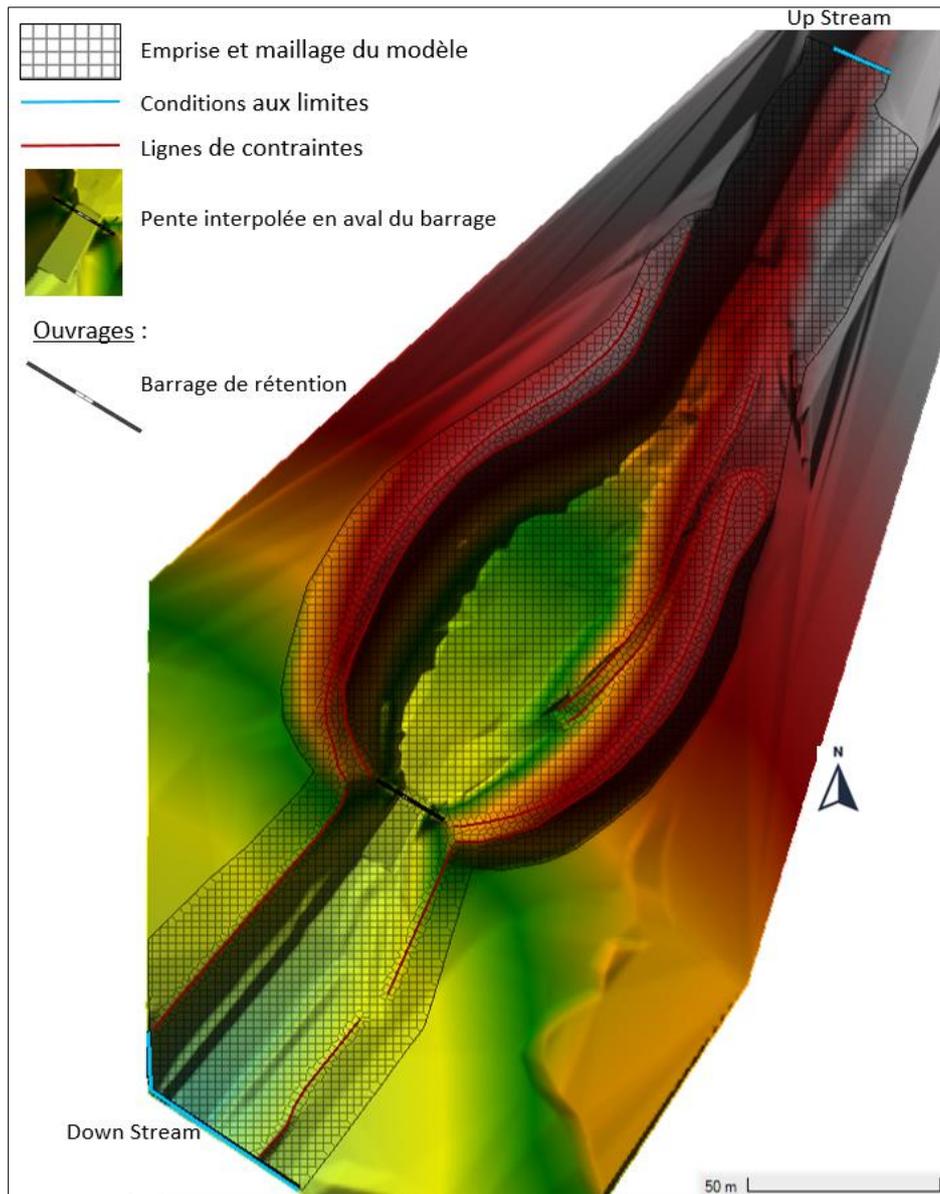


Figure 40 : Modèle HEC-RAS 2D construit sur fond topographique modifié (lave torrentielle 2019).
Réalisation : Leborgne (2022).

4.2. Résultats

Les résultats des simulations réalisées avec un seul coefficient de rugosité de Manning (0.04), les trois débits de pointe et les 6 jeux de paramètres rhéologiques retenus sont représentés sous forme graphique. Pour la lave torrentielle du 1er juillet 2019, il est question d'analyser l'influence des débits et des différentes rhéologies des laves torrentielles notamment sur les niveaux des **dépôts maximums** ainsi que les **dépôts finaux** atteints par les différentes laves torrentielles simulées au droit du **barrage filtrant**. La **répartition spéciale des dépôts résiduels** est aussi un critère d'analyse dans le bassin de rétention puisqu'il a été observé des dépôts latéraux juste en amont du barrage de fermeture.

Les valeurs de niveaux des dépôts atteints par les laves torrentielles simulées sont relevées au droit du barrage filtrant (distance horizontale : 0 m). En effet, contrairement aux simulations précédentes de 2017, il n'est pas observé ici une chute des profils en long qui mettait en doute les valeurs simulées au pied du barrage.

4.2.1. Niveaux des dépôts maximums

Les niveaux maximums atteints par les 9 laves torrentielles simulées sont tous inférieurs au niveau maximum de référence (697,1 masl) (Cf. Figure 41). Les niveaux maximums simulés se situent entre un minimum de 692,54 masl pour la lave torrentielle avec un débit de 67 m³/s et un rapport de τ_c/ρ de 1,18 m².s⁻² et un maximum de 694,63 masl pour un débit de 133 m³/s et un rapport de τ_c/ρ de 0,75 m².s⁻². Ainsi, aucune mise en charge du barrage n'est simulée. Pour ces résultats, ce sont, comme pour l'autre cas test, les laves les moins visqueuses mais avec le plus fort débit qui donnent des niveaux de lave atteints les plus importants.

Les niveaux atteints vont être influencés au premier ordre par les débits des laves visibles sur la figure par les 3 couleurs principales (vert : 133 m³/s ; rouge : 100 m³/s et bleu : 67 m³/s) avec une différence maximale de 1,89 m.

Les paramètres rhéologiques n'influencent que très peu les niveaux maximums (différentes nuances pour chaque couleur) avec une différence maximale de 0,32 m.

Une explication hypothétique est proposée dans la partie 4.3. *Analyses et interprétations* sur le fait que ces niveaux maximums simulés restent bien inférieurs au niveau maximum atteint par la lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019.

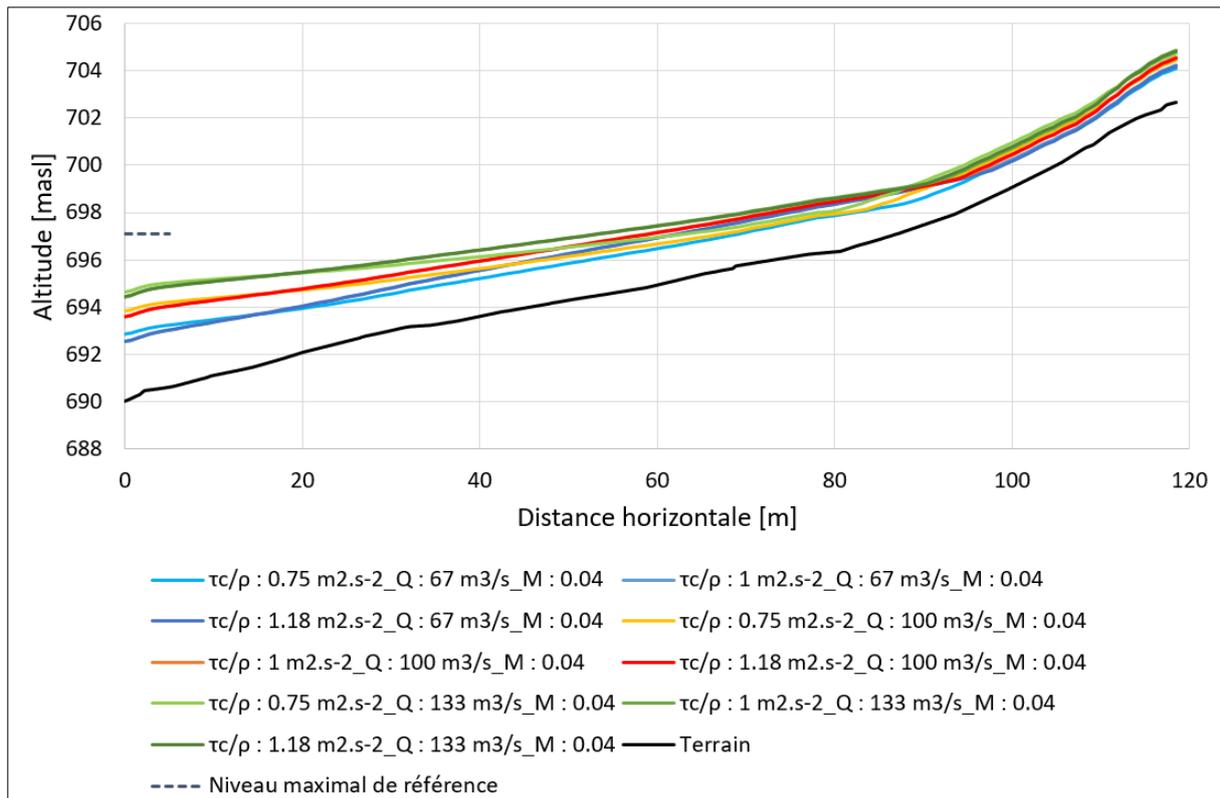


Figure 41 : Profils en long avec les niveaux maximums atteints par les 9 simulations de laves torrentielles avec un coefficient de rugosité de Manning commun de 0.04. Réalisation : Leborgne (2022).

4.2.2. Niveaux des dépôts finaux

Il peut être observé sur la Figure 42 que les niveaux finaux atteints par les différentes laves simulées sont plutôt proches du niveau de référence qui est situé au pied du barrage à 690 masl. Les valeurs des simulations sont prises au niveau du barrage filtrant (distance horizontale = 0 m sur la Figure 42) et vont d'un minimum de 690.17 masl à un maximum de 690.54 masl, ce qui reste tout à fait acceptable pour de la modélisation 2D d'écoulement non Newtonien. Ces niveaux sont influencés principalement par les paramètres rhéologiques des laves (regroupement de tous les profils en long simulés en 3 principaux fuseaux de profils visibles sur la Figure 42). Les volumes et donc les débits n'ont aucune influence sur les niveaux des dépôts. En effet, les valeurs obtenues pour des laves avec la même rhéologie mais avec les 3 débits différents sont exactement les mêmes.

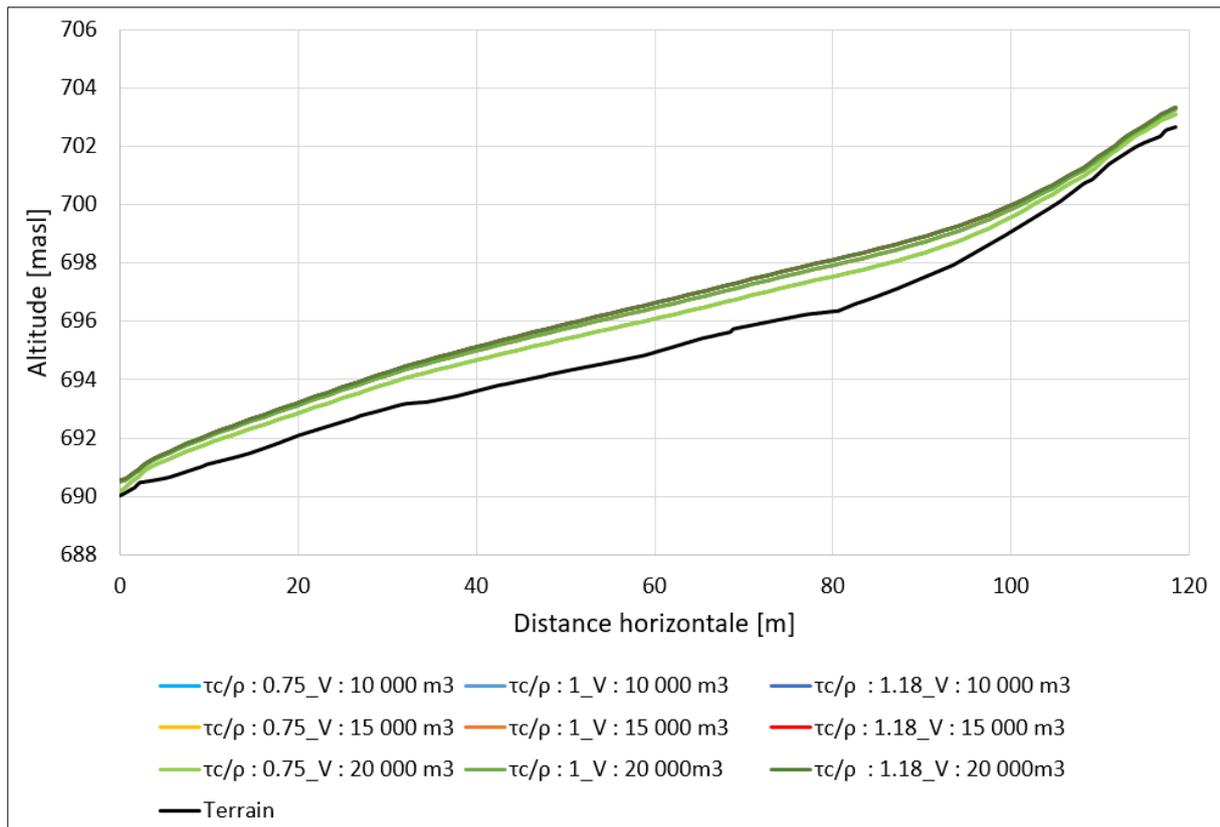


Figure 42 : Profils en long avec les niveaux finaux atteints par les 9 simulations de laves torrentielles avec un coefficient de rugosité de Manning commun de 0.04. Réalisation : Leborgne (2022).

4.2.3. Dépôts latéraux

Aucun dépôt latéral n'a été modélisé par le modèle HEC-RAS 2D au bout des 25 min de simulation. Toutes les laves torrentielles simulées montrent un dépôt de matériaux uniforme sur toute la largeur de la plage de dépôts (Cf. exemple, Figure 43). Une même explication hypothétique de ce constat est proposée dans la partie suivante.

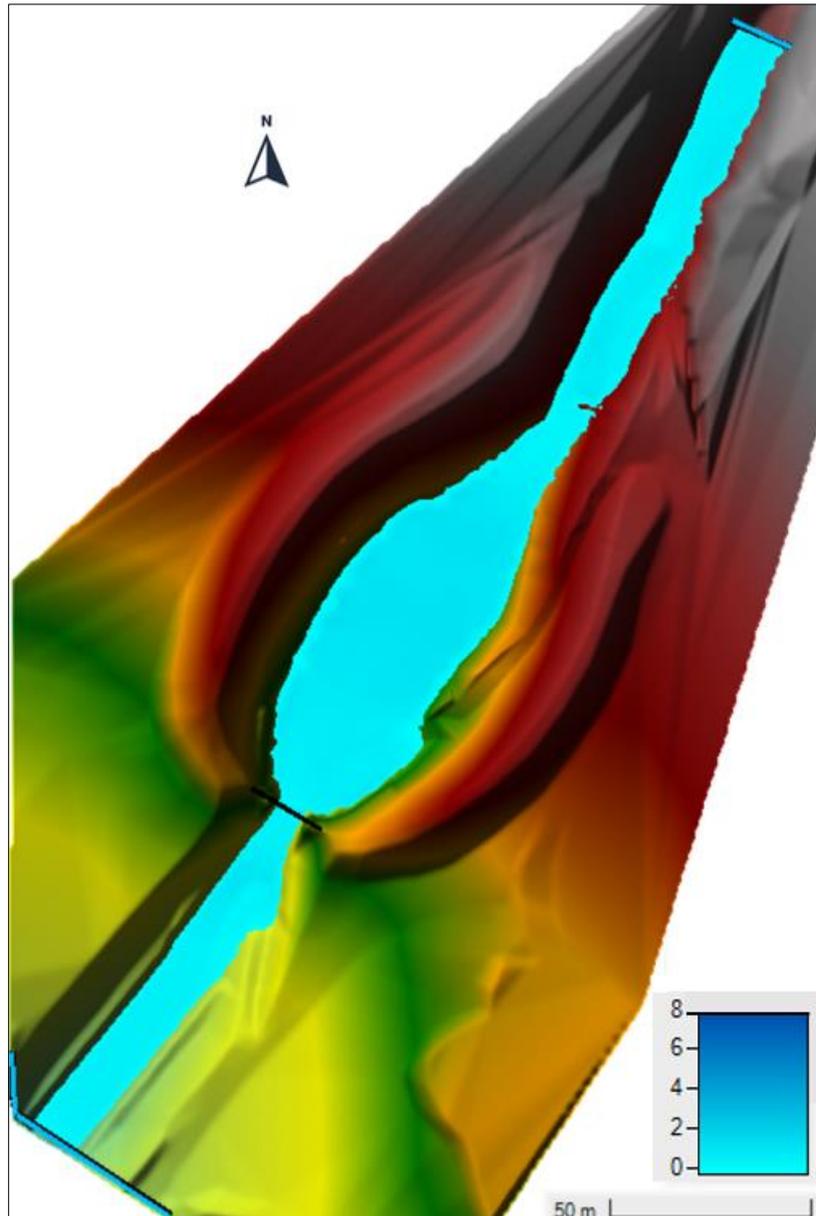


Figure 43 : Exemple de la répartition uniforme des dépôts finaux de la lave torrentielle avec un coefficient de rugosité de Manning de 0.04, un débit de 133 m³/s et un τ_c/ρ de 1,18 m².s⁻² au bout de 25 min de simulation. Réalisation : Leborgne (2022).

4.3. Analyses et interprétations

Comme vu précédemment les niveaux maximums des laves torrentielles simulées ne parviennent pas à atteindre le niveau de référence et il n'est pas non plus possible d'observer des dépôts latéraux en fin de simulation. L'hypothèse d'une **obstruction temporaire** du barrage filtrant par des blocs peut être envisagée.

Une modélisation exploratoire 0D (modèle réservoir de Piton, Goodwin, *et al.*, 2022) a été menée afin d'estimer le volume (et donc le débit selon notre hypothèse de durée de 5 min et d'hydrogramme triangulaire) avec lequel la lave torrentielle atteindrait le niveau maximum de référence (soit 697,1 masl) connu grâce aux laisses de crues sur le barrage filtrant. Cette

modélisation a donné un volume de 46 000 m³. Ce volume semble très exagéré par rapport aux estimations faites par les experts du RTM Savoie (entre 10 000 et 20 000 m³). Ces 46 000 m³ représenteraient toutefois le volume nécessaire pour la lave afin d'atteindre les 697,10 masl **sans obstruction** du barrage, mettant alors en avant une sous-estimation de la gamme de volume testé. Si l'hypothèse d'une obstruction temporaire du barrage de fermeture est faite, un volume moins conséquent pourrait alors permettre d'atteindre ce niveau maximum par accumulation et remplissage de la plage de dépôts. Cette obstruction pourrait également expliquer en partie les dépôts résiduels latéraux observés après la lave de 2019 et non observables par les simulations 2D. Les niveaux de dépôts finaux des simulations restent cohérents puisqu'une fois l'obstruction débloquée, l'auto-curage reprendrait et purgerait le bassin de rétention jusqu'à retrouver un niveau à la base du barrage soit à 690 masl, résultats retrouvés par les simulations.

Avec HEC-RAS il serait possible de modéliser cette obstruction, pas de façon automatique mais de façon manuelle et programmée (ex : l'ouverture et la fermeture de la vanne verticale à deux instants donnés, fixés par le modélisateur). Cependant, cela n'est actuellement pas possible rigoureusement puisqu'il n'existe aucune donnée disponible sur le moment où il y aurait le début d'une obstruction et le moment où elle se serait débloquée. Si ce phénomène peut s'envisager, il sera question de simplement reproduire une obstruction connue et non pas de pouvoir prédire ce genre de phénomène.

Un nouveau géophone complémentaire implanté en aval du barrage filtrant et un capteur à ultrason suspendu en face de la fente à 2 m en amont du barrage à hauteur des ailes du barrage ont été mis en place en Novembre 2020. Depuis, ces derniers permettent notamment de connaître l'activité de transport solide et d'évaluer l'évolution du niveau de l'écoulement dans la plage de dépôts au cours du temps. Ils permettraient ainsi de détecter s'il y a une obstruction du barrage filtrant.

CONCLUSION

En comparaison avec la modélisation numérique fluviale, dont les caractéristiques sont raisonnablement décrites par la théorie des fluides newtoniens et est couramment utilisée en ingénierie, la modélisation des laves torrentielles en tant que fluides non-newtoniens reste marginale, il existe peu d'utilisateurs de ces outils en ingénierie dont persistent de fortes incertitudes. Quelques travaux de recherche effectués sur la modélisation de la dynamique d'étalement des laves torrentielles et de leurs dépôts existent, mais rares sont ceux calés sur des événements de terrain avec suffisamment de données disponibles. Ces modèles 2D restent toutefois intéressants dans de nombreuses situations, en apportant par exemple une aide précieuse dans l'analyse des systèmes torrentielles. Dans un objectif global de recherche d'amélioration des capacités de modélisation de laves torrentielles avec des outils 2D, cette étude a pour objectif de confronter les résultats de calcul du modèle numérique HEC-RAS 2D sur la dynamique d'étalement et de dépôts de laves torrentielles dans un bassin de rétention, à des événements réels connus et documentés : lave torrentielle du 14 juin 2017 et lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019.

Une méthodologie sur l'analyse et la critique des données d'entrée a permis la modification de certaines données notamment concernant les données topographiques reflétant les états avant et après le passage des laves torrentielles étudiées. Des hydrogrammes ont été conceptualisés et, au vu des premiers résultats, la gamme des paramètres rhéologiques a été ajustée après préconisation du RTM. Une attention doit également être portée aux données d'entrée, notamment à leur incertitude et leur degré de représentation de l'évènement réel. La conception du modèle, le choix du type de géométrie de l'ouvrage ainsi que toutes les modifications nécessaires à son adaptation doivent faire l'objet de réflexion afin de ne pas s'éloigner des conditions initiales du terrain d'étude.

Concernant la phase de calage réalisée à partir de la lave torrentielle de 2017, il a été observé une bonne concordance entre les simulations et le phénomène observé concernant les niveaux de dépôts maximums et finaux ainsi que la durée de traversée des laves simulées. Il a été relevé que les paramètres rhéologiques ont une influence de premier ordre sur les niveaux des dépôts en amont de la plage de dépôts. En aval, c'est la singularité de l'ouvrage qui influence l'écoulement. Dans un second ordre se sont les débits des laves torrentielles qui vont influencer l'épaisseur de la lave et dans un troisième temps les coefficients de rugosité de Manning qui dans ce travail n'ont pas montré de réelle influence. C'est avant tout la complémentarité des différentes analyses menées pour le calage du modèle qui ont permis de faire ressortir trois paramètres rhéologiques reflétant le mieux la dynamique d'étalement et de dépôts de la lave torrentielle du 14 juin 2017.

La phase de validation du modèle HEC-RAS 2D à partir de la lave torrentielle du 1^{er} juillet 2019 et des jeux de paramètres les plus représentatifs de l'évènement précédent n'a pas abouti à des résultats très probants. Les résultats de niveaux maximums atteints par les laves simulées, bien inférieurs au niveau maximal atteint en réalité par la lave de 2019, laissent à penser qu'il s'est vraisemblablement produit une obstruction temporaire du barrage filtrant qui aurait permis une élévation temporaire du niveau d'écoulement dans la plage de dépôts, suffisamment pour qu'il y ait une mise en charge du barrage. N'ayant aucune information sur

cette hypothèse pour cette lave torrentielle, il n'est donc pas possible de reproduire ce phénomène au travers de la modélisation HEC-RAS. De plus, il est bon de rappeler que d'un évènement à l'autre, les paramètres constitutifs d'une lave torrentielle varient, et il persiste ici des incertitudes sur le volume réel de la lave torrentielle de 2019.

Les nouveaux dispositifs d'observation mis en place en novembre 2020 en aval du bassin de rétention du torrent du Claret permettent aujourd'hui d'être dans la capacité de savoir si un phénomène d'obstruction temporaire se produit. Très récemment, le 18 août 2022 vers les 18h30, une lave torrentielle s'est produite dans le torrent du Claret. Plus de 2 100 images ont été prises par la caméra, les géophones ainsi que le capteur de niveau situé en amont du barrage permettent d'avoir de nombreuses données. Il s'agit probablement de la deuxième observation de remplissage et de vidange enregistrée de la plage de dépôts du torrent du Claret. Ainsi, une perspective de ce travail serait d'étudier ce dernier phénomène de lave torrentielle produite sur le torrent du Claret, afin d'accomplir la validation du modèle.

Références

- Ancey C., 1999. Note de synthèse sur la rhéologie des laves torrentielles. Thèse, Irstea (hal-02578606), 35 pages.
- Bardou E., 2002. Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin. Thèse, Lausanne : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 382 pages.
- Chahrour N., 2021. Modélisation de la détérioration et optimisation de la maintenance fondée sur la physique à l'aide de réseaux de Petri stochastiques : application aux ouvrages de protection en montagne. Thèse, Grenoble: Université Grenoble Alpes, 259 pages.
- Chambon G., et Laigle D., 2013 : *Torrents et rivières de montagne. Dynamique et aménagement. Chapitre 4 : Les laves torrentielles*. Quae, Savoir-faire, 68 pages.
- Coussot P., 1992. Rhéologie des boues et des laves torrentielles. Etude de dispersions et de suspensions concentrées. Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble, 420 pages.
- Coussot P., 1994. Rhéologie des laves torrentielles. *La Houille Blanche* 80 (3): pages : 32-37. <https://doi.org/10.1051/lhb/1994040>.
- Coussot P., 1996 : *Les laves torrentielles. Connaissances à l'usage du praticien*. Série Etudes du Cemagref, Equipements pour l'eau et l'environnement, n° 23. 177 pages.
- Fontaine F., 2017. Descriptif technique : Dispositifs de prise de vue sur les plages de dépôts. Projet RISBA. Document technique, Version n°4. Irtea. 9 pages.
- Gary W. B., 2021. HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 6.0. Computer Program Documentation CPD-69. *Hydrologic Engineering Center*. 546 pages.
- Gibson S., and Sanchez A., 2020. HEC-RAS Mud and Debris Flow. Computer Program Documentation Version 6.0. US Army Corps of Engineers. 47 pages.
- Givry M., et Peteuil C., 2011. Le guide : Construire en montagne. La prise en compte du risque torrentiel. *Ministre de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement*. 125 pages.
- Hugerot T., 2020. Trajectoires socio-environnementales des cônes de déjection torrentiels en vallée de Maurienne depuis la fin du Petit Âge Glaciaire. Thèse, Géographie, Université de Savoie Mont Blanc. Tel-03204526f.
- Jakob M., Davidson S., Bullard G., Busslinger M., Collier-Pandya B., Grover P., and Lau C-A., 2022. Debris-Flood Hazard Assessments in Steep Streams. *Water Resources Research* 58 (4), 31 pages. <https://doi.org/10.1029/2021WR030907>.
- Jakob M., and Hungr O., 2005 : *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer-Praxis Books in Geophysical Sciences. Berlin Heidelberg: Springer, 795 pages.
- Johnson A.M., 1970. Physical Processes in Geology. Freeman, Cooper and Compagny, San Francisco, 577 pages.
- Laigle D., 2008. La modélisation des écoulements gravitaires rapides: application à la gestion du risque laves torrentielles. Mémoire, Sciences de l'environnement. Habitation à diriger des recherches, spécialité mécanique, Institut National Polytechnique de Grenoble, tel-02590505, 151 pages.
- Laigle D., Hector A.-F., Hübl J. and Rickenmann D., 2003. Comparison of numerical simulation of muddy debris flow spreading to records of real events. In proceedings of the 3rd International Conference "Debris-Flow Hazards Mitigation", Davos, Switzerland, 10-12 September 2003, Rickenmann D. & Chen C.L. (Eds.), Millpress: 635-646.

- Laigle, D., Hector A.-F., Hübl J., and Rickenmann D., 2006. Confrontation de la simulation numérique de l'étalement de laves torrentielles boueuses à des observations d'événements réels. *La Houille Blanche* 92:6, 105-112, DOI: 10.1051/lhb:2006108. <https://doi.org/10.1051/lhb:2006108>.
- Laigle D., et Peteuil C., 2010. Analyse de l'aléa « lave torrentielle » sur le cône de déjection du torrent du Rioulong (Hautes-Pyrénées) : une approche par scénarios. *Sciences Eaux & Territoires* Numéro 2 (2): 152 pages. <https://doi.org/10.3917/set.002.0152>.
- Marchi L., Cavalli M., et D'Agostino V., 2010. Hydrogeomorphic Processes and Torrent Control Works on a Large Alluvial Fan in the Eastern Italian Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10 (3): 547-558. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-547-2010>.
- Meunier M., 1991 : *Eléments d'hydraulique torrentielle*. Quae, Paris. n°1, 286 pages.
- O'Brien J. S., Julien P. Y., and Fullerton W. T., 1993. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of hydraulic engineering*, 119(2), 244-261. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1993\)119:2\(244\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244)).
- Piton G., Fontaine F., Bellot H., Liébault F., Bel C., Recking A., and Hugerot T., 2018. Direct Field Observations of Massive Bedload and Debris-Flow Depositions in Open Check Dams. Édité par Paquier A. et Rivière N. *E3S Web of Conferences* 40: 03003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184003003>.
- Recking A., Richard D., et Degoutte G., 2013 : *Torrents et rivières de montagne. Dynamique et aménagement*. Quae. ed, Savoir-faire, 334 pages.
- Remaître A., 2006. Morphologie et dynamique des laves torrentielles: Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud). Thèse, Géomorphologie, Université de Caen, 488 pages. tel-00119737v2. <https://doi.org/tel-00119737v2>.
- Rickenmann D., 2016. Debris-Flow Hazard Assessment and Methods Applied in Engineering Practice. *Revue*, 9 (3): 11 pages.
- RTM/ONF Savoie., 2013. Etude de bassin versant Torrent du Claret. V5, 118 pages.
- RTM/ONF Savoie., 2019. Rapport d'évènement : Laves torrentielles des torrents des Encombres (St-Martin, Rieu Sec, Claret et St Julien) en date du 17/06 et 01/07/19. Chambéry, 14 pages.
- Schaer N., 2018. Modélisation des écoulements à surface libre de fluides non-newtoniens. Thèse, Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie : Strasbourg, 349 pages.
- Sobol P., 2016. Etude du risque torrentiel sur le Manival. Historique et performance du système de protection vis-à-vis de la protection des enjeux.
- Vah M., 2019. Transport sédimentaire induit par un courant : effet du disponible sédimentaire. Thèse, Mécanique des fluides. Université de Normandie. NNT : 2019NORMLH14, tel-02310703. 180 pages. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02310703>.

Table des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Représentation schématique du transport par charriage. Source : (Vah, 2019). | 11 |
| Figure 2 : Représentation schématique des entités morphologiques d'une bouffée de lave torrentielle. Source : Bardou (2002), Modifications et traduction : Leborgne (2022). | 12 |
| Figure 3 : Représentation graphique du modèle Herschel-Bulkley. Réalisation : Leborgne (2022). | 14 |
| Figure 4 : Fenêtre des méthodes et paramètres non-newtoniens du logiciel HEC-RAS. | 20 |
| Figure 5 : Localisation de la commune de Saint-Julien-Mont-Denis dans le département de la Savoie. Sources : GEOATLAS (2009). Modifications : Leborgne (2022). | 22 |
| Figure 6 : Bassin versant du torrent du Claret et ses quatre sous-bassins. Source figure : GoogleEarth ; Source données : Etude de Bassin Versant, RTM/ONF Savoie, (2013). | 22 |
| Figure 7 : Etapes et localisation des principaux travaux RTM dans le bassin versant de Claret. Les étapes de la restauration sont figurées par les lettres (a) à (g). Source : Hugerot (2020). | 24 |
| Figure 8 : Ouvrages de protection torrentielle composant le dispositif « plage de dépôts » du torrent du Claret. Réalisation : Leborgne (2022), Données : RTM73. | 25 |
| Figure 9 : A gauche : Dimensions du barrage de fermeture de la plage de dépôts du Claret avant les travaux de 2018. Source : Chahrour (2021). A droite : Photo du barrage de fermeture au 01 mars 2013. Source : RTM/ONF Savoie (2013). | 27 |
| Figure 10 : A gauche : Dimensions du barrage de fermeture de la plage de dépôts du Claret après les travaux de 2018 (Source : Chahrour (2021)). A droite : Photo du barrage de fermeture au 02 juillet 2019 (Source : INRAE). | 28 |
| Figure 11 : Intensité et cumul de pluie du 14 juin 2017. Source : INRAE. | 30 |
| Figure 12 : Photos de caméra et croquis de synthèse clés des dépôts de la lave torrentielle : (a) T=20 s après que les coulées de débris aient atteint l'entrée, quelques blocs rocheux se sont arrêtés derrière les dents freineuses ; (b) T=25 s, tout le front granulaire de la coulée de débris a été déposé ; (c) T=53 s, la plupart du flux passait en rive droite du dépôt, s'étendant rapidement sur toute la largeur du bassin ; (d) T=76 s, la plupart du flux passe toujours en rive droite, en aval un flux de recirculation s'est déposé et est apparu sur la caméra car les flux ont atteint le barrage filtrant, bouchant la fente inférieure et remplissant la partie aval du bassin. Cette recirculation a remblayé le bassin jusqu'à ce que l'épaisseur du dépôt atteigne la fente supérieure. Source : Piton et al. (2018), Traduction française : Leborgne (2022). | 32 |
| Figure 13 : Synthèse de l'évènement en 3 situations : (1) Dépôts homogènes dans la plage de dépôts et obstruction de la fente inférieure du barrage ; (2) remplissage et auto-curage par la fente centrale avec une profondeur maximale atteinte par la lave de 5,1m ; (3) situation après crue avec une profondeur des dépôts de 4m (par rapport à la base de la fente centrale). Sources : Piton et al. (2018), Modifications et traduction française : Leborgne (2022). | 35 |
| Figure 14 : Nouveau profil en long synthétique avant la lave torrentielle de 2017. Réalisation : Leborgne (2022). | 37 |
| Figure 15 : Sous-estimation des dépôts du MNT 2001 par rapport aux nouveaux niveaux de dépôts déterminés. Réalisation : Leborgne (2022). | 38 |
| Figure 16 : Nouveau profil en long synthétique post évènement. Réalisation : Leborgne (2022). | 39 |
| Figure 17 : Comparaison du profil en long du MNT de septembre 2018 avec le profil en long modifié. Source : Leborgne (2022). | 40 |
| Figure 18 : Comparaison des profils en long modifiés avant et après évènement. Source : Leborgne (2022). | 40 |

| | |
|--|----|
| Figure 19 : Couche CorineLandCover importée dans HEC-RAS. ID : 1 : lit du torrent (Manning = 0,04 / 0,05 / 0,08) ; 2 : présence d'arbres (Manning = 0,18) ; 3 et 4 : piste et route (Manning = 0,025) ; 5 : terrains agricoles (Manning = 0,04). Réalisation : Leborgne (2022). | 42 |
| Figure 20 : Signal géophone enregistré lors du passage de la lave du 14 juin 2017. Source : Données RTM et INRAE (2017). | 43 |
| Figure 21 : Hydrogramme triangulaire pour un débit de pointe (Q_p) de 73 m ³ /s, soit un volume de 11 000 m ³ | 44 |
| Figure 22 : Exemple de vannes à levage vertical (« Sluice gates »). Z_U : élévation de la ligne de niveau de l'énergie amont ; Z_D : élévation de la surface de l'eau en aval ; Z_{sp} : élévation de la crête du déversoir à travers la vanne ; B : hauteur de l'ouverture de la vanne [m]. Source : Gary W. (2021). | 47 |
| Figure 23 : Profil en travers représentant la géométrie du barrage filtrant dans le logiciel HEC-RAS 2D pour la lave torrentielle de 2017. Réalisation : Leborgne (2022). | 47 |
| Figure 24 : Modèle HEC-RAS 2D construit sur fond topographique modifié (lave torrentielle 2017). Réalisation : Leborgne (2022). | 49 |
| Figure 25 : Comparaison de l'analyse schématique par Piton, et al., (2018) avec le cas de la modélisation 2D par HEC-RAS pour une lave torrentielle comprenant un $\tau_c/\rho = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; un débit = 87 m ³ /s et un coefficient de Manning = 0,08. (a) : Similitudes observées quant à l'effet séparateur des dents freineuses mais absence de la modélisation du dépôt du front granulaire au niveau des dents. (b) : Observation d'un flux plus important côté rive gauche, à l'inverse de l'analyse schématique. | 50 |
| Figure 26 : Exemple de profil en long des dépôts finaux montrant la chute du profil au droit du barrage filtrant. Source : Leborgne (2022). | 53 |
| Figure 27 : Niveaux maximums atteints par les laves torrentielles au droit du barrage filtrant pour les simulations HEC-RAS 2D, lave torrentielle 2017. Réalisation : Leborgne (2002). | 55 |
| Figure 28 : Niveaux finaux des dépôts au droit du barrage filtrant pour les simulations HEC-RAS 2D, lave torrentielle 2017. Réalisation : Leborgne (2002). | 56 |
| Figure 29 : Niveaux maximums atteints par les laves torrentielles au droit de la dent n°1 pour les simulations HEC-RAS 2D, lave torrentielle 2017. Réalisation : Leborgne (2002). | 57 |
| Figure 30 : Niveaux finaux des dépôts au droit de la dent n°1 pour les simulations HEC-RAS 2D, lave torrentielle 2017. Réalisation : Leborgne (2002). | 58 |
| Figure 31 : Profils en long des 54 laves torrentielles simulées représentant les dépôts finaux. Profils en long regroupés en six ensembles. Réalisation : Leborgne (2022). | 59 |
| Figure 32 : Profils en long de 4 laves torrentielles simulées avec le même coefficient de rugosité de Manning (0.04), le même rapport de τ_c/ρ (1.33 m ² .s ⁻²) mais des débits différents (60, 73 et 80 m ³ /s). Réalisation : Leborgne (2022). | 59 |
| Figure 33 : Profils en long de 6 laves torrentielles simulées avec le même coefficient de rugosité de Manning (0.04), le même débit (73 m ³ /s) mais des rapports de τ_c/ρ différents (0.5, 0.75, 1, 1.18, 1.33 et 1.43 m ² .s ⁻²). Réalisation : Leborgne (2022). | 60 |
| Figure 34 : Temps de traversée des 54 laves torrentielles simulées. Réalisation : Leborgne (2022). .. | 61 |
| Figure 35 : Laisses de crue apparentes sur le barrage filtrant et sur les digues latérales en enrochements (photo RTM73, 02/07/2019). | 64 |
| Figure 36 : Etat final de la plage de dépôts après le passage de la lave torrentielle du 1er juillet 2019 (photo RTM73, 02/07/2019). | 64 |
| Figure 37 : A gauche : dépôts latéraux résiduels en rive gauche après le passage de la lave torrentielle du 1 ^{er} juillet 2019 (photo RTM73, 02/07/2019). A droite : dépôts latéraux résiduels en rive droite (photo RTM73, 02/07/2019). | 65 |
| Figure 38 : Profil en long reflétant l'état initial, avant la lave torrentielle de 2019. Réalisation : Leborgne (2022), Sources des données : ONF/RTM73 : relevé topographique post récollement, octobre 2018. 66 | 66 |

| | |
|--|----|
| Figure 39 : Profil en travers représentant la géométrie du barrage filtrant dans le logiciel HEC-RAS 2D pour la lave torrentielle de 2019. Réalisation : Leborgne (2022)..... | 68 |
| Figure 40 : Modèle HEC-RAS 2D construit sur fond topographique modifié (lave torrentielle 2019). Réalisation : Leborgne (2022)..... | 70 |
| Figure 41 : Profils en long avec les niveaux maximums atteints par les 9 simulations de laves torrentielles avec un coefficient de rugosité de Manning commun de 0.04. Réalisation : Leborgne (2022). | 72 |
| Figure 42 : Profils en long avec les niveaux finaux atteints par les 9 simulations de laves torrentielles avec un coefficient de rugosité de Manning commun de 0.04. Réalisation : Leborgne (2022)..... | 73 |
| Figure 43 : Exemple de la répartition uniforme des dépôts finaux de la lave torrentielle avec un coefficient de rugosité de Manning de 0.04, un débit de 133 m ³ /s et un τ_c/ρ de 1,18 m ² .s ⁻² au bout de 25 min de simulation. Réalisation : Leborgne (2022)..... | 74 |

Table des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Classification de Ancey (1999) des laves torrentielles en 3 grandes familles. Source : Chambon et Laigle (2013). | 13 |
| Tableau 2 : Valeurs typiques des paramètres rhéologiques de Herschel-Bulkley pour les laves torrentielles boueuses, d'après Coussot (1996). Source : Chambon et Laigle (2013). | 15 |
| Tableau 3 : Caractéristiques spécifiques du bassin versant du Claret. Source : Etude de Bassin Versant, RTM/ONF Savoie (2013)..... | 23 |
| Tableau 4 : Principales étapes et durées dans le piégeage de la lave torrentielle observée dans la Figure 13. Sources : Piton et al. (2018), traduction française : Leborgne (2022)..... | 34 |
| Tableau 5 : Coefficients de Manning retenus pour les simulations reflétant la rugosité du lit du torrent et du fond de la plage de dépôts. M1 à M3 : coefficient de Manning 1 à 3. Source : Leborgne (2022). | 42 |
| Tableau 6 : Paramètres des volumes et débits de pointe (Qp) retenus pour les simulations HEC-RAS (lave torrentielle 2017) . V1 à V3 : volume 1 à 3. Source : Leborgne (2022) | 44 |
| Tableau 7 : Paramètres rhéologiques retenus pour les simulations HEC-RAS 2D. R1 à R6 : jeux de paramètres rhéologiques 1 à 6. Source : Leborgne (2022). | 46 |
| Tableau 8 : Paramètres des volumes et débits de pointe (Qp) retenus pour les simulations HEC-RAS (lave torrentielle 2019). V1' à V2' : volume 1 à 2. Source : Leborgne (2022). | 67 |
| Tableau 9 : Paramètres rhéologiques retenus pour les simulations HEC-RAS 2D. R1, R5 et R6 : jeux de paramètres rhéologiques 1, 5 et 6. Source : Leborgne (2022)..... | 67 |

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Résumé | 2 |
| Remerciements | 4 |
| Sommaire | 5 |
| Sigles et acronymes | 6 |
| Avant-propos | 7 |
| INTRODUCTION | 8 |
| CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART SUR LES CONNAISSANCES ACTUELLES DU PHENOMENE DE LAVE TORRENTIELLE ET DES APPROCHES DE MODELISATION | 10 |
| 1.1. Le phénomène torrentiel et le transport solide..... | 10 |
| 1.1.1. Le charriage | 10 |
| 1.1.2. Les laves torrentielles..... | 11 |
| 1.1.2.1. Les entités fonctionnelles d'une bouffée de lave torrentielle | 12 |
| 1.1.2.2. Classification des laves torrentielles | 12 |
| 1.1.2.3. Loi de comportement des laves torrentielles boueuses | 13 |
| 1.2. Approches de modélisation de la dynamique des laves torrentielles | 15 |
| 1.2.1. Modèles physiques..... | 15 |
| 1.2.2. Modèles numériques..... | 16 |
| 1.3. Choix et description détaillés du modèle HEC-RAS 2D..... | 18 |
| CHAPITRE 2 : TERRAIN D'ETUDE ET APPROCHE METHODOLOGIQUE | 21 |
| 2.1. Torrent du Claret..... | 21 |
| 2.1.1. Description générale du bassin versant | 21 |
| 2.1.2. Corrections torrentielles sur le torrent du Claret..... | 23 |
| 2.1.2.1. Dispositifs « plage de dépôts »..... | 24 |
| 2.1.2.2. Dispositif de mesures et d'observations | 26 |
| 2.1.2.3. Géométrie du barrage filtrant avant les travaux de 2018..... | 26 |
| 2.1.2.4. Géométrie du barrage filtrant après les travaux de 2018..... | 27 |
| 2.2. Approche méthodologique | 28 |
| CHAPITRE 3 : PHASE DE CALAGE DU MODELE HEC-RAS 2D : LAVE TORRENTIELLE DU 14 JUIN 2017 30 | |
| 3.1. Matériels et méthodes | 30 |
| 3.1.1. Caractéristiques de la lave torrentielle du 14 juin 2017 | 30 |
| 3.1.1.1. Conditions climatiques | 30 |
| 3.1.1.2. Dynamique de remplissage | 31 |
| 3.1.2. Données d'entrée pour la lave torrentielle du 14 juin 2017 | 35 |
| 3.1.2.1. Données topographiques | 35 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.2.1.1. Etat antécédent | 35 |
| 3.1.2.1.2. Etat post crue | 38 |
| 3.1.2.1.3. Conclusion sur l'analyse des données topographiques | 41 |
| 3.1.2.1.4. Coefficient de rugosité de Manning | 41 |
| 3.1.2.2. Données hydrologiques | 43 |
| 3.1.2.3. Données rhéologiques | 44 |
| 3.1.2.4. Géométrie du barrage filtrant dans HEC-RAS 2D pour la lave de 2017 | 46 |
| 3.1.2.5. Construction d'un modèle HEC-RAS 2D pour la lave de 2017 | 48 |
| 3.2. Résultats | 49 |
| 3.2.1. Description conceptuelle | 49 |
| 3.2.2. Niveaux des dépôts atteints au droit du barrage filtrant et de la 1 ^{ère} dent freineuse | 52 |
| 3.2.2.1. Niveaux des dépôts au droit du barrage filtrant | 54 |
| 3.2.2.1.1. Niveaux maximums des dépôts atteints au droit du barrage filtrant | 54 |
| 3.2.2.1.2. Niveaux finaux des dépôts au droit du barrage filtrant | 55 |
| 3.2.2.2. Niveaux des dépôts au droit de la dent n°1 | 56 |
| 3.2.2.2.1. Niveaux maximums des dépôts au droit de la dent n°1 | 56 |
| 3.2.2.2.2. Niveaux finaux des dépôts au droit de la dent n°1 | 57 |
| 3.2.3. Profils en long représentant les niveaux finaux | 58 |
| 3.2.4. Temps de traversée des laves torrentielles simulées | 60 |
| 3.3. Analyses et interprétations | 62 |
| CHAPITRE 4 : PHASE DE VALIDATION DU MODELE HEC-RAS 2D : LAVE TORRENTIELLE DU 1ER JUILLET 2019 | 63 |
| 4.1. Matériels et méthodes | 63 |
| 4.1.1. Caractéristiques de la lave torrentielle du 1 ^{er} juillet 2019 | 63 |
| 4.1.2. Données d'entrée pour la lave torrentielle du 1 ^{er} juillet 2019 | 65 |
| 4.1.2.1. Données topographiques | 65 |
| 4.1.2.1.1. Etat antécédent | 65 |
| 4.1.2.1.2. Etat post crue | 66 |
| 4.1.2.1.3. Coefficient de rugosité de Manning | 66 |
| 4.1.2.2. Données hydrologiques | 66 |
| 4.1.2.3. Données rhéologiques | 67 |
| 4.1.2.4. Géométrie du barrage filtrant dans HEC-RAS 2D pour la lave de 2019 | 68 |
| 4.1.2.5. Construction d'un modèle HEC-RAS 2D pour la lave de 2019 | 68 |
| 4.2. Résultats | 70 |
| 4.2.1. Niveaux des dépôts maximums | 71 |
| 4.2.2. Niveaux des dépôts finaux | 72 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.3. Dépôts latéraux | 73 |
| 4.3. Analyses et interprétations | 74 |
| CONCLUSION..... | 76 |
| Références | 78 |
| Table des figures | 80 |
| Table des tableaux | 82 |
| Table des matières | 83 |
| Table des annexes | 86 |
| Annexes | 86 |

Table des annexes

| | |
|--|----|
| Annexe 1 : Photos issues de la vidéo permettant de déterminer la durée de traversée de la lave torrentielle du 14 juin 2017 dans le bassin de rétention..... | 86 |
| Annexe 2 : Résultats des simulations HEC-RAS 2D. Evènement de référence : lave torrentielle 14 juin 2017..... | 88 |

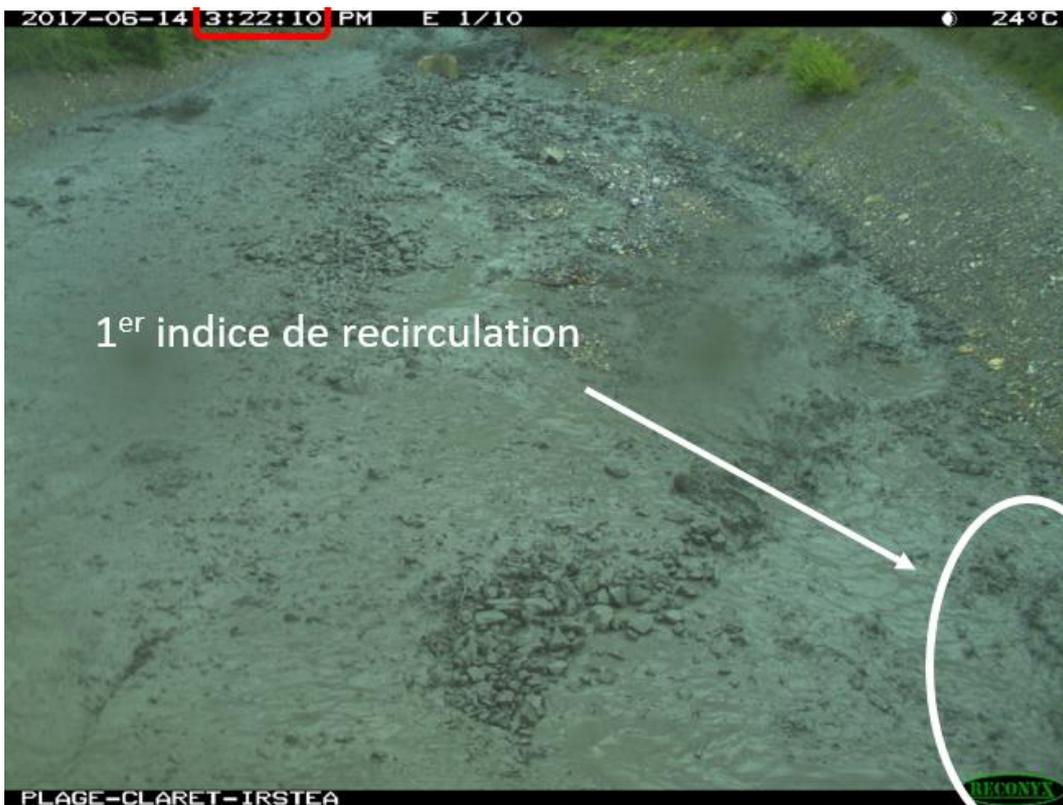
Annexes

Annexe 1 : Photos issues de la vidéo permettant de déterminer la durée de traversée de la lave torrentielle du 14 juin 2017 dans le bassin de rétention.

La durée de traversée de la lave torrentielle du 14 juin 2017 est déterminée de la 1^{ère} dent freineuse en amont de la plage de dépôts jusqu'au barrage filtrant en aval de la plage de dépôts.

- Le barrage filtrant est atteint entre 3h 21min et 48 s et 3h 22min et 10s.
- Heure d'atteinte retenue à 3h 21min et 55 s.
- Durée de traversée de la lave : 3h 21min et 01s – 3h 21min et 55s = 54s ± 5s.





Annexe 2 : Résultats des simulations HEC-RAS 2D. Evènement de référence : lave torrentielle 14 juin 2017.

| Manning | | Volume | [m3] | Rhéologie τ_c/ρ [m2.s-2] | |
|---------|------|--------|--------|----------------------------------|------|
| M1 | 0.04 | V1 | 9 000 | R1 | 1.18 |
| M2 | 0.05 | V2 | 11 000 | R2 | 1.33 |
| M3 | 0.08 | V3 | 13 000 | R3 | 1.43 |
| | | | | R4 | 0.5 |
| | | | | R5 | 0.75 |
| | | | | R6 | 1 |

a) Résultats des 54 simulations de laves torrentielles par HEC-RAS 2D.

| | | | Niveaux dépôts max barrage [m] | Niveaux dépôts finaux barrage [m] | Niveaux dépôts max dent 1 [m] | Niveaux dépôts finaux dent 1 [m] | Durée de traversée [s] |
|----|----|----|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| M1 | V1 | R1 | 694.91 | 694.10 | 701.61 | 701.31 | 73 |
| | | R2 | 694.54 | 694.09 | 702.02 | 701.51 | 98 |
| | | R3 | 694.22 | 694.09 | 702.19 | 701.64 | 124 |
| | | R4 | 695.72 | 694.10 | 701.47 | 700.62 | 35 |
| | | R5 | 695.44 | 694.12 | 701.60 | 700.89 | 53 |
| | | R6 | 695.00 | 694.13 | 701.85 | 701.18 | 79 |
| | V2 | R1 | 695.53 | 694.12 | 701.92 | 701.32 | 61 |
| | | R2 | 695.21 | 694.13 | 702.11 | 701.51 | 79 |
| | | R3 | 694.94 | 694.15 | 702.27 | 701.64 | 98 |
| | | R4 | 696.16 | 694.12 | 701.71 | 700.62 | 31 |
| | | R5 | 695.84 | 694.13 | 701.73 | 700.89 | 45 |
| | | R6 | 695.54 | 694.15 | 701.96 | 701.18 | 65 |
| | V3 | R1 | 695.97 | 694.13 | 702.04 | 701.32 | 52 |
| | | R2 | 695.73 | 694.15 | 702.20 | 701.51 | 67 |
| | | R3 | 695.56 | 694.17 | 702.37 | 701.64 | 81 |
| | | R4 | 696.71 | 694.49 | 701.95 | 700.62 | 28 |
| | | R5 | 696.37 | 694.18 | 701.88 | 700.89 | 40 |
| | | R6 | 695.99 | 694.17 | 702.07 | 701.18 | 56 |
| M2 | V1 | R1 | 694.95 | 694.09 | 701.82 | 701.32 | 74 |
| | | R2 | 694.54 | 694.09 | 702.02 | 701.51 | 99 |
| | | R3 | 694.22 | 694.09 | 702.20 | 701.64 | 125 |
| | | R4 | 695.72 | 694.10 | 701.40 | 700.62 | 37 |
| | | R5 | 695.44 | 694.12 | 701.61 | 700.89 | 55 |
| | | R6 | 695.00 | 694.13 | 701.86 | 701.18 | 80 |
| | V2 | R1 | 695.53 | 694.12 | 701.92 | 701.32 | 61 |
| | | R2 | 695.21 | 694.13 | 702.12 | 701.51 | 81 |
| | | R3 | 694.94 | 694.15 | 702.28 | 701.64 | 98 |
| | | R4 | 696.16 | 694.12 | 701.56 | 700.62 | 33 |
| | | R5 | 695.84 | 694.13 | 701.73 | 700.89 | 47 |
| | | R6 | 695.55 | 694.15 | 701.96 | 701.18 | 67 |
| | V3 | R1 | 695.96 | 694.13 | 702.03 | 701.32 | 52 |
| | | R2 | 695.73 | 694.15 | 702.21 | 701.51 | 68 |
| | | R3 | 695.56 | 694.17 | 702.37 | 701.64 | 81 |
| | | R4 | 696.71 | 694.48 | 701.78 | 700.62 | 30 |
| | | R5 | 696.37 | 694.18 | 701.87 | 700.89 | 41 |
| | | R6 | 695.99 | 694.17 | 702.07 | 701.18 | 58 |

| | | | Niveaux dépôts max barrage [m] | Niveaux dépôts finaux barrage [m] | Niveaux dépôts max dent 1 [m] | Niveaux dépôts finaux dent 1 [m] | Durée de traversée [s] |
|----|----|----|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| M3 | V1 | R1 | 694.93 | 694.09 | 701.85 | 701.32 | 80 |
| | | R2 | 694.53 | 694.09 | 702.05 | 701.51 | 104 |
| | | R3 | 694.21 | 694.09 | 702.22 | 701.64 | 128 |
| | | R4 | 695.71 | 694.10 | 701.46 | 700.62 | 44 |
| | | R5 | 695.43 | 694.12 | 701.65 | 700.89 | 60 |
| | | R6 | 694.99 | 694.13 | 701.89 | 701.18 | 84 |
| | V2 | R1 | 695.52 | 694.12 | 701.96 | 701.32 | 67 |
| | | R2 | 695.21 | 694.13 | 702.15 | 701.51 | 85 |
| | | R3 | 694.94 | 694.15 | 702.30 | 701.64 | 101 |
| | | R4 | 696.15 | 694.12 | 701.59 | 700.62 | 41 |
| | | R5 | 695.84 | 694.13 | 701.77 | 700.89 | 53 |
| | | R6 | 695.55 | 694.15 | 702.00 | 701.18 | 71 |
| | V3 | R1 | 695.96 | 694.14 | 702.07 | 701.32 | 54 |
| | | R2 | 695.73 | 694.15 | 702.24 | 701.51 | 72 |
| | | R3 | 695.56 | 694.17 | 702.40 | 701.64 | 85 |
| | | R4 | 696.70 | 694.48 | 701.73 | 700.62 | 37 |
| | | R5 | 696.37 | 694.17 | 701.90 | 700.89 | 47 |
| | | R6 | 696.00 | 694.17 | 702.11 | 701.18 | 62 |

b) Incertitudes des résultats des 54 simulations de laves torrentielles avec les valeurs de référence de la lave torrentielle du 14 juin 2017.

| Manning | | Volume [m3] | Rhéologie τ_c/ρ [m2.s-2] |
|---------|------|-------------|----------------------------------|
| M1 | 0.04 | V1 9 000 | R1 1.18 |
| M2 | 0.05 | V2 11 000 | R2 1.33 |
| M3 | 0.08 | V3 13 000 | R3 1.43 |
| | | | R4 0.5 |
| | | | R5 0.75 |
| | | | R6 1 |

| | Valeurs de référence |
|----------------------------------|----------------------|
| Niveau dépôts max barrage [m] | 695.10 |
| Niveau dépôts finaux barrage [m] | 694.00 |
| Niveau dépôts finaux dent 1 [m] | 700.65 |
| Durée de traversée [s] | 54 |

| | | | Incertitude avec la valeur de référence [%]_Niveaux dépôts max barrage | Incertitude avec la valeur de référence [%]_Niveaux dépôts finaux barrage | Incertitude avec la valeur de référence [%]_Niveaux dépôts finaux dent 1 | Incertitude avec la valeur de référence [%]_ Durée traversée |
|----|----|----|--|---|--|--|
| M1 | V1 | R1 | 0.03 | 0.01 | 0.09 | 35 |
| | | R2 | 0.08 | 0.01 | 0.12 | 85 |
| | | R3 | 0.13 | 0.01 | 0.14 | 67 |
| | | R4 | 0.09 | 0.01 | 0.00 | 35 |
| | | R5 | 0.05 | 0.02 | 0.03 | 2 |
| | | R6 | 0.01 | 0.02 | 0.08 | 48 |
| | V2 | R1 | 0.06 | 0.02 | 0.10 | 11 |
| | | R2 | 0.02 | 0.02 | 0.12 | 48 |
| | | R3 | 0.02 | 0.02 | 0.14 | 87 |
| | | R4 | 0.15 | 0.02 | 0.00 | 41 |
| | | R5 | 0.11 | 0.02 | 0.03 | 15 |
| | | R6 | 0.06 | 0.02 | 0.08 | 22 |
| | V3 | R1 | 0.13 | 0.02 | 0.10 | 7 |
| | | R2 | 0.09 | 0.02 | 0.12 | 24 |
| | | R3 | 0.07 | 0.02 | 0.14 | 54 |
| | | R4 | 0.23 | 0.07 | 0.00 | 46 |
| | | R5 | 0.18 | 0.03 | 0.03 | 26 |
| | | R6 | 0.13 | 0.02 | 0.08 | 0 |
| M2 | V1 | R1 | 0.02 | 0.01 | 0.10 | 50 |
| | | R2 | 0.08 | 0.01 | 0.12 | 48 |
| | | R3 | 0.13 | 0.01 | 0.14 | 46 |
| | | R4 | 0.09 | 0.01 | 0.00 | 31 |
| | | R5 | 0.05 | 0.02 | 0.03 | 2 |
| | | R6 | 0.01 | 0.02 | 0.08 | 48 |
| | V2 | R1 | 0.06 | 0.02 | 0.10 | 46 |
| | | R2 | 0.02 | 0.02 | 0.12 | 52 |
| | | R3 | 0.02 | 0.02 | 0.14 | 87 |
| | | R4 | 0.15 | 0.02 | 0.00 | 39 |
| | | R5 | 0.11 | 0.02 | 0.03 | 13 |
| | | R6 | 0.06 | 0.02 | 0.08 | 26 |
| | V3 | R1 | 0.12 | 0.02 | 0.10 | 4 |
| | | R2 | 0.09 | 0.02 | 0.12 | 24 |
| | | R3 | 0.07 | 0.02 | 0.14 | 44 |
| | | R4 | 0.23 | 0.07 | 0.00 | 48 |
| | | R5 | 0.18 | 0.03 | 0.03 | 24 |
| | | R6 | 0.13 | 0.02 | 0.08 | 7 |
| M3 | V1 | R1 | 0.02 | 0.01 | 0.10 | 48 |
| | | R2 | 0.08 | 0.01 | 0.12 | 94 |
| | | R3 | 0.13 | 0.01 | 0.14 | 146 |
| | | R4 | 0.09 | 0.01 | 0.00 | 19 |
| | | R5 | 0.05 | 0.02 | 0.03 | 13 |
| | | R6 | 0.02 | 0.02 | 0.08 | 56 |
| | V2 | R1 | 0.06 | 0.02 | 0.10 | 24 |
| | | R2 | 0.02 | 0.02 | 0.12 | 59 |
| | | R3 | 0.02 | 0.02 | 0.14 | 93 |
| | | R4 | 0.15 | 0.02 | 0.00 | 24 |
| | | R5 | 0.11 | 0.02 | 0.03 | 2 |
| | | R6 | 0.06 | 0.02 | 0.08 | 33 |
| | V3 | R1 | 0.12 | 0.02 | 0.10 | 6 |
| | | R2 | 0.09 | 0.02 | 0.12 | 35 |
| | | R3 | 0.07 | 0.02 | 0.14 | 57 |
| | | R4 | 0.23 | 0.07 | 0.00 | 31 |
| | | R5 | 0.18 | 0.02 | 0.03 | 11 |
| | | R6 | 0.13 | 0.02 | 0.08 | 13 |