



HAL
open science

La modélisation des écoulements gravitaires rapides : application à la gestion du risque laves torrentielles

D. Laigle

► **To cite this version:**

D. Laigle. La modélisation des écoulements gravitaires rapides : application à la gestion du risque laves torrentielles. Sciences de l'environnement. Habilitation à diriger des recherches, spécialité mécanique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2008. tel-02590505

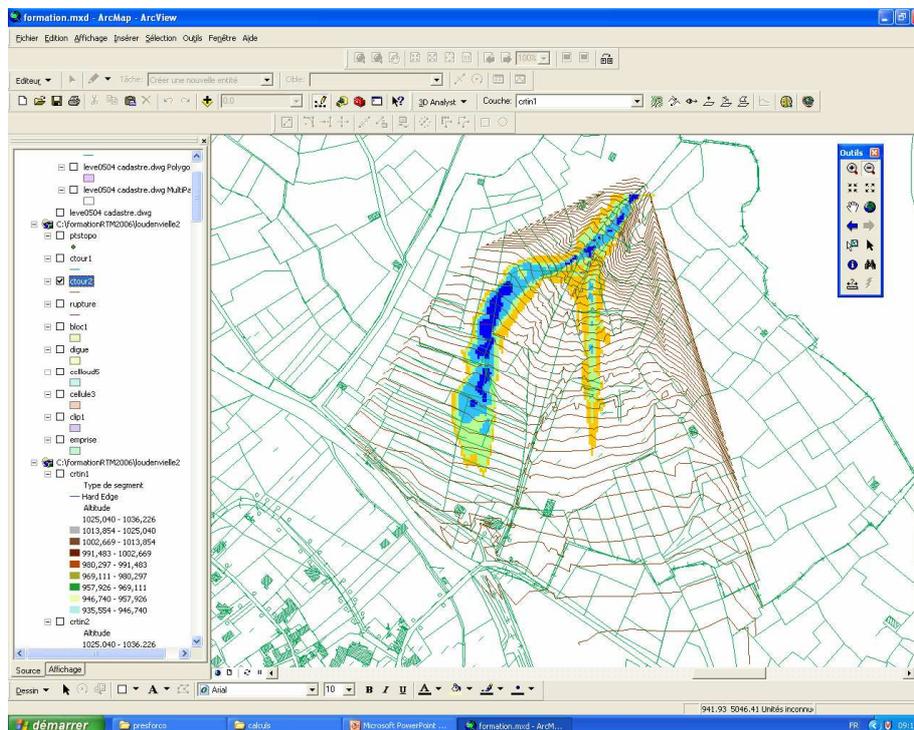
HAL Id: tel-02590505

<https://hal.inrae.fr/tel-02590505>

Submitted on 15 May 2020

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.



La modélisation des écoulements gravitaires rapides *Application à la gestion du risque « laves torrentielles »*

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme
d'Habilitation à Diriger des Recherches par

Dominique LAIGLE

Cemagref – Unité de Recherche Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches
Domaine Universitaire, Saint-Martin-d'Hères

Soutenu le 24 avril 2008

devant le jury composé de

James	BATHURST	Président
Roger	COJEAN	Rapporteur
Luc	OGER	Rapporteur
Pierre	SARAMITO	Rapporteur
Christophe	ANCEY	Examineur
François	NICOT	Examineur

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier messieurs Roger COJEAN, Luc OGER et Pierre SARAMITO d'avoir bien voulu accepter la fonction de rapporteurs et messieurs Christophe ANCEY, James BATHURST et François NICOT d'avoir bien voulu assurer la fonction d'examineurs dans le cadre du jury de soutenance du présent mémoire. Je voudrais également remercier collectivement les collègues du Cemagref qui, par leur collaboration à mes travaux ou simplement par leur présence, ont contribué de près ou de loin à l'avancée des thématiques scientifiques présentées ici. Je tiens également à remercier l'ensemble des partenaires français et européens avec qui j'ai eu l'occasion de collaborer de façon étroite tout au long de ces années et qui ont largement contribué à élargir ma vision des thématiques scientifiques abordées. Cette liste ne serait pas exhaustive si je ne faisais mention ici des thésards et stagiaires que j'ai eu l'occasion d'encadrer et qui, par leur enthousiasme au quotidien, ont largement contribué à faire avancer des travaux que je n'aurai pu mener à bien sans eux. Enfin, je tiens à remercier ma famille de son soutien quotidien, mais au combien indispensable, durant toutes ces années et notamment durant la période de rédaction du présent mémoire (ceux qui m'on précédé dans cet exercice me comprendront sans doute).

Sommaire

Préambule	9
Chapitre 1	
Problématique et démarche scientifique	11
1.1 Les laves torrentielles en quelques mots.....	11
1.2 Principales caractéristiques du phénomène.....	11
1.2.1 Le déclenchement des laves torrentielles	11
1.2.2 Les écoulements des laves torrentielles.....	13
1.2.2.1 Les principales caractéristiques d'une lave torrentielle.....	13
1.2.2.2 Les entités fonctionnelles d'une lave torrentielle	13
1.3 La prévention des risques générés par les laves torrentielles.....	14
1.3.1 Le pouvoir destructeur des laves torrentielles	14
1.3.2 Enjeux opérationnels	15
1.4 Propriétés mécaniques des écoulements de laves torrentielles	15
1.4.1 Une définition des laves torrentielles	15
1.4.2 Loi de comportement.....	16
1.4.2.1 Les travaux de Coussot sur les suspensions naturelles.....	16
1.4.2.2 Exemple de modèle viscoplastique.....	17
1.4.2.3 Exemple de modèle granulaire	17
1.4.3 Une classification des laves torrentielles.....	18
1.4.4 Loi « hydraulique »	19
1.4.4.1 Loi proposée par Coussot (1994).....	19
1.4.4.2 Similitude	20
1.5 Démarche scientifique	21
1.5.1 Une approche par nature pluridisciplinaire	21
1.5.2 Démarche scientifique et objectifs poursuivis.....	21
Chapitre 2	
Modélisation de type champ moyen 1D pour les écoulements chenalés de laves torrentielles	25
2.1 Objectifs.....	25
2.2 Présentation du modèle numérique 1D.....	25
2.2.1 Bases théoriques du modèle	26
2.2.2 Résolution numérique.....	27
2.2.2.1 Le problème de Riemann.....	28
2.2.2.2 Le solveur de Roe.....	29
2.2.2.3 Le schéma de Godunov	30

2.2.2.4	Traitement des conditions aux limites	31
2.3	Données d'entrée / sortie	31
2.3.1	Entrées.....	31
2.3.2	Sorties.....	31
2.4	Confrontation du modèle 1D à des expériences de laboratoire.....	31
2.4.1	Les expériences de laboratoire	32
2.4.1.1	Le matériau modèle et l'identification des paramètres rhéologiques	32
2.4.1.2	Le dispositif expérimental	32
2.4.1.3	Le principe des expériences.....	33
2.4.2	Ecoulements à hauteur initiale nulle	33
2.4.2.1	Comportement et sensibilité du modèle	33
2.4.2.2	Confrontation entre expériences et simulations.....	35
2.4.3	Ecoulements à hauteur initiale non nulle.....	37
2.4.4	Discussion des résultats.....	38
2.5	Confrontation du modèle 1D à des événements de terrain	39
2.5.1	Présentation du site instrumenté du Rio Moscardo	39
2.5.2	Caractéristiques des événements observés	39
2.5.3	Mise en œuvre du modèle numérique	40
2.5.3.1	Initialisation des calculs.....	40
2.5.3.2	Conditions aux limites	40
2.5.3.3	Identification des valeurs des paramètres rhéologiques	40
2.5.4	Confrontation des simulations aux mesures.....	41
2.5.4.1	Comparaison qualitative sur la forme des limnigrammes	41
2.5.4.2	Comparaison quantitative sur les hauteurs maximales d'écoulement et les temps de propagation.....	43
2.5.5	Discussion des résultats.....	43
2.6	Etude de la propagation de l'onde de rupture résultant de débâcles glaciaires.....	44
2.7	Applications opérationnelles du modèle 1D	44
2.8	Bilan et perspectives	45

Chapitre 3

Modélisation de type champ moyen 2D pour les écoulements en étalement libre de laves torrentielles		47
3.1	Objectifs.....	47
3.2	Présentation du modèle 2D	47
3.2.1	Bases théoriques du modèle	48
3.2.1.1	Equations du modèle	48
3.2.1.2	Hypothèses du modèle et domaine de validité	48
3.2.1.3	Résolution numérique.....	49
3.2.1.4	Conditions initiales et aux limites	49
3.2.2	Utilisation pratique du modèle	50
3.2.2.1	Données d'entrée	50
3.2.2.2	Forme des résultats.....	51
3.3	Confrontation du modèle 2D à des expériences de laboratoire.....	51
3.3.1	Objectifs	51
3.3.2	Protocole d'étude.....	52
3.3.2.1	Dispositif expérimental.....	52
3.3.2.2	Caractéristiques des essais expérimentaux	53
3.3.2.3	Sensibilité du modèle.....	53
3.3.3	Confrontation entre mesures et simulations	54
3.4	Confrontation du modèle 2D à des événements de terrain	57
3.4.1	Objectifs	57
3.4.2	Présentation des événements étudiés.....	57
3.4.2.1	Wartschenbach	58
3.4.2.2	Varunasch.....	60

3.4.3	Analyse de sensibilité et facteurs influençant la qualité des résultats	61
3.4.3.1	Paramètres rhéologiques	62
3.4.3.2	Volume et débit	63
3.4.3.3	Modèle numérique de terrain	64
3.4.4	Discussion des résultats	65
3.4.5	confrontation à d'autres modèles	65
3.5	Bilan et perspectives	66
3.5.1	Un modèle correctement validé permettant d'aborder des études de terrain	66
3.5.1.1	Applications opérationnelles du modèle 2D	66
3.5.1.2	Actions de transfert	67
3.5.2	Perspectives	67
3.5.2.1	Etudes prospectives à finaliser	67
3.5.2.2	Autres perspectives	68

Chapitre 4

L'approche par scénarios : une méthodologie opérationnelle de prédétermination des caractéristiques d'écoulement	69
4.1 Intérêt opérationnel de l'approche par scénarios	69
4.2 Objectifs	70
4.3 Evaluation de la magnitude	70
4.3.1 Evaluation du volume	70
4.3.2 Evaluation du débit	71
4.4 Evaluation des propriétés rhéologiques	71
4.4.1 Détermination du type de lave	71
4.4.2 Quelques méthodes existantes d'évaluation des paramètres rhéologiques	72
4.4.3 Une contribution à la détermination des propriétés rhéologiques d'un matériau frais de lave torrentielle	72
4.4.3.1 Procédure expérimentale	72
4.4.3.2 Le matériau testé	73
4.4.3.3 Rhéométrie de laboratoire	73
4.4.3.4 Rhéométrie à grande échelle	75
4.4.3.5 Détermination directe du seuil de contrainte	75
4.4.3.6 Evolution du seuil de contrainte pour des ajouts successifs de particules plus grossières	76
4.4.3.7 Loi de comportement du matériau naturel complet	76
4.5 Un cas de déclenchement caractérisé de façon déterministe	77
4.5.1 Analyse des conditions de formation d'une coulée de boue au front d'un glissement de terrain	77
4.5.2 Mise en œuvre des modèles de propagation	77
4.6 Un exemple de mise en œuvre : le torrent du Rioulong	78
4.6.1 Contexte de l'étude	78
4.6.2 Construction des scénarios	78
4.6.2.1 Hydrogramme d'entrée	78
4.6.2.2 Paramètres rhéologiques	79
4.6.2.3 Présentation synthétique des scénarios envisagés	79
4.6.3 Influence de la valeur du seuil de contrainte	80
4.6.4 Influence du débit de pointe	82
4.6.5 Influence du volume	84
4.6.6 Analyse de l'extension maximale d'une lave torrentielle « fluide » pour différentes hypothèses de volume	85
4.6.7 En cas de formation d'un embâcle de 9 m de large obstruant le chenal	87
4.6.8 Comparaison de deux configurations de digues de protection contre les débordements en rive gauche	88
4.6.9 Analyse des écoulements en présence d'une digue de protection contre les débordements en rive gauche	91

4.7 Bilan et perspectives	93
Chapitre 5	
Contributions à l'étude de la vulnérabilité structurelle	95
5.1 La problématique des interactions écoulements obstacles	95
5.1.1 Contexte	95
5.1.2 Modélisations existantes	96
5.2 Objectifs	96
5.3 Un modèle de type champ proche pour l'étude des interactions écoulements – obstacles	96
5.3.1 Choix d'une méthode numérique appropriée	97
5.3.2 Les fondements de la méthode SPH	97
5.3.3 Traitement des équations du mouvement	97
5.3.4 Prise en compte de la loi de comportement dans la méthode SPH	100
5.3.4.1 Fluides de Herschel-Bulkley	100
5.3.4.2 Fluides granulaires	101
5.3.5 Conditions de bord	101
5.3.6 Confrontation à des expériences en l'absence d'obstacle	102
5.3.6.1 Ecoulements transitoires de fluide viscoplastique	102
5.3.6.2 Ecoulements granulaires	103
5.3.7 Etude prospective de l'interaction d'écoulements transitoires avec un obstacle	105
5.3.7.1 Présentation des simulations	105
5.3.7.2 Réduction de quantité de mouvement due à l'obstacle	106
5.3.7.3 Contraintes appliquées à la structure	107
5.3.7.4 Une approche des interactions qui reste à compléter et valider	110
5.4 Etude expérimentale des interactions écoulements - obstacles	110
5.4.1 Introduction	110
5.4.2 Dispositif et procédure expérimentaux	110
5.4.2.1 Le fluide modèle	110
5.4.2.2 Le canal expérimental	110
5.4.2.3 La PIV	111
5.4.2.4 Le capteur de pression	111
5.4.2.5 Procédure expérimentale	112
5.4.3 Résultats expérimentaux	112
5.4.3.1 Ecoulements en amont de l'obstacle	112
5.4.3.2 Pression appliquée à l'obstacle	114
5.4.3.3 Régimes d'impact	116
5.5 Bilan et perspectives	117
5.5.1 Principaux résultats obtenus	117
5.5.1 Perspectives	117
Chapitre 6	
Travaux en cours et perspectives	119
6.1 Principales conclusions des travaux réalisés, traduites en axes de recherche à poursuivre ou à développer	119
6.2 Vers une nouvelle approche des propriétés mécaniques des matériaux en écoulement	120
6.2.1 Quelques approches existantes	120
6.2.2 Etudes prospectives relatives à l'influence du front granulaire sur l'écoulement des laves torrentielles	120
6.2.3 Phénomènes de ségrégation et formation du front granulaire	121
6.3 Vers une meilleure évaluation de la vulnérabilité structurelle	122
6.4 Etude de la déstabilisation d'un lit torrentiel par un écoulement de lave torrentielle	124
6.5 Vers une meilleure évaluation de la magnitude des phénomènes	126
6.6 Vers une meilleure prise en compte de l'incertitude	127

6.7 Développements orientés vers l'opérationnel.....	128
6.7.1 Vers une meilleure évaluation de toutes les composantes de la vulnérabilité.....	128
6.7.2 La place de l'expert.....	129
Références	131
Annexe	137

Préambule

Le présent document résume une activité portant essentiellement sur les laves torrentielles et qui s'étend sur une quinzaine d'années. On notera tout d'abord que ce travail a pris le parti de traiter essentiellement d'un phénomène naturel et non pas des apports d'une discipline scientifique à l'étude d'un ou plusieurs phénomènes. Il en résultera peut-être une certaine frustration pour certains spécialistes que de ne pas voir leur discipline plus largement exploitée dans le cadre du présent travail. J'espère qu'ils ne m'en tiendront pas rigueur.

Le fait de centrer mon approche sur un phénomène a nécessité l'utilisation de plusieurs disciplines scientifiques, parmi lesquelles la mécanique des fluides occupe néanmoins une place centrale, et de les combiner dans le cadre d'une démarche scientifique cohérente. Une telle démarche, que l'on peut qualifier de pluridisciplinaire, n'est pas un hasard. Elle résulte pour beaucoup d'une sensibilité personnelle qui m'a bien souvent amené à fonder mon travail sur une question : « quel intérêt pratique et quelle validité les outils et modèles que je développe présentent-ils ? » et sur un domaine d'application : « l'expertise et la gestion des risques naturels ». Pour les personnes qui connaissent le Cemagref de l'intérieur, c'est presque une évidence que de dire que le tiraillement entre recherche et expertise y est très fréquent et qu'il y est bien souvent vécu au niveau même des individus. En ce qui me concerne, je n'ai jamais opéré de choix clair entre ces deux aspects, non par contrainte, mais réellement par envie de combiner au mieux les deux statuts qui sont les miens : ingénieur du ministère de l'Agriculture – plus orienté vers l'expertise et la gestion des risques naturels – et chercheur – plus orienté vers la compréhension des phénomènes et leur modélisation. Cette absence de choix a sans doute eu un double avantage : d'une part, mes préoccupations en termes de gestion des risques naturels ont bien souvent alimenté ma démarche scientifique et d'autre part, j'ai toujours porté attention à l'application de mes résultats de recherche à la gestion du risque, en général et de production d'outils d'aide à l'expertise, en particulier. En revanche, cette absence de choix a sans doute présenté un défaut majeur : j'ai largement porté attention à la validité des outils et modèles produits mais corollairement assez peu à la construction d'édifices théoriques solides et parfaitement rigoureux. Ces différents aspects expliquent pour partie le titre et la structure du présent document dont une part importante traite de validation par confrontation à des expériences ou des observations de terrain et qui ne s'interdit pas de faire appel à des modèles empiriques ou à des raisonnements experts.

Comme il a été mentionné plus haut, mon activité dans le domaine des laves torrentielles couvre une bonne quinzaine d'années. La recherche internationale, encore assez embryonnaire au début de cette période, s'est largement développée depuis. Dans ces conditions, j'ai pris le parti de privilégier ici un exposé de ma démarche scientifique qui, on l'aura bien compris, a évolué dans le temps avec l'avancée des connaissances sur les laves torrentielles. On pourra donc être dérouter de ne pas trouver en début de ce document un état de l'art actuel sur les laves torrentielles mais simplement un exposé succinct des caractéristiques de ce phénomène et des principaux développements scientifiques sur lesquels s'est fondée mon approche du problème. C'est donc un choix délibéré que de n'avoir exposé en introduction que ce qui était strictement nécessaire à la compréhension des chapitres 2 à 5. Dans chacun de ces chapitres sont exposés les objectifs poursuivis ainsi que les perspectives d'évolution

pour chaque thématique traitée. Pour ne pas allonger inutilement un document déjà long, j'ai fait le choix d'exposer de façon assez détaillée certains travaux marquants, tandis que d'autres, qui peuvent néanmoins représenter un volume de travail important, sont plus succinctement évoqués. Au final, une mise en perspective de mes travaux est réalisée au chapitre 6. Celui-ci inclut également un exposé des objectifs et méthodologies adoptées pour les travaux récemment engagés, pour ceux qui constituent des perspectives personnelles, ou pour ceux qui devraient, de mon point de vue, faire l'objet d'une attention particulière de la part de la communauté scientifique. En résumé, je n'ai pas cherché à faire ici un état de l'art des connaissances scientifiques sur la modélisation des écoulements gravitaires rapides en général et des laves torrentielles en particulier. En revanche, je m'étends plus largement sur ma vision du problème et sur la logique scientifique qui m'a dirigé durant les années consacrées à l'étude de ce phénomène.

Chapitre 1

Problématique et démarche scientifique

1.1 Les laves torrentielles en quelques mots

Les laves torrentielles (photo 1.1) sont des phénomènes gravitaires rapides pouvant se déclencher dans certains torrents de montagne, notamment à la faveur d'événements pluviométriques intenses. Elles sont généralement constituées d'écoulements transitoires par « bouffées » de mélanges eau – matériau solide de très forte concentration (typiquement de l'ordre de $\frac{3}{4}$ de solide pour $\frac{1}{4}$ d'eau, en volume) et de granulométrie très étendue (des argiles à des blocs de plusieurs mètres de diamètre) (Hungar 2005). Ces phénomènes violents et pratiquement imprévisibles en l'état actuel des connaissances sont susceptibles de générer des dommages économiques et humains considérables. Leur intensité dans certaines parties du monde peut provoquer des catastrophes d'ampleur nationale telles que celles qui se sont produites au Venezuela en décembre 1999 (Garcia-Martinez & Lopez 2005) ou à Armero en Colombie en novembre 1985 (un lahar, phénomène apparenté aux laves torrentielles provoquant la mort de 25 000 personnes). En Europe, l'ampleur des phénomènes bien qu'un peu plus faible (volumes dépassant très rarement le million de m³) concerne de nombreux massifs montagneux : tout l'arc alpin, les Pyrénées, les Apennins (161 morts dans la région de Sarno en Italie en mai 1998 [Guadagno & Revellino 2005]) et dans une moindre mesure des massifs au relief moins vigoureux tels que le Massif Central (coulée de boue des Egravats au Mont-Dore, Puy-de-Dôme, en janvier 2004).

1.2 Principales caractéristiques du phénomène

1.2.1 Le déclenchement des laves torrentielles

La formation des laves torrentielles est schématiquement dictée par deux facteurs principaux :

- Un facteur de prédisposition. On devrait d'ailleurs plutôt parler d'une série de facteurs, en rapport notamment avec la géologie, la géomorphologie et l'hydrogéologie (Bonnet-Staub 2001). Ces facteurs se traduisent en pratique par une quantité importante de matériau solide altéré et déstructuré présente de façon ponctuelle ou plus étendue, dans le bassin de réception ou le chenal torrentiel. Une trop faible quantité de matériau disponible peut être considérée comme un facteur limitant qui ne permettra pas le développement de laves torrentielles de grande ampleur.
- Un événement pluvieux suffisamment intense. Dans une grande majorité des cas il s'agit d'une pluie orageuse de forte intensité qui fait office de facteur déclenchant. La situation la plus favorable au déclenchement des laves torrentielles résulte de la succession d'une période

pluvieuse longue (quelques jours) d'intensité modérée, contribuant à l'imbibition des terrains en place, et d'une période pluvieuse courte (quelques minutes à quelques heures) d'intensité forte.

A ces deux facteurs principaux, il convient d'ajouter une pente du terrain très importante (généralement supérieure à 30%) dans la zone de départ.

Les processus élémentaires qui concourent à la formation des laves torrentielles sont nombreux, de l'ordre d'une douzaine (Cojean & Génévois 1999). Ils regroupent tous les phénomènes d'érosion et de déstabilisation des terrains. Aucun de ces phénomènes élémentaires n'est d'ailleurs spécifique des laves torrentielles. On peut toutefois classer ces processus en fonction du lieu de formation des laves torrentielles : bassin de réception ou chenal d'écoulement. Dans le premier cas, l'érosion à l'origine du déclenchement peut être étendue sur une grande surface ou plus localisée si une quantité importante de matériau altéré est disponible localement. Dans le second cas, l'érosion à l'origine du déclenchement se concentre au niveau du chenal torrentiel (lit et berges).

En résumé, il existe 4 grandes modes de formation des laves torrentielles (Richard 1995, Bardou 2002), qui sont :

- Une soudaine alimentation en matériaux solides du chenal torrentiel qui peut provenir d'un glissement de terrain (alimentation ponctuelle), ou de l'érosion des berges (alimentation linéaire).
- Une alimentation en matériaux solides par un processus d'érosion s'étendant à tout le bassin versant (alimentation surfacique).
- Une déstabilisation du lit, celle-ci étant rarement la cause unique d'une lave torrentielle, en revanche elle peut concourir à une forte augmentation du volume de celle-ci.
- Une rupture d'un barrage naturel sur le torrent selon un processus d'embâcle-débâcle, ou encore une débâcle glaciaire, par exemple (Schuster 2000).



Photo 1.1 : Dépôt de lave torrentielle, Valgaudemar (Hautes-Alpes) été 2003, cliché H. Bellot, Cemagref

1.2.2 Les écoulements des laves torrentielles

« Dans un grondement de tonnerre, un mur noir apparût soudain au détour du canyon. Le torrent s'emplit d'un mélange de boue et de rochers s'entrechoquant avec fracas. Cette masse visqueuse dévalait la pente en transportant d'énormes blocs posés à sa surface. Parvenu dans la vallée, le torrent déborda. La lave torrentielle se répandit sur le cône de déjection, emportant au passage maisons et voitures. Enfin, comme essoufflé, le mélange boueux et rocailleux vint s'arrêter mollement dans les pâturages. La lave formait maintenant des lobes épais qui couvraient les champs comme une sauce au chocolat nappant un gâteau. Après quelques jours, la lave asséchée allait se pétrifier tel un béton grossier. » (Coussot 1996).

1.2.2.1 Les principales caractéristiques d'une lave torrentielle

Comparées aux autres écoulements d'eau chargés en matériau solide, les laves torrentielles présentent généralement les caractéristiques suivantes :

- Contrairement aux écoulements avec charriage, dont le débit moyen varie de façon généralement graduelle (des bouffées de concentration peuvent néanmoins être observées), leur écoulement est fortement transitoire. Il est le plus souvent constitué de bouffées successives indépendantes, qui se présentent sous la forme de vagues précédées d'un front raide, de l'ordre de 1 à quelques mètres de hauteur et se propageant à des vitesses comprises entre 1 et 10 m/s (en contexte alpin).
- Leur concentration en matériau solide est très élevée. Généralement supérieure à 50% en volume, elle peut atteindre 80% et plus. Tandis que cette dernière ne dépasse pas 20 à 40% pour les écoulements avec charriage torrentiel.
- Le matériau solide les constituant présente une large étendue granulométrique. Associée à une très forte concentration, cette caractéristique se traduit par un comportement d'ensemble de la coulée d'apparence monophasique et homogène, contrairement aux écoulements chargés qui sont clairement biphasiques. Ceci se traduit dans les faits par les caractéristiques suivantes :
 - Un faible tri granulométrique tout au long de l'écoulement et notamment lors de la phase de dépôt.
 - Un comportement intermédiaire entre fluide et solide qui, sur beaucoup d'aspects, ressemble plus à l'écoulement d'une pâte que d'un liquide à proprement parler. Ceci se traduit, notamment lorsqu'une zone de pente plus faible est atteinte, par un arrêt « en masse » de la coulée, avec une épaisseur de dépôt importante (de l'ordre du mètre) et la présence de bourrelets frontaux et latéraux (Coussot 1996).

Chacun de ces critères, pris indépendamment, ne suffit généralement pas à caractériser les laves torrentielles, il est donc nécessaire de croiser les informations disponibles avant de conclure à leur existence dans un bassin versant donné, notamment lors de l'observation de traces de crues anciennes.

1.2.2.2 Les entités fonctionnelles d'une lave torrentielle

Une lave torrentielle, au moins lorsqu'elle s'écoule dans un chenal suffisamment marqué, est généralement constituée de quatre parties (Figure 1.1, Bardou 2002) :

- Un front granulaire généralement raide, constitué des plus gros blocs (ainsi que parfois des « corps étrangers » tels qu'arbres, morceaux d'ouvrages, etc.), qui semblent poussés par le corps de la coulée. La section d'écoulement la plus importante de chaque bouffée se situe généralement au niveau du front.
- Un corps, qui suit le front et présente généralement un aspect plus boueux, car constitué essentiellement de blocs plus ou moins noyés dans un fluide interstitiel. Le corps constitue l'essentiel du volume de la bouffée de lave torrentielle.
- Des bourrelets latéraux, qui sont parallèles au corps mais présentent un aspect assez similaire à celui du front. Ils sont constitués pour partie de matériau grossier s'échappant du front et

laissent fréquemment des dépôts latéraux caractéristiques, souvent appelés également bourrelets latéraux, le long du chenal d'écoulement.

- Une queue de coulée, qui correspond au passage progressif vers un écoulement moins concentré et de ce fait, progressivement plus turbulent et biphasique.

Ce schéma est surtout valable lorsque les écoulements restent contraints latéralement, donc lorsqu'ils sont suffisamment chenalisés. Les laves torrentielles ont par ailleurs une certaine tendance à l'auto-chenalisation (dispersion latérale limitée). Lors de la phase d'étalement sur un cône de déjection, pouvant résulter d'un débordement par exemple, l'absence de confinement latéral semble propice à la dislocation du front granulaire et donc au dépôt des plus gros blocs. En conséquence, les écoulements non confinés ne présentent généralement pas une segmentation aussi nette en front, corps et queue.

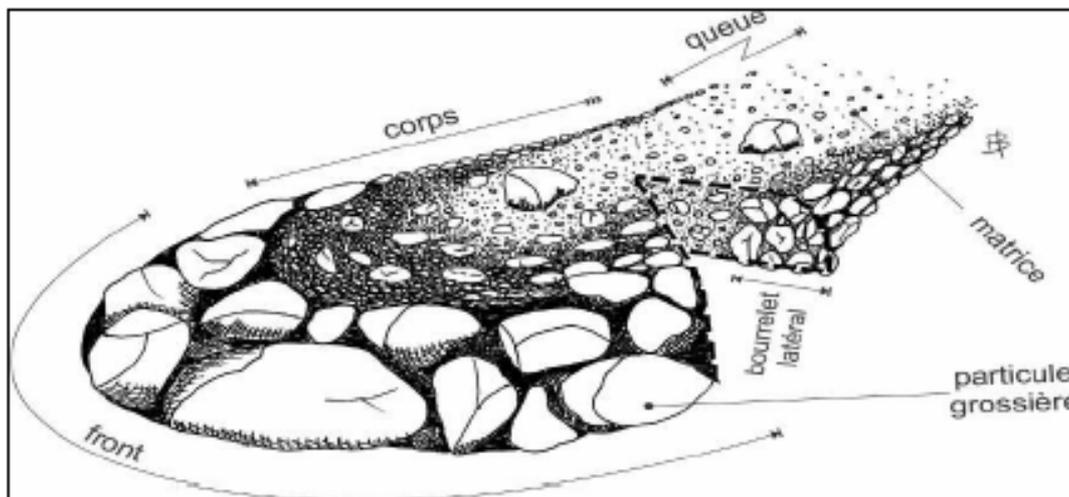


Figure 1.1 Profil schématique d'une lave torrentielle d'après Bardou (2002)

1.3 La prévention des risques générés par les laves torrentielles

1.3.1 Le pouvoir destructeur des laves torrentielles

Les laves torrentielles restent des phénomènes largement imprévisibles sur la base d'alertes météorologiques. La seule alerte opérationnelle vraiment fiable repose sur une détection précoce du phénomène d'écoulement. Toutefois, dans ce cas de figure, le délai s'écoulant entre la détection du phénomène et son arrivée sur des enjeux humains est très court (typiquement de l'ordre de quelques minutes). L'arrivée du phénomène ne présente alors aucune progressivité puisque l'intensité de l'écoulement est maximale en tête de coulée. Elle laisse également peu de place à la prise de conscience individuelle du danger. Compte tenu des caractéristiques dynamiques du phénomène, dans toute zone atteinte par l'écoulement, il y a mise en danger de la vie humaine, y compris fréquemment, à l'intérieur des bâtiments touchés.

Les désordres dus aux laves torrentielles apparaissent généralement lors d'un débordement hors du chenal dans une zone d'occupation humaine. Un tel débordement peut avoir plusieurs origines principales :

- capacité hydraulique insuffisante du chenal d'écoulement au niveau d'un point de faiblesse entraînant un débordement latéral ponctuel.
- obstruction d'un ouvrage ponctuel (ouvrage de franchissement de type pont notamment) par des blocs ou des corps flottants, entraînant un débordement latéral ponctuel.
- dépôt au niveau d'une réduction de pente, entraînant un engravement du lit et un débordement latéral plus ou moins généralisé, notamment s'il y a occurrence de plusieurs bouffées successives.

Les laves torrentielles ont pour principales caractéristiques de se propager de façon très transitoire, de présenter une densité forte et un front le plus souvent chargé en gros blocs. L'ensemble est donc susceptible de générer des pressions dynamiques extrêmement importantes lors de chocs sur des ouvrages de protection ou des bâtiments.

1.3.2 Enjeux opérationnels

Afin de mieux comprendre les enjeux opérationnels des travaux de recherche engagés à ce jour et de ceux qu'il serait souhaitable de mener dans les années à venir, nous reprenons ici quelques éléments de définition de la notion de risque naturel. Le **risque** naît de la rencontre de deux facteurs : l'un est constitué de l'occurrence probable d'un phénomène : l'**aléa** (fonction de l'intensité du phénomène et de sa probabilité d'occurrence), l'autre est constitué des enjeux humains : la **vulnérabilité**. Cette définition vaut pour tout territoire. Cependant, sur les territoires de montagne, le risque naturel est singulièrement présent pour deux raisons : les aléas y sont particulièrement nombreux et violents, et les enjeux humains, de par l'espace nécessairement restreint, particulièrement concentrés dans des zones exposées. La prévention des risques est fondée à la fois sur la connaissance des aléas, sur la mise en place de mesures de protection, sur l'information des citoyens et des élus et sur la préparation aux situations de crise.

Les mesures de protection sont essentiellement de deux types, que l'on qualifie de structurelles et de non-structurelles. Les mesures non-structurelles ont essentiellement pour finalité de réglementer l'occupation du sol afin de réduire l'exposition des personnes et des biens. En France, c'est le rôle dévolu aux Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR). Les mesures structurelles (Heumader 2000, Hübl & Fiebigler 2005) regroupent tous les aménagements visant à limiter ou empêcher le déclenchement des phénomènes (protections qualifiées « d'actives ») ou à canaliser, freiner, dévier ou arrêter les écoulements (mesures qualifiées de « passives »). Ce second type de mesure met en œuvre des ouvrages ayant une fonction de protection (d'où le problème pratique de l'optimisation de cette fonction). Ils doivent de plus assurer cette fonction de façon pérenne (d'où le problème de la résistance de ces ouvrages aux sollicitations exercées sur eux par le phénomène). La mise en place de ces mesures de protection, qu'elles soient structurelles ou non-structurelles, se fait encore actuellement de façon essentiellement empirique et repose largement sur l'expérience des services de terrain en charge de la gestion des risques liés à ces phénomènes.

De façon schématique, la détermination de mesures de prévention adaptées nécessite une capacité à prédéterminer l'intensité locale du phénomène (épaisseur, vitesse d'écoulement, etc.). Cette intensité locale dépend de la magnitude des phénomènes (volume et débit, pour simplifier) et de l'ensemble des facteurs qui déterminent les caractéristiques d'écoulement (topographie, loi de comportement du matériau, etc.). La magnitude des phénomènes est le résultat des processus de déclenchement (pluie caractérisée par une certaine fréquence d'occurrence et phénomènes d'entraînement de matériau induits). A ces phénomènes « globaux » s'ajoutent des phénomènes « perturbateurs » locaux dont l'influence peut être très importante : embâcles et autres phénomènes de blocage dus à la présence de blocs ou de corps flottants, etc. Face à la complexité des processus mis en œuvre, on comprend bien qu'il est difficile d'évaluer, pour un point donné de l'espace (une habitation, une route, un ouvrage de protection, etc.) par quelle intensité (risque de dommage ? risque pour la vie humaine ?) de phénomène il est susceptible d'être frappé et avec quelle fréquence (en moyenne, une fois tous les 10 ans ? 100 ans ? 300 ans ?). Les travaux de recherche sur les laves torrentielles ont pour objectif principal d'apporter des outils et méthodes permettant de répondre plus précisément à ces différentes questions, auxquelles ont à faire face quotidiennement les gestionnaires du risque.

1.4 Propriétés mécaniques des écoulements de laves torrentielles

1.4.1 Une définition des laves torrentielles

Le terme français, relativement général et donc également un peu flou de « lave torrentielle », se traduit difficilement dans d'autres langues et notamment en anglais, qui utilise des termes plus spécifiques tels que « mudflow » ou « debris-flow » (Hungar 2005). Il n'existe pas à ma connaissance de définition synthétique des écoulements de laves torrentielles en dehors de celle proposée par

Bardou (2002). Celle-ci est phénoménologique, mais bien argumentée par l'auteur. De plus, elle exprime une « vision » du phénomène que je partage. D'après Bardou (2002), les écoulements de laves torrentielles sont donc :

des écoulements subaériens granulaires lubrifiés, d'apparence cinématiquement monophasique.

Cette définition nous oriente tout naturellement vers une approche « moyenne » des écoulements et plus précisément vers la mécanique des fluides homogènes. On parlera donc plutôt d'hydraulique à surface libre pour des fluides complexes non-Newtoniens. Une telle approche « fluide homogène » possède inévitablement des limites. Elle paraît notamment peu compatible avec les phénomènes de ségrégation observables y compris à l'échelle macroscopique (segmentation front, corps, queue) et a fortiori avec des échelles d'investigation plus fines. Il n'en demeure pas moins que ce niveau d'approche a été largement exploité (Hutter et al. 1996) et qu'il continue de l'être. Ma démarche personnelle s'est largement inscrite dans ce cadre avec comme objectif d'en tester les capacités opérationnelles, plus que d'en faire évoluer les contours. Un retour sur cette hypothèse « fluide homogène » sera opéré dans le chapitre 6. Les paragraphes qui suivent n'ont pas la prétention d'être exhaustifs mais de mettre en lumière les concepts et modèles qui sont à la base de mon travail de modélisation.

1.4.2 Loi de comportement

1.4.2.1 Les travaux de Coussot sur les suspensions naturelles

L'hypothèse fluide homogène étant supposée admise (même si elle est discutable), la modélisation des écoulements peut être menée à bien à partir du moment où la loi de comportement du matériau est connue (on suppose par ailleurs connues les conditions aux limites du domaine d'écoulement). Afin de clarifier les éléments de choix d'une telle loi de comportement, nous nous appuyons ici sur les travaux de Coussot (1992) sur le comportement des suspensions naturelles. On notera par ailleurs qu'une revue beaucoup plus complète est proposée par Ancey (2007), dans un cadre qui dépasse celui des laves torrentielles. Les principaux résultats de Coussot (1992) sont présentés en Figure 1.2. Pour une concentration volumique solide et une fraction argileuse données, ils font apparaître les différents domaines suivants :

- A faible concentration (inférieure à quelques %) le comportement est Newtonien.
- Pour des concentrations supérieures mais ne dépassant pas 20 à 40%, le mélange eau-matériau solide ne demeure pas homogène, à l'arrêt il subit une sédimentation rapide. Dans ce domaine, les écoulements sont biphasiques. C'est par exemple le domaine du charriage torrentiel.
- Pour des concentrations très fortes dépassant 60 à 85% selon les cas (dépend de l'étendue granulométrique), on sort du domaine des écoulements et le cisaillement du matériau se traduit par des phénomènes de fracturation.
- Pour des concentrations solides de l'ordre de 60 à 70% et une fraction argileuse faible, apparaît un domaine pour lequel le comportement peut être qualifié de granulaire (interactions directes grain-grain).
- Pour des concentrations solides comprises entre 40 et 85% et une fraction argileuse suffisamment élevée (typiquement supérieures à 10%), apparaît un vaste domaine pour lequel le comportement est celui d'un fluide à seuil rhéofluidifiant (contacts lubrifiés).

Ces travaux ont mis en évidence deux grandes classes de comportement. Sans prétendre à l'exhaustivité, on peut dire que de façon globale, ces deux classes correspondent aux deux grands types de modèles développés au cours des 15 dernières années pour traduire le comportement des laves torrentielles, à savoir les modèles viscoplastiques (Johnson 1970, Chen 1988a-b, Coussot 1992, Major & Pierson 1992, O'Brien & Julien 1993, Coussot 1994, Atapattu et al. 1995) et les modèles granulaires (Takahashi 1991, Ancey 1997, Iverson & Denlinger 2001, Denlinger & Iverson 2001, Iverson et al. 2004, Denlinger & Iverson 2004, Iverson 2003, Iverson 2005, Takahashi 2007).

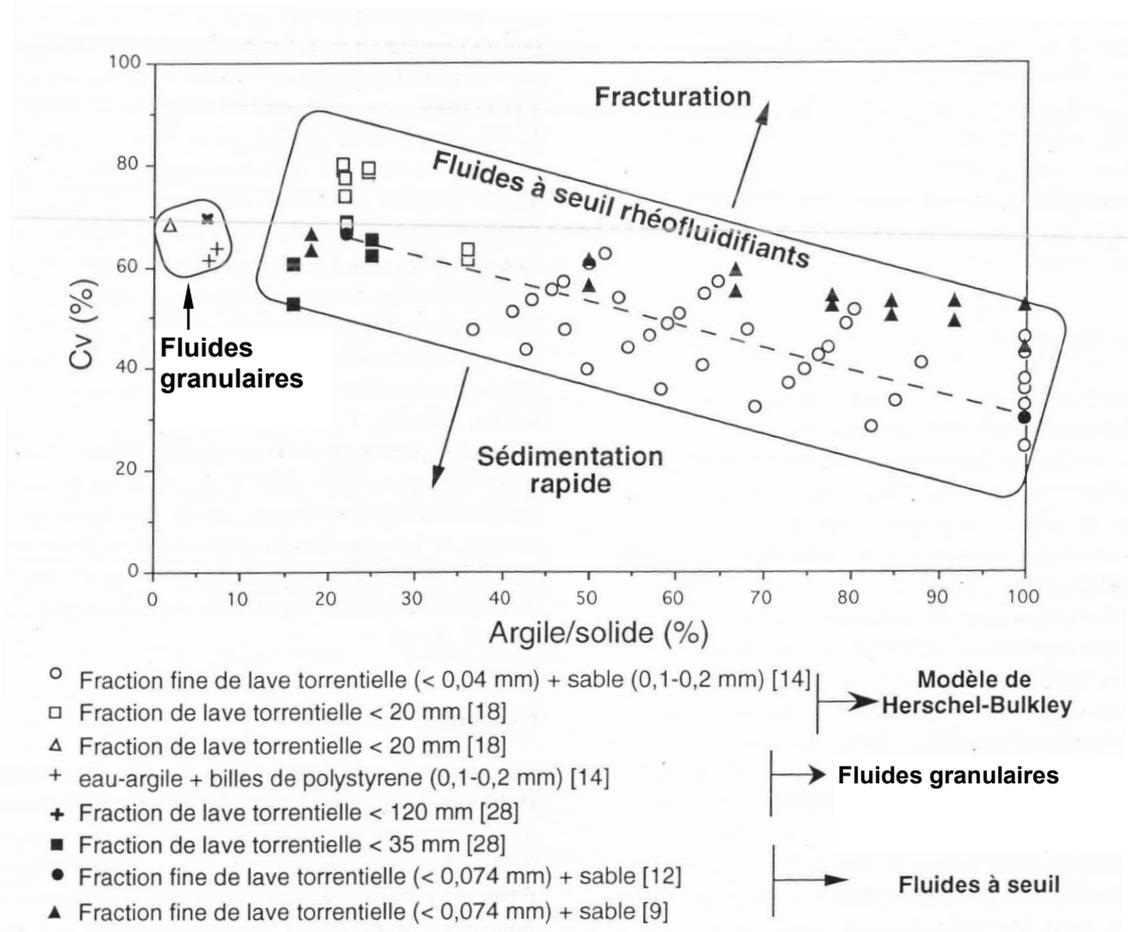


Figure 1.2 Loi de comportement en cisaillement simple de différents mélanges en fonction de leur fraction argileuse et de leur concentration solide d'après Coussot (1994)

1.4.2.2 Exemple de modèle viscoplastique

Les modèles viscoplastiques ont pour point commun de faire appel à la notion de seuil de contrainte qui traduit la transition entre comportement solide et comportement liquide du matériau, ainsi qu'à une loi visqueuse d'évolution des contraintes de cisaillement en fonction du taux de cisaillement. Un exemple de modèle viscoplastique est donné par le modèle de Herschel-Bulkley qui s'exprime de la façon suivante, en cisaillement simple :

$$\text{Si } \tau \geq \tau_c \text{ alors } \tau = \tau_c + K \dot{\gamma}^n \quad (1.1)$$

$$\text{Si } \tau \leq \tau_c \text{ alors } \dot{\gamma} = 0 \quad (1.2)$$

Où τ (Pa) est la contrainte de cisaillement, τ_c (Pa) est le seuil de contrainte, K (Pa.sⁿ) est la consistance, n (-) est le paramètre de la loi puissance et $\dot{\gamma}$ est le taux de cisaillement. Une expression tensorielle de ce modèle sera présentée au chapitre 5.

1.4.2.3 Exemple de modèle granulaire

Les modèles granulaires sont tous fondés sur une approche de type Coulomb traduisant un comportement frictionnel. Le modèle de Coulomb traduit une dépendance des contraintes de cisaillement par rapport aux contraintes normales et une indépendance par rapport au taux de cisaillement. Pour des écoulements suffisamment rapides, qualifiés de collisionnels, une dépendance par rapport au taux de cisaillement est ajoutée. Nous donnons ici l'exemple du modèle de Jop et al.

(2006) qui sera utilisé au chapitre 5 dans le cadre d'une modélisation numérique de type champ proche. En cisaillement simple ce modèle s'exprime de la façon suivante :

$$\tau = \sigma \tan \varphi(Co) \quad (1.5)$$

Où σ est la contrainte normale, φ est l'angle de frottement interne du matériau qui est fonction du nombre de Coulomb Co . Ce dernier s'exprime de la façon suivante :

$$Co = \frac{\rho_s d^2 \dot{\gamma}^2}{\sigma} \quad (1.6)$$

Où ρ_s est la masse volumique des particules solides et d leur diamètre.

On notera que pour des modèles de type Coulomb tel que celui-ci, Iverson (2003, 2005) a largement remis en cause l'approche rhéologique des laves torrentielles en faisant l'hypothèse qu'il s'agit d'un phénomène fondamentalement transitoire. L'interprétation d'Iverson est fondée sur le fait que dans un tel écoulement eau – matériau solide, la diffusion de la pression de l'eau interstitielle étant lente, sa pression locale peut atteindre des valeurs élevées. Ceci tend à diminuer fortement la contrainte normale effective et donc la contrainte de cisaillement. Le mélange peut alors être liquéfié et le rester sur des temps relativement longs. Cette approche, supportée par des résultats d'expérience en canal de grandes dimensions, vient remettre partiellement en cause l'approche fluide homogène, au moins pour des mélanges où des particules fines aux propriétés colloïdales sont absentes.

1.4.3 Une classification des laves torrentielles

Sur la base de considérations sur la loi de comportement des laves torrentielles et en prenant comme critères les caractéristiques des écoulements et des dépôts, Ancy (1999) a établi une classification présentée dans le Tableau 1.1. Il ne s'agit pas là de la seule classification existante (voir également Hungr [2005]). Toutefois, celle-ci présente l'avantage de mettre en regard loi de comportement et observations de terrain. Elle est de ce point de vue bien adaptée à une identification pratique du modèle le plus adapté pour un événement donné, notamment si on lui associe les critères de distinction entre classes de comportement établies par Bardou (2002). On notera que cette classification comporte une troisième classe relative aux écoulements de type lahars qui ne suit pas les modèles de comportement viscoplastique est granulaires présentés au paragraphe précédent. Le comportement pressenti pour les lahars correspond à un modèle de type Coulomb pour la phase de démarrage de l'écoulement, puis à un comportement Newtonien pour toute autre phase d'écoulement. Bien que majoritairement observé pour des mélanges d'eau et de cendres volcaniques, le comportement de type lahars a été observé pour des matériaux solides non volcaniques, pauvres en argile mais riches en silts.

Nom scientifique proposé		<i>Lave torrentielle à comportement viscoplastique</i>	<i>Lave torrentielle à comportement frictionnel-collisionnel</i>	<i>Lave torrentielle à comportement frictionnel-visqueux</i>
Nom commun		<i>Lave torrentielle à matrice boueuse</i>	<i>Lave torrentielle granulaire</i>	<i>Lahar¹</i>
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 Pas de bourrelet
	Forme des bourrelets et des lobes	Forme arrondie	Faces planes	
	Pente de la zone d'arrêt	> 5%	> 15 %	> 0,1 %
Caractéristiques mises en évidence en laboratoire	Rhéologie	Loi de comportement viscoplastique (Bingham, Herschel-Bulkley)	Loi de comportement de type Coulomb	Loi de comportement Coulomb aux faibles vitesses et Newton aux fortes vitesses
	Nombre de paramètres de la loi de comportement	2 ou 3 (K, n, τ_c)	2 (K, ϕ)	1 à 2 (ϕ , μ)
	Granulométrie	Matrice fine importante avec quantité importante d'argiles	Matrice fine faible, peu d'argiles	Matrice fine importante avec peu d'argiles et beaucoup de silts
	Essais d'identification des sols	Sols argileux	Sols grossiers	Sols limoneux, le plus souvent d'origine volcanique
Témoignages	Vitesse observée (m/s)	1-30	?	1-30

Tableau 1.1 Classification des laves torrentielles proposée par Ancy (1999)

1.4.4 Loi « hydraulique »

La loi de comportement peut directement être prise en compte dans le cadre d'une modélisation de type champ proche. En revanche, dans le cadre d'une modélisation de type champ moyen, que l'on pourra aussi qualifier d'hydraulique, il est nécessaire de faire appel à une loi reliant hauteur (ou section) et vitesse moyenne (ou débit) d'écoulement ou encore de calculer la contrainte de cisaillement moyenne au fond de l'écoulement en fonction de ces mêmes grandeurs. Un certain nombre de lois de ce type ont pu être déduites de considérations sur la loi de comportement, de considérations empiriques (Rickenmann 1999), ou d'ajustements de modèles numériques de propagation à des données de terrain (Rickenmann & Koch 1997, Rickenmann & Weber 2000). Nous ne présenterons ici en détail que la loi proposée par Coussot (1994), seule ayant été utilisée de façon détaillée dans le cadre de notre approche de modélisation.

1.4.4.1 Loi proposée par Coussot (1994)

Pour établir cette loi, Coussot a considéré un écoulement à surface libre permanent et uniforme d'un fluide de Herschel-Bulkley en canal infiniment large, en faisant l'hypothèse que le paramètre $n=1/3$.

¹ En général, le terme de lahar est employé spécifiquement pour désigner des écoulements de cendres volcaniques saturées en eau.

Le profil des vitesses d'un tel écoulement peut aisément être établi (Coussot 1994). Sa particularité est de présenter une zone non cisailée en surface, parfois dénommée « plug ». Une fois intégré sur la hauteur d'écoulement, il peut en être déduit une expression de la vitesse débitante :

$$U = \left(\frac{\tau_c}{K}\right)^3 h \left[\frac{1}{A} \left(\frac{\rho g R_H \sin \theta}{\tau_c} - 1 \right) \right]^{10/3} \quad (1.5)$$

Où U est la vitesse moyenne débitante, τ_c et K sont les paramètres de la loi de Herschel-Bulkley, ρ est la masse volumique, h l'épaisseur d'écoulement, R_H le rayon hydraulique, θ l'angle de la pente et A est un coefficient correcteur lié à la géométrie du canal et qui vaut théoriquement 1,93 dans le cas d'un écoulement infiniment large.

De la même façon, Coussot a établi l'expression de la contrainte de cisaillement moyenne à la paroi τ_p , donnée par :

$$\tau_p = \tau_c \left[1 + A \left(\frac{K}{\tau_c} \left(\frac{U}{h} \right)^{1/3} \right)^{0,9} \right] \quad (1.6)$$

Par ailleurs des expressions empiriques du coefficient correcteur A ont été établies pour un canal rectangulaire de largeur L , pour $h/L < 1$:

$$A = 1,93 - 0,43 \arctg \left[\left(\frac{10h}{L} \right)^{20} \right] \quad (1.7)$$

et pour un canal trapézoïdal (pente des berges de 45°) de largeur à la base B , pour $h/B < 4$:

$$A = 1,93 - 0,6 \arctg \left[\left(\frac{0,4h}{B} \right)^{20} \right] \quad (1.8)$$

Ces expressions, établies en régime permanent et uniforme, ont été validées pour une utilisation en régime permanent graduellement varié. Elles seront notamment utilisées aux chapitres 2 et 3 pour traiter des écoulements transitoires.

1.4.4.2 Similitude

Coussot (1994) a par ailleurs établi que les écoulements à surface libre d'un fluide de Herschel-Bulkley sont régis par trois nombres adimensionnels :

- le classique nombre de Froude qui traduit le rapport entre inertie et gravité :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh \cos \theta}} \quad (1.9)$$

- le nombre G qui traduit le rapport entre la contrainte motrice (gravité) et le seuil de contrainte :

$$G = \frac{\rho g h \sin \theta}{\tau_c} \quad (1.10)$$

- le nombre Hb qui traduit le rapport entre le seuil de contrainte et la contrainte visqueuse liée au mouvement :

$$Hb = \frac{\tau_c}{K} \left(\frac{h}{U} \right)^n \quad (1.11)$$

Ces trois grandeurs déterminent les critères de similitude permettant de lier écoulements réels et écoulements de laboratoire. Ils ont déterminé le choix des fluides modèles mis en œuvre lors des expériences présentées aux chapitres 2, 3 et 5.

1.5 Démarche scientifique

1.5.1 Une approche par nature pluridisciplinaire

Ma démarche scientifique, bien que principalement centrée sur les écoulements, s'est toujours efforcée d'assurer le lien entre les disciplines permettant d'aborder le phénomène de lave torrentielle dans sa globalité en étudiant les processus de formation, d'écoulement en chenal, d'étalement, d'arrêt et d'interaction avec des obstacles. Plus récemment, cette démarche a intégré des réflexions relatives à la gestion du risque, incluant de ce fait la composante humaine du risque : la vulnérabilité. Les disciplines scientifiques utilisées dans le cadre de ce travail sont donc principalement : l'hydraulique, la mécanique des fluides, la rhéologie, l'analyse numérique et dans une moindre mesure : la géomorphologie, l'hydrologie, la mécanique des structures et la sociologie.

Cette démarche personnelle s'est également attachée à fournir des outils et méthodes pratiques proches de l'ingénierie. D'où la place importante accordée dans ce travail à la validation des modèles produits.

1.5.2 Démarche scientifique et objectifs poursuivis

Le cadre scientifique dans lequel s'est déroulé l'essentiel de mes travaux sur les laves torrentielles est celui de la mécanique des fluides homogènes non newtoniens. Dans ce cadre, la principale différence entre les laves torrentielles et d'autres écoulements à surface libre réside dans l'expression de la loi de comportement. Lorsque ces travaux ont débuté, ce problème de loi de comportement était encore très peu défriché. On notera d'ailleurs qu'à l'heure actuelle, la résolution de ce problème a beaucoup progressé, sans toutefois qu'on puisse la considérer comme totalement réglée. J'ai toutefois pris le parti il y a une douzaine d'années de ne pas faire porter l'essentiel de mon travail sur ce point. En effet, à cette date les travaux entrepris notamment par Coussot (1992, 1994) ouvraient des perspectives très importantes de développement d'outils et de méthodes de modélisation des écoulements de laves torrentielles dont on pouvait penser qu'ils pourraient rapidement contribuer à des simulations d'événements réels et de ce fait être utilisés dans le cadre d'expertises des risques naturels. Une démarche de mise au point et de validation de tels outils était néanmoins nécessaire avant toute utilisation opérationnelle. Une telle validation, ainsi que l'évaluation des limites des modèles produits a constitué une part importante de mon activité durant plusieurs années.

Pour des raisons plus contextuelles que vraiment scientifiques, mes travaux ont principalement pris comme hypothèse un comportement viscoplastique des laves torrentielles, abordant de ce fait peu le comportement de type granulaire. Ces raisons sont les suivantes :

- une raison historique, les travaux de Coussot mentionnés plus haut qui offraient des perspectives très importantes lors de mon arrivée au Cemagref.
- une raison opérationnelle, le fait que les laves torrentielles boueuses (à comportement viscoplastique) sont particulièrement fréquentes en France et notamment dans des zones présentant des enjeux humains importants.
- une raison de répartition des domaines de compétence au sein du Cemagref, les modèles d'écoulements granulaires étant largement exploités par les spécialistes des avalanches.

A l'heure actuelle, l'approche fondée sur la mécanique des fluides homogènes ayant montré ses capacités mais aussi ses limites, d'autres hypothèses sont en cours d'étude dans le cadre d'une thèse

s'intéressant aux phénomènes de ségrégation et de formation du front granulaire des laves torrentielles.

Chronologiquement, à partir d'un cadre de départ constitué de l'hydraulique à surface libre et de l'hypothèse fluide homogène, ma démarche s'est construite dans une logique de prise en compte toujours plus étendue de l'ensemble des processus déterminant la propagation des laves torrentielles, donc très orientée « phénomène », et de sophistication des modèles développés afin d'en améliorer les performances. En fonction des objectifs poursuivis, différentes échelles d'approche ont été adoptées : de type champ moyen (hypothèses de type onde longue pour les écoulements présentant un rapport longueur sur épaisseur caractéristique élevé) ou de type champ proche (pour l'étude et la modélisation des écoulements au voisinage d'obstacles). Par ailleurs, ma démarche s'est toujours appliquée à fournir des outils et méthodes pouvant être mis en œuvre dans le cadre d'études ou d'expertises du risque lié aux laves torrentielles. J'ai donc eu le souci constant de tester la validité et les limites des modèles proposés, en référence aux phénomènes naturels, et d'assurer la convivialité et le transfert de ces outils afin de les rendre accessibles aux praticiens.

Les principales étapes de cette démarche peuvent être résumées ainsi :

- Modélisation de type champ moyen des écoulements chenalisés (1D) des laves torrentielles. Ce travail a été initié en 1992, dans un contexte où très peu (pour ne pas dire aucun) de modèles de propagation spécifiques aux laves torrentielles existaient et surtout aucun modèle qui ait été validé par confrontation à des écoulements réels. Ce travail s'est poursuivi jusqu'en 1996.
 - Construction d'un modèle numérique d'écoulement transitoire à surface libre en chenal pour les fluides à seuil (modèle 1D).
 - Confrontation de ce modèle à des écoulements de laboratoire afin d'analyser la validité et les limites des hypothèses et schémas numériques retenus.
 - Confrontation de ce modèle à des écoulements réels afin d'en analyser la validité en conditions de terrain et plus particulièrement l'adéquation de l'hypothèse fluide homogène pour simuler des écoulements réels chenalisés.
- Modélisation de type champ moyen des écoulements en étalement libre (2D) des laves torrentielles. Ce travail a été initié en 1995, dans un contexte où très peu (seul modèle identifié alors : O'Brien & Julien [1993], testé sur des écoulements peu concentrés) de modèles de propagation spécifiques aux laves torrentielles existaient et pas de modèle validé pour les laves torrentielles. Ce travail s'est poursuivi jusqu'en 2003.
 - Construction d'un modèle numérique d'écoulement transitoire à surface libre pour les fluides à seuil en étalement latéral libre et en phase d'arrêt (modèle 2D).
 - Confrontation de ce modèle à des écoulements de laboratoire afin d'analyser la validité et les limites des hypothèses et schémas numériques retenus.
 - Confrontation de ce modèle à des écoulements réels afin d'en analyser la validité en conditions de terrain et plus particulièrement l'adéquation de l'hypothèse fluide homogène pour simuler des écoulements réels en étalement.
 - Amélioration des performances de ce modèle numérique par optimisation de la structure des maillages de calcul.
 - Amélioration de la convivialité de ce modèle par l'interfaçage avec un système d'information géographique, ainsi qu'un travail prospectif sur une représentation visuellement réaliste des écoulements, de type « réalité virtuelle ».
- Détermination au terrain des conditions aux limites et paramètres des modèles d'écoulement. Initié à partir de 1996, ce travail s'est surtout intensifié à partir de 2000 sur le constat que d'assez nombreuses sources d'information existaient dans la bibliographie, mais qu'à notre connaissance, elles n'avaient jamais été clairement structurées autour de l'utilisation de modèles d'écoulement pour bâtir un cadre opérationnel. Ce travail s'est surtout poursuivi jusqu'en 2004 et dans une moindre mesure jusqu'à aujourd'hui.
 - Mise au point d'une méthodologie permettant la détermination des caractéristiques rhéologiques d'un matériau frais de lave torrentielle.
 - Mise au point d'un cadre méthodologique de prédétermination des caractéristiques d'écoulement en contexte incertain, fondée sur l'utilisation de scénarios. Une telle approche nécessitait une « mise à plat » de l'ensemble des modèles existants (y

compris modèles empiriques, statistiques, etc.) relatifs à la formation des laves torrentielles, à leur propagation en chenal, au phénomène de débordement, à l'étalement, à l'arrêt et à l'interaction avec des obstacles. Elle nécessitait également d'assurer l'interopérabilité entre ces différents niveaux de modèles. Par ailleurs, des analyses de sensibilité des modèles ont été menées.

- Analyse de la validité au terrain des modèles de propagation 1D et 2D dans un cas où les conditions de déclenchement peuvent être approchées de façon déterministe (cas d'un glissement de terrain dont une partie du matériau subit un processus de liquéfaction).
- Etude de la vulnérabilité structurelle. Initié en 2000, sur le constat qu'un nombre extrêmement limité d'études s'étaient intéressées aux interactions entre écoulements de laves torrentielles et obstacles, alors qu'en termes d'enjeux opérationnels, il s'agissait là d'une thématique très importante. Ce travail, qui fait l'objet des thèses de Lachamp (2003) et Tiberghien (2007) se poursuit encore actuellement.
 - Modélisation de type champ proche, fondée sur la méthode SPH (Smooth Particle Hydrodynamics), des écoulements à surface libre de fluides à seuil. L'objectif de ce travail était d'investiguer de façon théorique les interactions écoulements boueux – obstacles.
 - Etude expérimentale des interactions entre écoulements transitoires à surface libre de fluides à seuil et des obstacles.
- Etude des processus de ségrégation des granulats à l'intérieur d'un écoulement de fluide à seuil et de l'influence de la formation d'un front granulaire sur la dynamique d'un tel écoulement. Initié en 2006, ce travail repose sur le constat que les limites de l'approche « fluide homogène » ont été maintenant atteintes et sur l'hypothèse qu'une lave torrentielle peut être assimilée à un mélange de fluide interstitiel souvent viscoplastique et de particules non-colloïdales pouvant subir des phénomènes de ségrégation. Ce travail, qui fait l'objet de la thèse d'A. Ghemmour, se poursuit actuellement.

Chapitre 2

Modélisation de type champ moyen 1D pour les écoulements chenalés de laves torrentielles

2.1 Objectifs

On entend ici par modélisation 1D, une approche de type « hydraulique » fondée sur les hypothèses de Saint-Venant, qui raisonne sur les grandeurs physiques moyennes dans une section en travers d'écoulement. Il s'agit d'une modélisation « filaire » s'appuyant sur un maillage monodimensionnel du profil en long du chenal torrentiel, d'où la dénomination 1D. Les deux objectifs principaux fixés lors de l'initiation de ce travail, il y a une quinzaine d'années, étaient d'une part, de bâtir un modèle numérique, capable de simuler les écoulements transitoires chenalés des laves torrentielles et d'autre part, de le valider et d'en tester les limites. Compte tenu de la nature très transitoire des laves torrentielles et de la présence d'un front généralement raide, des techniques numériques adaptées ont été choisies. Dans le cadre de la mécanique des fluides homogènes, nous nous sommes alors appuyés sur les résultats les plus récents en matière de lois de comportement et plus spécifiquement de lois hydrauliques (relations hauteur – débit) adaptées aux laves torrentielles.

L'objectif de validation du modèle a été abordé en deux temps :

- une première étape au laboratoire avec des fluides boueux bien caractérisés rhéologiquement, afin de tester les capacités du modèle – notamment les techniques numériques utilisées - à simuler des écoulements transitoires de fluides à seuil en conditions contrôlées et sans préjuger de la validité au terrain de la loi de comportement adoptée.
- une seconde étape, de confrontation à des écoulements réels afin d'analyser la validité du modèle en conditions de terrain et plus particulièrement l'adéquation de l'hypothèse fluide homogène pour simuler des écoulements réels de laves torrentielles chenalées.

En cas de résultat positif à ces deux étapes de validation, l'objectif était de finaliser le modèle en vue d'une utilisation par les services opérationnels en charge de la gestion du risque « laves torrentielles ». Ceux-ci auraient alors pu le mettre en œuvre dans le cadre d'études au même titre que d'autres modèles existants d'hydraulique à surface libre d'eau claire ou faiblement chargée.

2.2 Présentation du modèle numérique 1D

On considère des écoulements à surface libre chenalés pour lesquels les deux variables principales sont la section en travers et la vitesse moyenne de l'écoulement. Le matériau est supposé continu, homogène, incompressible et son écoulement est supposé laminaire. Le front granulaire et son influence sur l'écoulement sont négligés, ainsi que le pouvoir érosif des laves torrentielles (hypothèse

fond fixe). Ces deux hypothèses, a priori fortes, seront discutées ultérieurement, après confrontation du modèle à des événements réels.

En pratique, la propagation du phénomène très transitoire des laves torrentielles est abordée en résolvant des équations de type Saint-Venant. Ceci signifie notamment que les vitesses et accélérations verticales sont négligées (hypothèse onde longue). Nous faisons également l'hypothèse d'une répartition des pressions de type hydrostatique.

2.2.1 Bases théoriques du modèle

Nous utilisons ici les équations de Saint-Venant, écrites sous forme conservative. L'avantage essentiel de cette forme est de vérifier la relation de Rankine-Hugoniot (relation de bilan entre l'amont et l'aval d'une discontinuité telle qu'un ressaut pour un écoulement à surface libre). Associée à un schéma numérique approprié, lui-même qualifié de conservatif, cette formulation permet de construire un modèle numérique capable de traiter une discontinuité, telle qu'un front, comme n'importe quel point courant d'écoulement et d'en déterminer la position à chaque instant. Une telle technique permet un traitement global de tout écoulement transitoire présentant un front de propagation avec un degré de complexité et des temps de calcul raisonnables (Vila 1986a). Comme toute formulation de type Saint-Venant, le système d'équations n'est complet qu'après adoption d'une équation de fermeture traduisant la contrainte de cisaillement au fond en fonction des variables principales, qui dans ce cas sont la section en travers et le débit d'écoulement (Jin & Fread 1999). Nous adoptons la formulation établie par Coussot (1994), ce qui implique que le modèle n'est a priori valide que pour les laves torrentielles à matrice boueuse. Les équations de Saint-Venant à forte pente (Berger 1994) que nous utilisons s'expriment de la façon suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} S \\ Q \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} Q \\ \delta \frac{Q^2}{S} + P(S, x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ gS \sin(\theta) - \frac{\tau_p}{\rho} P_e + B(S, x) \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

où la pression est définie par :

$$P(S, x) = \int_0^h g(h-y) \cos(\theta) L(y, x) dy \quad (2.2)$$

de telle sorte que :

$$\frac{\partial P(S, x)}{\partial x} = gS \cos(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.3)$$

et le terme de pression latérale, dû aux variations longitudinales du profil en travers est défini par :

$$B(S, x) = \int_0^h g(h-y) \cos(\theta) \frac{\partial L(y, x)}{\partial x} dy \quad (2.4)$$

où S est la section transversale droite de l'écoulement, Q est le débit, θ est l'angle de la pente du chenal, g est la gravité, τ_p est la contrainte de cisaillement à la paroi, ρ est la masse volumique du matériau, P_e est le périmètre mouillé qui est déterminé par la géométrie du canal et la profondeur d'écoulement, h est la profondeur d'écoulement qui est liée à la section d'écoulement et $L(y, x)$ est la largeur du chenal pour une abscisse x et une cote y données. δ est un terme correctif, généralement proche de 1 (assimilé à 1 dans la suite du développement), permettant de prendre en compte les écarts entre vitesse locale et vitesse moyenne de l'écoulement. L'expression de la contrainte à la paroi utilisée a été présentée au chapitre 1. On peut ici l'exprimer sous la forme :

$$\tau_p = \tau_c \left[I + A \left[\frac{K}{\tau_c} \left(\frac{Q/S}{h} \right)^{1/3} \right]^{0,9} \right] \quad (2.5)$$

Les effets de la pente, le frottement et la pression latérale, qui constituent le second membre du système d'équations (2.1) ont une influence linéique et n'interviennent donc pas sur l'expression des bilans de masse et de quantité de mouvement au travers d'une discontinuité (Vila 1986a-b). Les solutions du système (2.1) vérifient donc également les relations de Rankine-Hugoniot, qui s'expriment de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \sigma[S] &= [Q] \\ \sigma[Q] &= \left[\frac{Q^2}{S} + P(S, x) \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

où σ est la vitesse de déplacement de la discontinuité et $[-]$ désigne le saut d'une quantité de part et d'autre de la discontinuité

2.2.2 Résolution numérique

Si l'on considère uniquement le premier membre des équations de Saint-Venant conservatives, en annulant le second membre, on obtient un système strictement hyperbolique non linéaire.

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} S \\ Q \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{S} + P(S, x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Résoudre numériquement ce système d'équations nécessite de traiter le problème des discontinuités dans la propagation. Une solution à la fois élégante et très efficace consiste à utiliser des résultats théoriques importants sur la solution (analytique ou approchée) du problème de Riemann (Eq. 2.9) (Toro 1999). Nous avons donc fait appel à un schéma numérique de type Godunov (Harten et al. 1983, Vila 1986a-b, Fraccarollo & Toro 1995), qui utilise les résultats du problème de Riemann. Nous n'exposerons ici en détail que le cas du schéma de Godunov du premier ordre en temps et en espace. Toutefois 2 schémas numériques, très proches dans leur conception, sont implémentés dans le code de calcul :

- le schéma de Godunov pour lequel la solution est considérée comme constante par maille, il est du premier ordre en temps et en espace.
- le schéma de Van Leer pour lequel la solution est considérée comme linéaire par maille. Il est du second ordre en espace et du premier ou du second ordre en temps.

Ce type d'approche est particulièrement efficace pour résoudre un tel système d'équations (Fraccarollo & Toro 1995). De plus, il introduit très peu de diffusion numérique au niveau du front. La non-linéarité de ce problème nous a amené à préférer un schéma numérique explicite.

Considérons ici un schéma explicite et un maillage régulier monodimensionnel de type différences finies avec un pas de temps Δt et un pas d'espace Δx . La solution au temps $(n+1)\Delta t$ au point $j\Delta x$, notée U_j^{n+1} est donnée en fonction de la solution au temps $n\Delta t$ notée U_j^n et des flux numériques aux interfaces de la maille de calcul j , notés $F_{j-1/2}$ et $F_{j+1/2}$, par l'expression suivante :

$$U_j^{n+1} = U_j^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{j-1/2} - F_{j+1/2}] \quad (2.8)$$

avec $U = \begin{pmatrix} S \\ Q \end{pmatrix}$ et $F(U) = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{S} + P(S, x) \end{pmatrix}$ dans notre cas.

2.2.2.1 Le problème de Riemann

Pour calculer les flux $F(U)$ aux interfaces du maillage de calcul, les schémas de type Godunov utilisent les solutions du problème de Riemann. Ce dernier est exprimé par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = 0 \\ U(x,0) = \begin{cases} U_g & \text{si } x < 0 \\ U_d & \text{si } x > 0 \end{cases} \end{cases} \quad (2.9)$$

Une façon de traduire ce que représente concrètement le problème de Riemann est de l'assimiler en hydraulique au problème d'une rupture de barrage dans un chenal à fond plat, où les extrémités droite et gauche ne sont pas limitées, où les dissipations (frottements, viscosité) sont négligées et où la condition initiale est donnée par deux surfaces libres horizontales, caractérisées par un état à gauche U_g et un état à droite U_d séparés par une discontinuité.

La solution $U(x,t)$ est connue exactement (Figure 2.1), elle est constituée de deux ondes qui peuvent être soit des chocs soit des détente, séparées par un état constant U^* et qui relient U_g et U_d . On s'intéresse tout particulièrement à la valeur de la solution au point $x = 0$ qui est désignée sous le nom de solution stationnaire U_s et qui ne dépend que des états initiaux U_g et U_d ainsi que de x/t . Les équations des courbes de détente et de choc sont connues analytiquement. Une onde de détente est une caractéristique qui diverge par rapport aux caractéristiques des points voisins dans le plan (x,t) . Un choc est constitué par la rencontre de caractéristiques issues de points différents. Leur intersection dans le plan (x,t) , appelée courbe de choc, correspond physiquement à un ressaut mobile en hydraulique.

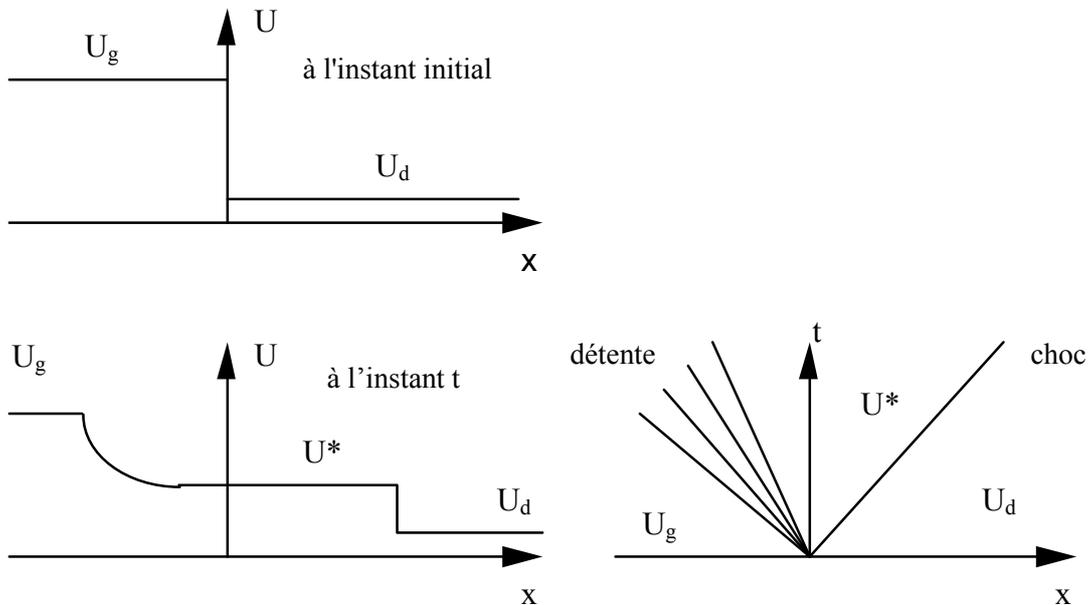


Figure 2.1 Schématisation du problème de Riemann

2.2.2.2 Le solveur de Roe

La solution analytique du problème de Riemann est connue mais délicate à manier, par conséquent nous utilisons une solution linéaire approchée donnée par le solveur de Roe (Roe 1981, Vila 1986b). Il s'agit d'une solution du problème de Riemann linéarisé, pour laquelle toutes les ondes sont considérées comme des détente. Une linéarisation du problème revient à écrire :

$$\frac{\partial F(U)}{\partial x} = A \frac{\partial U}{\partial x} \quad (2.10)$$

A étant une matrice. Le problème de Riemann peut alors être formulé de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + A \frac{\partial U}{\partial x} &= 0 \\ x < x_i, U &= U_g \\ x > x_i, U &= U_d \end{aligned} \quad (2.11)$$

où x_i désigne la position de l'interface entre l'état à gauche et l'état à droite.

Pour simplifier l'exposé de la méthode, $U = \begin{pmatrix} h \\ h\bar{u} \end{pmatrix}$ et $F(U) = \begin{pmatrix} h\bar{u} \\ h\bar{u}^2 + g\frac{h^2}{2} \end{pmatrix}$ sont ici reformulés en

fonction de la hauteur h et de la vitesse moyenne \bar{u} sur la hauteur d'écoulement, ce qui revient à traiter un écoulement dans un canal infiniment large. Une solution pour A est donnée par la matrice Jacobienne, de telle sorte que le système linéarisé peut s'écrire :

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} h \\ h\bar{u} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ c^2 - \bar{u}^2 & 2\bar{u} \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} h \\ h\bar{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

où $c = \sqrt{gh \cos(\theta)}$ est la vitesse de propagation des ondes gravitaires.

Cette matrice possède deux valeurs propres réelles distinctes (système hyperbolique) :

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \bar{u} - c \\ \lambda_2 &= \bar{u} + c \end{aligned} \quad (2.13)$$

et deux vecteurs propres :

$$\begin{aligned} \vec{v}_1 &= \begin{pmatrix} 1 \\ \lambda_1 \end{pmatrix} \\ \vec{v}_2 &= \begin{pmatrix} 1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Il existe alors deux nombres w_1 et w_2 , appelés invariants de Riemann, tels que :

$$\begin{aligned} \vec{\text{grad}}(w_1) \bullet \vec{v}_1 &= 0 \\ \vec{\text{grad}}(w_2) \bullet \vec{v}_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

De façon explicite ces invariants peuvent être exprimés par :

$$\begin{aligned} w_1 &= \bar{u} + 2c \\ w_2 &= \bar{u} - 2c \end{aligned} \quad (2.16)$$

Ils permettent de diagonaliser la matrice A , de telle sorte que le système peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \bar{u} + 2c \\ \bar{u} - 2c \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{u} - c & 0 \\ 0 & \bar{u} + c \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} \bar{u} + 2c \\ \bar{u} - 2c \end{pmatrix} = 0 \Leftrightarrow \frac{D}{Dt} \begin{pmatrix} \bar{u} + 2c \\ \bar{u} - 2c \end{pmatrix} = 0 \quad (2.17)$$

2.2.2.3 Le schéma de Godunov

Dans le cas où aucune discontinuité n'apparaît le système (2.17) peut aisément être résolu par la classique méthode des caractéristiques (Cunge et al. 1980). Néanmoins, le système étant non linéaire, des discontinuités, matérialisées par des ondes de choc, sont susceptibles d'apparaître. Dans ce cas, le système ne possède pas de solution régulière mais des solutions faibles ou solutions au sens des distributions. La solution globale du problème est obtenue par raccordement d'une série de solutions continues par morceaux. Aucun traitement spécifique des discontinuités n'est donc nécessaire. Une solution du problème sans second membre étant obtenue, une correction est ensuite réalisée pour tenir compte du second membre (gravité, loi de frottement, etc.). La résolution complète, par un schéma de Godunov, comporte donc les étapes détaillées ci-dessous.

- 1^{ère} étape : Projection

On prolonge la solution U_j^n sur toute la maille jusqu'aux interfaces, ce qui transforme le problème en une succession de discontinuités à chaque interface, U_j^n étant la solution sur la maille d'abscisse $j\Delta x$ au temps $n\Delta t$.

$$U_j^n = \frac{1}{\Delta x} \int_{(j-1/2)\Delta x}^{(j+1/2)\Delta x} U^n(x, t) dx \quad (2.18)$$

- 2^{ème} étape : Résolution du problème de Riemann pour chacune des interfaces

Pour chacune des interfaces du maillage la solution stationnaire U_s du problème de Riemann est calculée ainsi que le flux $F(U_s)$ correspondant. On en déduit pour chaque maille j , les flux $F_{j-1/2}$ et $F_{j+1/2}$.

- 3^{ème} étape : Sommation des flux

Pour chaque cellule j du maillage, la sommation des flux aux interfaces permet de calculer la valeur de U au temps $t = (n+1)\Delta t$.

$$U_j^{n+1} = U_j^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{j-1/2} - F_{j+1/2}] \quad (2.19)$$

- 4^{ème} étape : Correction pour tenir compte du second membre

Le schéma étant explicite, la valeur du second membre au temps $t = n\Delta t$ est ajoutée à la solution sans second membre.

$$U^{n+1} = \hat{U}^{n+1} + G(U^n) \quad (2.20)$$

Où $G(-)$ désigne l'expression du second membre et \hat{U}^{n+1} , la solution sans second membre.

Le problème étant formulé de façon explicite, pour que les différents problèmes de Riemann n'interagissent pas entre eux, il est nécessaire que les caractéristiques issues des interfaces ne puissent se rencontrer. Cette condition classique sur le pas de temps, dite condition de Courant-Friedrich-Levy (ou CFL) se traduit par :

$$\Delta t = CFL \frac{\Delta x}{\max(|\bar{u}_j| + c_j)} \quad (2.21)$$

où \bar{u}_j est la vitesse et c_j la célérité des ondes dans la maille j . La CFL doit être inférieure à 1 et d'autant plus petite que le second membre peut prendre des valeurs élevées.

2.2.2.4 Traitement des conditions aux limites

En fonction du régime de l'écoulement, la nature des conditions aux limites amont et aval du domaine de calcul doit être adaptée. Dans le cas d'un écoulement subcritique, on impose une condition à la limite amont sur le débit et une condition à la limite aval sur la section d'écoulement ; en régime supercritique deux conditions à la limite amont (débit et section d'écoulement) et pas de condition aval (sortie libre). En pratique, le problème de Riemann sur la première (resp. la dernière) interface du maillage est résolu en tenant compte de la condition à la limite imposée (débit et/ou section), à l'amont (resp. à l'aval) de l'interface.

2.3 Données d'entrée / sortie

2.3.1 Entrées

Les principales données d'entrée du modèle, stockées dans des fichiers ASCII, sont saisies grâce à un préprocesseur. Elles sont constituées de :

- paramètres du maillage de calcul (nombre et taille des cellules).
- paramètres géométriques du domaine d'écoulement (représentatifs du profil en long et des profils en travers).
- conditions initiales (hauteurs et vitesses d'écoulement à l'instant initial, si nécessaire).
- conditions aux limites (débit entrant, section imposée en amont ou en aval du domaine de calcul, condition de sortie libre, etc.).
- paramètres rhéologiques du matériau de l'écoulement.
- paramètres de gestion du calcul (CFL, temps maximum, pas de temps de sauvegarde des résultats, etc.).

2.3.2 Sorties

Les sorties sont constituées d'un certain nombre de fichiers donnant les hauteurs, sections, vitesses et débits d'écoulement sous forme de profils (valeurs en fonction de l'abscisse pour un instant donné) ou d'hydrogrammes (valeurs de débit, hauteur, section ou vitesse en fonction du temps pour une abscisse donnée).

2.4 Confrontation du modèle 1D à des expériences de laboratoire

La confrontation à des expériences de laboratoire présentée ici, a pour objectif de juger de la pertinence et des éventuelles limites de l'approche numérique 1D. Elle est une étape intermédiaire, permettant la validation du modèle en conditions contrôlées, avant la confrontation à des écoulements réels. Nous adoptons le principe de réaliser des écoulements transitoires de type rupture de barrage avec des matériaux boueux pour lesquels la validité du modèle de Herschel-Bulkley est établie. Les valeurs des paramètres rhéologiques sont déterminées de façon indépendante.

2.4.1 Les expériences de laboratoire

2.4.1.1 Le matériau modèle et l'identification des paramètres rhéologiques

Les matériaux fabriqués pour les expériences sont constitués de mélanges eau-argile naturelle (Sinard, Isère, France) à différentes concentrations. Ils sont au nombre de quatre, notés A, B, C et D, dont les caractéristiques rhéométriques (paramètres de la loi de Herschel-Bulkley) ont été mesurées de façon indépendante à l'aide d'un rhéomètre plan-plan de laboratoire et sont reportées dans le Tableau 2.1. Pour plus de détails sur la technique utilisée pour l'ajustement du modèle de Herschel-Bulkley aux mesures effectuées au rhéomètre, on se reportera à Coussot (1992). En cumulant les incertitudes des mesures et du calage de la loi, on obtient des erreurs d'estimation de l'ordre de 20% sur les paramètres rhéologiques. Le calage a été particulièrement délicat pour le matériau D. Les matériaux mis en œuvre permettent d'assez bien respecter les critères de similitude établis par Coussot (1994).

matériau	masse volumique ρ (kg.m^{-3})	contrainte seuil τ_c (Pa)	K ($\text{Pa.s}^{1/3}$)
A	1410	19	3,5
B	1422	17	5,6
C	1397	9,5	3,1
D	1330	4,5	1,4

Tableau 2.1 Paramètres rhéologiques des matériaux expérimentaux (hypothèse $n = 1/3$)

2.4.1.2 Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (Figure 2.2) est constitué d'une partie hydraulique et d'une partie électronique de mesure. Le dispositif hydraulique est constitué d'un canal à section rectangulaire d'une largeur de 60 cm et d'une longueur de 4 m dont la pente peut être facilement modifiée. L'extrémité amont du canal (abscisse $x = 0$) est limitée par une paroi. A l'abscisse 0,85 m est disposée une plaque verticale amovible servant de barrage qui peut être retirée rapidement par coulissement vers le haut. Le dispositif de mesure est constitué de 3 capteurs de distance à ultrasons, disposés dans le plan médian du canal. Ils permettent une détermination des hauteurs d'écoulement avec une fréquence de 33 mesures par seconde, sont disposés aux abscisses 1,65 m, 2,75 m et 3,85 m et sont reliés à un système d'acquisition.

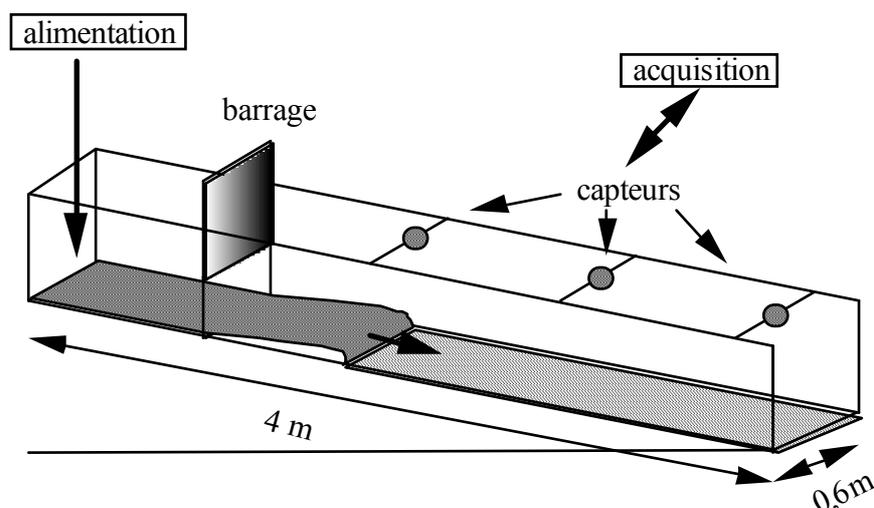


Figure 2.2 Représentation schématique du dispositif expérimental

2.4.1.3 Le principe des expériences

Le principe retenu consiste à effectuer des lâchers instantanés de matériau modèle dans le canal et à mesurer les caractéristiques de la propagation de l'écoulement (Laigle & Coussot 1997). Les laves torrentielles étant des écoulements par bouffées, deux cas de figure ont été étudiés :

- la première bouffée, traduite ici par des écoulements en canal initialement propre.
- les bouffées suivantes, qui se propagent sur du matériau préalablement déposé et qui sont traduites ici par des écoulements en canal présentant une hauteur initiale non-nulle.

Outre les propriétés rhéologiques du matériau utilisé, les écoulements en canal propre sont entièrement déterminés par les conditions initiales, c'est-à-dire la hauteur de matériau stocké à l'amont du barrage (la surface libre du matériau stocké est horizontale) et la pente du canal. Pour les propagations sur dépôt, il convient de prendre également en compte l'épaisseur de celui-ci. Environ 150 essais ont été effectués dans des conditions différentes de pente (6%, 11%, 16%, 21%, 26%, 31%) de hauteur de matériau initialement stocké derrière le barrage (de 5 cm à environ 20 cm) et de propriétés rhéologiques du matériau (cf. Tableau 2.1). Différentes sources d'incertitudes de mesure sont dues, soit au mode opératoire (ouverture du barrage pas complètement instantanée, adhérence d'un peu de matériau au barrage, synchronisation entre ouverture du barrage et déclenchement de l'acquisition, etc.) ou au système de mesure lui-même (surface de mesure par les capteurs à ultrasons de l'ordre de 4 cm, précision des capteurs, etc.). Ces incertitudes ont été estimées de l'ordre de 5 à 15% des valeurs mesurées de hauteur ou de temps de parcours.

2.4.2 Écoulements à hauteur initiale nulle

2.4.2.1 Comportement et sensibilité du modèle

Les objectifs de l'analyse de sensibilité sont de mettre en évidence les paramètres qui déterminent le plus fortement les résultats de simulation et d'analyser comment une incertitude donnée sur les paramètres d'entrée (pente, paramètres rhéologiques, etc.) se traduit en incertitude sur les résultats (hauteur d'écoulement, vitesse, distance parcourue, etc.), en tenant compte des conditions d'écoulement (écoulement pleinement développé ou phase d'arrêt par exemple).

Nous nous plaçons ici dans le cadre d'écoulements à vitesse initiale nulle et en canal uniforme supposé très large par rapport aux hauteurs d'écoulement atteintes. Dans ces conditions, nos écoulements sont entièrement déterminés par la hauteur initiale à l'amont immédiat du barrage, la pente et les paramètres rhéologiques. Sur la base de considérations sur les nombres adimensionnels Fr , G et Hb (Coussot, 1994), on peut aisément déduire que nos conditions expérimentales sont entièrement décrites par les deux nombres adimensionnels :

$$G' = \frac{\rho g H_{bar} \sin(\theta)}{\tau_c} \quad (2.22)$$

et

$$Hb' = \frac{K}{\tau_c} \left(\frac{g \cos(\theta)}{H_{bar}} \right)^{n/2} \quad (2.23)$$

où H_{bar} est la hauteur de matériau en amont immédiat du barrage au temps initial, θ est l'angle de la pente, K et τ_c sont les paramètres rhéologiques, ρ est la masse volumique du matériau, g est la gravité et $n = 1/3$.

Dans le cadre des expériences menées, la valeur de G' est comprise entre 4 et 70 et celle de Hb' est comprise entre 0,35 et 0,8. Cette fourchette de valeurs est suffisamment large pour inclure des écoulements en similitude de bon nombre de laves torrentielles réelles. Par exemple, le matériau A en écoulement dans le canal de 4 m de longueur peut traduire à l'échelle $1/30^\circ$ le comportement d'un matériau naturel ($\rho = 2200 \text{ kg.m}^{-3}$, $\tau_c = 900 \text{ Pa}$, $K = 290 \text{ Pa.s}^{1/3}$) dans un chenal de 120 m de long. Les volumes mis en œuvre correspondraient alors à des bouffées de 400 à 3000 m³, en nature.

La simulation d'un exemple, fondé sur des valeurs arbitraires de G' et Hb' , montre qu'un écoulement se décompose en trois phases qui sont respectivement un démarrage, une phase d'écoulement pleinement développé et une phase d'arrêt. Pour un écoulement pleinement développé, après une diminution rapide observée lors de la mise en vitesse, les hauteurs maximales tendent asymptotiquement vers une valeur quasi-constante (Figure 2.3). Les vitesses du front restent à peu près constantes au cours de ces deux premières phases (Figure 2.4). L'arrêt se traduit par une diminution rapide des hauteurs maximales d'écoulement et des vitesses de propagation du front. En fait, aussi bien expérimentalement que numériquement, la phase d'arrêt débute par une diminution très rapide de la vitesse de propagation du front qui laisse ensuite la place à un écoulement lent (de l'ordre de quelques mm/min) avant que l'arrêt complet ne soit atteint au bout généralement de plusieurs minutes.

L'étude de sensibilité porte ici plus particulièrement sur les hauteurs maximales et sur les temps de propagation du front d'écoulement. Nous examinons un exemple fondé sur une valeur fixe de $Hb' = 0,684$ et une variation de $\pm 10\%$ de G' autour de sa valeur initiale égale à 35. Les résultats sont exprimés sous forme de hauteur maximale adimensionnelle (Figure 2.3) et de temps de propagation adimensionnel (Figure 2.4). Par rapport à ces variables, la sensibilité du modèle est faible durant les phases de mise en vitesse et d'écoulement pleinement développé. Au cours de ce dernier, la sensibilité sur les hauteurs maximales d'écoulement reste à peu près constante alors qu'elle croît à peu près linéairement avec la distance parcourue en ce qui concerne les temps de parcours. En revanche, le modèle présente une forte sensibilité, aussi bien sur les hauteurs maximales que sur les temps d'écoulement à proximité d'une phase d'arrêt. Les résultats présentés ont été établis avec un seul couple (G', Hb') et uniquement pour une variation de G' , mais nous avons pu établir que les résultats présentés restent qualitativement valables pour une variation de Hb' . Une étude de l'évolution de la sensibilité montre que celle-ci diminue lorsque la valeur de Hb' diminue ou lorsque la valeur de G' augmente.

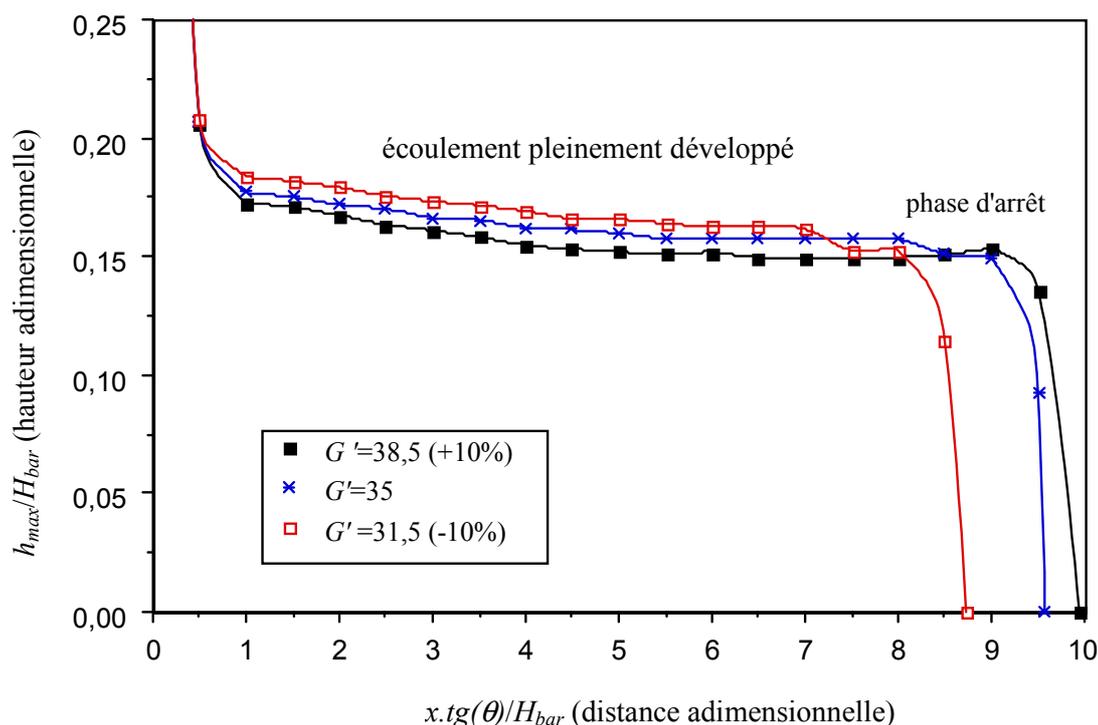
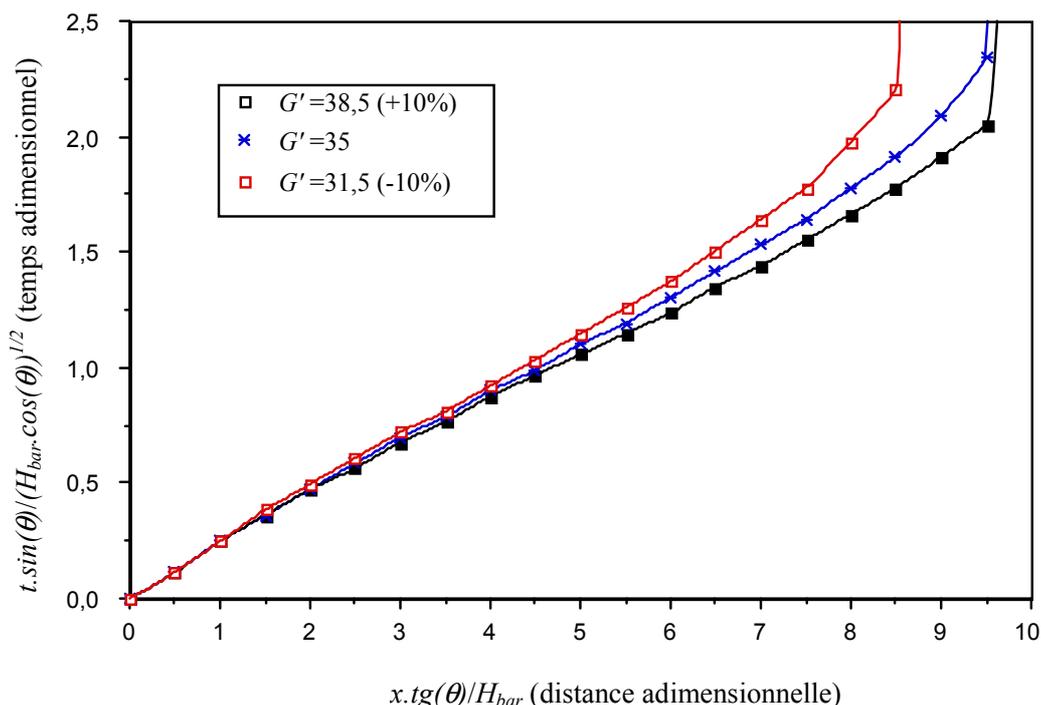


Figure 2.3 Sensibilité sur les hauteurs maximales d'écoulement ($Hb' = 0,684$)

Figure 2.4 Sensibilité sur les temps de propagation ($Hb' = 0,684$)

2.4.2.2 Confrontation entre expériences et simulations

La validation du modèle numérique passe par une confrontation entre simulations et résultats expérimentaux. Un exemple de confrontation portant sur les limnigrammes (hauteurs en fonction du temps) mesurés et simulés au niveau des capteurs à ultrasons est présenté en Figure 2.5. Pour une confrontation globale sur l'ensemble des expériences, nous avons retenu deux variables principales : les hauteurs maximales d'écoulement et les temps de parcours ; et deux variables secondaires : l'épaisseur du dépôt de matériau en fin d'expérience et la distance parcourue avant arrêt, dans le cas où celui-ci se produit dans le canal. Qualitativement, les simulations et les mesures présentent une bonne concordance. La forme des limnigrammes simulés est généralement bien respectée (Figure 2.5), les ordres de grandeur des hauteurs et des temps de propagation sont tout à fait cohérents avec les mesures. Les différences portent sur :

- un décalage des hauteurs maximales d'écoulement (Figure 2.6) dans un rapport généralement inférieur à $\pm 20\%$ de la valeur mesurée. Seules 12% des valeurs calculées s'écartent de cette fourchette. Un certain nombre d'entre elles correspondent à des phases d'arrêt pour lesquelles il a été établi que la sensibilité du modèle est forte (§ 2.4.2.1).
- un décalage du temps d'arrivée au niveau d'un capteur (Figure 2.7) généralement compris dans la fourchette -20% à $+10\%$ de la valeur mesurée, sauf dans le cas d'écoulements proches d'une phase d'arrêt pour lesquels le décalage peut être important (sensibilité forte) ;
- un décalage de la hauteur d'écoulement observée en fin d'expérience (à $t = 10$ secondes) pouvant varier entre 0 et $+10$ à $+15\%$ de la hauteur mesurée ;
- pour les simulations de la distance d'arrêt, les différences peuvent atteindre $\pm 25\%$ de la distance parcourue mesurée.

La plupart des différences observées restent à l'intérieur de la fourchette d'incertitude attachée aux mesures. En d'autres termes, les incertitudes sur l'estimation des paramètres rhéologiques ou les incertitudes expérimentales en général, permettent à elle seules d'expliquer les discordances observées entre simulations et mesures, les éventuelles éventuels biais imputables au modèle lui-même n'étant de ce fait plus discernables.

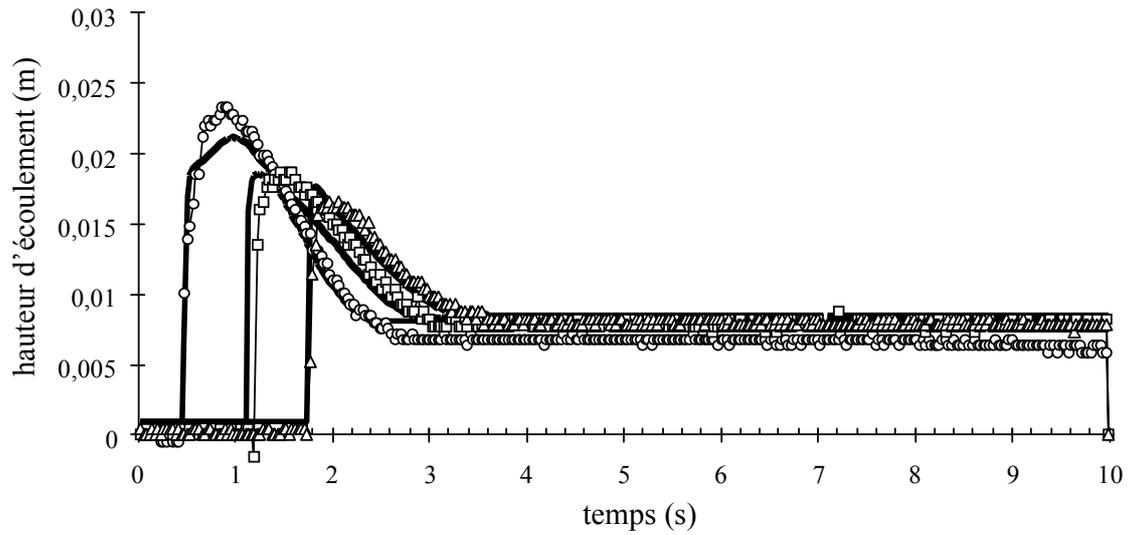


Figure 2.5 Exemple de confrontation simulation / expérience avec hauteur initiale nulle (pente = 21%, $H_{bar} = 14$ cm, matériau A) au niveau des 3 capteurs de hauteur ; les traits pleins correspondent aux simulations ; chacun des cercles, carrés ou triangles correspond à une mesure.

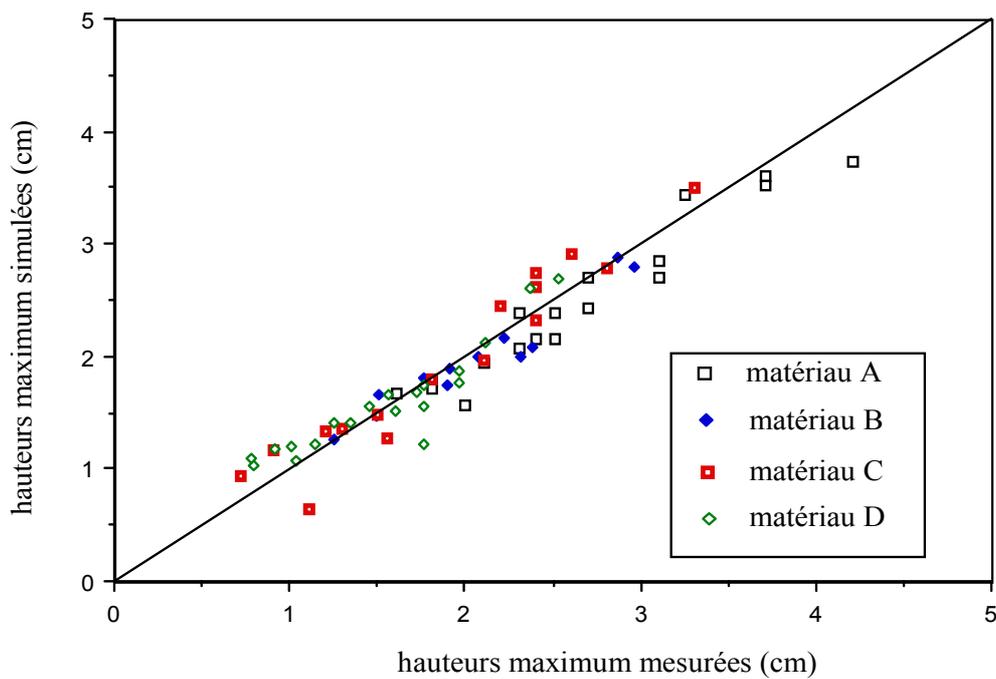


Figure 2.6 Confrontation des hauteurs maximales d'écoulement simulées et mesurées

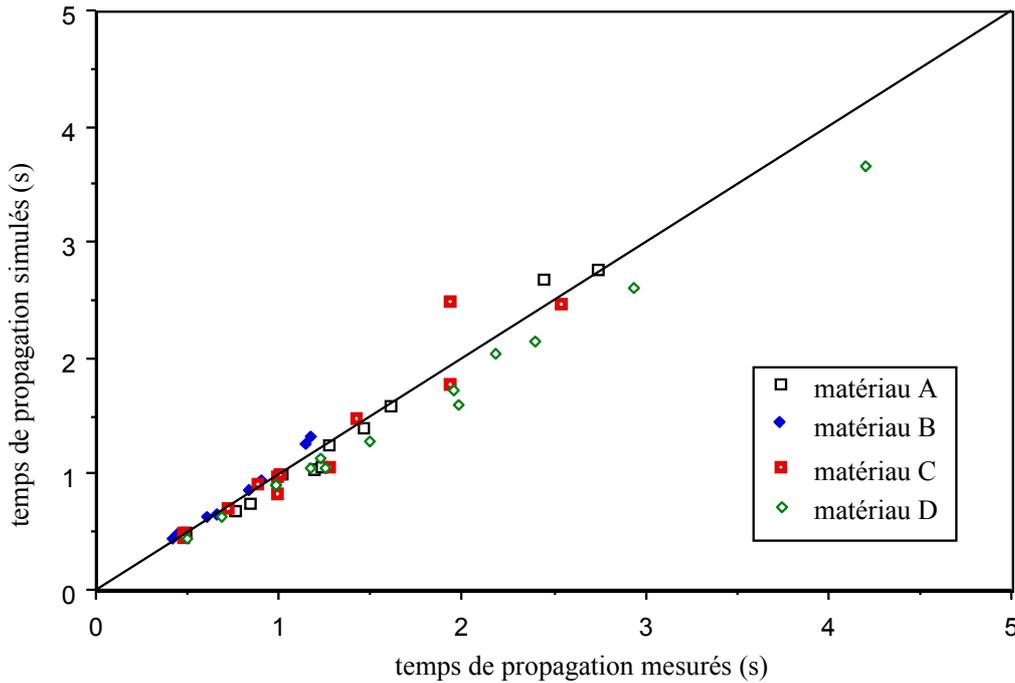


Figure 2.7 Confrontation des temps de propagation simulés et mesurés

2.4.3 Écoulements à hauteur initiale non nulle

Concernant les écoulements à hauteur initiale non nulle, l'exemple de confrontation présenté en Figure 2.8, montre que les discordances entre simulations et mesures peuvent être importantes dans ce cas. Les vagues simulées sont généralement plus raides, plus rapides, avec une pointe plus marquée et une phase de tarissement plus courte que les vagues mesurées. De façon globale, l'amplitude des discordances, qui peut atteindre + 70% sur les hauteurs maximales et - 35% sur les temps de propagation (Figure 2.9) évolue nettement avec le rapport hauteur initiale à l'amont du barrage sur hauteur du dépôt initial (H_{bar} / H_{init}). Très importantes pour des valeurs faibles de ce rapport, les discordances retrouvent des valeurs comparables au cas « hauteur initiale nulle » pour H_{bar} / H_{init} supérieur à environ 20.

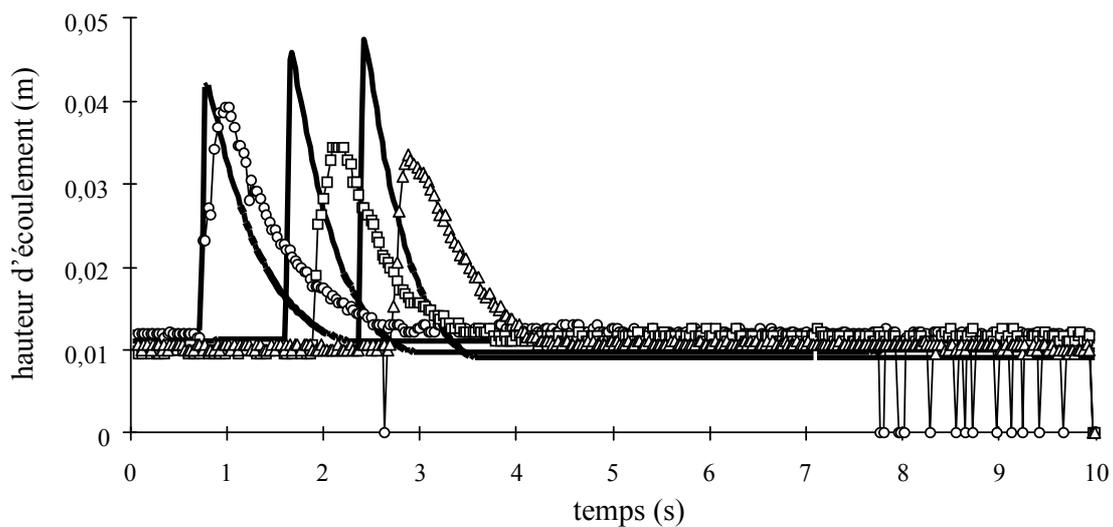


Figure 2.8 Exemple de confrontation simulation / expérience avec hauteur initiale non nulle (pente = 16%, $H_{bar} = 9$ cm, matériau A) au niveau des 3 capteurs de hauteur ; les traits pleins correspondent aux simulations ; chacun des cercles, carrés ou triangles correspond à une mesure.

Une interprétation possible des discordances entre simulations et mesures réside sans doute dans l'incapacité des équations de Saint-Venant, et donc du modèle, à traduire certains types de vagues présentant des accélérations verticales non négligeables (non validité de l'hypothèse onde longue dans ce cas). Des modélisations plus adaptées au calcul de vagues (Stoker 1957) seraient nécessaires. Une seconde interprétation tient à la difficulté de traduire correctement la mise en mouvement et l'incorporation du matériau présent dans le canal. On peut en effet admettre que cet entrainement de matériau se fait de façon progressive, qu'il modifie substantiellement le profil des vitesses et que l'expression de la contrainte au fond que nous utilisons s'en trouve invalidée.

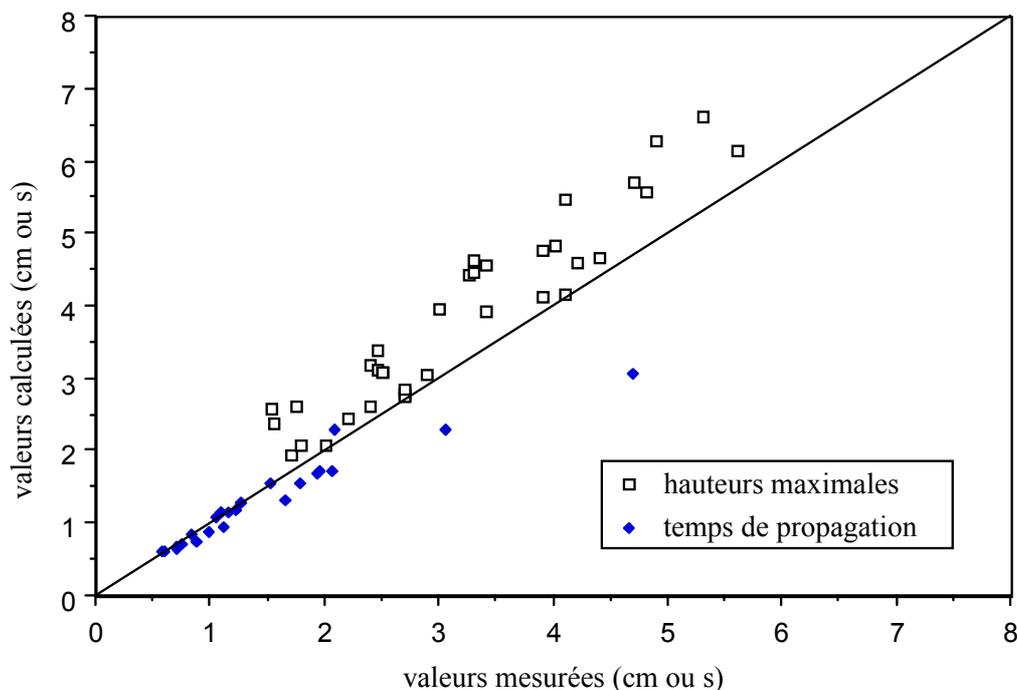


Figure 2.9 Confrontation entre valeurs simulées et mesurées des hauteurs maximales et temps de propagation

2.4.4 Discussion des résultats

Les résultats obtenus montrent que, sur fond sec, le modèle est capable de reproduire correctement la forme des vagues expérimentales, les vitesses de propagation ainsi que les hauteurs maximales d'écoulement, dès lors que l'écoulement est complètement développé. Les discordances peuvent, dans ce cas, localement atteindre 10 à 15%. Toutefois, l'étude de sensibilité a montré que les incertitudes sur la mesure des paramètres rhéologiques sont, à elles-seules, en mesure d'expliquer ces discordances. En revanche, durant la phase d'arrêt, la forte sensibilité du modèle ne permet généralement pas d'obtenir un aussi bon niveau de précision sur les variables dynamiques de l'écoulement. Par contre, les distances parcourues sont assez correctement traduites. Concernant les écoulements sur dépôt préalable, les discordances peuvent être importantes. Elles sont directement reliées à l'épaisseur du dépôt : faibles pour des épaisseurs faibles, elles atteignent 50% et plus pour des épaisseurs de dépôt élevées. La validité du modèle n'est donc pas établie dans ce cas de figure.

L'objectif finalisé de cette étude étant d'obtenir un modèle capable de représenter fidèlement la dynamique de propagation des laves torrentielles, le succès de cette première étape en conditions contrôlées, pour ce qui concerne les écoulements sur fond sec (cas le plus fréquemment rencontré en pratique) ouvre la voie à une confrontation à des événements réels.

2.5 Confrontation du modèle 1D à des événements de terrain

La confrontation du modèle 1D à des écoulements contrôlés de boue ayant été fructueuse au moins pour ce qui concerne les écoulements sur fond sec, la capacité intrinsèque du modèle à simuler de tels phénomènes était assurée. En revanche, il restait nécessaire de tester ses capacités prédictives en référence à des événements réels, ceci afin notamment de valider l'hypothèse d'une loi de comportement de type Herschel-Bulkley pour les laves torrentielles réelles dans leur phase d'écoulement en chenal. Pour effectuer une telle confrontation, nous nous appuyons ici sur 7 événements qui se sont produits dans le torrent instrumenté du Rio Moscardo (Frioul, Italie), entre août 1991 et juillet 1994. Ce site instrumenté est géré par l'institut de recherche italien : Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR - IRPI). L'objectif initial était de procéder à cette confrontation sans avoir recours à un rétro-calage des paramètres. Ceci semblait a priori possible car une détermination indépendante des caractéristiques rhéologiques du matériau a été menée sur l'événement du 5 juillet 1995 (cf. chapitre 3). Cette analyse a montré la capacité du modèle de Herschel-Bulkley à représenter les caractéristiques mécaniques du matériau de cette lave torrentielle. Toutefois, lors de cet événement, les capteurs ultrasoniques étaient malheureusement hors-service.

2.5.1 Présentation du site instrumenté du Rio Moscardo

Le Rio Moscardo, localisé sur la commune de Paluzza (Frioul, Nord-est de l'Italie), est un site intéressant pour l'étude des écoulements de laves torrentielles car son accès est facile et la fréquence des événements y est élevée (1 à 3 événements par an en moyenne). Nous nous intéressons ici tout particulièrement au bief terminal de ce torrent, qui au début des années 90, période d'observation exploitée dans le cadre de la présente étude, présentait une pente constante de 10,2% et une section en travers assez uniforme de 15 à 17 m de large pour une profondeur d'environ 3,5 m, avec des berges raides. A cette époque, l'équipement d'observation, largement complété depuis, était constitué de deux distancemètres à ultrasons, placés au dessus du chenal en son centre et distants d'environ 300 m. Ces capteurs, reliés à une centrale d'acquisition, enregistraient une mesure de hauteur d'écoulement toutes les 10 s. Aucune mesure directe de la vitesse d'écoulement n'était effectuée. Seuls étaient connus le temps de propagation entre les deux capteurs et la distance les séparant, de telle sorte que seule la vitesse de propagation du front pouvait être estimée. Par ailleurs, des levés topographiques étaient effectués après chaque événement, de telle sorte que la topographie initiale avant l'événement suivant était connue avec un bon degré de précision. On notera toutefois que la fréquence d'acquisition des hauteurs était assez faible et que de ce fait, certains pics de hauteur ont pu passer inaperçus. De plus, l'évolution éventuelle du niveau du fond, ou toute modification du profil en travers, en cours d'écoulement ne peut être traduite par une simple mesure de hauteur, telle qu'elle est réalisée par les capteurs mis en œuvre.

2.5.2 Caractéristiques des événements observés

Le jeu initial de données disponibles était constitué de 9 événements, présentant un total de 12 bouffées, potentiellement exploitables pour une confrontation. Toutefois, certains de ces écoulements étaient manifestement en phase d'arrêt ou présentaient des hauteurs faibles, traduisant un matériau très liquide et donc a priori non compatible avec l'existence d'un seuil de contrainte (écoulements pas clairement identifiés comme laves torrentielles). Nous avons donc au final retenu 7 écoulements qui se sont produits le 13 août 1991, le 1^{er} septembre 1992 (2 bouffées), les 11 et 20 juillet 1993, le 14 septembre 1993 et le 19 juillet 1994.

De façon générale pour ces 7 événements, les limnigrammes mesurés (exemples en Figure 2.10 et Figure 2.11) présentent un front raide avec un pic de hauteur en tête de coulée, suivi d'une décroissance rapide, puis d'une longue phase de décroissance avec en fin d'écoulement une hauteur résiduelle généralement faible. D'importantes oscillations de la hauteur d'écoulement sont généralement observées et un pic secondaire marqué apparaît même sur le limnigramme de l'événement du 1^{er} septembre 1992. Ce pic secondaire correspond très probablement à l'arrivée d'une seconde bouffée en cours d'événement. Les hauteurs d'écoulement sont très variables d'un événement

à l'autre et sont comprises entre 1,5 m et 3,9 m. Tandis que les vitesses de propagation du front sont comprises entre 1,87 m/s et 4,95 m/s. La hauteur observée sous le capteur amont est généralement supérieure à celle observée sous le capteur aval. Les données mesurées de hauteur maximum d'écoulement et de temps de propagation, pour les 7 événements retenus, sont présentées dans le Tableau 2.3. Des dépôts sont parfois observés en fin d'épisode sous le capteur aval, en revanche ils ne sont jamais observés sous le capteur amont. La présence d'une certaine épaisseur de dépôt peut être aisément expliquée si l'on se réfère au modèle de Herschel-Bulkley (existence d'un seuil de contrainte). En revanche l'absence de dépôt est incompatible avec ce modèle. En fait, les propriétés mécaniques du matériau varient à l'intérieur d'un même événement entre le corps et la queue. Des observations effectuées sur de nombreux sites montrent que cette queue est le plus souvent constituée d'un écoulement avec charriage, nettement moins concentré que le corps de lave torrentielle lui-même. Un modèle de fluide à seuil n'est a priori adapté que pour le corps. Observer une discordance en fin d'écoulement, entre hauteurs simulées et mesurées, est donc somme toute logique.

2.5.3 Mise en œuvre du modèle numérique

2.5.3.1 Initialisation des calculs

Les calculs sont menés sur un maillage régulier de pas d'espace égal à 1 m. La zone considérée s'étend du capteur amont au capteur aval et est prolongée en aval de ce dernier. La géométrie du chenal est représentée par un profil en long de pente constante et trois profils en travers situés au niveau du capteur amont, du capteur aval et à mi-distance entre ces capteurs. Une représentation paramétrique de ces sections en travers est adoptée. Compte tenu de la régularité du bief considéré, une telle représentation simple est a priori pertinente. Les conditions initiales du calcul sont fixées par une vitesse nulle dans tout le domaine de calcul ainsi qu'une hauteur initiale de matériau déposé égale à 10 cm (le modèle ne peut gérer une hauteur parfaitement nulle). Compte tenu de l'existence d'un seuil de contrainte, une vitesse initiale nulle est parfaitement cohérente avec une telle épaisseur de matériau.

2.5.3.2 Conditions aux limites

Ne disposant d'aucune information sur les écoulements en amont du capteur amont, il est nécessaire de « construire » un hydrogramme amont (débit en fonction du temps) à partir des informations dont nous disposons et notamment du limnigramme amont. Pour ce faire, on considère que la vitesse d'écoulement est égale à la vitesse moyenne de propagation du front d'écoulement entre les deux capteurs. Celle-ci est établie par comparaison des limnigrammes amont et aval. La hauteur d'écoulement donnée par le limnigramme amont sert à calculer la section d'écoulement correspondante. Cette valeur est multipliée par la vitesse moyenne de propagation pour en déduire le débit imposé comme condition amont, à tout instant du calcul. Deux cas de figure de condition amont peuvent théoriquement se présenter : régime fluvial ou régime torrentiel. Dans le cas du régime fluvial, l'imposition d'un débit amont est suffisante. En revanche en régime torrentiel, la condition amont est constituée d'un débit imposé et d'une hauteur imposée. Le limnigramme observé est alors utilisé pour imposer l'évolution de la hauteur d'écoulement en fonction du temps. Dans le cas d'un régime fluvial, les hauteurs simulées et mesurées au niveau du capteur amont peuvent être différentes (exemple en Figure 2.10).

2.5.3.3 Identification des valeurs des paramètres rhéologiques

L'événement du 5 juillet 1995 a fait l'objet d'une analyse rhéométrique détaillée combinant une série de mesures à petite échelle (rhéomètre de laboratoire) et à grande échelle (rhéomètre de terrain, analyse des épaisseurs de dépôt). Cette analyse, qui sera détaillée au chapitre 4, a permis d'établir que les propriétés mécaniques du matériau de cet événement peuvent bien être traduites par un modèle de Herschel-Bulkley et de déduire les valeurs des paramètres rhéologiques associés. Ces valeurs sont les suivantes : seuil de contrainte $\tau_c = 2935$ Pa, consistance $K = 2190$ Pa.s^{1/3} et masse volumique $\rho = 2390$ kg.m⁻³. L'incertitude sur les valeurs du seuil de contrainte et de la consistance est de l'ordre de 20 %. Dans un premier temps, ces valeurs de paramètres ont été utilisées pour simuler les événements qui se sont produits entre 1991 et 1994. Elles conduisaient toutefois à des temps de propagation et des

hauteurs d'écoulement généralement surestimés. Dans un deuxième temps, il a été décidé de recourir à un rétro-calage des valeurs des paramètres rhéologiques et de discuter de la pertinence des valeurs obtenues. La valeur de la masse volumique, peu variable dans l'absolu, a été prise égale à celle observée sur l'événement de 1995. Les valeurs calées des paramètres sont présentées dans le Tableau 2.2 pour chacun des événements étudiés.

date de l'événement	τ_c (Pa)	τ_c/ρ (m ² s ⁻²)	K (Pa.s ^{1/3})	K/τ_c (s ^{1/3})	hauteur de plug (m)
13 août 1991	1315	0,55	438	0,333	0,553
1 ^{er} septembre 1992, 1 ^{er} pic	1195	0,5	837	0,7	0,502
1 ^{er} septembre 1992, 2 ^{ème} pic	1195	0,5	598	0,45	0,502
11 juillet 1993	1386	0,58	462	0,333	0,583
20 juillet 1993	1195	0,5	837	0,7	0,502
13 septembre 1993	1362	0,57	454	0,333	0,573
19 juillet 1994	1482	0,62	963	0,65	0,623

Tableau 2.2 Valeurs calées des paramètres rhéologiques, la hauteur de plug a été calculée par l'intermédiaire de l'expression $\tau_c/(\rho.g.\sin(\theta))$ en considérant une pente de 10,2%

On observe tout d'abord que ce rétro-calage nous amène à considérer des valeurs de paramètres rhéologiques 2 à 3 fois plus faibles que celles mesurées sur le dépôt de l'événement de 1995. Par exemple, l'épaisseur de dépôt observée lors de l'événement de 1995 est de 1,2 m, à comparer aux hauteurs de plug du Tableau 2.2. L'événement de 1995 ne faisant pas partie de la liste des événements simulés, on peut admettre qu'il se singularise peut-être par un matériau particulièrement visqueux. On ne peut donc conclure de façon générale sur la validité des valeurs de paramètres obtenues par rétro-calage. Cette différence n'en est pas moins troublante.

En revanche, on observe que les valeurs calées de seuil de contrainte varient assez peu d'un événement à l'autre, entre 1195 et 1482 Pa. La consistance varie plus nettement, entre 438 et 963 Pa.s^{1/3}. Il est d'ailleurs étonnant de constater que les valeurs calées de consistance varient fortement entre les deux pics de l'événement du 1^{er} septembre 1992, ce qui là encore, soulève quelques doutes quant à la validité de l'approche par rétro-calage.

2.5.4 Confrontation des simulations aux mesures

L'objectif est ici d'évaluer la validité du modèle en conditions de terrain par confrontation des simulations aux mesures. Les simulations ont été obtenues en utilisant les valeurs de paramètres rhéologiques présentées dans le Tableau 2.2. Les critères de comparaison portent d'une part, qualitativement sur la forme globale des limnigrammes et d'autre part quantitativement, sur les hauteurs maximales au droit des capteurs et les temps de propagation du phénomène entre les deux capteurs.

2.5.4.1 Comparaison qualitative sur la forme des limnigrammes

Quand le régime amont est supercritique (événements du 13 août 1991, 2^{ème} pic du 1^{er} septembre 1992 et du 19 juillet 1994), la hauteur d'écoulement au droit du capteur amont est imposée comme condition à la limite du domaine de calcul. Dans ce cas, bien évidemment, le limnigramme amont est parfaitement simulé. Quand le régime amont est subcritique, le limnigramme amont simulé n'est pas imposé mais calculé sur la base de l'hydrogramme amont imposé. Rappelons que cet hydrogramme est estimé à partir du limnigramme amont mesuré et de la vitesse moyenne de propagation entre les deux capteurs. Les discordances entre limnigrammes amont simulés et mesurés (exemples donnés en Figure

2.10 et Figure 2.11) sont donc directement révélatrices de la faible robustesse de la méthode employée pour estimer l'hydrogramme.

La forme générale des limnigrammes simulés et mesurés peut être assez discordante. La hauteur maximale d'écoulement est généralement assez bien représentée, mais on remarquera que le rétrocalage des paramètres s'est naturellement beaucoup appuyé sur une représentation cohérente de ces hauteurs. En revanche, après le passage du pic, les hauteurs simulées diminuent beaucoup plus rapidement que les hauteurs mesurées. Elles tendent également de façon asymptotique vers une hauteur limite non nulle, dictée par la hauteur de plug du matériau sur la pente considérée (Tableau 2.2). Par contre, les hauteurs mesurées tendent vers des valeurs plus faibles et en tout état de cause incompatibles avec les valeurs adoptées de seuil de contrainte. Une telle évolution ne peut s'interpréter que par un changement notable dans les propriétés mécaniques du matériau naturel. Les temps de propagation simulés peuvent être très différents des temps mesurés, ce qui se traduit par un fort décalage des limnigrammes simulés et mesurés au niveau du capteur aval (Figure 2.11).

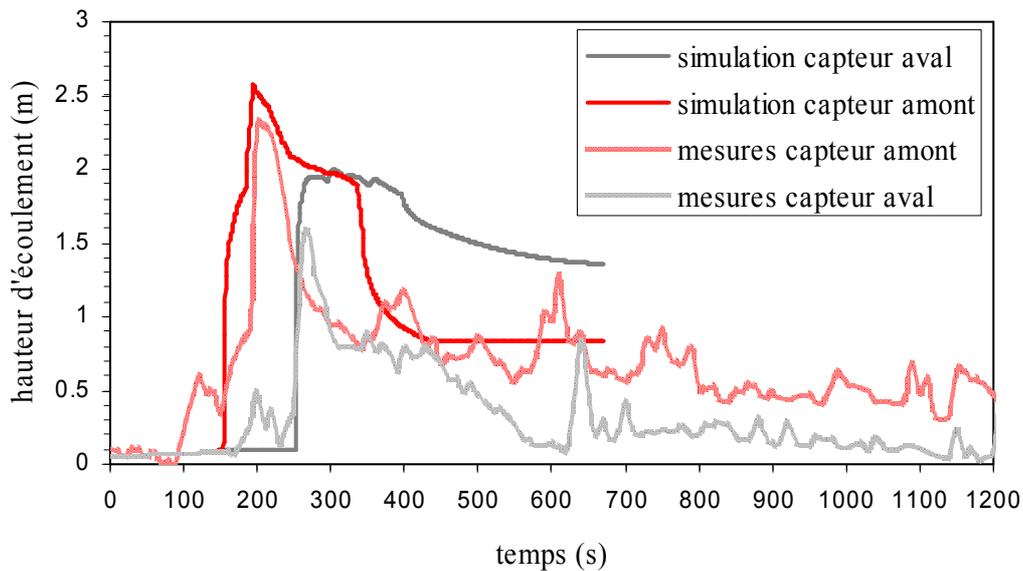


Figure 2.10 Exemple de confrontation des simulations aux mesures : événement du 20 juillet 1993

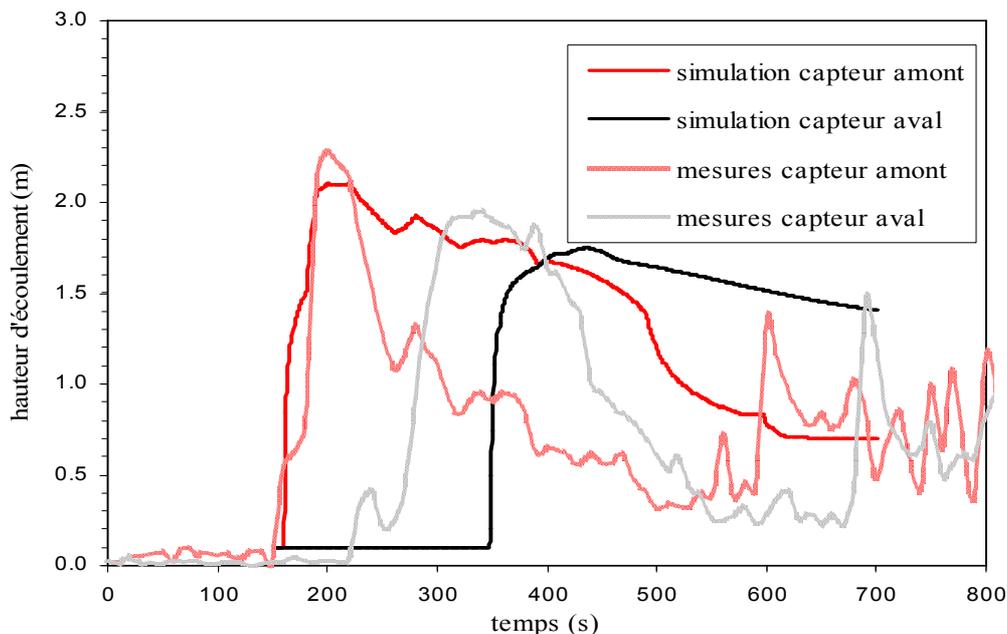


Figure 2.11 Exemple de confrontation des simulations aux mesures : événement du 1^{er} septembre 1992 (1^{ère} bouffée)

2.5.4.2 Comparaison quantitative sur les hauteurs maximales d'écoulement et les temps de propagation

Les résultats de confrontation sont présentés dans le Tableau 2.3. Les discordances citées ci-après, exprimées en pourcentages, correspondent au rapport (valeur simulée – valeur mesurée) / valeur mesurée. Ces discordances sont comprises entre -16% et +15% pour les hauteurs d'écoulement au droit du capteur amont. Elles sont comprises entre -23% et +74% pour les hauteurs d'écoulement au droit du capteur aval. Elles sont enfin comprises entre -16% et +78% pour les temps de propagation du front d'écoulement entre les deux capteurs.

date de l'événement	h. max. amont simulée (m)	h. max. amont mesurée (m)	h. max. aval simulée (m)	h. max. aval mesurée (m)	temps de propagation simulé (s)	temps de propagation mesuré (s)
13 août 1991	2,23	2,23	1,72	2,23	78	60
1 ^{er} septembre 1992, 1 ^{er} pic	2,10	2,22	1,75	1,96	196	110
1 ^{er} septembre 1992, 2 ^{ème} pic	2,32	2,32	1,81	1,04	27	30
11 juillet 1993	1,85	2,19	1,65	1,90	110	100
20 juillet 1993	2,57	2,30	1,99	1,54	104	70
14 septembre 1993	1,75	1,52	1,60	1,36	118	120
19 juillet 1994	3,84	3,84	2,53	2,27	71	85

Tableau 2.3 Confrontation des valeurs simulées et mesurées de hauteur maximum et de temps de propagation

2.5.5 Discussion des résultats

Les valeurs des paramètres rhéologiques établies sur l'événement de 1995 n'ayant pas permis l'obtention de résultats satisfaisants, les paramètres rhéologiques ont été calés. Malgré ce calage, les résultats obtenus restent assez peu satisfaisants. Les discordances observées semblent notamment peu compatibles avec une future utilisation opérationnelle du modèle pour simuler des événements réels. Les hypothèses du modèle de Saint-Venant (hypothèse onde longue, pression hydrostatique, etc.) ayant été validées au laboratoire, il ne semble pas pertinent de les remettre en cause. Les résultats obtenus tendent donc à prouver, que pour les laves torrentielles chenalées, c'est très probablement l'hypothèse fluide homogène qui n'est pas complètement satisfaisante. Ce résultat est confirmé par une autre étude menée en 1998 sur le torrent Gran Vallon (Cesana, Piémont, Italie). En revanche des confrontations menées sur des coulées boueuses pratiquement dépourvues de blocs (par exemple, le cas de Super-Sauze, traité au chapitre 4) montrent une cohérence bien meilleure entre simulations et observations de terrain. En conclusion de cette étude, on peut donc émettre l'hypothèse qu'une lave torrentielle chenalée, pour peu qu'elle réponde au schéma classique (présence importante de matériau granulaire notamment au niveau du front) présenté au chapitre 1, voit son écoulement largement dicté, non pas seulement par les propriétés du corps (représente le volume le plus important) mais également par d'autres processus. Ces processus sont d'une part, l'interaction entre le corps et le front et d'autre part, les interactions entre l'écoulement et le lit (érosion et dépôt). Ces différents points font actuellement l'objet de travaux ou de perspectives de recherches à venir (cf. paragraphe 2.8).

2.6 Etude de la propagation de l'onde de rupture résultant de débâcles glaciaires

Les débâcles glaciaires sont des phénomènes qui hydrauliquement s'apparentent à des ruptures de barrage, le plus souvent très rapides et qui peuvent être à l'origine de la formation de laves torrentielles (Schuster 2000) ou pour le moins d'écoulements chargés en matériau solide. Le modèle 1D étant capable de traiter les phénomènes de propagation très transitoires, qu'il s'agisse de laves torrentielles ou d'écoulements purement liquides, son application dans le cadre d'une étude des risques d'origine glaciaire pouvait être envisagée moyennant quelques adaptations. Il s'agissait notamment de préciser les hypothèses de mise en mouvement pouvant être raisonnablement retenues. Deux cas concrets ont été étudiés. Le premier concerne la catastrophe du glacier de Tête Rousse qui en libérant brutalement une poche d'eau sous glaciaire a entraîné la formation d'une lave torrentielle et provoqué la mort de 175 personnes à Saint-Gervais (Haute-Savoie) le 12 juillet 1892. L'étude menée a permis de préciser les caractéristiques du chargement en matériau solide de l'écoulement et une assez bonne concordance entre simulations de la lave torrentielle et données d'archives a été obtenue. Le second cas concret concerne le lac proglaciaire de Rochemelon (Bessans, Savoie), qui à la fin de l'été 2004 était en situation de débordement imminent avant sa vidange artificielle en 2004 et 2005. Sur ce site, la propagation d'une lave torrentielle jusqu'à des zones habitées n'était pas à craindre, en revanche la libération plus ou moins brutale des 650 000 m³ d'eau de ce lac était susceptible de provoquer d'importantes inondations sur plusieurs dizaines de kilomètres vers l'aval. Une étude prospective menée en 2003 s'est attachée à préciser les caractéristiques de cette propagation d'onde de rupture sur la base de deux hypothèses : rupture brutale ou rupture progressive. Ce travail préliminaire a permis de préciser l'étendue des risques encourus et de délivrer des informations ciblées aux services de terrain lors de la gestion de crise (alerte et évacuation des populations) en 2004.

2.7 Applications opérationnelles du modèle 1D

Le modèle 1D a été utilisé directement dans le cadre des expertises suivantes :

Commanditaire :

Préfecture du Puy-de-Dôme, maîtrise d'ouvrage déléguée : DDE du Puy-de-Dôme.

Nature de la prestation :

Etude des phénomènes de type coulées de boue et écoulements torrentiels au lieu-dit « Les Egravâts », commune du Mont-Dore (63) suite à l'événement de janvier 2004. Expertise réalisée via un groupement conjoint BRGM – LRPC – Cemagref. Dimensionnement hydraulique de goulottes destinées à assurer le transit de coulées de boue au travers d'une zone résidentielle (2004).

Commanditaire :

Direction Départementale de l'Équipement des Hautes-Alpes.

Nature de la prestation :

Calcul du temps de propagation probable d'une lave torrentielle survenant dans le torrent du Riou Sec, commune de l'Argentière-la-Bessée (05), dans l'optique de l'installation d'un dispositif d'alerte (1997).

Le modèle 1D a également été utilisé sous une forme dérivée adaptée au calcul de propagation d'ondes de rupture de barrage pour de l'eau, dans le cadre des expertises suivantes :

Commanditaire :

Service de Restauration des Terrains en Montagne de la Savoie, Préfecture de la Savoie, Protection Civile.

Nature de la prestation :

Contribution à la gestion de la situation de crise engendrée par le risque de rupture du lac proglaciaire de Rochemelon, commune de Bessans (73). Caractérisation hydraulique des conséquences potentielles en aval, sur les vallées du Ribon et de l'Arc, sur la base de différents scénarios de rupture (2003-2004).

Commanditaire :

Service de Restauration des Terrains en Montagne des Alpes de Haute-Provence.

Nature de la prestation :

Analyse des risques potentiels pour la ville de Digne-les-bains (04) des phénomènes de laves torrentielles ou de transport solide pouvant résulter de l'activité du glissement de terrain de Villard-des-Dourbes (2003).

Commanditaire :

Service de Restauration des Terrains en Montagne de la Haute-Savoie.

Nature de la prestation :

Etude des risques hydrauliques liés à la débâcle potentielle d'une retenue naturelle sur le torrent de la Chaise, commune de Saint-Ferreol (74) (1995).

2.8 Bilan et perspectives

Nous avons montré que le modèle 1D avait une bonne capacité à simuler des écoulements très transitoires de fluide à seuil au laboratoire. En conditions de terrain, une confrontation à deux événements réels a été couronnée de succès. Il s'agit du travail mené en collaboration avec l'université de Strasbourg sur le glissement de terrain de super Sauze (Malet et al. 2005) qui sera présenté au chapitre 4. Dans ce cas, la nature du matériau était particulière car constitué essentiellement de matériau argileux avec peu de constituants solides grossiers. Un tel écoulement peut, en première approche, être qualifié de coulée boueuse homogène car en tout état de cause, il ne présentait pas les caractéristiques classiques (segmentation front – corps – queue) d'une lave torrentielle telle qu'elle a été présentée au chapitre 1.

En revanche, les confrontations à des événements de terrain de laves torrentielles chenalées répondant au schéma classique avec présence d'un front granulaire, ont été moins fructueuses. Les discordances observées entre simulations et mesures peuvent être importantes, y compris après calage des paramètres rhéologiques. De plus la cohérence entre paramètres rhéologiques mesurés indépendamment, d'une part et calés par rapport aux observations, d'autre part, n'a pu être établie. Dans ces conditions, nous avons jugé que pour des applications opérationnelles et plus particulièrement pour un transfert aux services opérationnels, le modèle 1D présentait des déficiences trop importantes et en tout état de cause un domaine de validité trop restreint. On notera que ce problème de validité concerne essentiellement les écoulements chenalés, car comme nous le verrons au chapitre 3, ils ne sont pas ou peu rencontrés pour les écoulements non contraints latéralement. Ceci nous amène à la conclusion que l'écoulement chenalé est dicté largement par un jeu d'interactions complexes qui ne peuvent généralement être négligées.

De ces constatations, nous tirons comme conclusions que le modèle 1D devrait faire l'objet d'améliorations de fond portant essentiellement sur les points suivants :

- Une prise en compte explicite de l'effet du front granulaire sur la propagation de la lave torrentielle chenalée. Ceci nécessiterait un travail de fond sur les phénomènes de ségrégation des éléments grossiers dans l'écoulement et sur les modifications induites sur la loi de comportement. Un tel travail de fond est actuellement en cours dans le cadre de la thèse d'Assia Ghemmour qui sera évoquée au chapitre 6.
- Certains phénomènes de terrain ont montré qu'une forte interaction entre l'écoulement et le lit torrentiel est parfois présente (événement d'août 2005 sur le torrent d'Armanette aux Contamines-Montjoie, par exemple). L'hypothèse fond fixe est donc sans doute elle aussi à discuter. Deux axes paraissent intéressants à exploiter pour aborder cette question :

- Une étude portant sur la déstabilisation d'un lit torrentiel soumis au passage d'une lave. Les grandes lignes d'une telle étude sont définies dans le cadre d'un projet de thèse que nous souhaitons faire aboutir et qui sera présenté au chapitre 6.
- Une autre voie intéressante, portant plus spécifiquement sur la modélisation des écoulements, est celle entreprise notamment par Armanini & Fraccarollo (2008) qui abandonnent l'hypothèse fluide homogène et présentent une approche clairement biphasique. De notre point de vue, cette approche souffre encore de déficiences, elle n'en demeure pas moins une piste à explorer. Cette voie de recherche sera évoquée au chapitre 6.

Chapitre 3

Modélisation de type champ moyen 2D pour les écoulements en étalement libre de laves torrentielles

3.1 Objectifs

On entend ici par modélisation 2D, une approche de type « hydraulique » fondée sur les hypothèses de Saint-Venant, qui raisonne sur les grandeurs physiques moyennes dans l'épaisseur de l'écoulement. Il s'agit d'une modélisation s'appuyant sur un maillage bidimensionnel plaqué sur la topographie du terrain, d'où la dénomination 2D. Les deux objectifs principaux fixés lors de l'initiation de ce travail il y a une dizaine d'années étaient d'une part, de bâtir un modèle numérique capable de simuler les écoulements transitoires non contraints latéralement des laves torrentielles et d'autre part, de le valider et d'en tester les limites. A ce stade, les hypothèses fluide boueux homogène, de type fluide à seuil et fond fixe ont été retenues.

L'objectif de validation du modèle a été abordé en deux temps :

- une première étape au laboratoire avec des fluides boueux bien caractérisés rhéologiquement, ce qui devait permettre de tester les capacités du modèle – notamment les techniques numériques utilisées - à simuler des écoulements transitoires de fluides à seuil en conditions contrôlées et sans préjuger de la validité au terrain de la loi de comportement adoptée
- une seconde étape, de confrontation à des écoulements réels afin d'analyser la validité du modèle en conditions de terrain et plus particulièrement l'adéquation de l'hypothèse fluide homogène pour simuler des écoulements réels de laves torrentielles en étalement sur un cône de déjection. En pratique, ce travail a été complété par une confrontation à d'autres modèles existant aux Etats-Unis et en Suisse.

En cas de résultat positif à ces deux étapes de validation, l'objectif était de finaliser le modèle en vue d'une utilisation par les services opérationnels avec comme domaine d'application privilégié, la détermination des niveaux d'aléa sur un cône de déjection torrentiel dans une optique de zonage.

3.2 Présentation du modèle 2D

On considère des écoulements non chenalés pouvant s'étaler librement et pour lesquels les variables principales sont l'épaisseur et les composantes horizontales de la vitesse moyenne de l'écoulement. La propagation du phénomène est ici abordée en résolvant les équations de Saint-Venant bidimensionnelles. Comme pour le modèle 1D, l'expression de la contrainte à la paroi utilisée est celle présentée au chapitre 1 pour les laves torrentielles à matrice boueuses. Elle est ici adaptée pour des écoulements à deux directions planes.

3.2.1 Bases théoriques du modèle

3.2.1.1 Equations du modèle

Le modèle est basé sur la forme conservative des équations de Saint-Venant à forte pente bidimensionnelles [(3.1) et (3.2)]. Il prend en compte l'effet de la gravité et des dissipations visqueuses à l'intérieur du matériau en écoulement par l'intermédiaire de l'expression de la contrainte à la paroi (3.3) proposée par Coussot (1994). Cette expression est fondée sur l'hypothèse d'un comportement visco-plastique du matériau, représenté par un modèle de Herschel-Bulkley. Le modèle n'est donc théoriquement valide que pour les coulées boueuses et les laves torrentielles à matrice boueuse avec une teneur en argile suffisamment élevée. Nous verrons toutefois en conclusion de ce chapitre que le modèle est néanmoins capable de traiter bon nombre de cas de terrain rencontrés en pratique.

Le modèle de Saint-Venant 2D à forte pente est exprimé par le jeu d'équations suivant :

Conservation de la masse

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\begin{cases} \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial\left(h\delta\bar{u}^2 + \frac{gh^2 \cos(\theta_{xy})}{2}\right)}{\partial x} + \frac{\partial(h\delta\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = gh \sin(\theta_x) - \frac{\bar{u}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \frac{\tau_p}{\rho} \\ \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\delta\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial\left(h\delta\bar{v}^2 + \frac{gh^2 \cos(\theta_{xy})}{2}\right)}{\partial y} = gh \sin(\theta_y) - \frac{\bar{v}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \frac{\tau_p}{\rho} \end{cases} \quad (3.2)$$

Il est complété par l'expression suivante de la contrainte de cisaillement à la paroi :

$$\tau_p = \tau_c \left[1 + 1,93 \left(\frac{\tau_c}{K} \left(\frac{h}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \right)^{1/3} \right)^{-0,9} \right] \quad (3.3)$$

où h est l'épaisseur de l'écoulement, θ_x et θ_y sont les angles de pente et \bar{u} et \bar{v} les composantes (moyennes sur la verticale) de la vitesse le long de deux directions perpendiculaires : respectivement x et y . θ_{xy} est l'angle de plus grande pente. δ est un coefficient quadratique de correction du profil de vitesses. τ_p est la contrainte à la paroi qui dépend du seuil de contrainte τ_c et de la consistance K du matériau. ρ est la masse volumique.

3.2.1.2 Hypothèses du modèle et domaine de validité

Le matériau est supposé continu, homogène, incompressible et avec un écoulement en régime laminaire. Le front granulaire et son influence sur l'écoulement sont négligés. Cette hypothèse est a priori réaliste dans le cas d'étalements, car généralement le front se disloque ou s'arrête très tôt dans une partie confinée de la zone d'étalement. Le pouvoir érosif des laves torrentielles en phase d'étalement est négligé car l'érosion est très probablement réduite dans la zone considérée. La composante verticale de la vitesse est négligée. Les contraintes normales sont supposées se réduire à l'expression de la pression dont la distribution est supposée de forme hydrostatique. Dans le tenseur

des contraintes, σ_{xy} , est supposé négligeable par rapport à σ_{xz} et σ_{yz} , ce qui nous place de fait dans le cadre de l'hypothèse onde longue dont la validité, pour les phénomènes qui nous intéressent, a été soulignée notamment par Denlinger & Iverson (2001) ou Savage & Hutter (1989). Par conséquent, l'effet des contraintes de cisaillement est supposé se réduire à la force de résistance au niveau du lit. La contrainte de cisaillement au fond en un point donné est supposée identique à sa valeur en régime permanent avec une hauteur et une vitesse moyenne d'écoulement identiques.

Un travail théorique portant sur la prise en compte de tous les termes de cisaillement (approche quasi-tridimensionnelle avec intégration dans le formalisme des équations de Saint-Venant de l'expression tensorielle de la loi de comportement (Piau 1996) a également été mené. Les tests effectués ont toutefois montré que ces termes ne présentent une influence significative que dans certains cas particuliers de forts cisaillements latéraux, peu fréquemment rencontrés en pratique. Ils ont par conséquent été négligés dans la plupart des applications.

3.2.1.3 Résolution numérique

Le système d'équations est résolu par la technique des volumes finis en s'appuyant sur un maillage quadrangulaire ou triangulaire du domaine de calcul. Le schéma numérique utilisé est de type Van Leer (Vila 1986a), du premier ordre en temps et du second ordre en espace. Le code est écrit en FORTRAN sur la base d'un code préexistant dédié à l'étude de problèmes de type rupture de barrage. Une technique dite de splitting permet de résoudre les équations bidimensionnelles. Celle-ci consiste à projeter les variables du système d'équations (3.1), (3.2) et (3.3), connue dans le système de coordonnées globales, dans un système de coordonnées locales lié à chacune des interfaces des mailles du domaine de calcul selon la normale et la tangente à ces dernières. En négligeant les composantes tangentielles à chacune des interfaces, le système projeté se réduit au problème monodimensionnel suivant :

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}_n)}{\partial x_n} &= 0 \\ \frac{\partial(h\bar{u}_n)}{\partial t} + \frac{\partial\left(h\delta\bar{u}_n^2 + \frac{g h^2 \cos(\theta_{xy})}{2}\right)}{\partial x_n} &= G(h, h\bar{u}_n, h\bar{u}_t) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Où G représente la contribution du second membre (gravité, frottement, etc.), les indices n et t représentant les valeurs respectivement normale et tangentielle pour la variable considérée relativement à l'interface considérée. Le système d'équations (3.4) est alors formellement équivalent au problème monodimensionnel qui a été résolu au chapitre 2. Ceci permet un calcul des flux au travers de chacune des interfaces des mailles. Une rétro-projection des variables locales dans le repère global, suivie d'une sommation par maille, fournit une solution complète par maille. Dans les faits, le second membre du système d'équations (3.4) n'est pas pris en compte dans la phase de résolution locale, mais seulement en fin de chaque itération, sur la base des variables calculées au pas de temps précédent (résolution explicite) dans le système de référence global.

3.2.1.4 Conditions initiales et aux limites

Les conditions aux limites sont, pour une grande majorité des interfaces externes des mailles de bordure, des conditions d'imperméabilité. Dès lors que le domaine de calcul est pris suffisamment vaste pour que l'écoulement n'interagisse pas avec ses limites, cette condition n'est pas limitante. Quelques mailles de bordure, situées au point d'entrée du matériau dans le domaine (point d'arrivée du chenal torrentiel sur le cône de déjection pour les cas de terrain) sont toutefois traitées de façon spécifique et tout à fait analogue à la procédure utilisée pour le modèle 1D (§ 2.2.2.4). On impose alors une condition en débit (et éventuellement en hauteur d'écoulement) sur l'interface externe des mailles concernées. Cette condition est prise en compte dans la résolution du problème de Riemann

sur l'interface. Les conditions initiales sont données par une épaisseur et une vitesse d'écoulement initiales sur chacune des mailles du domaine de calcul.

3.2.2 Utilisation pratique du modèle

Le calcul produit, pour chaque pas de temps et pour chaque cellule du maillage, l'épaisseur de matériau et les deux composantes planes de la vitesse moyenne. Le point le plus important dans le cadre d'un zonage de l'aléa est l'identification des zones atteintes par l'écoulement lorsqu'il s'arrête, ce qui correspond à l'extension maximale du phénomène. En pratique, les résultats de calcul sont essentiellement exploités pour produire des cartes de l'extension et de l'épaisseur des dépôts, ainsi que des hauteurs et vitesses maximales atteintes en cours d'écoulement. Ces cartes peuvent être superposées à d'autres couches d'information géographique, de telle sorte que les zones soumises à l'aléa peuvent aisément être comparées à l'occupation humaine et donc à la vulnérabilité. Dans le but de faciliter le traitement de l'information géographique requise, le modèle a été interfacé avec le système d'information géographique ArcView qui permet une saisie des données topographiques nécessaires au modèle ainsi qu'une représentation pertinente des résultats de calcul (hauteurs et vitesses à tout instant ainsi que hauteurs et vitesses maximales). Seuls des maillages réguliers à mailles carrées peuvent être utilisés dans ce cadre directement dédié à une utilisation opérationnelle. On notera que le système d'information géographique est ici utilisé comme interface et non comme support de calcul, contrairement à d'autres approches existantes (Bathurst et al. 2003).

3.2.2.1 Données d'entrée

3.2.2.1.1 Vue d'ensemble

Les données requises sont : les conditions à la limite (valeurs imposées du débit entrant et localisation des points d'entrée), les conditions initiales (épaisseur de matériau au temps initial en chaque point du maillage), la structure du maillage de calcul, la matrice des altitudes (modèle numérique de terrain), les valeurs des paramètres rhéologiques ainsi que d'autres données relatives à la simulation numérique (pas de temps initial, condition de stabilité du schéma numérique ou CFL, durée de la simulation, etc...). Ces fichiers sont listés dans le Tableau 3.1.

Extension du fichier	contenu
.asc	Matrice des altitudes de la zone considérée
.cli	Fichier de conditions à la limite, constitué de valeurs du débit d'entrée en fonction du temps pour un certain nombre d'arêtes de cellules du bord du maillage, référencées par leur numéro d'identification.
.rhe	Valeurs des paramètres rhéologiques : τ_c/ρ (m^2s^{-2}) et K/τ_c ($s^{1/3}$)
.don	Valeurs des paramètres de simulation (temps maximum, pas de temps des sorties...)
.mai	Structure du maillage incluant les données d'altitude et les référencements de mailles, d'arêtes et de nœuds
.cin	Conditions initiales : épaisseurs initiales de dépôt à l'intérieur de la zone considérée

Tableau 3.1 Liste des fichiers d'entrée

Certains de ces fichiers sont directement importés d'ArcView (.asc), d'autres font l'objet d'une saisie utilisant une interface Excel (.cli, .rhe, .don) et d'autres sont générés par l'intermédiaire d'un programme de prétraitement sur la base de fichiers de sortie d'ArcView (.mai, .cin).

3.2.2.1.2 Principales données requises pour le calcul

(1) Données topographiques

Dans sa version opérationnelle, le modèle requiert un Modèle Numérique de Terrain (MNT) sous forme d'une grille rectangulaire constituée de carrés (structure de grille importée d'ArcView). Cette grille est en fait exploitée de deux façons différentes : pour définir la structure du maillage de calcul et pour calculer les altitudes aux nœuds du maillage. Ces opérations sont menées grâce au programme de prétraitement qui permet également la déclaration du type de condition à la limite à imposer aux frontières du domaine de calcul.

(2) conditions aux limites

Les conditions aux limites d'entrée, saisies grâce à l'interface Excel, sont constituées d'un hydrogramme (débit en fonction du temps) et le cas échéant (écoulement subcritique) d'un limnigramme (hauteur en fonction du temps). Le fichier correspondant déclare pour un temps donné : le numéro identifiant l'arête de la cellule sur laquelle s'applique la condition à la limite, la hauteur d'écoulement imposée (si nécessaire) et le débit imposé par unité de largeur (direction normale à l'arête). Les valeurs sont linéairement interpolées entre deux temps déclarés préalablement, ce qui permet de calculer la condition à la limite à tout instant du calcul.

(3) caractéristiques du matériau

Les caractéristiques du matériau, saisies grâce à l'interface Excel, sont décrites par les valeurs des paramètres rhéologiques : le rapport τ_c/ρ (seuil de contrainte sur masse volumique) et le rapport K/τ_c (consistance sur seuil de contrainte). La valeur du paramètre n est prise égale à 1/3.

(4) Zones imperméables

Le programme de prétraitement permet de prendre en compte les zones imperméables telles que des bâtiments ou des ouvrages simples (digues...). Une procédure à l'intérieur d'ArcView rend possible cette déclaration de cellules imperméables et permet d'importer les modifications correspondantes dans la structure du maillage de calcul. Durant l'exécution des calculs, les arêtes extérieures des groupes de cellules déclarées comme imperméables sont considérées comme des murs et une condition de flux nul à travers la paroi leur est appliquée.

3.2.2.2 Forme des résultats

Le résultat final des simulations est notamment constitué d'une série de matrices ayant les dimensions du maillage de calcul. Chaque matrice contient, pour chaque cellule, la hauteur d'écoulement pour un temps prescrit à l'avance (toutes les 100 secondes par exemple). Deux autres matrices contiennent les hauteurs et vitesses maximales atteintes en cours de calcul en tout point du domaine. Chacune de ces matrices peut être directement importée dans ArcView en tant que grille, ce qui permet la génération de cartes.

3.3 Confrontation du modèle 2D à des expériences de laboratoire

3.3.1 Objectifs

Afin de tester les capacités du modèle 2D à simuler des écoulements en conditions contrôlées, nous avons retenu le principe de le confronter à des écoulements transitoires de matériaux boueux au laboratoire. Le principe des expériences est de libérer instantanément un volume fini d'un mélange eau-kaolin au niveau d'une portion de canal qui débouche sur une plate-forme inclinée (Laigle 1997). Le phénomène d'étalement sur la plate-forme est mesuré par une série de capteurs à ultrasons disposés au dessus de la zone d'étalement. L'emprise des dépôts lors de l'arrêt complet est cartographiée. Les propriétés rhéologiques du matériau utilisé, conforme au modèle de Herschel-Bulkley, sont mesurées de façon indépendante. Les paramètres de cette loi font l'objet d'un ajustement par rapport aux

mesures rhéométriques. Les concentrations du matériau modèle sont ajustées afin de respecter au mieux les critères de similitude propres aux laves torrentielles boueuses (Coussot 1997).

3.3.2 Protocole d'étude

3.3.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (Figure 3.1) utilisé est constitué d'une plate-forme de 2,10 m de large et 6,0 m de long. Cette plate-forme est divisée en trois parties : un réservoir à surface libre dans lequel le matériau est initialement stocké, un canal de 0,75 m de long et 0,5 m de large obturé par une vanne guillotine et une zone d'étalement d'une longueur de 4m où sont observés les étalements. Dix capteurs de distance à ultrasons, dont la localisation est donnée par la Figure 3.2, permettent de mesurer les hauteurs d'écoulement en fonction du temps.

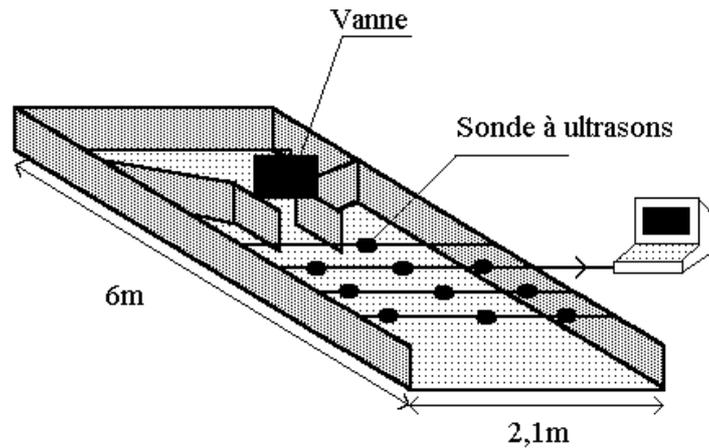


Figure 3.1 Vue schématique du dispositif expérimental

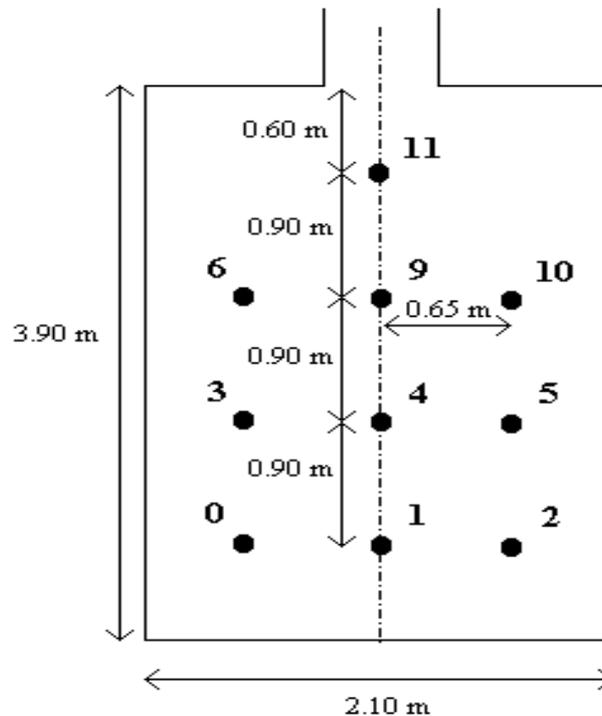


Figure 3.2 Localisation et numérotation des capteurs sur la plate-forme expérimentale

3.3.2.2 Caractéristiques des essais expérimentaux

Le matériau modèle est constitué d'un mélange d'eau et de kaolin, de concentration volumique solide voisine de 30%. Les valeurs de ses paramètres rhéologiques (ajustement au modèle de Herschel-Bulkley) ont été déterminées indépendamment à l'aide d'un rhéomètre plan-plan. Les expériences sont menées à différentes pentes (10, 14, 15 et 20%) pour différentes quantités de matériau stocké et différentes caractéristiques rhéologiques. Le matériau initialement stocké dans le réservoir est rapidement libéré à l'ouverture de la vanne qui déclenche également le système d'acquisition des hauteurs d'écoulement. En fin d'expérience, lorsque l'arrêt est atteint, le dépôt est photographié depuis un point situé au-dessus de la plate-forme, ce qui fournit un levé de l'extension maximale des écoulements. 8 tests, dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 3.2 ont fait l'objet d'une confrontation entre mesures et résultats de simulations.

N° du test	Caractéristiques du matériau			Caractéristiques géométriques		
	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Contrainte seuil τ_c (Pa)	Consistance K (Pa.s ^{1/3})	Pente de la plate forme (m/m)	Largeur du canal (m)	Hauteur au barrage (m)
A3	1374	29,70	15,77	0,14	0,500	0,160
A4	1374	29,70	15,77	0,14	0,500	0,210
A16	1394	33,00	20,78	0,20	0,500	0,220
A18	1396	29,70	15,40	0,20	0,500	0,200
A21	1396	29,70	15,40	0,20	0,500	0,170
A30	1396	29,70	15,40	0,15	0,500	0,225
A33	1388	29,70	16,50	0,10	0,500	0,210
A38	1388	29,70	16,50	0,10	0,500	0,190

Tableau 3.2 Caractéristiques des essais réalisés

3.3.2.3 Sensibilité du modèle

Dans le cadre des expériences présentées ici, les paramètres géométriques (pente, largeur du canal et hauteur de stockage initiale) et rhéologiques (masse volumique, contrainte seuil et consistance) sont mesurées indépendamment. En conséquence, ces valeurs peuvent être entachées d'incertitudes de mesure susceptibles d'influencer la qualité des confrontations entre simulations et résultats d'expériences. Afin d'identifier les paramètres ayant le plus d'influence sur les résultats et d'évaluer l'impact des incertitudes sur leur qualité, une analyse de sensibilité a été menée et a donné lieu aux principales conclusions suivantes :

- concernant par exemple le test A21 (Tableau 3.2), une variation de +15% (respectivement -15%) des valeurs du seuil de contrainte se traduit par une variation -19.4% (respectivement +16.9%) de la longueur de la zone d'extension maximale simulée.
- concernant les hauteurs de dépôt, les hauteurs maximales d'écoulement et les temps de propagation, la sensibilité du modèle est assez similaire à ce qui vient d'être exposé pour les extensions maximales, tant que l'écoulement n'est pas trop proche de sa phase d'arrêt.
- en revanche, dès que la phase d'arrêt est atteinte, les vitesses d'écoulement deviennent brusquement très faibles et la sensibilité du modèle devient très grande, notamment lorsqu'il s'agit de simuler les hauteurs d'écoulement et temps de propagation. Ces résultats sont tout à fait comparables à ceux exposés au § 2.4.2.1 pour le modèle 1D. Ces conditions d'écoulement proches de l'arrêt, seront fréquemment rencontrées dans les expériences, au niveau des capteurs latéraux.

3.3.3 Confrontation entre mesures et simulations

La confrontation entre simulations et mesures et calculs a porté, d'une part sur les caractéristiques dynamiques des écoulements et d'autre part sur les caractéristiques de la zone d'arrêt. Vu la finalité du modèle qui est le zonage des risques, une bonne représentation des zones d'extension maximale était un critère essentiel à la validation du modèle.

Pour illustrer les caractéristiques dynamiques des écoulements, nous avons retenu les hauteurs maximales d'écoulement et les temps de propagation qui pouvaient aisément être mesurés au niveau des capteurs à ultrasons. Nous définissons ici l'erreur d'estimation (en %) comme le rapport (valeur simulée – valeur mesurée) / valeur mesurée. La confrontation portant sur les hauteurs maximales d'écoulement est illustrée par la Figure 3.3. De façon générale, le modèle tend à surestimer les hauteurs maximales d'écoulement, les discordances pouvant atteindre jusqu'à 90%. On note toutefois que ces discordances importantes apparaissent essentiellement en conditions d'écoulement proches de l'arrêt, au niveau des capteurs latéraux notamment. Dans de telles conditions, il a été établi précédemment que le modèle est particulièrement sensible aux incertitudes sur les valeurs des paramètres. Lorsque les écoulements ne sont pas en phase d'arrêt, ce qui est surtout vérifié pour les capteurs situés dans l'axe du canal amont, les discordances ne dépassent pas 30%.

La confrontation portant sur les temps de propagation est illustrée par la Figure 3.4. Le modèle sous-estime ou surestime les temps de propagation avec une large marge d'incertitude allant de -80% à +120%. On peut là aussi invoquer la forte sensibilité du modèle lors de la phase d'arrêt. Rappelons d'ailleurs que celle-ci est particulièrement grande sur les temps de propagation. En dehors de ces conditions d'écoulement proches de l'arrêt, les discordances sont strictement comprises entre -20% et +40%.

La confrontation portant sur la forme de la zone d'extension maximale est illustrée par la Figure 3.5, pour le test A33. La confrontation portant sur les dimensions de la zone d'étalement maximal est illustrée par la Figure 3.6. On note tout d'abord que la forme des extensions simulées et observées est tout à fait concordante. Concernant les longueurs et largeurs de la zone d'étalement maximal, les discordances sont extrêmement faibles. Enfin, pour ce qui concerne les hauteurs de dépôt observées après l'arrêt de l'écoulement, le modèle tend à les surestimer légèrement avec une incertitude comprise entre 0 et 20% dans la plupart des cas.

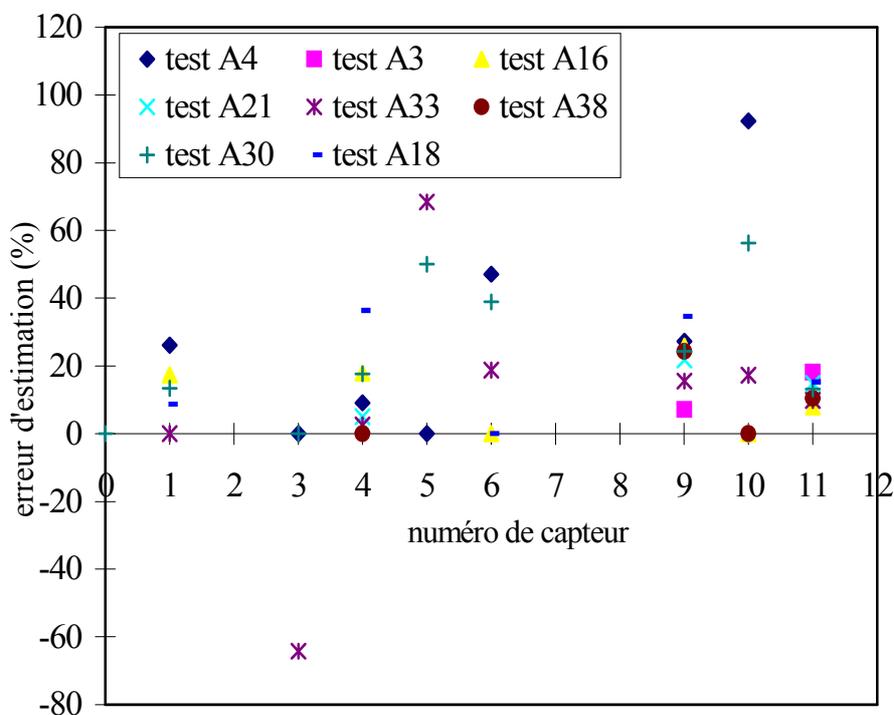


Figure 3.3 Estimation de l'erreur sur les hauteurs d'écoulement

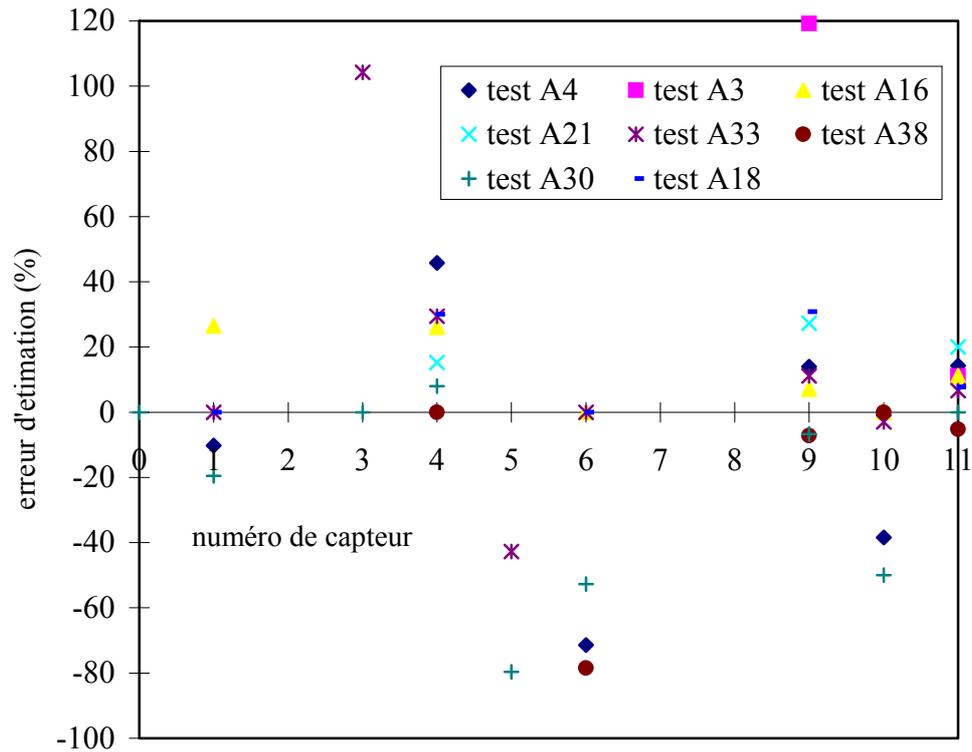


Figure 3.4 Erreur d'estimation sur les temps de propagation

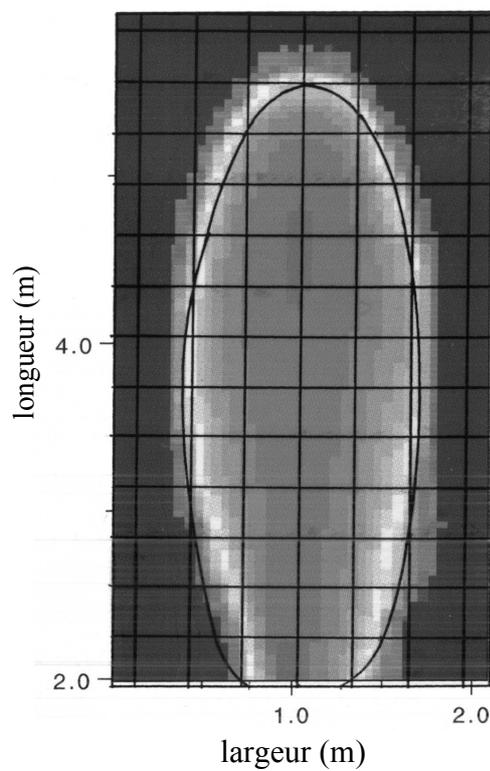


Figure 3.5 Exemple de confrontation entre extension maximale mesurée (courbe noire) et simulée (zone grisée) dans le cas A33

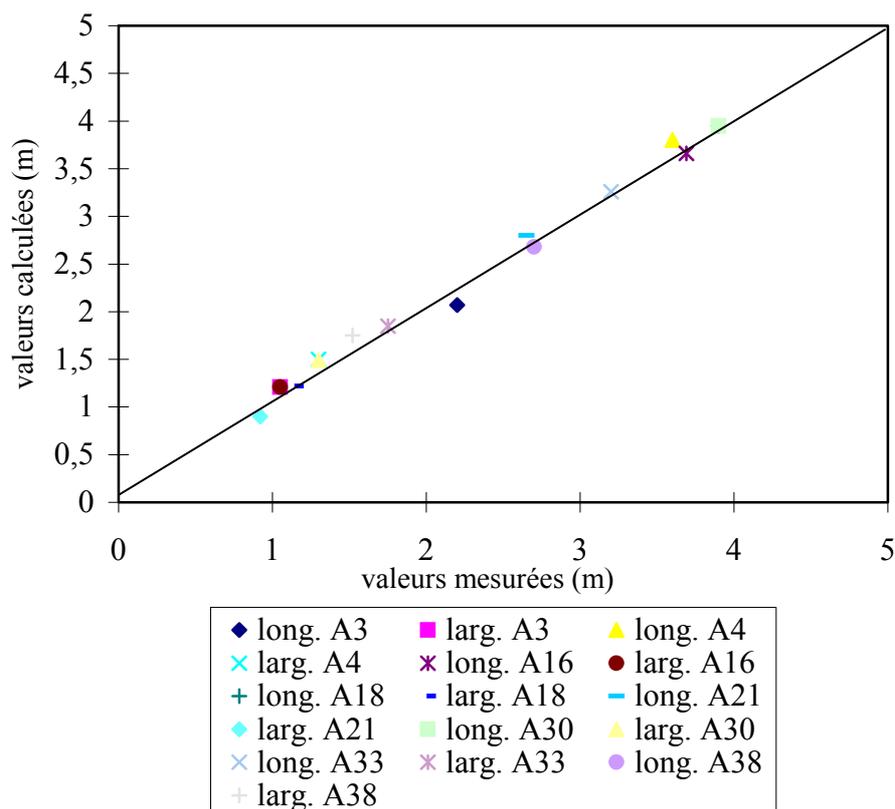


Figure 3.6 Confrontation des longueurs et largeurs de dépôt mesurées expérimentalement et calculées par le modèle 2D pour plusieurs configurations de pente, volume et propriétés rhéologiques du matériau libéré instantanément.

Le travail de confrontation s'est attaché à préciser la capacité du modèle à reproduire les caractéristiques dynamiques d'un écoulement d'une part, et les caractéristiques de la zone de dépôt du matériau d'autre part. Selon que l'on s'intéresse à l'une ou l'autre de ces deux caractéristiques, les résultats de la comparaison sont assez différents. En effet, concernant les caractéristiques dynamiques, les différences entre calculs et mesures peuvent être parfois élevées (la différence peut atteindre 100% de la valeur mesurée). Deux phases d'écoulement doivent toutefois être distinguées. Lorsque l'écoulement est rapide et donc parfaitement développé, les différences restent faibles et de l'ordre de grandeur de celles observées dans le cas monodimensionnel. En revanche pour les phases d'écoulement proches de l'arrêt, les différences sont importantes. Ceci peut s'interpréter par la forte sensibilité du modèle dans cette phase particulière de l'écoulement. Ce comportement avait précédemment été observé sur le modèle 1D (§ 2.4.2.1).

On doit donc conclure que dans la phase d'arrêt, la modèle traduit assez mal les caractéristiques dynamiques de l'écoulement aux points de mesure. On doit toutefois garder en mémoire l'allure de l'écoulement lors de cette phase. Le front d'écoulement est raide et avance lentement (Liu & Mei 1989). Par conséquent, un faible décalage sur la position du point d'observation entraîne des variations fortes sur les valeurs enregistrées, qu'il s'agisse des hauteurs d'écoulement ou des temps de propagation. Dans ces conditions, les fortes discordances observées ne peuvent être considérées comme un argument de rejet du modèle. D'autant plus que, si l'on considère la représentation par le modèle de la zone maximum d'extension, les différences entre calculs et mesures sont faibles. Non seulement, la forme générale du dépôt est bien respectée, mais les dimensions caractéristiques (longueur et largeur) du dépôt sont également bien traduites. Les différences sont généralement inférieures à 20% des valeurs mesurées, ce qui est à rapprocher de la précision des mesures rhéométriques effectuées sur le matériau. On gardera également en mémoire que par rapport à l'objectif opérationnel, la capacité à traduire correctement les caractéristiques de la zone d'étalement est le critère le plus important.

3.4 Confrontation du modèle 2D à des événements de terrain

La capacité du modèle 2D à simuler des écoulements contrôlés de boue, et plus particulièrement leur zone d'extension maximale, ayant été établie, il restait à tester ses capacités prédictives en référence à des événements réels, ceci afin notamment de valider l'hypothèse d'une loi de comportement de type Herschel-Bulkley pour les laves torrentielles réelles dans leur phase d'étalement. Quelques tentatives ont été menées à partir de 1999 sur la base de données recueillies par exemple sur le torrent du Pousset (Saint-Michel de Maurienne, Savoie). Ces tentatives n'ont pas complètement abouti, généralement à cause de la faible précision des données topographiques disponibles avant événement, sur les sites ayant connu des étalements de laves torrentielles bien documentés. Des données beaucoup plus complètes nous ont en revanche été fournies par le WSL de Zurich (Varunasch, § 3.4.2.2) et l'université Bodenkultur de Vienne (Wartschenbach, § 3.4.2.1) dans le cadre du projet 5^{ème} PCRD THARMIT (2000 – 2003). Une présentation détaillée de cette étude figure dans Laigle et al. (2003a, 2006).

3.4.1 Objectifs

L'objectif de la présente étude est de comparer les résultats de simulation numérique à des événements réels, essentiellement pour tester les capacités du modèle en conditions de terrain, mais également pour déterminer ses domaines de validité et niveau de précision (Laigle 2000). Une telle confrontation nécessitait des données très précises concernant les événements et préférentiellement une détermination indépendante des caractéristiques rhéologiques des matériaux en écoulement, ceci afin d'éviter tout rétro-calage des valeurs des paramètres du modèle. Un tel rétro-calage aurait en effet diminué l'intérêt du modèle dans une logique d'utilisation opérationnelle en prédétermination. Cette condition n'a pu être parfaitement remplie, notamment car aucune mesure directe des propriétés rhéologiques n'est possible, compte tenu de la grande taille des blocs généralement présents dans les coulées. Seules des méthodes d'estimation indirectes, telles que celles proposées par Phillips & Davies (1991) ou Coussot et al. (1998) peuvent être mises en œuvre. Dans le cas présent, par exploitation des observations de terrain, il a été néanmoins possible de faire une estimation des valeurs des paramètres sans avoir recours à un rétro-calage. Ceci a permis, dans des conditions admissibles, de tester les capacités prédictives du modèle. Deux événements de laves torrentielles ont pu être exploités pour mener à bien cette confrontation : celui de 1997 sur le torrent du Wartschenbach en Autriche et celui de 1987 sur le torrent du Varunasch en Suisse. La confrontation porte essentiellement sur la forme globale de l'extension de la coulée et donc sur la surface couverte par les dépôts, mais aussi sur la distribution spatiale des hauteurs de dépôt.

3.4.2 Présentation des événements étudiés

Le Tableau 3.3 résume les principales caractéristiques des événements de laves torrentielles étudiés. L'essentiel des données disponibles ne peut être utilisé directement pour générer les données d'entrée du modèle, mais nécessite un traitement préalable. Le travail effectué dans le cadre de la présente étude peut être séparé en deux parties : la détermination des données d'entrée du modèle et la confrontation entre résultats de simulation et descriptions disponibles des événements réels. Concernant la détermination des données d'entrée, un point essentiel est l'estimation des valeurs des paramètres rhéologiques. Pour l'événement du Wartschenbach, des analyses des propriétés du matériau avaient été menées préalablement à la présente étude en utilisant par exemple un tapis roulant (Davies 1988, Hübl & Steinwendtner 2000a). Ceci a permis d'établir que le matériau présentait les caractéristiques d'une lave torrentielle à matrice boueuse. Toutefois, l'analyse n'ayant porté que sur la fraction fine du matériau déposé, les valeurs déduites du seuil de contrainte (environ 100 Pa) ne pouvaient expliquer les épaisseurs de dépôt (compatibles avec un seuil de contrainte de quelques kPa) observées sur le terrain. Concernant l'événement du Varunasch, aucun résultat d'analyse des propriétés rhéologiques du matériau n'était disponible.

torrent	Wartschenbach	Varunasch
localisation	Ost-Tyrol (Autriche)	Grisons (Suisse)
Caractéristiques du site		
Superficie du bassin versant (km ²)	2.6	6.5
altitudes	2500 - 650	3450 – 1040 m
Pente moyenne du cône de déjection	4 %	15 %
chenal	Présent dans la zone d'étalement	
Caractéristiques des laves torrentielles		
date	16/08/1997	18/07/1987
total volume	20 000 – 25 000 m ³	215 000 m ³
durée	environ 30 minutes	Environ 5 heures
Nombre de vagues	1	3 vagues principales et plusieurs vagues secondaires
Comportement du matériau	boueux, visco-plastique	
Données disponibles		
Modèle numérique de terrain	Grilles à mailles carrées de 2 ou 5 m	Grilles à mailles carrées de 5 ou 25 m
dépôts	Relevé cartographique des limites d'étalement, photos des dépôts	Relevé cartographique des limites d'étalement, estimations des hauteurs de dépôt
Caractéristiques du matériau		
rhéologie	Ordre de grandeur des paramètres rhéologiques correspondant à un modèle de Bingham et résultats originaux de tests rhéométriques (viscosimètre, tapis roulant)	Aucune donnée disponible
Masse volumique	environ 2000 kg/m ³	environ 1850 kg/m ³
Concentration volumique solide	50 – 60 %	environ 50 %

Tableau 3.3 Caractéristiques et données associées aux événements étudiés

3.4.2.1 Wartschenbach

Le bassin versant du Wartschenbach (Tableau 3.3) est localisé près de la ville de Lienz (Ost-Tyrol, Autriche). L'événement étudié ici, s'est produit le 16 août 1997 après un intense épisode pluvieux avec de la grêle (40 mm de pluie en 20 minutes). Environ 45 000 m³ d'eau et de sédiments furent mobilisés en 30 minutes et atteignirent la plage de dépôt située à l'apex du cône de déjection. La moitié du matériau transporté s'arrêta à cet endroit. Les 20 000 à 25 000 m³ de matériau restant s'étalèrent sur le cône de déjection où ils endommagèrent 15 maisons (Hübl & Steinwendtner 2000b). Cet étalement sur le cône de déjection est ici utilisé comme base de confrontation entre simulations et observations.

3.4.2.1.1 Détermination des données d'entrée

(1) *Propriétés du matériau*

Les valeurs des paramètres rhéologiques déduites d'investigations directes (Hübl & Steinwendtner 2000a) sur des échantillons frais, ne permettant pas d'expliquer l'épaisseur des dépôts observés au terrain, il fut décidé d'exploiter une série de photographies prises juste après l'événement pour en déduire la valeur du seuil de contrainte (en pratique, le rapport τ_c/ρ). Pour cela, nous avons exploité une photographie d'un dépôt appuyé contre le mur d'une scierie, dont nous avons pu estimer l'épaisseur. Nous disposions également d'une estimation de la pente à cet endroit. Il fut donc possible, grâce à la formule classique $\tau_c/\rho = g h \sin \theta$ (équilibre entre contrainte de cisaillement au fond, due à la gravité et seuil de contrainte) d'en déduire une valeur du rapport τ_c/ρ comprise entre 0,8 et 1,35 m²s⁻². Nous avons retenu une valeur égale à 1,1 m²s⁻² pour une première simulation. Conformément aux préconisations de Coussot (1996) le rapport K/τ_c a été pris égal à 0,3 s^{1/3}.

(2) *Hydrogramme d'entrée*

Ne disposant d'aucune donnée sur la forme de l'hydrogramme réel de la lave torrentielle qui a atteint le cône de déjection du Wartschenbach, nous avons retenu l'hypothèse d'un hydrogramme triangulaire présentant un débit de pointe de 16 m³/s et un volume de 22 500 m³. La valeur du débit de pointe résulte de considérations hydrologiques dont la validité est douteuse pour une lave torrentielle. Toutefois, une valeur beaucoup plus élevée de 100 m³/s a également été testée et a donné des résultats très proches en termes d'extension. Sur ce cas, l'influence du débit de pointe sur l'extension de la coulée est faible, ce qui sera confirmé par l'analyse de sensibilité.

(3) *Modèle numérique de terrain (MNT)*

Plusieurs grilles constituées de cellules carrées de 5 m ou 2 m de côté, générées avec ou sans l'utilisation de « break-lines » (prise en compte des lignes de rupture de la topographie dans la génération du MNT) étaient disponibles suite à une préalable application du modèle d'hydraulique des coulées boueuses FLO2D (O'Brien et al. 1993). Les premières simulations ont été effectuées avec des tailles de cellules de 2 m, tandis que des tailles de cellules de 5 m ont été utilisées dans le cadre de l'analyse de sensibilité du modèle.

(4) *Zones imperméables*

Les bâtiments présents dans la zone d'étalement ont été pris en compte comme des groupes de cellules aux bords imperméables. Une zone boisée centrale qui n'a pas été affectée par l'écoulement réel a également été traitée comme une zone imperméable.

3.4.2.1.2 Résultats de simulation et confrontation à l'événement réel

Sur la base des données d'entrée exposées au paragraphe précédent, une première simulation a été menée. La comparaison entre extensions réelle et simulée est présentée en Figure 3.7. La forme globale de l'extension des dépôts est bien reproduite par le modèle et les hauteurs simulées sont cohérentes avec la réalité. Par conséquent notre estimation des valeurs des paramètres rhéologiques peut être considérée comme valide. Toutefois, dans la partie Est de la zone d'étalement, la simulation ne rend pas complètement compte de la réalité. Ainsi, quatre maisons sont affectées par l'écoulement réel alors qu'elles ne le sont pas par l'écoulement simulé. Il y a également un dépassement de la route à la partie Sud-Est de l'étalement qui est simulé mais non observé dans la réalité. Ce point toutefois n'est pas aussi problématique que le précédent. En effet, même si la simulation ne rend pas parfaitement compte de la limite du dépôt observé, on peut voir sur les photographies prises après l'événement que très probablement la lave torrentielle réelle a partiellement dépassé la route sans qu'il soit possible de déterminer précisément la limite atteinte par celle-ci. La surface couverte par le dépôt simulé est légèrement plus grande que celle du dépôt réel mais la discordance reste faible. Ainsi le rapport surface couverte simulée sur surface couverte réelle s'établit à 112 %. Pour interpréter les différences entre simulations et observations de terrain, il convient tout d'abord de noter que l'incertitude sur les données d'entrée peut avoir des répercussions fortes sur la qualité du résultat. Ce

point sera traité plus en détails dans l'analyse de sensibilité (§ 3.4.3). Il convient également de noter que le modèle considère un matériau homogène dont les propriétés sont constantes dans le temps et en tout point du domaine de calcul. Cette hypothèse permet une utilisation aisée du modèle sur des cas pratiques. Il s'agit toutefois d'une hypothèse forte, notamment parce que les propriétés du matériau des laves torrentielles dépendent fortement de facteurs tels que leur teneur en eau. Des variations de ces facteurs se traduisent inévitablement par des phénomènes de ségrégation, qui même s'ils restent faibles, influencent le résultat.

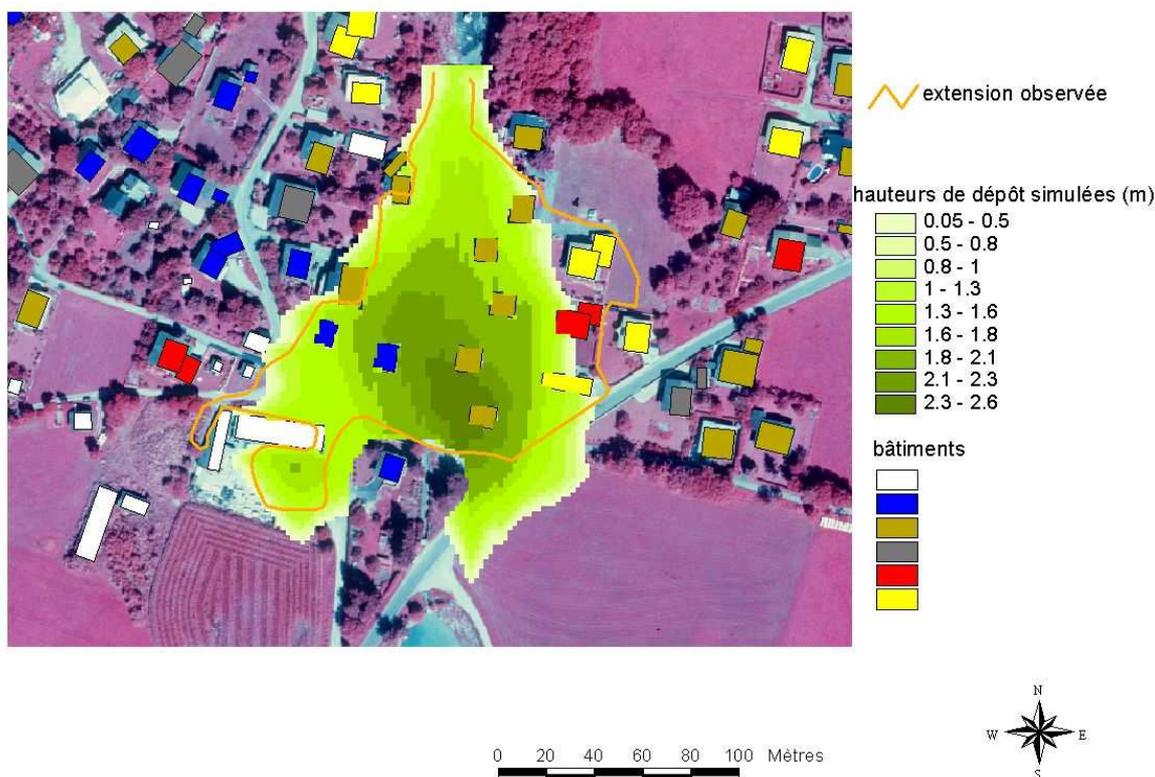


Figure 3.7 Extensions réelle et simulée de la lave torrentielle du Wartschenbach, hypothèses retenues pour la simulation : volume = 23 000 m³, paramètres rhéologiques : $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ et $K/\tau_c = 0,3 \text{ s}^{1/3}$, débit de pointe = 16 m³/s, grille de calcul constituée de cellules carrées de 2 m de côté.

3.4.2.2 Varunasch

3.4.2.2.1 Présentation de l'événement

Le bassin versant du Varunasch (Tableau 3.3) est situé dans le canton des Grisons en Suisse. L'événement de lave torrentielle étudié ici s'est produit le 18 juillet 1987 et a mobilisé 215 000 m³ de matériau qui se sont écoulés en trois vagues principales et dix vagues secondaires en s'étalant sur le cône de déjection (Hürlimann 2000).

3.4.2.2.2 Détermination des paramètres d'entrée

(1) *Propriétés du matériau*

Aucun résultat d'analyse des propriétés rhéologiques du matériau de cet événement n'était disponible. Comme dans le cas du Wartschenbach, une estimation grossière du seuil de contrainte peut être déduite des observations de terrain. Seuls des ordres de grandeur de l'épaisseur des dépôts (1 à 1,5 mètres) et de la pente moyenne du cône de déjection étaient connues. Sur la base de ces données, nous avons établi que le rapport τ_c/ρ avait une valeur très probablement comprise entre 1,45 et 2,2 m²s⁻².

Une valeur de $1,8 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ a été utilisée pour effectuer une première simulation et le rapport K/τ_c a été pris égal à $0,3 \text{ s}^{1/3}$.

(2) Hydrogramme d'entrée

Ne disposant d'aucune information sur la forme de l'hydrogramme réel, un hydrogramme triangulaire a été adopté. Celui-ci présente un débit nul à l'instant initial, qui croît ensuite linéairement jusqu'à atteindre un débit de pointe de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ au bout de 180 secondes, puis qui décroît linéairement jusqu'à obtention du volume de l'événement. Un choix similaire avait été fait pour une application antérieure du modèle FLO2D (O'Brien et al. 1993) à l'événement du Varunasch.

(3) Modèle numérique de terrain

Une grille constituée de cellules carrées de 5 m de côté (MNT existant préalablement à la présente étude) a été utilisée en pratique. Le chenal est bien marqué sur le MNT, de telle sorte qu'on peut supposer que des « break-lines » appliquées au rebord du chenal ont probablement été utilisées lors de la génération de la grille d'altitudes.

3.4.2.2.3 Résultats de simulation et confrontation à l'événement réel

Sur la base des données d'entrée exposées au paragraphe précédent, une première simulation a été menée. La comparaison entre extensions réelle et simulée est présentée en Figure 3.8. La forme globale du dépôt et la direction de l'écoulement sont convenablement décrites par le modèle. La superficie couverte par les dépôts simulés est égale à 90% de la superficie des dépôts réels. Par conséquent, il semble que l'estimation très grossière des valeurs des paramètres rhéologiques que nous avons effectuée était assez pertinente. Toutefois, deux zones sont assez mal représentées par les simulations. La première est localisée à l'aval en rive droite et la seconde à l'amont en rive gauche. Concernant la première de ces zones, elle a été recouverte par l'écoulement réel mais aucune des simulations effectuées et quelles que soient les valeurs des paramètres rhéologiques testés, n'a permis d'aboutir à un écoulement dans cette zone. Un problème éventuel de précision des données topographiques dans cette zone pourrait expliquer cette discordance dont l'origine précise n'a toutefois pu être déterminée. La seconde zone présente une forte variabilité de l'extension des coulées simulées en fonction des valeurs des paramètres rhéologiques employés. Dans ces conditions de forte instabilité, le modèle peut difficilement prendre en compte la complexité locale des écoulements et par conséquent représenter de façon pertinente toutes les digitations observées sur le terrain. Il s'agit ici clairement de l'une des limites opérationnelles du modèle.

3.4.3 Analyse de sensibilité et facteurs influençant la qualité des résultats

Tout comme précédemment (§ 3.3.2.3), l'analyse de sensibilité a ici pour objectif de déterminer quels paramètres déterminent le plus fortement les résultats et plus particulièrement leur qualité. En contexte opérationnel, une telle analyse peut fournir des renseignements précieux sur les données de terrain qui devront être recueillies avec le plus de soin et fournir également une évaluation des incertitudes pesant sur les résultats de simulation.

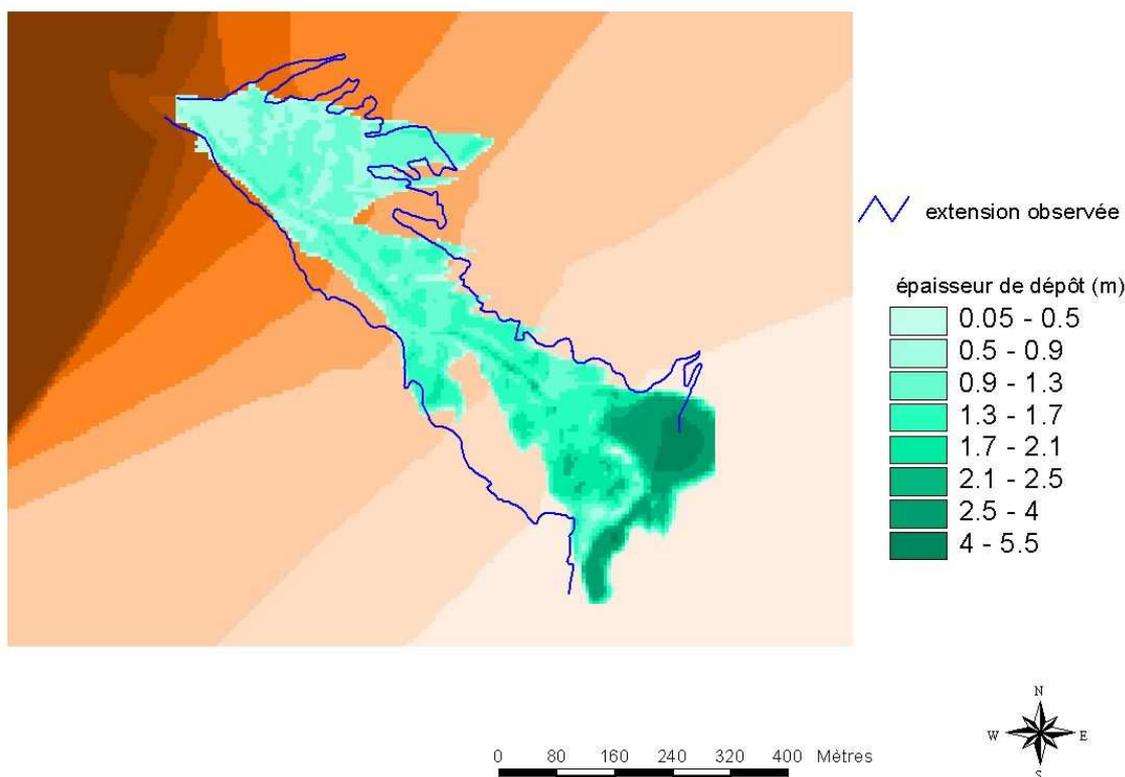


Figure 3.8 Extensions réelle et simulée de la lave torrentielle du Varunasch, hypothèses retenues pour la simulation : volume = 215 000 m³, $\tau_c/\rho = 1,8 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, $K/\tau_c = 0,3 \text{ s}^{1/3}$, débit de pointe = 600 m³/s, grille de calcul constituée de cellules carrées de 5 m de côté.

3.4.3.1 Paramètres rhéologiques

L'estimation des valeurs des paramètres rhéologiques est délicate et, en l'état actuel des connaissances, reste entachée d'une forte incertitude. Afin d'estimer la sensibilité du modèle à la variabilité de ces paramètres, des tests ont été menés sur le Wartschenbach en utilisant différentes valeurs des paramètres rhéologiques. En référence à la Figure 3.9, la sensibilité du modèle aux variations du rapport τ_c/ρ paraît bien plus importante que celle résultant des variations du rapport K/τ_c . Une variation de 10% de la valeur de τ_c/ρ se traduit par une variation de 6,5% de la superficie des dépôts (Tableau 3.4), tandis qu'une variation de 1/3 du rapport K/τ_c se traduit par de faibles variations de cette superficie. Les tests effectués sur le Varunasch amènent toutefois à modérer cette conclusion. En effet, même si encore une fois la superficie couverte semble plus influencée par τ_c/ρ que par K/τ_c , une variation relative de 1/3 sur la valeur de K/τ_c amène dans ce cas à une variation de 2,5% sur la superficie couverte par les dépôts. En fait, l'effet relatif des paramètres rhéologiques semble dépendre des valeurs de la pente locale et du débit. Par conséquent, l'influence relative des paramètres n'est pas la même pour tous les événements, même si généralement le rapport τ_c/ρ semble être le paramètre dominant.

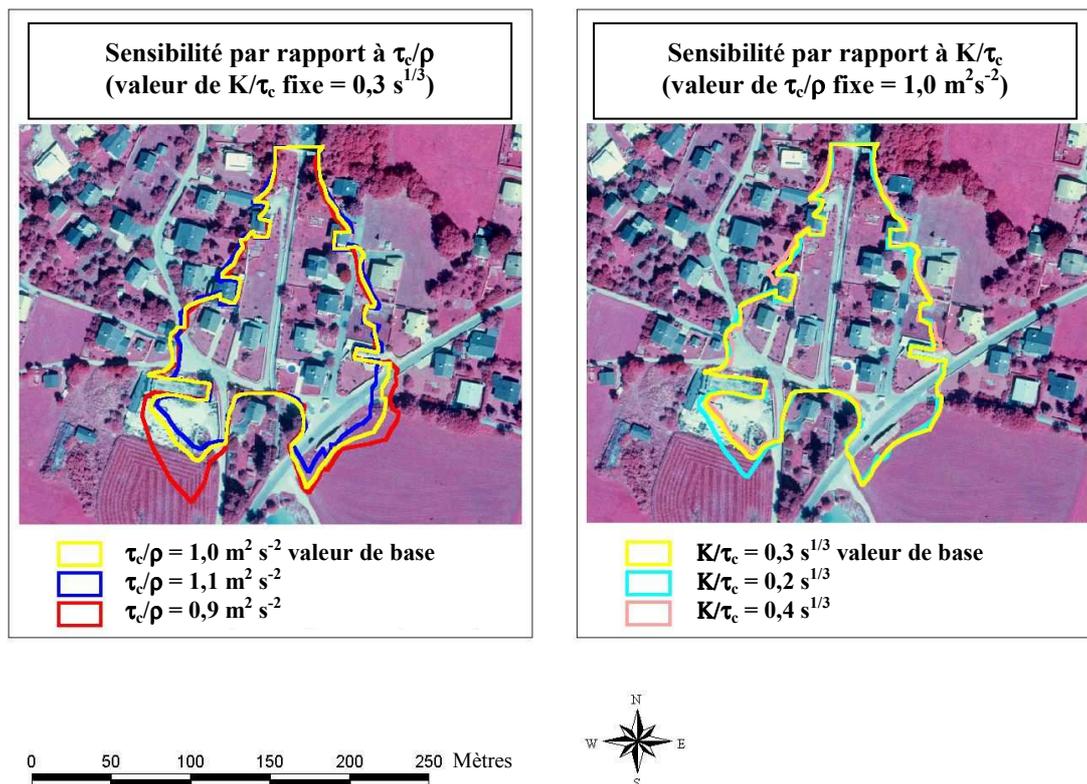


Figure 3.9 Sensibilité du modèle aux variations des valeurs des paramètres rhéologiques (Wartschenbach), hypothèses retenues pour la simulation : volume = 23 000 m³, débit de pointe = 16 m³/s, grille de calcul constituée de cellules carrées de 2 m de côté.

Valeur de τ_c/ρ (m ² s ⁻²)	0.8	0.9	1.0	1.1	1.35	1.45	1.8	2.2
Superficie des dépôts (× 0,01 km ²)	1.76	1.71	1.60	1.50	1.28	15.2	15.0	13.2
torrent	Wartschenbach					Varunasch		

Tableau 3.4 Influence de la valeur de τ_c/ρ sur la superficie couverte par les dépôts

3.4.3.2 Volume et débit

Dans le cas du Wartschenbach, les variations du débit ne semblent pas influencer fortement l'extension de l'étalement, même pour une augmentation considérable (+50%) de ce dernier. En revanche, la sensibilité du modèle aux variations du volume entrant est importante et déjà significative pour une variation de 10%. Les tests similaires, concernant l'influence du débit, conduits sur le Varunasch amènent à modérer cette conclusion (Figure 3.10). Dans ce cas, un débit plus élevé se traduit par une extension latérale plus importante du dépôt. Ceci résulte probablement de l'augmentation de hauteur d'écoulement consécutive à l'augmentation de débit, ce qui amène le matériau suffisamment haut pour surverser et donc dépasser certaines limites naturelles de l'écoulement. Cet effet est clairement lié à la topographie du site.

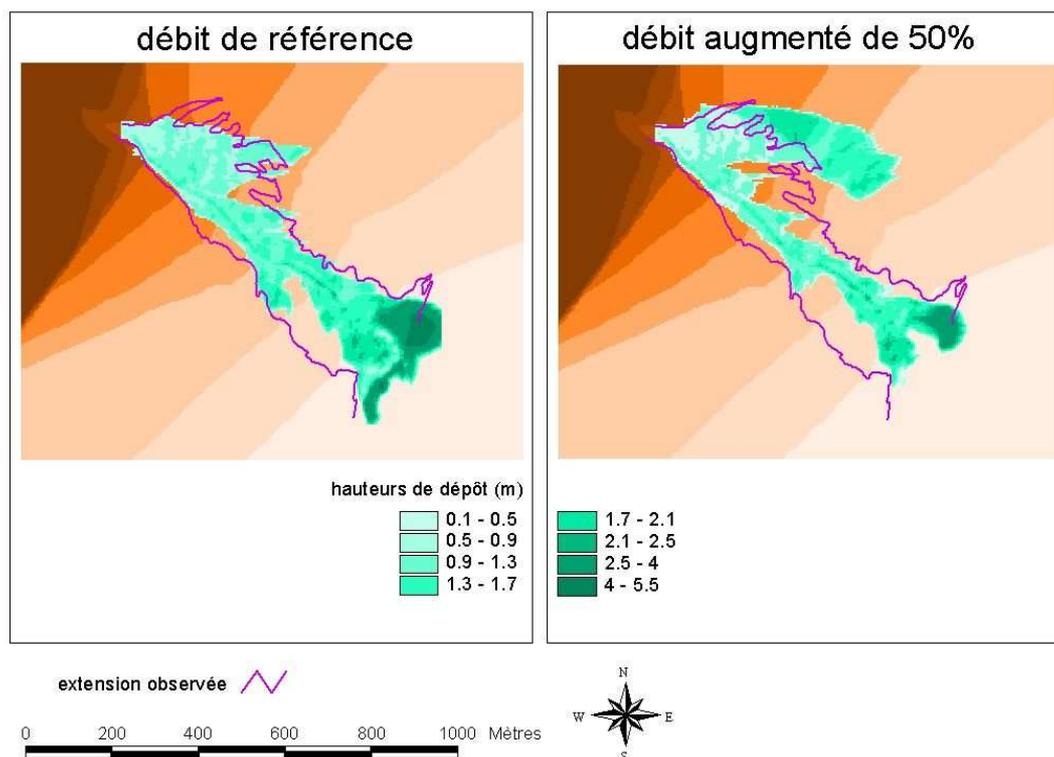


Figure 3.10 Sensibilité du modèle aux variations du débit entrant (Varunasch), hypothèses retenues pour la simulation : volume = 215 000 m³, $\tau_c/\rho = 1,8 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, $K/\tau_c = 0,3 \text{ s}^{1/3}$, grille de calcul constituée de cellules carrées de 5 m de côté.

3.4.3.3 Modèle numérique de terrain

3.4.3.3.1 Taille des cellules

Des tests effectués sur le Wartschenbach, en utilisant plusieurs grilles, montrent qu'une meilleure résolution sur la taille de la grille (cellules de petite taille) améliore la qualité des simulations. Sur l'exemple (Figure 3.11), l'emprise des dépôts n'est pas très bien simulée avec une grille constituée de cellules de 5 m et l'écoulement se trouve improprement dirigé vers le Sud-Est. Les résultats de cette dernière simulation sont un peu meilleurs si l'on utilise des « break-lines » pour prendre en compte l'existence de lignes de ruptures dans la topographie. Le meilleur choix consiste clairement à utiliser une grille constituée de cellules de 2 m.

3.4.3.3.2 Méthode appropriée pour générer la grille d'altitudes

Dans le modèle utilisé, la grille de calcul et la grille altimétrique sont superposées et constituées de cellules de tailles identiques. Il n'a donc pas été possible d'étudier de façon tout à fait indépendante l'influence de la précision du MNT sur les résultats de simulation. En effet, le passage à des mailles plus grossières s'accompagne d'une dégradation de l'information topographique prise en compte, mais aussi d'une moins bonne précision du calcul hydraulique lui-même, sans qu'il soit possible de discriminer leurs influences respectives. Toutefois, en référence aux tests conduits dans le cadre de la présente étude, on peut affirmer que la méthode la plus appropriée pour générer une grille d'altitudes à partir des points du relevé topographique consiste à générer dans un premier temps un réseau de triangles irréguliers (TIN, pour triangular irregular network) plutôt que de générer directement la grille. La représentation du terrain par un TIN est également améliorée par la prise en compte de « break-lines » représentant les bords de routes, chenaux ou crêtes.

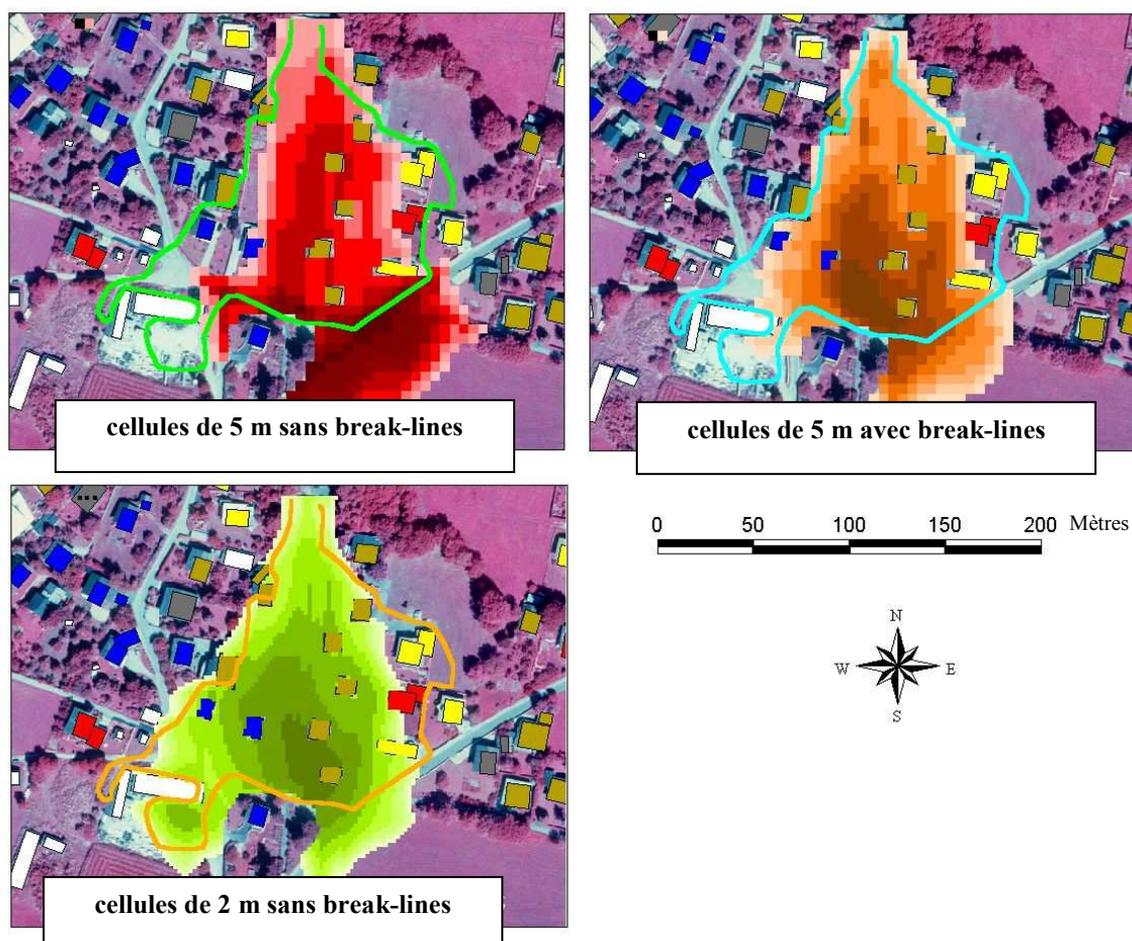


Figure 3.11 Influence de la taille des cellules sur la qualité des résultats de simulation (Wartschenbach), hypothèses retenues pour la simulation : volume = 23 000 m³, $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, $K/\tau_c = 0,3 \text{ s}^{1/3}$, débit de pointe = 16 m³/s.

3.4.4 Discussion des résultats

L'objectif de la présente étude était de confronter les résultats du modèle 2D à des événements réels bien documentés. L'application est basée sur les événements du Wartschenbach (Autriche, 1997) et du Varunasch (Suisse, 1987). Ces confrontations ont été menées sans faire appel à un rétro-calage des paramètres du modèle. Une bonne concordance entre les simulations et la réalité a été observée. L'extension des étalements et la distribution des hauteurs de dépôt simulées concordent avec les enregistrements d'événements réels. Une analyse de la sensibilité du modèle a été menée. L'effet dominant de la qualité des données topographiques ainsi que de l'estimation des valeurs des paramètres rhéologiques (tout particulièrement le seuil de contrainte) et du volume de matériau sur la précision des résultats a été établi. Toutefois, l'influence de la précision de l'estimation des valeurs des paramètres d'entrée reste variable d'un cas à l'autre. On notera également que ce modèle permet la prise en compte de certains aménagements de protection, ce qui renforce son intérêt opérationnel.

3.4.5 Confrontation à d'autres modèles

Le modèle 2D a également été confronté au modèle FLO2D d'O'Brien & Julien (1993) et au modèle développé par le WSL de Zurich, dans le cadre de la simulation des événements du Wartschenbach et du Varunasch présentés ci-dessus. Ce travail a fait l'objet d'une publication (Rickenmann et al. 2006) qui montre d'une part que la qualité de simulation des événements est relativement similaire d'un

modèle à l'autre et qui, d'autre part aboutit à une série de conclusions similaires à celle exposée au paragraphe 3.4.3, pour ce qui concerne la sensibilité des modèles.

3.5 Bilan et perspectives

3.5.1 Un modèle correctement validé permettant d'aborder des études de terrain

Nous avons montré que le modèle 2D a une bonne capacité à simuler des écoulements très transitoires de fluide à seuil au laboratoire. En conditions de terrain, une confrontation à deux événements réels, dont on peut considérer qu'ils entraînent dans la catégorie laves torrentielles boueuses a été couronnée de succès. La précision des résultats fournis par le modèle a pu être évaluée et une étude de sensibilité a permis d'identifier les points clés déterminant une utilisation optimale des capacités du modèle. Son utilisation comme outil d'appui à l'expertise (cf. paragraphe 3.5.1.1), d'aide au zonage de l'aléa lave torrentielle et son transfert aux services opérationnels, était de ce fait envisageable. De plus, une utilisation dans le cadre d'une expertise (torrent du Rioulong, description détaillée au chapitre 4) a montré que dans une certaine mesure le modèle pouvait être utilisé pour orienter la conception et le dimensionnement de certains ouvrages de protection, ce qui constituait un point très intéressant pour les praticiens. Pour autant certaines perspectives d'amélioration peuvent être envisagées et pour certaines d'entre elles ont déjà fait l'objet d'études prospectives.

3.5.1.1 Applications opérationnelles du modèle 2D

3.5.1.1.1 Les Egravâts

Le modèle 2D a été utilisé dans le cadre de l'expertise suivante :

Commanditaire :

Préfecture du Puy-de-Dôme, maîtrise d'ouvrage déléguée : DDE du Puy-de-Dôme.

Nature de la prestation :

Etude des phénomènes de type coulée de boue et écoulements torrentiels au lieu-dit « Les Egravâts », commune du Mont-Dore (63), suite à l'événement de janvier 2004. Expertise réalisée via un groupement conjoint BRGM – LRPC – Cemagref. Caractérisation de l'aléa torrentiel dans une zone résidentielle (2004). Le lotissement menacé par ce phénomène ayant fait l'objet d'un arrêté d'interdiction d'occupation des lieux suite à l'événement de janvier 2004, cette expertise s'est déroulée dans un contexte de très fort enjeu, aussi bien pour les propriétaires des habitations concernées que pour l'Etat. La question centrale à résoudre était : « peut-on mettre en sécurité le lotissement pour un montant inférieur à celui des biens menacés, ou y a-t-il lieu d'exproprier (application de la loi Barnier) ? ». Le modèle 2D a été utilisé dans le cadre de cette expertise pour déterminer les niveaux d'aléa. Un certain nombre de simulations, dont un exemple est donné en Figure 3.12, ont été menées sur la base notamment de scénarios de volume des coulées. L'analyse de ces différentes simulations a permis de proposer une cartographie des aléas sur ce secteur et notamment de démontrer qu'une large majorité des habitations était susceptible d'être affectée par des écoulements boueux transitant par l'une ou l'autre des trois ravines qui cernent ce lotissement.

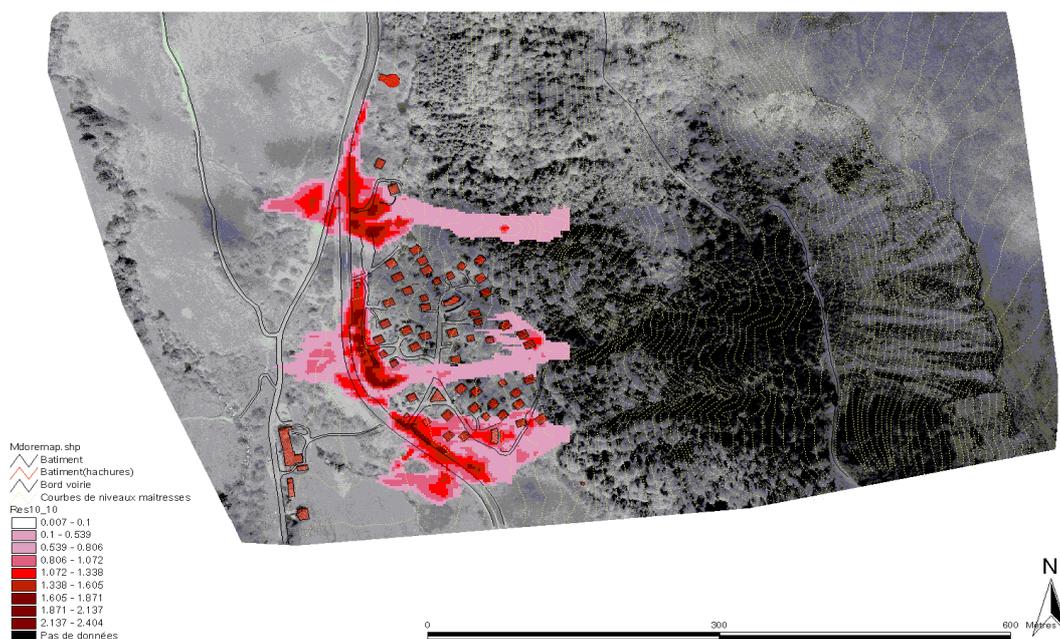


Figure 3.12 Simulation des coulées de boue sur le site des Egravâts dans l'hypothèse $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, $K/\tau_c = 0,3 \text{ s}^{1/3}$ et un volume de $10\,000 \text{ m}^3$ pour chacune des trois ravines ; sont figurées ici les épaisseurs (m) de dépôt après arrêt des coulées.

3.5.1.1.2 Le Rioulong

Le modèle 2D a été utilisé dans le cadre de l'expertise suivante :

Commanditaire :

Service de Restauration des terrains en Montagne, Délégation nationale chaîne des Pyrénées.

Nature de la prestation :

Etude de l'aléa « laves torrentielles » sur le cône de déjection du torrent du Rioulong, Forêt domaniale de la neste du Louron (Hautes-Pyrénées) (2005).

Cette étude fera l'objet d'une présentation détaillée au chapitre 4 en illustration de la méthode d'analyse par scénarios.

3.5.1.2 Actions de transfert

Le modèle 2D a également fait l'objet d'une session de formation spécifique en vue de son transfert aux praticiens :

Bénéficiaire :

Services départementaux de Restauration des Terrains en Montagne

Intitulé de la formation :

« Laves torrentielles : spécificités, méthodes de diagnostic et outils d'aide à l'expertise » (3 sessions identiques organisées en octobre et novembre 2006).

3.5.2 Perspectives

3.5.2.1 Etudes prospectives à finaliser

L'étude de sensibilité menée sur le modèle 2D d'étalement de laves torrentielles a mis en évidence l'importance de la précision des données topographiques considérées et plus particulièrement de sa prise en compte au niveau du maillage altitudinal servant de base au calcul numérique. Un comparatif avec d'autres modèles numériques d'étalement (§ 3.4.5) a montré de façon générale l'importance de ce point. Afin d'améliorer les performances de ce modèle 2D, un travail portant sur une construction optimisée du maillage (Saramito & Roquet 2002) a été mené. L'adoption de mailles triangulaires dont

la taille est fonction de la pente locale du terrain s'est révélée la plus adaptée. Des critères portant sur la forme des triangles et sur les tailles respectives de triangles voisins ont été établis (Laigle et al. 2003b).

Par ailleurs, se posait la question d'une représentation optimale des résultats de simulations menées grâce au modèle 2D et notamment de leur impact dans le cadre de négociations entre techniciens et décideurs. Afin de renforcer la facilité de compréhension des résultats de cet outil, l'utilisation de techniques de type « réalité virtuelle » était a priori séduisante. Une étude prospective a été menée en ce sens afin de produire des textures réalistes de laves torrentielles pouvant être drapées sur les résultats numériques bruts et aboutir à la production de films correspondant à chacun des scénarios envisagés dans le cadre d'une expertise. Les premiers résultats obtenus étaient tout à fait prometteurs (Laigle et al. 2003b). Cependant, cette collaboration ne s'étant pas poursuivie, l'outil n'est pas actuellement opérationnel.

Enfin, une partie des perspectives opérationnelles concernant ce modèle sera abordée au chapitre 4. Dans le cadre de l'approche par scénarios, un modèle de ce type peut en effet être considéré comme un maillon central de la démarche.

3.5.2.2 Autres perspectives

Au titre des perspectives d'amélioration à moyen terme du modèle 2D, on peut citer sa capacité à intégrer la présence d'obstacle de type structures de protection par exemple. C'est là une demande forte des services opérationnels, qui devrait pouvoir bénéficier à terme des avancées sur les interactions écoulements – obstacles qui seront évoquées au chapitre 5.

A l'heure actuelle, le modèle a fait ses preuves pour des laves torrentielles à matrice boueuse. Une adaptation et une validation pour les autres types de laves torrentielles (granulaires et lahars) restent à mener.

Chapitre 4

L'approche par scénarios : une méthodologie opérationnelle de prédétermination des caractéristiques d'écoulement

4.1 Intérêt opérationnel de l'approche par scénarios

Les laves torrentielles, comme beaucoup de phénomènes naturels, présentent une grande variabilité de leurs conditions d'occurrence. Cette variabilité résulte bien sûr de l'occurrence des conditions météorologiques déclenchantes, mais également de la nature et de la disponibilité des matériaux solides présents dans le bassin versant. Ces deux facteurs conjugués vont déterminer le volume, les propriétés mécaniques du matériau et plus généralement l'ensemble des conditions d'écoulement.

Or, pour le praticien travaillant à la définition de mesures de prévention, qui voudrait connaître l'intensité (vitesse d'écoulement et donc dommages générés) et la probabilité d'occurrence (une fois tous les 10 ans, 100 ans, 1000 ans ?) des phénomènes susceptibles d'affecter un point donné de l'espace (une habitation, par exemple), il est crucial d'appréhender cette variabilité. Evaluer des intensités de phénomène et les probabilités associées, à un niveau local, est a priori envisageable si l'on connaît les propriétés statistiques des processus et valeurs des paramètres qui déterminent l'écoulement. Dans ces conditions, l'utilisation de modèles d'écoulement pour lesquels les valeurs des données d'entrée (de propriétés statistiques supposées connues) sont aléatoirement imposées (technique de type Monte-Carlo, par exemple), permettent ce type d'évaluation. Cela a par exemple été démontré par Ancey (2005), pour les avalanches. Une telle démarche stochastique constitue a priori le cadre scientifique à mettre en œuvre pour résoudre ce problème. Toutefois, pour ce qui concerne les laves torrentielles et si l'on s'en tient à un cadre de prédétermination, on se trouve confronté à un double problème :

- La complexité des processus de génération et d'écoulement des laves torrentielles, pilotés par des paramètres, qui pour certains sont difficilement « probabilisables » (phénomènes perturbateurs tels qu'embâcles, blocages de corps flottants sous un pont, par exemple).
- La méconnaissance actuelle des propriétés statistiques de nombreuses données d'entrée des modèles dont la mise en œuvre est envisageable.

Dans ce contexte, l'analyse par scénarios, qui fait l'objet du présent chapitre, est à considérer comme un palliatif à une approche stochastique qui peut difficilement être mise en œuvre pour les raisons évoquées ci-dessus. Elle est donc avant tout une méthode d'ingénieur qui consiste à définir une fourchette de valeurs possibles pour chacune des variables d'entrée et à leur affecter une probabilité d'occurrence le plus souvent qualitative (moyenne, rare, exceptionnelle...). Des simulations d'écoulement peuvent alors être menées en « balayant » ces gammes de variation prédéfinies, chaque

résultat étant a posteriori associé à une fréquence d'occurrence, elle aussi qualitative. D'un point de vue pratique, ces différentes approches fondées sur l'utilisation de modèles numériques est complémentaire d'autres types d'approches plus purement empiriques, telles que celle proposée par Rickenmann (1999).

4.2 Objectifs

Partant du constat exposé au paragraphe précédent, la présente étude a pour objectif principal d'établir un cadre méthodologique de prédétermination des caractéristiques d'écoulement en contexte incertain, fondée sur l'utilisation de scénarios. Sur le principe, une telle approche nécessite tout d'abord une « mise à plat » de l'ensemble des modèles existants (y compris modèles empiriques, statistiques, etc.) relatifs à la formation des laves torrentielle, à leur propagation en chenal, au phénomène de débordement (Laigle & Marchi 2000), à l'étalement, à l'arrêt et à l'interaction avec des obstacles. Elle nécessite également d'assurer l'interopérabilité entre ces différents niveaux de modèles.

La faible précision avec laquelle il est possible à ce jour de quantifier les écoulement chenalisés dans un cadre de prédétermination (problème de précision des modèles et de complexité des phénomènes, abordé au chapitre 2) interdit en pratique de considérer l'ensemble des processus allant de la formation au dépôt des laves torrentielles. Nous restreignons donc le cadre des développements à suivre aux écoulements sur le cône de déjection torrentiel, lieu où très généralement se concentrent les enjeux potentiellement menacés par les laves torrentielles et où l'on peut mettre en œuvre le modèle 2D (chapitre 3). Pour utiliser ce modèle, il nous faut prédéterminer la magnitude (essentiellement le volume et le débit) des phénomènes susceptibles d'atteindre le cône, ainsi que les paramètres rhéologiques du matériau. Nous présentons ici quelques méthodes d'évaluation de ces données d'entrée, puis montrons comment ces données peuvent être combinées pour bâtir des scénarios, auxquels on peut attribuer une fréquence d'occurrence qualitative. Ces scénarios sont ensuite « propagés » par le modèle et traduits en caractéristiques d'écoulement. L'intérêt pratique de cette approche est montré sur la base d'un exemple de terrain.

Assez clairement, les développements présentés dans ce chapitre se situent à l'interface entre recherche scientifique et application opérationnelle. Ils visent d'ailleurs principalement à poser les bases d'une méthodologie dédiée à l'expertise. Pour autant, même s'ils n'ont pas encore été exploités à ce jour, des cadres formels plus scientifiques que l'approche pragmatique ici exposée, existent. Ils seront évoqués en conclusion de ce chapitre, au titre des perspectives.

4.3 Evaluation de la magnitude

4.3.1 Evaluation du volume

A ce jour, les méthodes pratiques de prédétermination du volume des laves torrentielles susceptibles d'être produites par un bassin versant et d'atteindre le cône de déjection, sont essentiellement de 3 types :

- Des méthodes globales sommaires, fondamentalement empiriques, telles que celle proposée par Marchi & d'Agostino (2004), qui fournissent une évaluation du volume en fonction de caractéristiques globales du bassin, telles que sa surface et sa pente moyenne, ainsi qu'éventuellement d'index caractérisant de façon globale la morphologie ou la géomorphologie du bassin. Ces formules, généralement établies pour une région délimitée, fournissent une grande disparité de résultats et ne précisent généralement pas la fréquence d'occurrence du volume ainsi calculé. Une synthèse de ces formules est proposée par Marchi & Brochot (2000) et Brochot et al. (2002).
- Des approches géomorphologiques telles que celle proposée par Hungr et al. (1984), qui fournit des éléments d'évaluation du volume de matériau potentiellement fourni par un chenal torrentiel, en fonction des caractéristiques géométriques et géologiques de ce dernier. On peut également citer des approches visant à caractériser la recharge sédimentaire dans un bassin versant à laves torrentielles, ainsi que son évolution (Veyrat-Charvillon 2005), des méthodes

de cartographie de la prédisposition à la production de laves torrentielles (Bonnet-Staub 2001) ou des méthodologies dédiées à la construction de scénarios en termes de volume mobilisable par un événement (Bonnet-Staub 1998, Laugier & Cojean 2001, Bardou 2002).

- Des approches statistiques, telles que celle proposée par Brochot et al. (2002), qui sur la base d'archives (y compris éléments ayant fait l'objet d'un travail d'historien), ont procédé à un ajustement de loi statistique sur les données de volume disponibles (y compris valeurs évaluées par « reconstruction » des probables caractéristiques d'événement). Cette dernière méthode présente l'avantage de mettre en relation le volume estimé avec une fréquence d'occurrence. En revanche, elle ne peut être mise en œuvre que sur la base de données suffisamment nombreuses. On ne peut donc espérer l'appliquer valablement que sur des torrents produisant fréquemment des laves torrentielles.

Un exemple d'approche combinée de ces différentes classes de méthodes est présenté par Brochot et al. (2002).

4.3.2 Evaluation du débit

Il est extrêmement complexe d'évaluer a priori la forme de l'hydrogramme pouvant être utilisé comme donnée d'entrée pour un modèle de propagation, de telle sorte qu'une hypothèse simpliste de type hydrogramme de forme triangulaire est bien souvent adoptée. On considère aussi généralement que le débit de pointe est observé en tête de coulée (chapitre 1). En prédétermination, le nombre de méthodes permettant l'évaluation de ce débit de pointe est extrêmement réduit et se limite pratiquement aux formules empiriques proposées par Rickenmann (1999), à savoir :

- Pour une lave torrentielle d'apparence granulaire : $Q = 0,135.V^{0,78}$
- Pour une lave torrentielle d'apparence boueuse : $Q = 0,0225.V^{0,78}$

Où Q est le débit de pointe (m^3/s) et V est le volume de l'événement (m^3). On gardera toutefois en mémoire que ces formules empiriques, résultant d'ajustement statistiques par rapport à des observations de terrain, ne donnent qu'un ordre de grandeur du débit de pointe. En réalité, les débits observés présentent une forte dispersion, dans un rapport de l'ordre de 1 à 10. Les expressions ci-dessus ne donnent qu'une valeur moyenne du débit.

4.4 Evaluation des propriétés rhéologiques

L'un des principaux problèmes auxquels se heurte l'application pratique de modèles d'écoulements de laves torrentielles est la détermination des paramètres rhéologiques du matériau. Une prédétermination avant événement de ces caractéristiques, sur la base d'une analyse des matériaux disponibles dans un bassin versant, reste encore aujourd'hui inaccessible à cause de la trop grande variabilité des processus de formation et de la forte dépendance des propriétés rhéologiques à la teneur en eau du matériau. Les processus de formation sont souvent nombreux et complexes et ne peuvent que très difficilement être appréhendés en prédétermination. C'est pourquoi l'évaluation pratique des paramètres rhéologiques se fonde le plus souvent sur l'observation d'événements anciens : dépôts encore observables ou données d'archives lorsqu'elles sont disponibles, ce qui est rare. L'hypothèse sous-jacente est ici que les laves torrentielles susceptibles de se produire ont des propriétés comparables à celles qui ont été observées, ce qui est loin d'être toujours évident. En pratique, il semble donc préférable de considérer une certaine variabilité des propriétés rhéologiques et d'intégrer cette variabilité au raisonnement, ce qui souligne encore une fois l'intérêt d'une approche par scénarios.

4.4.1 Détermination du type de lave

Le type de lave ne peut être déterminé que sur la base d'une observation d'événements anciens et tout particulièrement de leurs dépôts. Un critère approximatif, proposé par Coussot (1992), consiste à considérer que lorsque la fraction granulométrique de taille inférieure à $40 \mu m$ représente plus de 10%

en volume de l'ensemble du matériau solide, la lave torrentielle peut être considérée du type « boueux » et dans le cas contraire, du type « granulaire ». Des critères a priori plus robustes, prenant en compte la totalité de l'étendue granulométrique ont par ailleurs été proposés par Staub-Bonnet (1998) et plus récemment par Bardou (2002) qui distingue clairement les trois types de laves torrentielles identifiés par Ancey (1999).

4.4.2 Quelques méthodes existantes d'évaluation des paramètres rhéologiques

On se concentre ici sur l'évaluation au terrain des paramètres rhéologiques des laves torrentielles à matrice boueuse. Une telle estimation ne peut en définitive porter que sur la valeur du seuil de contrainte, les valeurs des autres paramètres de la loi de Herschel-Bulkley ne pouvant être déterminées de cette manière. Dans le cas où un dépôt présente une hauteur uniforme sur une surface suffisante, le seuil de contrainte peut être évalué en utilisant l'équation (4.2) (§ 4.4.3.5). Dans les autres cas, la forme des lobes de dépôt peut être interprétée en utilisant les méthodes proposées par Coussot et al. (1995) et Coussot (1996). Enfin, lorsque des documents d'archives sont disponibles, il est possible d'avoir recours au rétro-calage de modèles d'écoulement du type du modèle 1D présenté au chapitre 2 ou du modèle 2D présenté au chapitre 3. Dans ce cas, un calage portant sur les valeurs du seuil de contrainte et de la consistance est parfois possible. Compte tenu de la variabilité des paramètres rhéologiques d'un événement à l'autre, une telle détermination ne devra être considérée que comme une base de raisonnement pour l'établissement de scénarios.

4.4.3 Une contribution à la détermination des propriétés rhéologiques d'un matériau frais de lave torrentielle

Prédéterminer les caractéristiques rhéologiques d'une lave torrentielle est, sur la base des connaissances actuelles, pratiquement impossible. Au mieux, peut-on s'appuyer sur l'observation de dépôts anciens pour évaluer le seuil de contrainte du matériau de ces événements passés. En revanche une caractérisation rhéologique complète d'un matériau frais, prélevé dans les heures suivant un événement était a priori possible sans avoir été menée de façon exhaustive lorsque la présente étude a été engagée. L'objectif est ici de croiser plusieurs échelles d'investigation en mettant en œuvre des techniques rhéométriques à petite et grande échelle ainsi que des mesures de terrain. Ces différentes échelles d'étude peuvent être mises en relation avec l'étendue granulométrique du matériau sur lequel porte la mesure, les investigations à petite échelle ne pouvant porter que sur du matériau sans éléments grossiers. Tout l'enjeu de cette étude est de vérifier que l'ajout progressif de granulats au fluide interstitiel de départ ne se traduit pas par un effet de seuil et n'aboutit donc pas à un changement radical de loi de comportement. Cette étude a été menée sur du matériau de l'événement du 5 juillet 1995 sur le torrent du Moscardo (§ 2.5).

4.4.3.1 Procédure expérimentale

On laisse ici de côté le problème du front granulaire pour s'intéresser au comportement du corps de la lave torrentielle. On cherche à déduire le comportement du matériau complet à partir d'un jeu de tests rhéométriques appliqué à diverses suspensions pouvant être obtenues à partir de celui-ci. La présente approche est fondée sur l'hypothèse que le mélange constituant le matériau complet peut être obtenu en ajoutant successivement à de l'eau les fractions solides de plus en plus grossières qui le constituent. A chacun de ces ajouts, une suspension différente et de plus grossière est obtenue. On fait ici l'hypothèse qu'il doit être possible de déterminer le comportement du matériau complet par extrapolation, dès lors que le comportement des suspensions fines et intermédiaires qui le composent sera connu. Les suspensions les plus fines peuvent être étudiées à l'aide d'un rhéomètre de laboratoire et les suspensions intermédiaires à l'aide d'un rhéomètre de grande taille. Par ailleurs, le seuil de contrainte peut être étudié indépendamment à l'aide de tests au plan incliné (Coussot 1996). Enfin une analyse de la forme des dépôts au terrain permet une estimation du seuil de contrainte du matériau complet. De cette façon, la loi de comportement du matériau complet, ainsi que les valeurs des paramètres qui s'y rattachent doivent pouvoir être déduites.

4.4.3.2 Le matériau testé

Le matériau testé provient d'un dépôt de la lave torrentielle du 5 juillet 1995 sur le torrent du Rio Moscardo (commune de Paluzza, Frioul, Italie). Le bassin versant de ce torrent a une superficie de 4,1km². Les débris mobilisés par les laves torrentielles proviennent essentiellement de formations rocheuses hétérogènes très érodables du Quaternaire, constituées notamment de grès et de schistes. Ce torrent connaissant de fréquents épisodes de laves torrentielles, il a été instrumenté dès 1989 avec deux distancemètres à ultrasons, localisés au dessus du bief terminal du chenal torrentiel sur le cône de déjection (Marchi et al. 2002). 11 épisodes ont été enregistrés entre 1989 et 1995. Lors de l'événement du 5 juillet 1995, un volume important de matériau s'est déposé sur une berge du chenal. Deux échantillons de 9 litres, dont le diamètre maximal des éléments solides était d'environ 50 mm, ont été prélevés 40 heures après l'événement. On peut raisonnablement supposer que la teneur en eau du matériau avait peu changé au cours de ces 40 heures. Trois mois plus tard, environ 10 m³ de matériau ont été prélevés sur ce même dépôt afin d'entreprendre des tests rhéométriques à grande échelle. La courbe granulométrique a été établie sur la fraction [0-50 mm] par tamisage et la fraction supérieure à 50 mm dans le matériau complet a été évaluée par observation directe. Considérant que les échantillons constitués de fractions fines dérivent du matériau complet auquel on a retiré les fractions les plus grossières, la concentration volumique solide du matériau complet ($\phi_c = 81,8\%$) a pu aisément être déduite, sur la base d'une analyse des échantillons prélevés juste après l'événement. De façon générale, la concentration volumique solide (ϕ_d) d'un échantillon constitué de l'eau contenue dans le matériau complet et des particules de diamètre inférieur à d (en mm) de ce même matériau, est donnée par :

$$\phi_d = \frac{f_d \phi_c}{1 + \phi_c (f_d - 1)} \quad (4.1)$$

Où f_d représente la fraction des particules de diamètre inférieur à d , dans le matériau complet. Cette valeur est directement donnée par la courbe granulométrique. Dans notre cas, les différentes valeurs de concentration solide en volume des mélanges qui ont été testées sont données en Figure 4.1. Chacun de ces mélanges peut être considéré comme un fluide interstitiel du matériau complet.

4.4.3.3 Rhéométrie de laboratoire

Les mesures rhéométriques de laboratoire ont été menées sur les mélanges les plus fins (taille des particules inférieure à 400 μm), à l'aide d'un rhéomètre de laboratoire équipée d'une géométrie plan-plan (diamètre 5 cm, entrefer 3 mm). La méthode expérimentale de détermination de la loi de comportement est celle décrite par Coussot & Piau (1994). De façon globale, celle-ci consiste à imposer une succession de vitesses de rotation de l'appareil couvrant une large gamme de taux de cisaillement, entrecoupée de retours à une vitesse de rotation faible. Un modèle de Herschel-Bulkley est ensuite ajusté sur les données expérimentales. Le matériau étant a priori non thixotrope et des vitesses de rotations suffisamment faibles ayant été utilisées, le seuil de contrainte mesuré est très proche du seuil de contrainte réel. La loi de comportement obtenue est présentée en Figure 4.2. Les incertitudes de mesure sont ici de l'ordre de 15%.

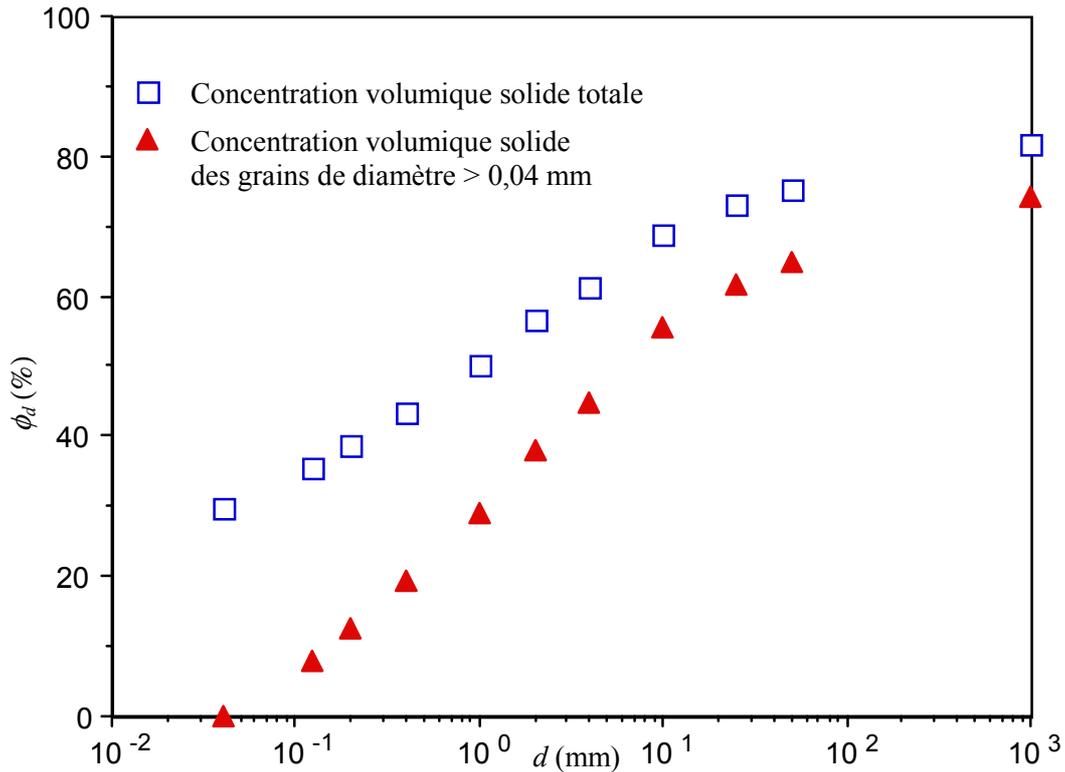


Figure 4.1 Concentration volumique solide ϕ_d des fluides interstitiels successifs obtenus par addition progressive de particules plus grossières, en fonction du diamètre maximum d des particules du mélange (particules ajoutées en proportion de leur fraction dans le matériau complet).

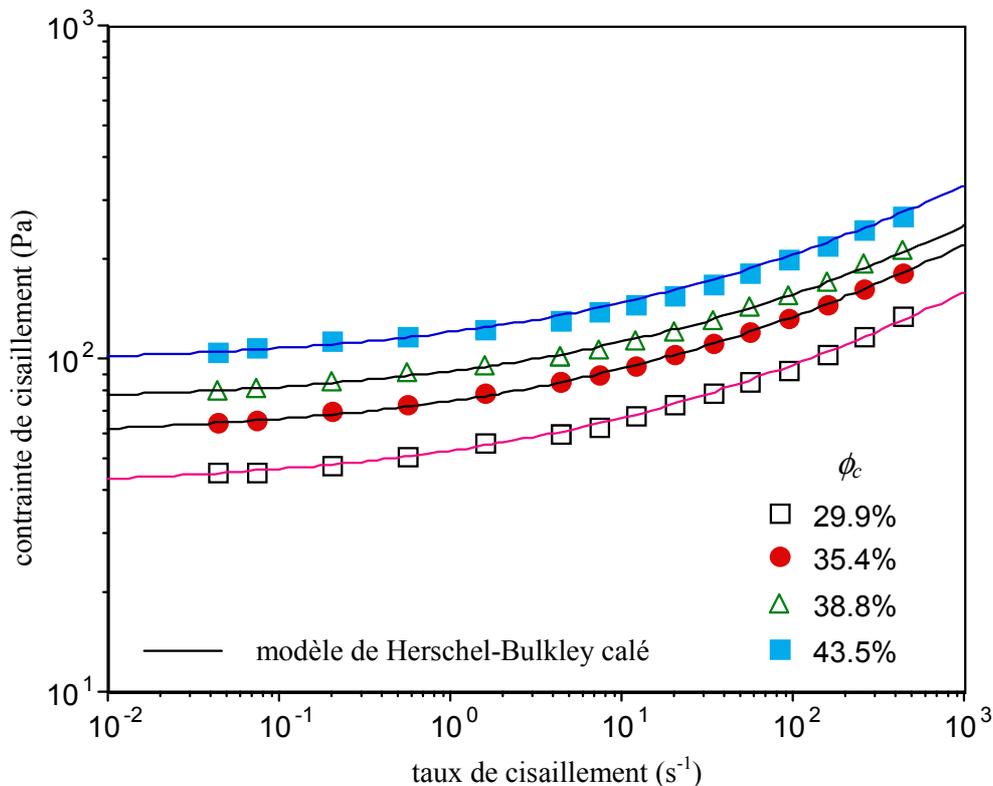


Figure 4.2 Loi de comportement pour les 4 fluides interstitiels les plus fins. Un modèle de Herschel-Bulkley avec $n = 1/3$ est ajusté aux données. Les valeurs de la consistance K sont respectivement 11,7 ; 16,2 ; 17,7 et 21,5 Pa.s^{1/3}.

4.4.3.4 Rhéométrie à grande échelle

Une suspension contenant les particules solides du matériau complet ayant un diamètre inférieur à 25 mm a été testée à l'aide du rhéomètre de grande taille présenté par Coussot & Piau (1995). Ce rhéomètre est composé de deux cylindres coaxiaux de diamètres respectifs 0,8 m et 1,2 m, le cylindre extérieur étant fixe. Il peut contenir environ 0,5 m³ de matériau. Une large gamme de vitesses de rotation est imposée au cylindre intérieur et pour chacune des vitesses, le couple correspondant est mesuré et enregistré par un système d'acquisition. Le matériau sec, contenant des particules de diamètre inférieur à 25 mm est mélangé à de l'eau dans une bétonnière afin de donner au mélange une concentration volumique solide égale au ϕ_{25} du matériau complet. Le matériau est ensuite disposé entre les deux cylindres du rhéomètre. Plusieurs vitesses de rotation croissantes sont imposées chacune pendant une minute. La même procédure est reproduite avec des vitesses de rotation décroissantes. Aucune différence significative de couple n'a été enregistrée entre les phases de vitesses croissantes et décroissantes. Les résultats de cette série de mesures sont présentés en Figure 4.3, ainsi que l'ajustement à un modèle de Herschel-Bulkley.

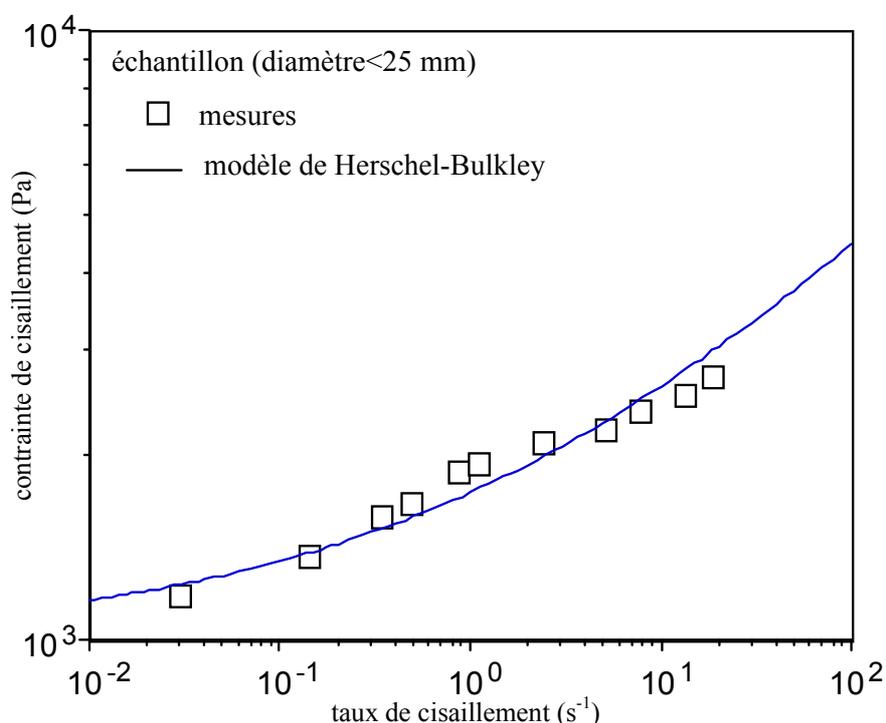


Figure 4.3 Loi d'écoulement pour le mélange intermédiaire. Mesures effectuées à l'aide du rhéomètre de grande taille. Modèle de Herschel-Bulkley ajusté avec $n = 1/3$

4.4.3.5 Détermination directe du seuil de contrainte

Le seuil de contrainte de plusieurs mélanges, contenant des particules de diamètre allant jusqu'à 50 mm, a également pu être déterminé à l'aide d'un test à la planche. En fait la technique utilisée en pratique est celle décrite par Coussot et al. (1996). Un volume fini de matériau déposé sur un plan incliné forme un lobe assez similaire à ce qui peut être observé au terrain. Lorsque le rapport entre l'épaisseur caractéristique et la longueur caractéristique du dépôt est suffisamment petite, il existe une région centrale pour laquelle l'épaisseur de dépôt asymptotique est atteinte. Le seuil de contrainte peut alors être déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$\tau_c = \rho g h_0 \sin(\theta) \quad (4.2)$$

Où τ_c est le seuil de contrainte, ρ est la masse volumique, g est la gravité, h_0 est l'épaisseur maximale du dépôt et θ est l'angle de la pente du plan incliné. Le principe de cette méthode peut également être utilisé sur un dépôt naturel de matériau complet. Le dépôt de l'événement du 5 juillet 1995 avait

approximativement 50 m de long et 10 m de large. Son épaisseur maximum, pratiquement uniforme sur une grande surface, était de 1,2 m sur une pente d'environ 10,5%. L'ensemble de ces résultats est présenté en Figure 4.4.

4.4.3.6 Evolution du seuil de contrainte pour des ajouts successifs de particules plus grossières

La Figure 4.4 montre clairement que le seuil de contrainte des différents mélanges augmente avec la concentration volumique solide, ou ce qui est équivalent dans notre cas, avec le diamètre maximum des particules ajoutées au mélange. En échelle semi-logarithmique, cette évolution est grossièrement traduite par deux segments de droites, l'évolution la plus marquée étant observée pour les concentrations solides les plus élevées. Ceci suggère que pour ces concentrations plus élevées, l'apparition de contacts inter-grains contribue à une augmentation plus rapide du seuil de contrainte. Toutefois au cours des tests effectués, cet effet n'est pas devenu prépondérant de telle sorte que le comportement d'ensemble n'a pas été fondamentalement modifié. On remarque notamment que les seuils de contrainte déterminés par extrapolation des lois de comportement des mélanges fins et intermédiaires et ceux déterminés par le test au plan incliné, tombent à peu près sur la même courbe. De plus, l'extrapolation de la courbe vers la valeur de concentration solide du matériau complet donne une valeur de seuil de contrainte compatible avec la valeur estimée directement à partir de l'épaisseur du dépôt naturel. Ceci prouve la robustesse de la présente approche.

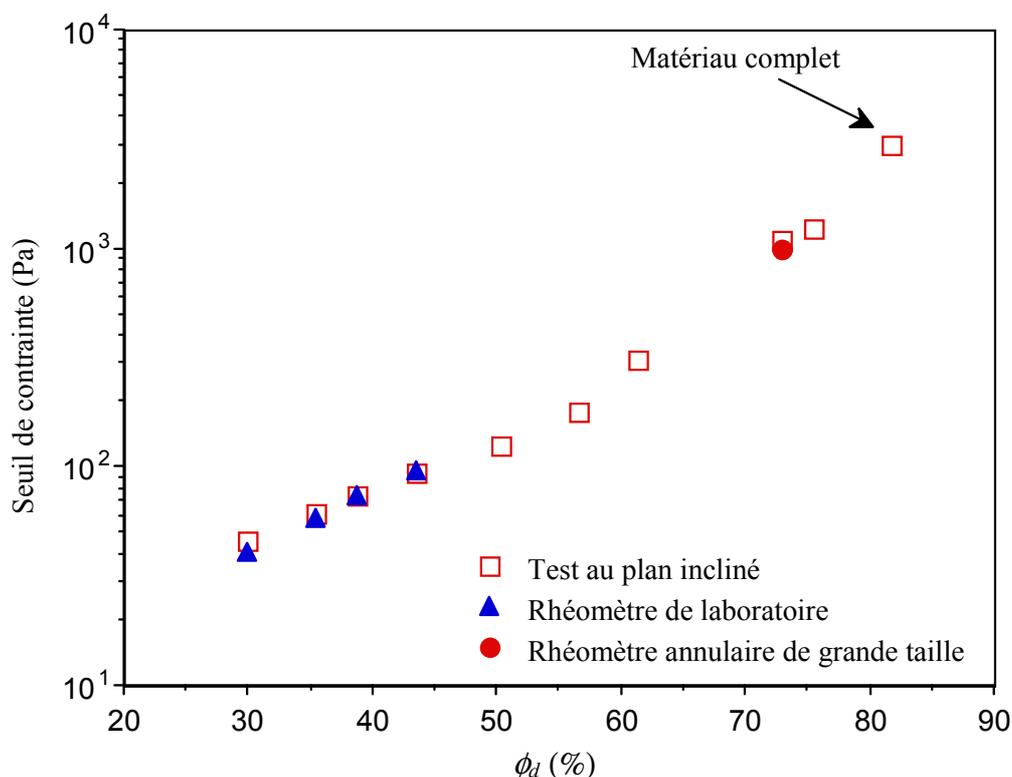


Figure 4.4 Evolution de la contrainte seuil du matériau reconstitué, en fonction de sa concentration volumique solide (ϕ_d) variant par additions successives d'éléments solides de plus en plus grossiers. Application de différentes techniques rhéométriques en fonction de l'échelle.

4.4.3.7 Loi de comportement du matériau naturel complet

Le comportement des mélanges fins peut être traduit par un modèle de Herschel-Bulkley pour une large gamme de taux de cisaillement couvrant 4 ordres de grandeur, ceci avec une incertitude d'environ 25% (Figure 4.2). Aucun rhéomètre ne permet de déterminer directement le type de comportement d'un matériau complet de lave torrentielle. Néanmoins, on note d'une part que l'évolution du seuil de contrainte en fonction de la concentration solide est cohérente entre les

différentes échelles d'investigation. On note également que pour le paramètre exposant n de la loi de Herschel-Bulkley, une valeur constante et égale à $1/3$ permet un ajustement satisfaisant de la loi pour tous les mélanges fins, ainsi que pour le mélange intermédiaire. Enfin on note que pour la consistance K , son évolution en fonction de la concentration solide est assez parallèle à celle observée pour τ_c , là aussi pour les différents mélanges fins et intermédiaire. Cet ensemble de remarques amène à penser qu'aucun phénomène nouveau, à l'origine du comportement du matériau, n'apparaît entre le matériau intermédiaire et le matériau complet, car un tel phénomène aurait probablement influencé l'évolution du seuil de contrainte. Il est donc suggéré ici que le matériau complet présente un comportement similaire à celui du matériau intermédiaire. On conclut donc que le comportement du matériau du dépôt de lave torrentielle du 5 juillet 1995 sur le Rio Moscardo, peut être représenté par une loi de Herschel-Bulkley avec un seuil de contrainte $\tau_c = 2935$ Pa, une consistance $K = 2190$ Pa.s^{1/3} et un exposant $n = 1/3$.

Cette méthode est bien sûr d'un emploi délicat et ne saurait être utilisée de façon systématique, d'autant plus que la teneur en eau et donc la concentration solide d'un matériau de lave torrentielle ne peut être connue par analyse de son dépôt s'il est ancien. En revanche, cette étude vient légitimer l'emploi du modèle de Herschel-Bulkley, y compris pour des matériaux de très forte concentration, dès lors que la granulométrie inclut une proportion suffisante d'éléments fins de type argileux.

4.5 Un cas de déclenchement caractérisé de façon déterministe

4.5.1 Analyse des conditions de formation d'une coulée de boue au front d'un glissement de terrain

Dans une grande majorité des cas, prédéterminer le volume d'une lave torrentielle et a fortiori ses caractéristiques d'écoulement ainsi que son emprise, sur la base d'une hypothèse de pluviométrie, est inaccessible, en l'état actuel des connaissances. Ceci à cause de la grande complexité des processus de formation. En revanche, dans le cas de laves torrentielles déclenchées par la liquéfaction du matériau d'un glissement de terrain bien instrumenté une démarche purement prédictive pouvait être envisagée. C'est pour mettre en évidence cette possibilité qu'a été initiée la présente étude portant sur le glissement de terrain de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence). Ce glissement fait l'objet d'une étude détaillée depuis plusieurs années par l'Observatoire des Sciences de la terre, Institut de Physique du Globe de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg (Malet et al. 2004). Au printemps de 1999, deux coulées de boue d'un volume égal à 2500 m³ et 7700 m³ se sont formées au front du glissement et ont parcouru respectivement des distances d'environ 100 m et 600 m dans le chenal situé en contrebas du glissement. Ces deux événements ont fait l'objet d'une étude détaillée des conditions météorologiques et hydrogéologiques les ayant provoqués. Le matériau du glissement étant bien caractérisé ainsi que les circulations d'eau, une analyse de stabilité du front du glissement a été menée et a prédéterminé de façon indépendante un volume instable tout à fait cohérent avec le volume effectivement libéré pour chacun des deux événements. Des mesures rhéométriques ont été effectuées sur du matériau du glissement humidifié à la teneur en eau correspondant à la limite de stabilité du front de glissement. Une loi de comportement de type Herschel-Bulkley a été mise en évidence et les valeurs des paramètres du matériau établies.

4.5.2 Mise en œuvre des modèles de propagation

Le processus de déclenchement et donc le volume de matériau, ainsi que les valeurs des paramètres rhéologiques étant connus, nous disposons de toutes les informations nécessaires à la mise en œuvre du modèle 1D présenté au chapitre 2, pour calculer la propagation de la coulée boueuse (peu d'éléments grossiers et donc pratiquement pas de front granulaire dans ce cas). Une confrontation entre simulations et observations de terrain a ainsi pu être menée (Malet et al. 2005). En termes d'épaisseurs de dépôt, pour les deux événements simulés, l'erreur relative est de +27,8% et +16,6%. En termes de distance parcourue, l'erreur relative est de -13% et +10,2%. Sur ce dernier critère les simulations montrent une très bonne concordance avec les coulées réelles observées surtout si l'on

songe aux fortes incertitudes inhérentes à la détermination des valeurs des paramètres rhéologiques (cf. discussions des chapitres 2 et 3). Ceci prouve la bonne capacité du modèle à prédéterminer les caractéristiques des écoulements, dès lors que ses paramètres d'entrée sont déterminés de façon précise et que l'hypothèse « coulée de boue » (absence d'élément grossier, matériau suffisamment homogène) est respectée.

Cette méthodologie a ensuite été utilisée en prédétermination pour établir qu'une précipitation de période de retour 5 ans était susceptible de générer des coulées de boue de l'ordre de 5000 m³ et que des précipitations de période de retour 25 ans étaient susceptibles de générer des coulées de boue de 30 000 à 50 000 m³, pouvant atteindre le cône de déjection situé en contrebas et sur lequel sont implantées des infrastructures humaines. Cette zone du cône de déjection a fait l'objet de simulations à l'aide du modèle 2D présenté au chapitre 3, afin de déterminer les zones potentiellement atteintes par les coulées.

4.6 Un exemple de mise en œuvre : le torrent du Rioulong

4.6.1 Contexte de l'étude

La présente étude fait suite à un diagnostic préliminaire réalisé par le service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM), qui sur la base d'une analyse du profil en long du torrent, de l'hydrologie et des processus érosifs à l'œuvre dans le bassin versant, a conclu que la probabilité d'occurrence de laves torrentielles, sur le torrent du Rioulong, ne pouvait être négligée. Par ailleurs, les enjeux présents sur le cône de déjection sont des habitations, un terrain de camping et une route. Dans ce contexte, le service RTM a souhaité que soit menée une étude visant à appréhender les conséquences potentielles de l'occurrence d'une lave torrentielle sur ce cône de déjection. Disposant d'assez peu d'éléments quant à l'intensité des phénomènes potentiels et aux caractéristiques mécaniques des matériaux pouvant s'écouler sous forme de laves torrentielles, la présente étude est menée de façon paramétrique. C'est à dire qu'elle analyse les conséquences possibles, notamment en terme d'extension sur le cône de déjection, de laves torrentielles qui répondent à des hypothèses précises et qu'en tout état de cause on peut considérer comme vraisemblables. La simulation des conséquences de chacun des scénarios retenus est effectuée grâce au modèle 2D (chapitre 3).

4.6.2 Construction des scénarios

La topographie du cône de déjection étant connue, grâce à un levé effectué spécifiquement, la mise en œuvre du modèle 2D requiert deux types de données d'entrée qui sont d'une part, l'hydrogramme de lave torrentielle à l'apex du cône de déjection et d'autre part, les paramètres rhéologiques du matériau en écoulement.

4.6.2.1 Hydrogramme d'entrée

L'hydrogramme d'entrée fixe le débit de lave torrentielle arrivant sur le cône de déjection en fonction du temps. Ne disposant d'aucune donnée sur la forme de cet hydrogramme, nous avons fait l'hypothèse d'une évolution linéaire du débit qui varie depuis sa valeur en pointe à l'instant $t = 0$ du calcul jusqu'à une valeur nulle au bout d'un certain temps t_f . La donnée du débit de pointe et du volume fixe la durée t_f de la coulée. Quatre hypothèses de volume (qualifiées en probabilité d'occurrence) ont été étudiées : 5 000 m³ (probabilité forte), 10 000 m³ (probabilité moyenne) 15 000 m³ (probabilité faible) et 25 000 m³ (probabilité exceptionnelle). Trois hypothèses de débit de pointe (qualifiées en probabilité d'occurrence) ont été étudiées : 30 m³/s (probabilité moyenne), 100 m³/s (probabilité faible) et 180 m³/s (probabilité exceptionnelle). Ces différentes valeurs ont été établies par le service RTM. Cet hydrogramme est « injecté » au niveau du chenal du Rioulong en amont du cône de déjection et en limite du domaine de calcul considéré (Figure 4.5).

4.6.2.2 Paramètres rhéologiques

Nous faisons ici l'hypothèse que les laves torrentielles du torrent du Rioulong peuvent être classées dans la catégorie des laves torrentielles à matrice boueuse dont la loi de comportement est du type Herschel-Bulkley. Cette hypothèse se fonde sur les observations effectuées sur le terrain et notamment le fait que les matériaux présents sur les versants et à proximité du chenal torrentiel contiennent de toute évidence une proportion importante d'éléments fins de type argile. Le comportement mécanique de ce type de matériau d'apparence boueuse et répondant à une loi de Herschel-Bulkley est traduit par la donnée de deux paramètres : le rapport seuil de contrainte sur masse volumique τ_c/ρ (m^2/s^2) et le rapport consistance sur contrainte seuil K/τ_c ($\text{s}^{1/3}$). Ne disposant d'aucun moyen de mesurer les valeurs de ces paramètres pour les laves torrentielles du Rioulong (ceci n'est généralement possible que sur du matériau d'une lave torrentielle très récente), nous avons fait les hypothèses suivantes : la valeur du rapport K/τ_c est fixée à $0,3 \text{ s}^{1/3}$ conformément à la valeur moyenne préconisée par Coussot (1996), la valeur du rapport τ_c/ρ est traitée de façon paramétrique. Pour ce dernier paramètre, nous avons retenu trois valeurs pour les simulations :

- une valeur moyenne $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Considérant, sur la base de notre expérience, qu'une valeur de cet ordre de grandeur est fréquemment rencontrée sur de nombreux torrents, sa probabilité d'occurrence est supposée forte. De plus, l'interprétation de traces de dépôts anciens est venue confirmer cette hypothèse.
- une valeur forte $\tau_c/\rho = 2,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$, dont la probabilité d'occurrence est plus faible, mais qu'il est intéressant d'étudier dans le cadre de la présente approche paramétrique car elle conduit à des hauteurs d'écoulement et de dépôt élevées (considérées ici comme les hauteurs maximales plausibles pour un débit et un volume donnés).
- une valeur faible $\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$, dont la probabilité d'occurrence est assez faible, mais qu'il est intéressant d'étudier dans le cadre de la présente approche paramétrique car elle conduit à des vitesses et des extensions des coulées élevées (considérées ici comme les vitesses et extensions maximales plausibles pour un débit et un volume donnés).

4.6.2.3 Présentation synthétique des scénarios envisagés

Les résultats de simulation présentés ci-après correspondent à des scénarios fondés sur les hypothèses synthétisées dans le Tableau 4.1. En soi, elles ne peuvent rendre compte de tous les cas possibles d'écoulement qui sont en nombre pratiquement infini. Pour chaque cas traité, des phénomènes perturbateurs sont susceptibles de modifier sensiblement le résultat. A titre d'exemple de ces phénomènes perturbateurs, nous avons traité le cas de la formation d'un embâcle dans le chenal du torrent. Deux hypothèses d'implantation d'ouvrages de protection de type digue déviatrice sont traitées.

volume de la lave (m ³)	débit de pointe (m ³ /s)	τ_c / ρ	K / τ_c	Objectifs des simulations
10 000	100	0,5	0,3	Test de sensibilité sur la viscosité de la lave (Figures 4.5, 4.6 et 4.7)
10 000	100	1	0,3	
10 000	100	2	0,3	
10 000	30	1	0,3	Test de sensibilité sur le débit de pointe de la lave (Figures 4.8, 4.6 et 4.9)
10 000	100	1	0,3	
10 000	180	1	0,3	
5 000	100	1	0,3	Test de sensibilité sur le volume dans une optique de cartographie de l'aléa (Figures 4.10, 4.6, 4.11 et 4.12)
10 000	100	1	0,3	
15 000	100	1	0,3	
25 000	100	1	0,3	
10 000	100	0,5	0,3	Identique au cas précédent mais pour une lave plus fluide (Figures 4.5, 4.13 et 4.14)
15 000	100	0,5	0,3	
25 000	100	0,5	0,3	
10 000	100	1	0,3	Analyse d'un exemple d'obstacle « naturel », du type embâcle de moins de 9 mètres de large (Figures 4.15 et 4.16)
25 000	100	1	0,3	
10 000	100	1	0,3	Analyse de l'impact d'une digue de déviation présentant un angle d'incidence de 45° avec l'axe d'écoulement (Figures 4.17 et 4.18)
10 000	100	1	0,3	Analyse de l'impact d'une digue de déviation présentant un angle d'incidence de 15 à 20° avec l'axe d'écoulement (Figures 4.19 et 4.20)
10 000	180	0,5	0,3	Identique au cas précédent mais en privilégiant une vitesse d'écoulement élevée (Figure 4.21)
10 000	180	2	0,3	Identique au cas précédent mais en privilégiant une hauteur d'écoulement élevée (Figure 4.22)
25 000	180	1	0,3	Impact de l'ouvrage sur les zones habitées situées en rive droite et fonctionnement du dispositif en cas d'événement exceptionnel (Figure 4.23)
25 000	180	0,5	0,3	Identique au cas précédent mais pour une lave plus fluide (Figure 4.24)

Tableau 4.1 Présentation synthétique des hypothèses retenues pour les simulations

4.6.3 Influence de la valeur du seuil de contrainte

Les simulations suivantes ont pour objectif de mettre en évidence l'influence des caractéristiques rhéologiques du matériau. Elles sont effectuées en considérant un même volume de 10 000 m³ et un même débit de pointe de 100 m³/s. Les trois hypothèses retenues correspondent à une lave torrentielle « fluide » ($\tau_c / \rho = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$), « moyenne » ($\tau_c / \rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$) ou « visqueuse » ($\tau_c / \rho = 2,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$).

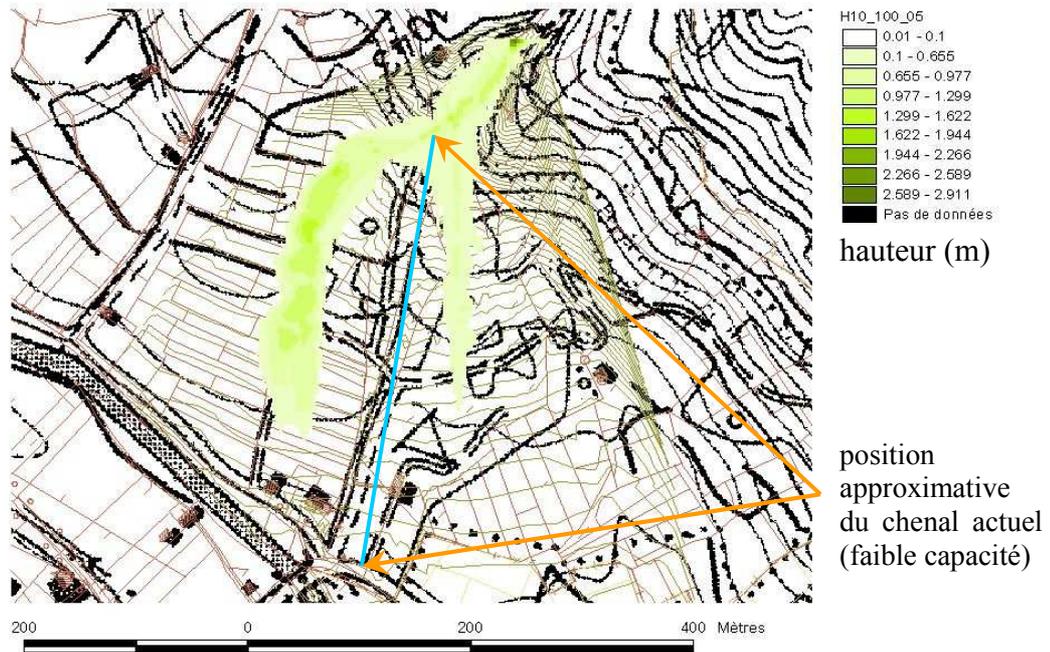


Figure 4.5 Hauteurs maximales simulées pour un volume de $10\,000\text{ m}^3$, un débit de pointe de $100\text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 0,5\text{ m}^2/\text{s}^2$.



Figure 4.6 Hauteurs maximales simulées pour un volume de $10\,000\text{ m}^3$, un débit de pointe de $100\text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0\text{ m}^2/\text{s}^2$

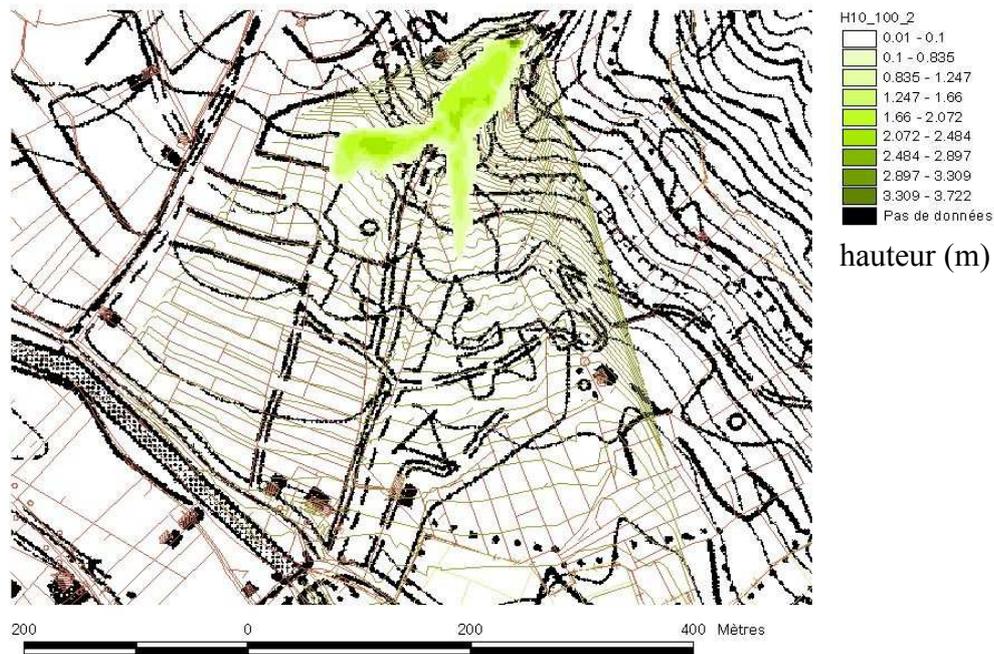


Figure 4.7 Hauteurs maximales simulées pour un volume de $10\,000\text{ m}^3$, un débit de pointe de $100\text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 2,0\text{ m}^2/\text{s}^2$

Ces simulations mettent en évidence une forte influence de la viscosité du matériau sur l'extension de la coulée. Il s'agit là d'un résultat tout à fait cohérent avec des études antérieures menées sur d'autres torrents. On note toutefois l'existence d'une tendance très marquée sur le Rioulong : le débordement latéral en tête de cône de déjection de la totalité du matériau provenant de l'amont, avec répartition entre la rive droite et la rive gauche. Cette tendance est confirmée par les simulations ultérieures.

4.6.4 Influence du débit de pointe

Les simulations suivantes ont pour objectif de mettre en évidence l'influence du débit de pointe. Elles sont effectuées en considérant un même volume de $10\,000\text{ m}^3$ et des caractéristiques rhéologiques correspondant à une viscosité moyenne ($\tau_c/\rho = 1,0\text{ m}^2/\text{s}^2$). Les trois hypothèses de débit de pointe retenues sont : $30\text{ m}^3/\text{s}$, $100\text{ m}^3/\text{s}$ et $180\text{ m}^3/\text{s}$.



Figure 4.8 Hauteurs maximales simulées pour un volume de $10\,000\text{ m}^3$, un débit de pointe de $30\text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0\text{ m}^2/\text{s}^2$

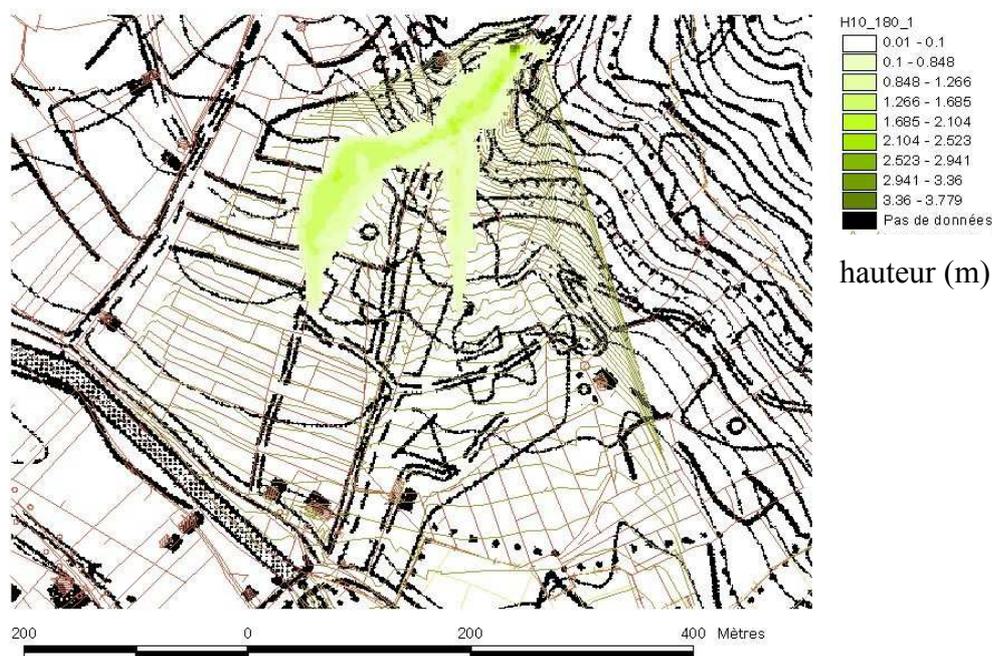


Figure 4.9 Hauteurs maximales simulées pour un volume de $10\,000\text{ m}^3$, un débit de pointe de $180\text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0\text{ m}^2/\text{s}^2$

Pour les cas de figures traités, la variation du débit de pointe influence de façon très modérée l'extension maximale des coulées. Cette variation se traduit essentiellement par des variations de la vitesse et dans une moindre mesure de la hauteur d'écoulement, principalement dans la zone chenalisée en amont du cône de déjection.

4.6.5 Influence du volume

Les simulations suivantes ont pour objectif de mettre en évidence l'influence du volume de la coulée. Elles sont effectuées en considérant un même débit de pointe de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ et des caractéristiques rhéologiques correspondant à une viscosité « moyenne » ($\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$). Les hypothèses de volume considérées sont : $5\,000 \text{ m}^3$, $10\,000 \text{ m}^3$ (Figure 4.6), $15\,000 \text{ m}^3$ et $25\,000 \text{ m}^3$.

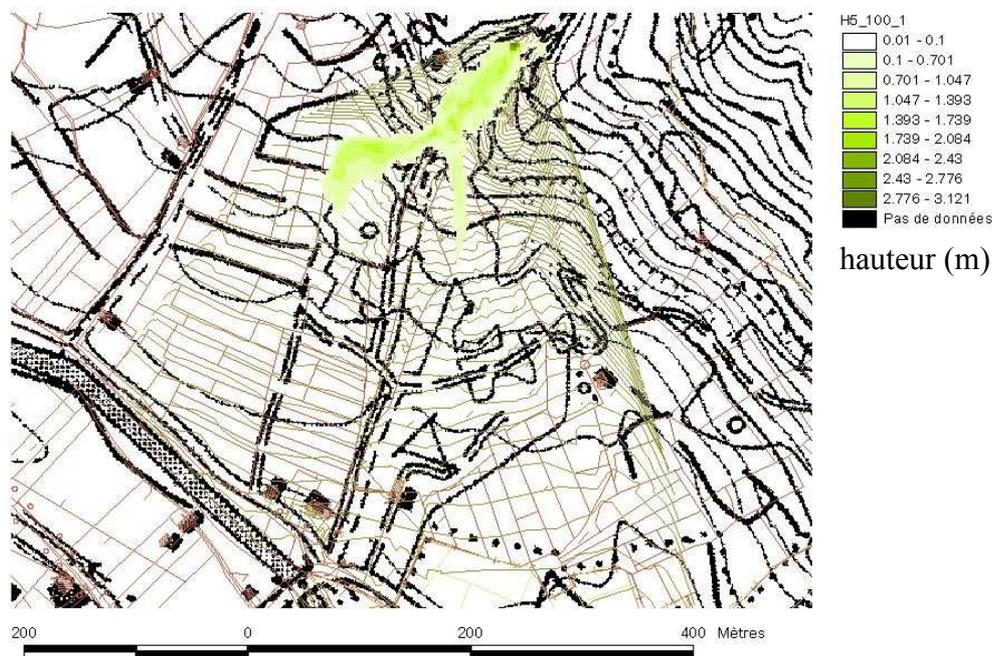


Figure 4.10 Hauteurs maximales simulées pour un volume de $5\,000 \text{ m}^3$, un débit de pointe de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$

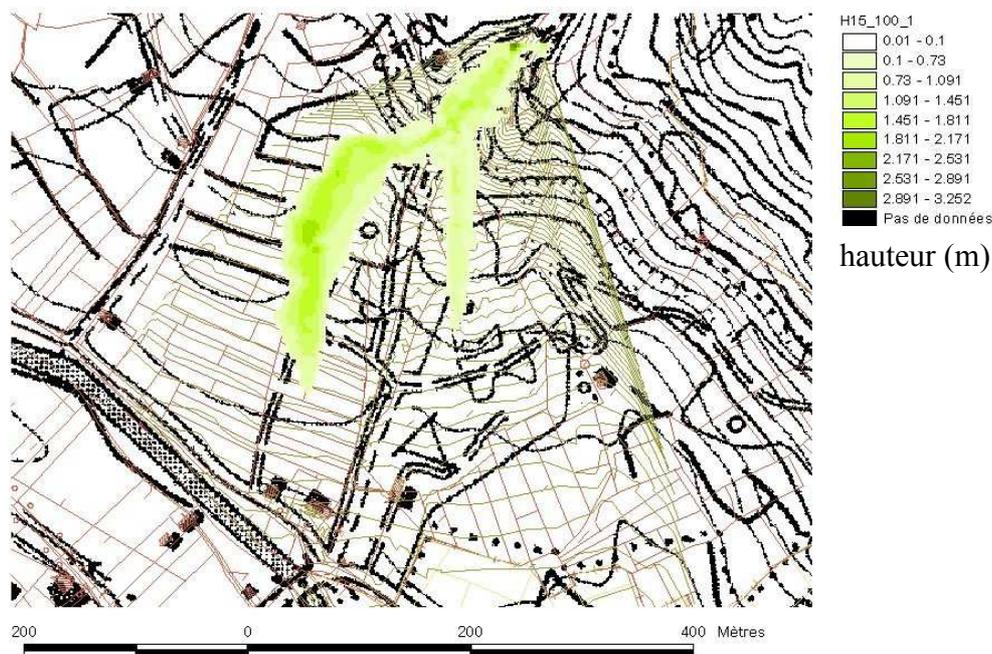


Figure 4.11 Hauteurs maximales simulées pour un volume de $15\,000 \text{ m}^3$, un débit de pointe de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$

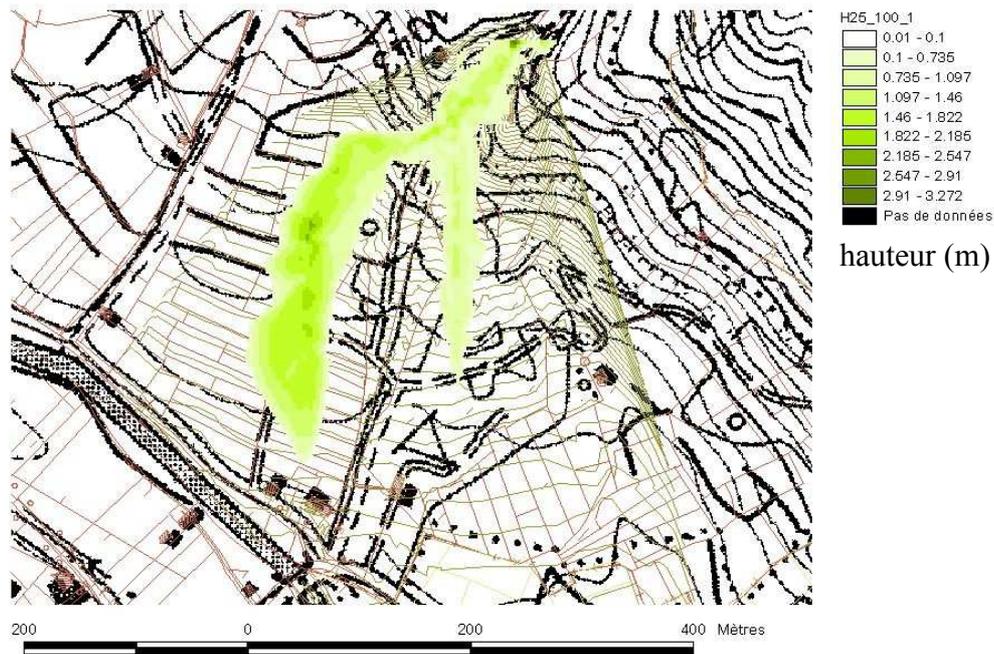


Figure 4.12 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 25 000 m³, un débit de pointe de 100 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$

Ces simulations mettent en évidence une forte influence du volume sur l'extension de la coulée. Il s'agit là d'un résultat tout à fait cohérent avec des études antérieures menées sur d'autres torrents.

4.6.6 Analyse de l'extension maximale d'une lave torrentielle « fluide » pour différentes hypothèses de volume

Les simulations suivantes ont pour objectif de mettre en évidence l'extension maximale de la coulée dans le cas défavorable d'un matériau fluide ($\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$) qui tend à s'étaler plus facilement mais qui présente des hauteurs d'écoulement et de dépôt plus faibles. Elles sont effectuées en considérant un même débit de pointe de 100 m³/s. Les volumes considérés sont de 10 000 m³ (Figure 4.5) 15 000 m³ et 25 000 m³.

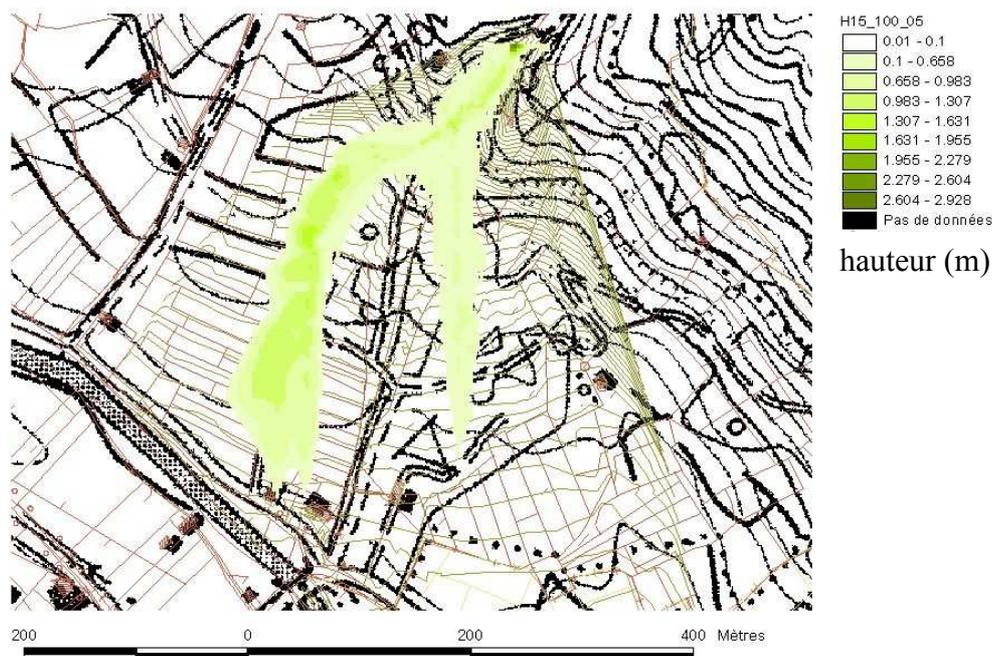


Figure 4.13 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 15 000 m³, un débit de pointe de 100 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$

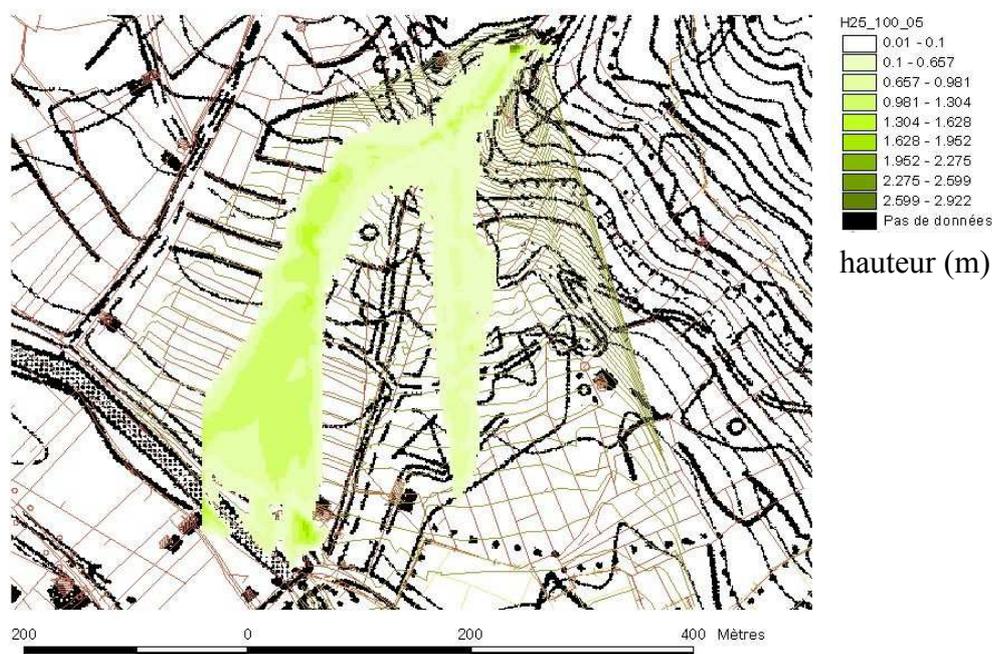


Figure 4.14 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 25 000 m³, un débit de pointe de 100 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (NB : les limites du domaine de calcul étant atteintes, les extensions de la coulée à son extrémité inférieure gauche n'ont pu être simulées correctement)

Ces simulations mettent en évidence que dans la configuration actuelle, au-delà d'un volume d'environ 15 000 à 20 000 m³ et dans l'hypothèse d'une lave torrentielle fluide, les habitations (représentées par des rectangles noirs sur les figures) situées en rive droite du Rioulong et en aval du cône de déjection sont susceptibles d'être atteintes par des laves torrentielles. Par ailleurs, comme dans tous les cas précédents, le risque en rive gauche est constamment présent.

4.6.7 En cas de formation d'un embâcle de 9 m de large obstruant le chenal

Le bassin versant étant très boisé et le chenal étant de faible capacité, il a paru judicieux d'envisager l'hypothèse d'un blocage du chenal, suite à la formation d'un embâcle. Il est impossible de traiter tous les cas de figures de formation d'un embâcle, une telle éventualité pouvant a priori se produire en n'importe quel point du chenal et avec des niveaux d'importance variables. Le cas traité ici ne doit donc être considéré que comme une illustration d'un tel phénomène. L'hypothèse d'un tel blocage est ici envisagée à l'apex du cône de déjection, au point de divergence des écoulements. Les deux cas traités correspondent à un débit de pointe de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ et à un matériau de « viscosité moyenne ». Les deux hypothèses de volume traitées sont : $10\,000 \text{ m}^3$ et $25\,000 \text{ m}^3$.

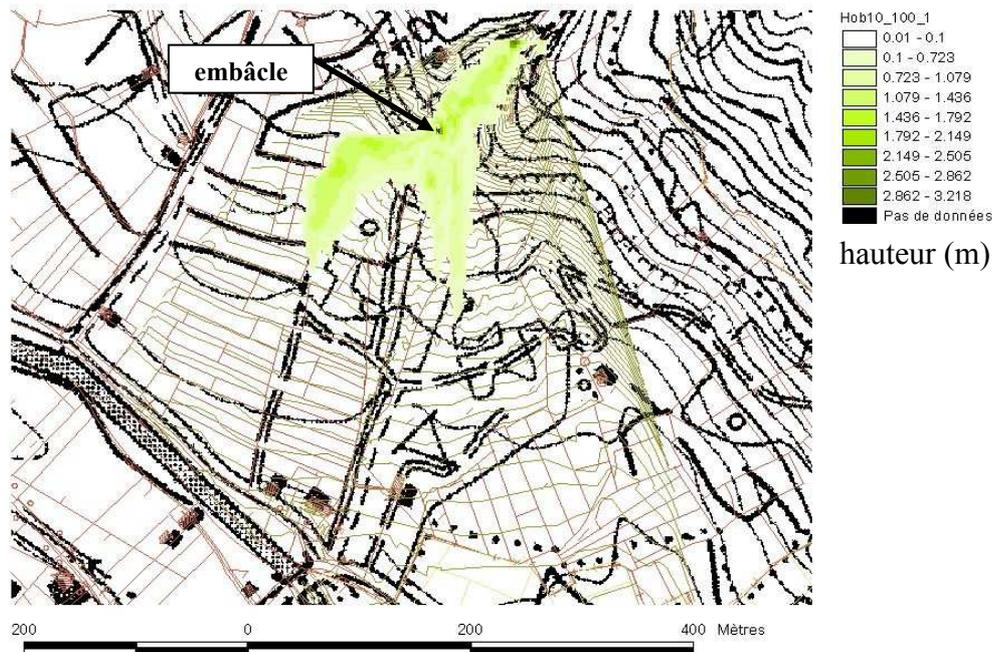


Figure 4.15 Hauteurs maximales simulées pour un volume de $10\,000 \text{ m}^3$, un débit de pointe de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de la formation préalable d'un embâcle à l'apex du cône de déjection.

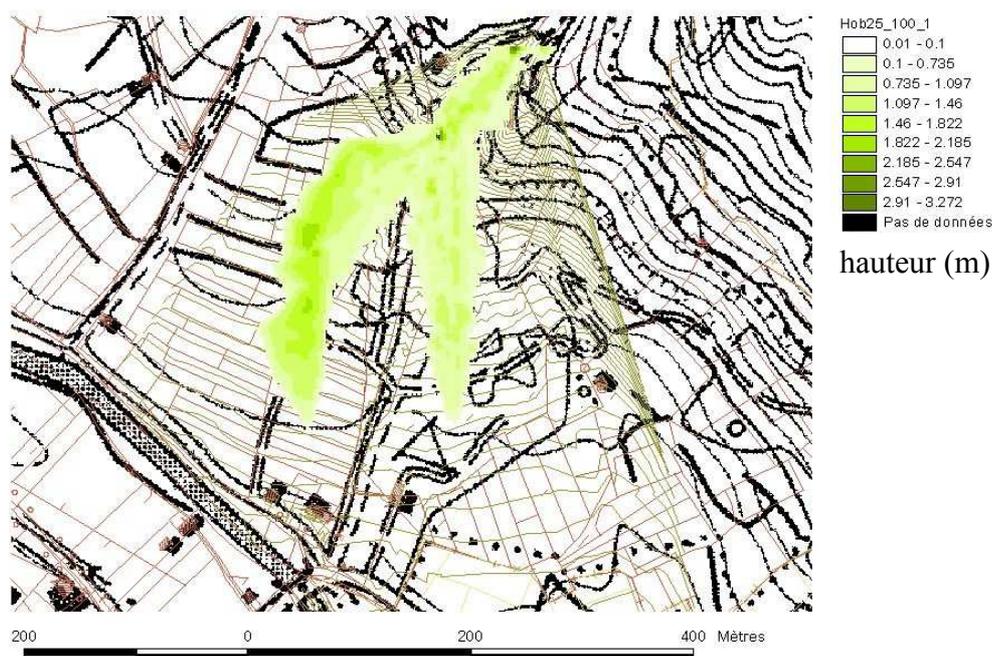


Figure 4.16 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 25 000 m³, un débit de pointe de 100 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de la formation préalable d'un embâcle

Par rapport aux cas similaires (hypothèses équivalentes) traités en l'absence d'embâcle, on observe une tendance à l'accentuation du débordement en rive gauche du chenal torrentiel, la localisation du point de débordement ne changeant pas fondamentalement. Ce cas de figure, tout à fait plausible, se traduit par une augmentation du volume de matériau dirigé vers la rive gauche du chenal torrentiel et donc une accentuation du risque dans ce secteur.

4.6.8 Comparaison de deux configurations de digues de protection contre les débordements en rive gauche

La zone de vulnérabilité la plus forte (en l'occurrence, un terrain de camping) étant située en rive gauche du cône de déjection, un aménagement de type digue déviatrice a été envisagé par le service RTM. L'objectif de cette digue, implantée au point de divergence des écoulements à l'apex du cône de déjection, est de supprimer le risque de débordement en rive gauche. Nous examinons ici deux cas de figure d'implantation d'une telle digue. Une première configuration (dénommée digue type A [Figure 4.17]) présentant un angle d'incidence d'environ 45° par rapport au chenal amont et une seconde (dénommée digue type B [Figure 4.17]) présentant un angle d'incidence d'environ 15 à 20°, sont testées. Les hypothèses retenues pour cette comparaison sont : lave de viscosité moyenne ($\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$), volume de 10 000 m³ et débit de pointe de 100 m³/s. L'objectif est ici d'établir la quelle de ces deux configurations est la plus favorable en termes d'efficacité et ensuite en termes de dimensionnement de l'ouvrage. Les digues sont ici traitées dans le modèle comme des groupes de cellules imperméables (§ 3.2.2.1.2)

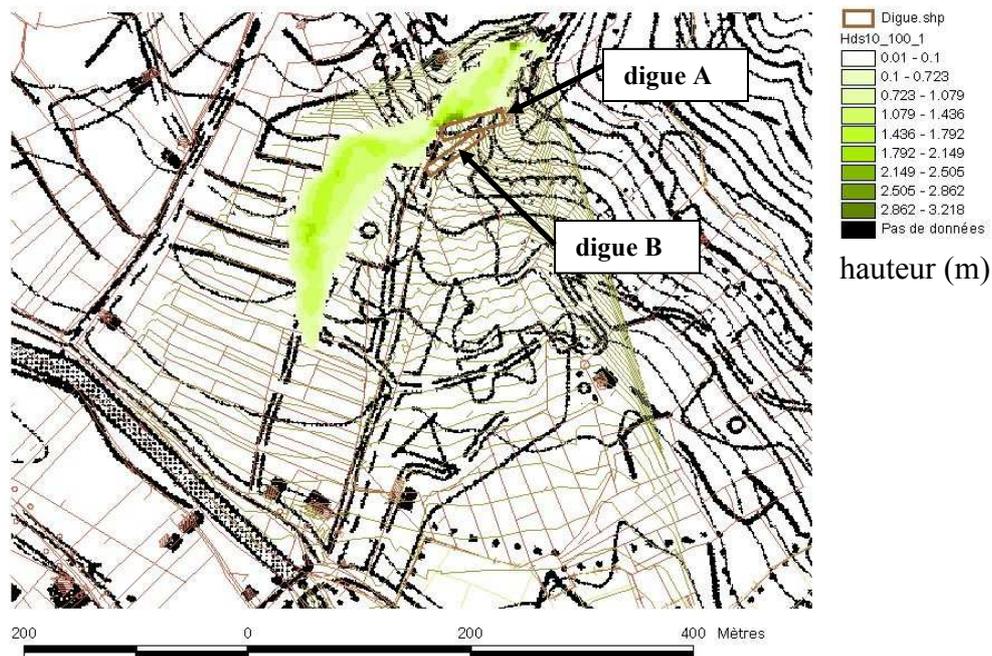


Figure 4.17 Hauteurs maximales simulées pour un volume de $10\,000\text{ m}^3$, un débit de pointe de $100\text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0\text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de l'implantation d'une digue présentant un angle d'incidence d'environ 45° par rapport au chenal amont du torrent

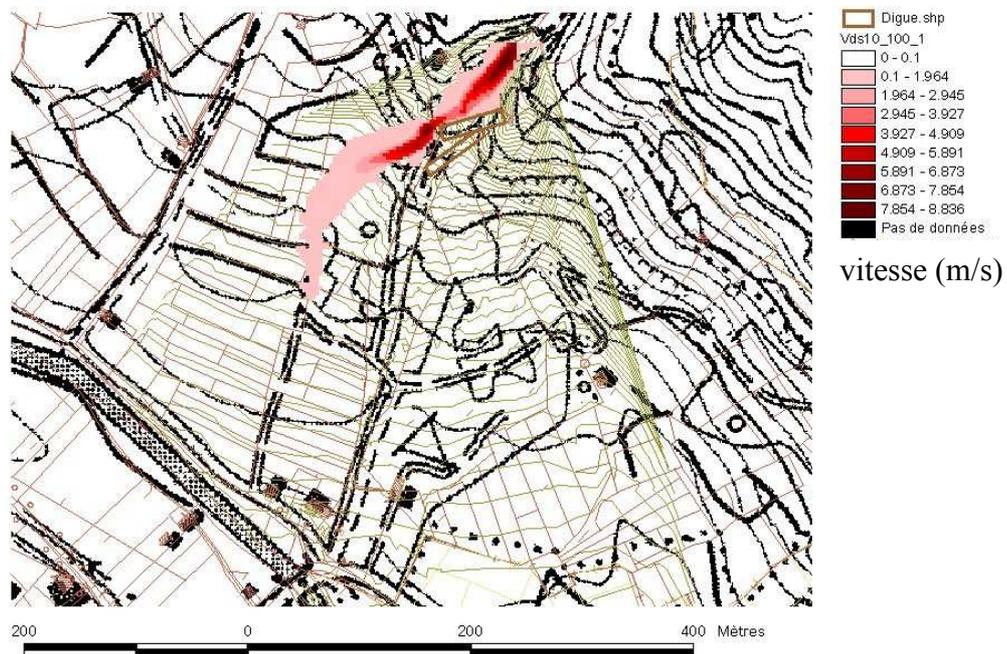


Figure 4.18 Vitesses maximales simulées pour un volume de $10\,000\text{ m}^3$, un débit de pointe de $100\text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0\text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de l'implantation d'une digue présentant un angle d'incidence d'environ 45° par rapport au chenal amont du torrent

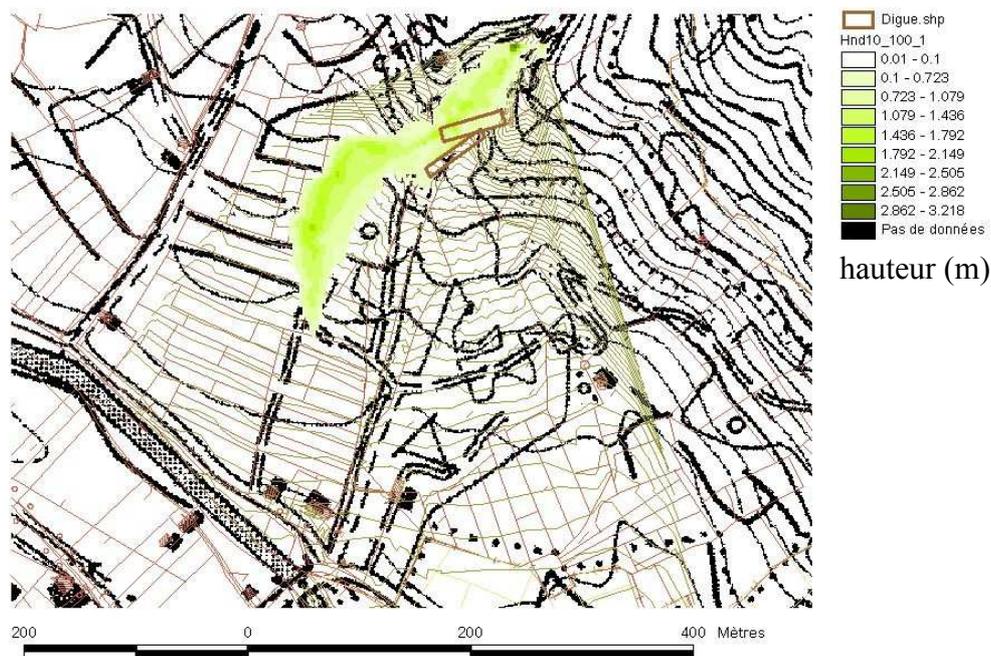


Figure 4.19 Hauteurs maximales simulées pour un volume de $10\,000\text{ m}^3$, un débit de pointe de $100\text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0\text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de l'implantation d'une digue présentant un angle d'incidence d'environ 15° par rapport au chenal amont du torrent

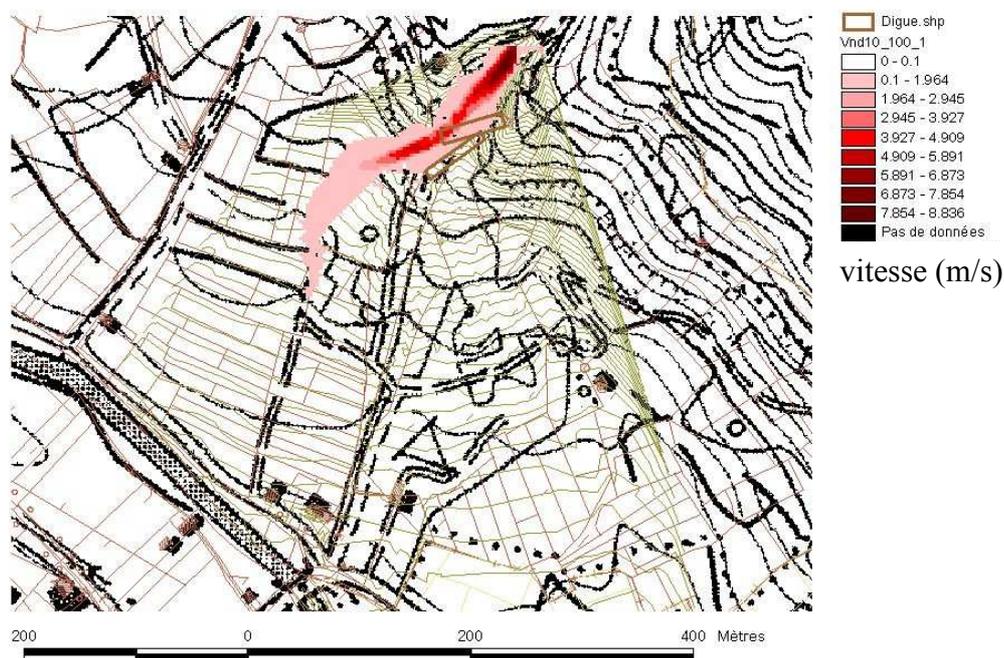


Figure 4.20 Vitesses maximales simulées pour un volume de $10\,000\text{ m}^3$, un débit de pointe de $100\text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0\text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de l'implantation d'une digue présentant un angle d'incidence d'environ 15° par rapport au chenal amont du torrent

Les simulations mettent en évidence un comportement hydraulique de la digue de type B plus favorable que celui de la digue de type A. Les hauteurs et les vitesses d'écoulement atteintes au voisinage de la digue B sont en effet inférieures à celles obtenues pour la digue A (hauteur

maximale : 2,8 m et vitesse maximale : 5,6 m/s pour la digue A et hauteur maximale : 1,5 m et vitesse maximale : 1,0 m/s pour la digue B). Ceci présente deux avantages : pour une efficacité a priori équivalente, la digue B pourra être de hauteur un peu plus faible et le risque qu'elle soit endommagée par l'impact d'un écoulement est également plus faible. De plus, l'implantation de type A entraîne un « étranglement » des écoulements au niveau du chenal à l'aval immédiat de la digue, conduisant à une accélération locale de l'écoulement (vitesse maximale atteinte ponctuellement : 8,2 m/s dans l'hypothèse considérée). L'implantation de type B ne provoque pas cet effet d'étranglement et donc d'accélération ponctuelle de l'écoulement (vitesse maximale atteinte ponctuellement : 5,3 m/s dans l'hypothèse considérée). Une implantation de type B semble donc préférable. Certains ajustements de sa disposition par rapport à celle représentée sur la Figure 4., seront discutés au paragraphe suivant.

4.6.9 Analyse des écoulements en présence d'une digue de protection contre les débordements en rive gauche

Nous retenons ici uniquement une digue de protection dans sa configuration B évoquée ci-dessus. L'objectif des simulations suivantes est double :

- analyser les écoulements au voisinage de la digue, afin de déterminer pour diverses hypothèses d'événement, les hauteurs et vitesses maximales atteintes à son contact.
- analyser les conséquences à l'aval, de la présence de cette digue.

Pour ce faire, on traite :

- un scénario prenant comme hypothèses une lave torrentielle « fluide » et un débit élevé, ce qui nous permet par simulation de tirer des informations sur la vitesse maximale plausible de l'écoulement au contact de la digue.
- un scénario prenant comme hypothèses une lave torrentielle « visqueuse » et un débit élevé, ce qui nous permet par simulation de tirer des informations sur la hauteur maximale plausible de l'écoulement au contact de la digue (élément de dimensionnement de la future digue).
- Deux scénarios prenant comme hypothèse un volume exceptionnel, un débit élevé, avec pour objectif d'analyser l'extension maximale en présence d'une digue.

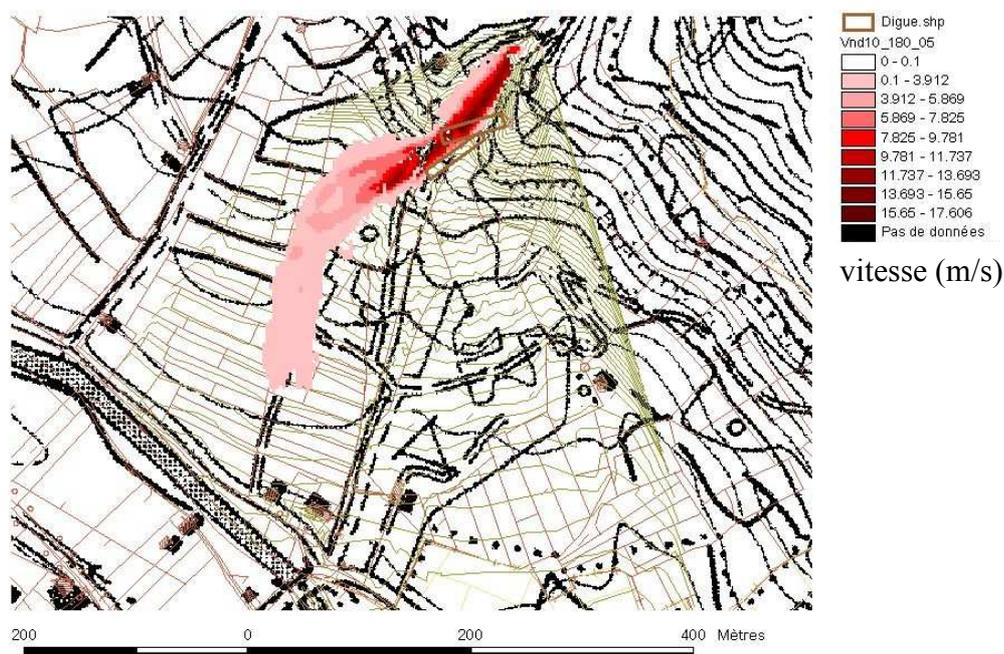


Figure 4.21 Vitesses maximales simulées pour un volume de $10\,000\text{ m}^3$, un débit de pointe de $180\text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 0,5\text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de l'implantation d'une digue présentant un angle d'incidence d'environ 15° par rapport au chenal amont du torrent

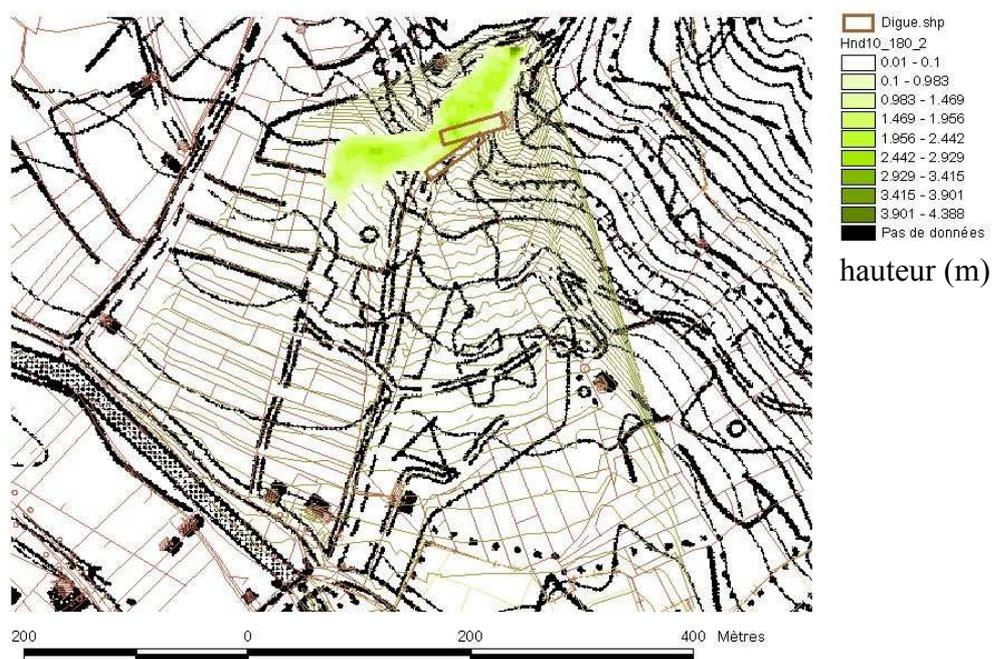


Figure 4.22 Hauteurs maximales simulées pour un volume de $10\,000\text{ m}^3$, un débit de pointe de $180\text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 2,0\text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de l'implantation d'une digue présentant un angle d'incidence d'environ 15° par rapport au chenal amont du torrent

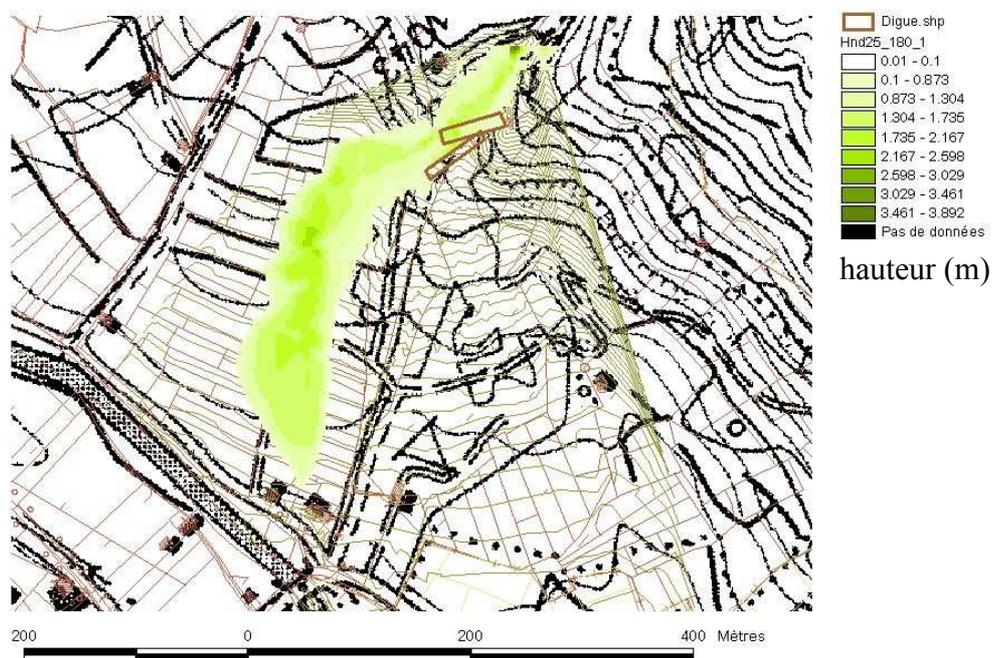


Figure 4.23 Hauteurs maximales simulées pour un volume de $25\,000\text{ m}^3$, un débit de pointe de $180\text{ m}^3/\text{s}$ et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0\text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de l'implantation d'une digue présentant un angle d'incidence d'environ 15° par rapport au chenal amont du torrent

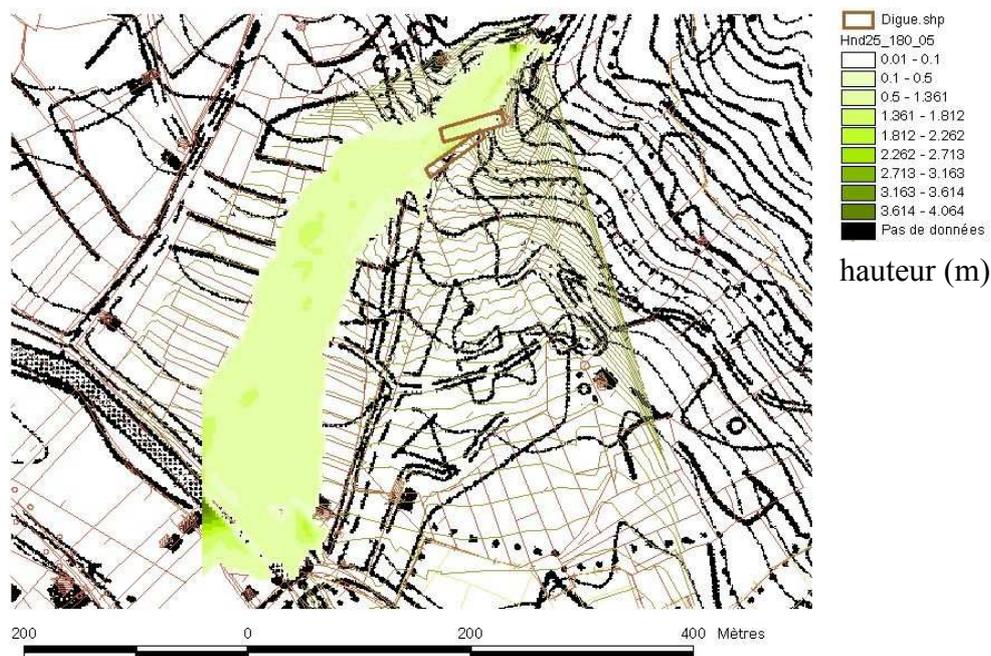


Figure 4.24 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 25 000 m³, un débit de pointe de 180 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de l'implantation d'une digue présentant un angle d'incidence d'environ 15° par rapport au chenal amont du torrent (NB : les limites du domaine de calcul étant atteintes, les extensions de la coulée à son extrémité inférieure gauche n'ont pu être simulées correctement)

Pour ce qui concerne les caractéristiques des écoulements au voisinage de la digue, le volume de la coulée a une influence très limitée. L'hypothèse envisagée la plus défavorable en termes de vitesse de la coulée fait apparaître ponctuellement des valeurs de l'ordre de 10,0 m/s et très localement 13 m/s à proximité de l'extrémité aval de la digue (hypothèse d'un débit de pointe de 180 m³/s et lave fluide de $\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$). L'hypothèse envisagée la plus défavorable en terme de hauteur maximale d'écoulement fait apparaître ponctuellement des valeurs de l'ordre de 2,5 m (hypothèse d'un débit de pointe de 180 m³/s et lave visqueuse de $\tau_c/\rho = 2,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$). Même si ces chiffres ne doivent pas être retenus sans discussion complémentaire, ils pourront néanmoins servir à orienter le dimensionnement de la digue.

La présence de la digue dirigeant la totalité du volume vers la rive droite du chenal, on assiste à une intensification des écoulements et des extensions sur cette partie du cône. Le risque sur la zone du cône de déjection située en rive droite du chenal et notamment pour les deux habitations situées à la partie aval de celle-ci, ainsi que la route, est donc un peu supérieur dans cette configuration, par rapport à l'état existant.

4.7 Bilan et perspectives

Au-delà de l'approche scientifique concernant l'évaluation des propriétés rhéologiques et de la mise en perspective des méthodes de prédétermination de la magnitude qui ont été présentées, ce chapitre a surtout été l'occasion de présenter une démarche d'ingénieur. L'intérêt opérationnel de cette démarche est indéniable, comme le prouvent les différentes expertises menées à ce jour sur cette base. Toutefois, elle manque d'un cadre formel plus scientifique, pour lequel des pistes ont déjà été évoquées en introduction de ce chapitre. Un point de blocage actuel à la mise en œuvre d'une approche stochastique, réside dans un manque de caractérisation statistique de l'occurrence des processus de formation et de propagation des laves torrentielles. Une réponse possible à ce problème pourrait être fournie par des approches bayésiennes telles que celle mise en œuvre par Eckert (2007) pour les

avalanches. Ces dernières bénéficient de bases de données très importantes qui ont rendu possible une telle approche. Il n'est malheureusement pas certain que les phénomènes torrentiels puissent bénéficier d'un tel apport en termes de quantité de données. Toutefois, compte tenu des enjeux, c'est sans doute une piste à creuser.

Sans aller forcément jusqu'à une caractérisation statistique complète, l'intérêt pratique de l'approche par scénario sera nettement renforcé lorsqu'elle pourra pleinement bénéficier des résultats des travaux en cours de J.-M. Tacnet au Cemagref. Celui-ci a engagé une réflexion de fond sur la représentation et la caractérisation de l'incertitude et sur sa prise en compte dans le cadre d'un processus décisionnel (Tacnet et al. 2005). Ce travail s'intéresse tout particulièrement aux phénomènes torrentiels. Il s'applique à fournir des outils et méthodes de construction de scénarios, de propagation des incertitudes et d'analyse de la démarche de l'expert en s'appuyant sur différents niveaux de formalisation quantitatifs et qualitatifs, qu'il s'agit de mixer.

Ces deux travaux ouvrent des perspectives scientifiques intéressantes de formalisation et d'analyse, qui devraient permettre de dépasser le niveau zéro de l'approche par scénarios, telle qu'elle a été exposée ici.

Chapitre 5

Contributions à l'étude de la vulnérabilité structurelle

5.1 La problématique des interactions écoulements obstacles

5.1.1 Contexte

Les laves torrentielles sont susceptibles de générer des dégâts aux infrastructures humaines tout particulièrement du fait des forces d'impact exercées par le front d'écoulement. De nombreuses structures de protection contre les laves torrentielles sont directement installées dans le lit des torrents (Heumader 2000, Hübl & Fiebiger 2005) et pour bon nombre d'entre elles, sont soumises à des impacts normaux. Ces structures de protection ont généralement pour fonction de réduire la dynamique des écoulements et donc les effets destructeurs qui en résultent. Elles doivent être conçues pour remplir cette fonction de façon optimale et pérenne, ce qui suppose qu'elles doivent résister aux sollicitations qui leur sont imposées. Toutefois, à ce jour, l'interaction entre laves torrentielles et structures a rarement été étudiée en détails (Armanini & Scotton 1992, Holzinger & Hübl 2005, Zanuttigh & Lamberti 2006) ; en conséquence, ces structures sont encore aujourd'hui conçues sur la base de règles empiriques résultant de l'expérience des praticiens en charge de la gestion des risques torrentiels. Dans ce contexte, les études engagées sur le thème des interactions ont deux objectifs principaux. D'une part, on cherche à caractériser l'influence de la structure sur l'écoulement et notamment à quantifier la réduction d'énergie ou de quantité de mouvement qu'elle génère. D'autre part, on cherche à caractériser les forces d'impact appliquées à la structure. Or, la résistance d'une structure soumise à un impact dépend non seulement de l'intensité maximale des contraintes qui lui sont imposées, mais également de leur répartition spatiale et de leur évolution dans le temps, qui doit être comparée au temps de réaction propre de la structure. Notre démarche s'est donc attachée à étudier les caractéristiques d'écoulement au voisinage de la structure et à les relier aux contraintes locales appliquées. D'un point de vue opérationnel, une telle étude présentait a priori un intérêt, non seulement pour la conception de structures de protection, mais également pour l'évaluation des dommages potentiellement occasionnés aux infrastructures (habitations, ouvrages d'art, etc.). Une telle évaluation de la vulnérabilité structurelle est un élément clé de toute évaluation du risque et par conséquent de bon nombre de mesures de protection non-structurelles (règles d'urbanisme, prescriptions constructives, etc.).

5.1.2 Modélisations existantes

Concernant la modélisation numérique, la grande majorité des outils actuels, dédiés aux laves torrentielles (voir quelques exemples dans Rickenmann et al. 2006) est fondée sur des approches intégrées sur la verticale, de type Saint-Venant (Iverson & Denlinger 2001). Les plus sophistiqués de ces modèles ont prouvé leur capacité à simuler de façon précise des écoulements de masses granulaires fluidisées (Denlinger & Iverson 2001) ou granulaires secs (Denlinger & Iverson 2004, Iverson et al. 2004, Patra et al. 2005) sur des surfaces topographiques complexes tridimensionnelles. De tels modèles sont a priori capables de simuler l'influence de nombreux types de structures de protection sur les écoulements. Une étude spécifique des interactions entre écoulements à surface libre de matériau granulaire et des obstacles a été menée par Gray et al. (2003), qui a établi, par comparaison à des expériences de laboratoire, que l'approche intégrée sur la hauteur permet de simuler de façon précise les écoulements au voisinage d'un obstacle tridimensionnel et en particulier de simuler des phénomènes complexes comme la formation d'ondes de choc, de zones mortes ou de zones de vide. Toutefois, l'approche intégrée sur la hauteur souffre d'une limitation majeure, seules des valeurs moyennes sur la verticale, de vitesse ou de pression, sont calculées et l'information sur leurs valeurs locales le long de la direction verticale est inaccessible. En conséquence, la distribution des contraintes sur la face amont d'une structure soumise à un impact normal ne peut être étudiée en détail avec ce type de modélisation, alors même que la connaissance des contraintes locales appliquées à la structure est un élément essentiel d'appréciation de la réaction de cette dernière. Pour cette raison, nous nous sommes orientés vers une modélisation de type champ proche, permettant une prise en compte explicite de la variation des principales grandeurs physiques dans une section en travers d'écoulement.

5.2 Objectifs

Lorsque nous avons commencé à nous intéresser à la problématique des interactions écoulements – obstacles, le constat a été fait que, dans le domaine des laves torrentielles, très peu d'études avaient été menées. La quasi-totalité de la problématique scientifique était donc à bâtir. Un traitement global du problème, dont la finalité principale est d'évaluer l'endommagement des structures soumises à impact, aurait sans doute tiré avantage d'une approche couplée mécanique des fluides – mécanique des structures. Il a toutefois paru raisonnable d'aborder le problème en restant dans le cadre de la mécanique des fluides, ce qui revenait à considérer l'obstacle comme parfaitement fixe et rigide. L'adoption de cette hypothèse se justifiait par l'intérêt, dans un premier temps, de nettement mieux caractériser les écoulements autour de l'obstacle et les sollicitations exercées sur ce dernier, en faisant abstraction de son comportement propre. Un retour sur cette hypothèse mené au § 5.5.2.

La problématique des interactions laves torrentielles – obstacles étant mal défrichée, l'intérêt d'une approche couplée, à la fois numérique et expérimentale s'est imposé à nous très rapidement. D'une part, parce que les expériences de laboratoire présentant des limitations bien connues notamment en termes de respect des critères de similitude. D'autre part, parce que la modélisation requiert une validation, extrêmement complexe en conditions de terrain, pour les phénomènes qui nous intéressent. En pratique, pour des raisons plus contextuelles que scientifiques, le premier travail de thèse mené sur le sujet (Lachamp 2003) a été essentiellement numérique et a porté sur le développement d'un code bidimensionnel vertical fondé sur la méthode SPH (smoothed particle hydrodynamics). En conséquence de quoi, le parti a été pris de faire largement porter le second travail de thèse (Tiberghien 2007) sur une approche expérimentale. A ce jour, la confrontation entre approche numérique et approche expérimentale reste à mener. Elle fait l'objet d'un projet de thèse qui sera évoqué au § 5.5.2.

5.3 Un modèle de type champ proche pour l'étude des interactions écoulements – obstacles

Les travaux présentés ici sont issus pour l'essentiel du travail de thèse de Philippe LACHAMP soutenu en décembre 2003 (Lachamp 2003).

- Directeur de thèse : Sedat Tardu, LEGI, INPG-UJF-CNRS.

- Thèse identifiée parmi les 21 thèses excellentes soutenues à l'UJF entre 2003 et 2005.
- Principales publications : Lachamp et al. 2002, Laigle et al. 2007.

5.3.1 Choix d'une méthode numérique appropriée

Afin d'aborder de façon théorique les interactions écoulements - obstacles pour les laves torrentielles (mais également pour les avalanches de neige dense), il était nécessaire de disposer d'un outil de modélisation de type champ proche, permettant une approche locale des phénomènes. Notre choix s'est porté sur la méthode SPH (Lucy 1977, Monaghan 1988). SPH est une méthode particulière de traitement des équations de la mécanique des fluides, typiquement les équations de Navier-Stokes, utilisant un formalisme Lagrangien (Monaghan 1994). Les particules mises en œuvre dans le cadre de cette méthode ne sont pas des particules physiques, elles doivent être considérées comme un moyen de discrétiser un milieu fluide continu dont les propriétés rhéologiques sont données par une viscosité apparente à valeur locale. Comme cela a été souligné par Rodriguez-Paz & Bonet (2004), d'autres méthodes que la SPH auraient pu être utilisées pour étudier les interactions lave torrentielle – structure : notamment les différences finies, les volumes finis, les éléments finis ou la méthode « particule in cell ». Toutefois, de par le fait qu'elles utilisent un maillage, ces méthodes sont coûteuses en temps, du fait de la nécessité de remailler le domaine de calcul au fur et à mesure de l'évolution temporelle de la solution. D'autres méthodes sans maillage, telles que la méthode des éléments discrets, adoptent une approche discontinue qui ne permet pas la prise en compte de lois de comportement fluides. Dans ce contexte, la méthode SPH peut être vue comme une alternative à des méthodes plus classiques, qui présente de surcroît l'avantage de résoudre de façon relativement simple les équations de la mécanique des fluides, sans présenter de problème de structure de maillage et avec la capacité à calculer directement la position de la surface libre des écoulements, y compris sur des topographies complexes.

5.3.2 Les fondements de la méthode SPH

Dans le cadre de la méthode SPH, le réseau de particules (points immatériels) s'apparente à un maillage de l'espace se déformant à tout instant. Une spécificité cette méthode est de résoudre les équations de la mécanique des fluides compressibles, y compris pour des fluides très faiblement compressibles. La pression locale est ainsi calculée par l'intermédiaire d'une loi d'état en fonction de la densité locale des particules. Afin de fermer le système d'équations, le tenseur des contraintes locales est calculé à partir du tenseur taux de déformation local et d'une viscosité apparente locale (Piau 1996). Un grand nombre de lois de comportement peut ainsi être traité. Nous avons principalement considéré des rhéologies de type Bingham ou Herschel-Bulkley, qui sont adaptées à la modélisation des laves torrentielles boueuses (Johnson 1970, Coussot 1997, Pierson 2005). Mais d'autres lois rhéologies, adaptées aux écoulements granulaires, ont été testées avec succès par Lachamp et al. (2002), qui utilisent des approches similaires à celle proposée par Jop et al. (2006), ou Rodriguez-Paz & Bonet (2004). Après un traitement approprié des interactions entre l'écoulement et le fond du chenal (Monaghan 1989), SPH est en mesure de simuler des écoulements très transitoires à surface libre de fluides complexes dans des géométries complexes.

5.3.3 Traitement des équations du mouvement

Les équations du mouvement sont fondées sur les lois classiques de conservation, interpolées sur une structure de maillage, elle-même fondée sur la position des particules. Le maillage, initialement organisé, devient rapidement désorganisé. L'interpolation est fondée sur une classique technique de quadrature utilisant une fonction de coupure dont une formulation classiquement utilisée est donnée par :

$$W(s) = \frac{C}{h^\lambda} \begin{cases} 1 - \frac{3s^2}{2} + \frac{3s^3}{4}, & 0 \leq s \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-s)^3, & 1 \leq s \leq 2 \\ 0, & s \geq 2 \end{cases} \quad (5.1)$$

où $s = \frac{|r|}{h}$ ($r = \|\vec{r}\|$ est la distance entre deux particules et h dépend du pas d'espace initial Δx (en 2D, $h \cong 1.2\Delta x$), λ est la dimension de l'espace, et C prend les valeurs $\frac{2}{3}$, $\frac{10}{7\pi}$, $\frac{1}{\pi}$, respectivement pour $\lambda = 1, 2$, et 3 . Ce polynôme fournit un support compact à la fonction de coupure W .

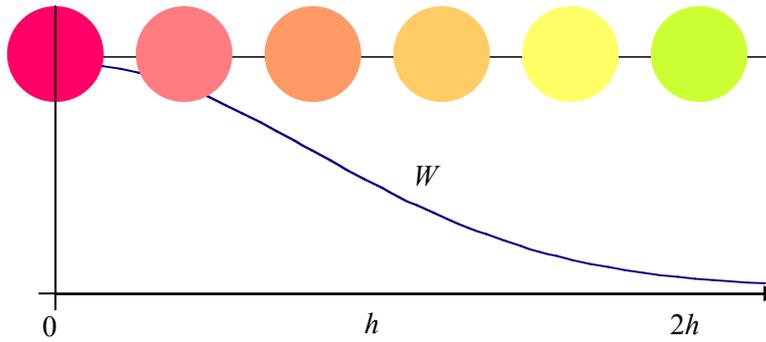


Figure 5.1 Fonction de coupure W , illustration de l'intensité de l'interaction entre la particule considérée (à gauche) et ses voisines en fonction de leurs distances respectives.

Considérons l'équation de conservation de la quantité de mouvement pour les fluides incompressibles :

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \underline{\underline{\sigma}} \right) + \vec{F} \quad (5.2)$$

et l'équation de conservation de la masse pour les fluides compressibles :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho \vec{u}) \quad (5.3)$$

Pour les écoulements à surface libre, le terme source \vec{F} se réduit à la gravité \vec{g} . \vec{u} est le vecteur vitesse et $\underline{\underline{\sigma}}$ est le tenseur de Cauchy.

Dans le formalisme SPH, l'équation de conservation de la quantité de mouvement s'exprime par :

$$\frac{d u_\alpha^i}{dt} = \sum_{\beta \in G} m_\beta \left(\frac{\sigma_{ii}^\alpha + \sigma_{ii}^\beta}{\rho_\alpha \rho_\beta} + \Pi_{\alpha\beta} \right) \frac{\partial W_{\alpha\beta}}{\partial x_i} + \sum_{\beta \in G} m_\beta \left(\frac{\sigma_{ij}^\alpha + \sigma_{ij}^\beta}{\rho_\alpha \rho_\beta} \right) \frac{\partial W_{\alpha\beta}}{\partial x_j} + g_i \quad (5.4)$$

et l'équation de conservation de la masse s'exprime par :

$$\frac{\partial \rho_\alpha}{\partial t} = \sum_{\beta \in G} m_\beta \vec{u}_{\alpha\beta} \cdot \vec{\nabla}_\alpha W_{\alpha\beta} \quad (5.5)$$

Où les indices i et j s'appliquent aux coordonnées, avec $i \neq j$. Chaque particule α (resp. β) a une masse m_α (resp. m_β), un vecteur vitesse donné par ses coordonnées u_α^i (resp. u_β^i , avec $\vec{u}_{\alpha\beta} = \vec{u}_\alpha - \vec{u}_\beta$), un tenseur des contraintes $\underline{\underline{\sigma}}(\alpha)$ (resp. $\underline{\underline{\sigma}}(\beta)$) et une masse volumique ρ_α (resp. ρ_β). Les dérivées de W en fonction des coordonnées de la particule α s'expriment par :

$$\frac{\partial W_{\alpha\beta}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} W\left(\frac{r_{\alpha\beta}}{h}\right) \quad (5.6)$$

où $r_{\alpha\beta} = \|\vec{r}_{\alpha\beta}\|$ est la distance entre deux particules α et β . $\Pi_{\alpha\beta}$ est une viscosité numérique utilisée de façon optionnelle pour certaines applications, la prise en compte d'ondes de choc par exemple (Monaghan & Gingold 1983).

$$\Pi_{\alpha\beta} = \begin{cases} \frac{-ac\mu_{\alpha\beta} + b\mu_{\alpha\beta}^2}{\rho_{\alpha\beta}^*}, & \vec{u}_{\alpha\beta} \cdot \vec{r}_{\alpha\beta} < 0 \\ 0, & \vec{u}_{\alpha\beta} \cdot \vec{r}_{\alpha\beta} \geq 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

avec :

$$\mu_{\alpha\beta} = \frac{h\vec{u}_{\alpha\beta} \cdot \vec{r}_{\alpha\beta}}{r_{\alpha\beta}^2 + \eta^2} \quad (5.8)$$

la valeur moyenne de la densité des particules α et β étant définie par :

$$\rho_{\alpha\beta}^* = \frac{m_\alpha \rho_\alpha + m_\beta \rho_\beta}{m_\alpha + m_\beta} \quad (5.9)$$

Pour le traitement d'écoulements à surface libre, on adopte $a = 0,01$, $b = 0$ et $\eta = 0,1h$ (Monaghan, 1994). c est la vitesse du son moyenne des particules α et β .

Dans le cadre de la méthode SPH, les fluides, même incompressibles, doivent être traités comme des fluides faiblement compressibles. La pression doit donc être calculée pour chaque particule en fonction de sa masse volumique. Ceci est réalisé par l'intermédiaire d'une équation d'état, qui dans notre cas s'exprime par :

$$P_\alpha = P_0 + c^2(\rho_\alpha - \rho_0) \quad (5.10)$$

Où c est la vitesse du son, P_0 et ρ_0 sont des constantes généralement prises égales respectivement à la pression et la masse volumique initiale.

On remarque tout d'abord que la relation $\frac{\partial P_\alpha}{\partial \rho_\alpha} = c^2$ est vérifiée. On remarque également que la

compressibilité et la vitesse du son sont liées par la relation $\frac{\Delta \rho_\alpha}{\rho_\alpha} = M_\alpha^2$ (M_α est le nombre de Mach

de la particule α , défini par $M_\alpha = \frac{\|\vec{u}_\alpha\|}{c}$). Par conséquent, lorsque la vitesse du son est 10 fois supérieure à la vitesse maximale d'écoulement, la compressibilité maximale est de 1%. On peut alors

définir la pression dynamique par $P_\alpha = \rho_\alpha \|\vec{u}_\alpha\|^2$ et noter qu'elle ne dépend pas de la vitesse du son, de telle sorte qu'en pratique, il est possible d'adopter une valeur de vitesse du son numérique inférieure à la valeur physique réelle pour augmenter le pas de temps et donc réduire les temps de calcul.

5.3.4 Prise en compte de la loi de comportement dans la méthode SPH

Dans le formalisme SPH, la loi de comportement est implémentée en utilisant une viscosité apparente à valeur locale qui peut notamment dépendre du taux de cisaillement local. Le tenseur de Cauchy, utilisé dans l'équation 5.4, peut être écrit sous la forme :

$$\underline{\underline{\sigma}} = -P \delta_{ij} + \underline{\underline{T}} \quad (5.11)$$

où P est la pression, δ_{ij} le symbole de Kroneker, et $\underline{\underline{T}}$ la partie déviatoire du tenseur des contraintes. Ce dernier est relié au tenseur des taux de déformation $\underline{\underline{D}}$ par la classique relation suivante :

$$\underline{\underline{T}} = 2\eta \underline{\underline{D}} \quad (5.12)$$

où η est la viscosité dynamique apparente.

On notera que ce concept de viscosité apparente locale peut être utilisé pour simuler un grand nombre de fluides. On peut en effet considérer que la viscosité dépend du taux de cisaillement local (modèle de Herschel-Bulkley, par exemple), mais également d'autres variables telles que la pression locale (modèle d'écoulements granulaires de Jop et al. [2005, 2006], par exemple). Il est d'ailleurs possible de simuler en même temps plusieurs fluides de comportements différents, comme cela a été démontré par Lachamp (2003).

5.3.4.1 Fluides de Herschel-Bulkley

Pour simuler des coulées de boue ou des laves torrentielles boueuses, on a recours au modèle rhéologique de Herschel-Bulkley (Coussot 1992, Coussot 1997, Pierson 2005). Ce modèle de Herschel-Bulkley (ou le cas particulier du modèle de Bingham) s'exprime sous forme tensorielle de la façon suivante (Piau 1996):

$$\begin{aligned} \underline{\underline{T}} &= 2\eta \underline{\underline{D}} \quad \text{si} \quad \sqrt{\frac{\text{tr} \underline{\underline{T}}^2}{2}} > \tau_c \\ \underline{\underline{D}} &= 0 \quad \text{si} \quad \sqrt{\frac{\text{tr} \underline{\underline{T}}^2}{2}} \leq \tau_c \end{aligned} \quad (5.13)$$

La viscosité apparente η s'exprime alors de la façon suivante :

$$\eta = K \sqrt{2\text{tr} \underline{\underline{D}}^2}^{(n-1)} + \frac{\tau_c}{\sqrt{2\text{tr} \underline{\underline{D}}^2}} \quad (5.14)$$

où τ_c est le seuil de contrainte, n l'exposant de la loi puissance et K est la consistance du matériau. Le modèle de Bingham est obtenu en prenant $n = 1$. Numériquement, il est nécessaire de se fixer une valeur de viscosité maximale η_{max} pour traiter le cas où le taux de cisaillement $\dot{\gamma} = \sqrt{2\text{tr} \underline{\underline{D}}^2}$ prend des valeurs très faibles.

5.3.4.2 Fluides granulaires

Les écoulements granulaires ont à ce jour fait l'objet d'un assez grand nombre d'études dont certaines étaient plus spécifiquement dédiées aux laves torrentielles granulaires (Ancey 1997, Iverson & Denlinger 2001, Iverson 2003, Iverson 2005, Zanuttigh & Lamberti 2006). Pour autant, la loi de comportement des écoulements granulaires denses est encore imparfaitement établie et fait l'objet de débats au sein de la communauté scientifique. Une première approche de traitement par la SPH d'écoulements granulaires en interaction avec des structures a été menée par Lachamp et al. (2002). Cette approche fondée sur l'hypothèse d'une loi de comportement de type Mohr-Coulomb et a donné des résultats encourageants. Elle a récemment été complétée par l'implémentation de la loi de comportement granulaire proposée par Jop & al. (2006), qui s'adapte très bien au formalisme de la SPH.

En conditions de cisaillement simple, la contrainte de cisaillement s'exprime par :

$$\tau = \mu(I)P \quad (5.15)$$

où $\mu(I)$ est un coefficient de frottement et P est la pression. Le coefficient de frottement est exprimé par :

$$\mu(I) = \mu_s + \frac{\mu_2 - \mu_s}{\left(\frac{I_0}{I} + 1\right)} \quad (5.16)$$

avec I défini par :

$$I = \frac{\dot{\gamma}d}{\sqrt{\frac{P}{\rho_s}}} \quad (5.17)$$

où $\dot{\gamma}$ est le taux de cisaillement, d est le diamètre des particules et ρ_s la masse volumique du matériau constitutif des grains. μ_2 et I_0 sont des paramètres propres au matériau.

Une généralisation tridimensionnelle de cette loi est proposée par les mêmes auteurs en se fondant sur l'hypothèse que les variations de volume au sein d'un écoulement granulaire dense restent faibles et peuvent de ce fait être négligées. Il suffit pour cela de considérer dans l'équation (5.12), une viscosité définie par :

$$\eta(\dot{\gamma}, P) = \frac{\mu(I)P}{\dot{\gamma}} \quad (5.18)$$

Cette loi de comportement fait l'hypothèse d'un écoulement granulaire portant sur une seule taille de billes et sur un fond rugueux dont la taille des rugosités est équivalente à celle des billes en mouvement. Son formalisme est très proche de celui d'une loi de type Herschel-Bulkley pour les fluides viscoplastiques avec cependant une influence additionnelle de la pression locale.

5.3.5 Conditions de bord

SPH est une méthode développée à l'origine pour aborder des problèmes d'astrophysique, donc par définition sans limites du domaine d'écoulement. Traiter de façon satisfaisante une condition de bord impose tout d'abord que les particules fluides proches de la paroi subissent une force répulsive dépendant de la distance à cette dernière (Monaghan, 1994). Pour de nombreux fluides et notamment les fluides visqueux qui nous intéressent, il est également nécessaire d'assurer une condition de non glissement à la paroi. La technique adoptée pour le traitement des conditions de paroi repose sur la construction de particules fantômes, symétriques des particules fluides par rapport à la paroi, dès lors que ces dernières sont situées à une distance inférieure à $2h$ (cf. Eq. 5.1) de la paroi. Pour assurer la condition de non glissement, la vitesse des particules fantômes est prise opposée à celle de sa particule

fluide symétrique. La pression et la viscosité des particules fantômes ont également été ajustées de façon à assurer la continue dérivabilité des profils correspondants, au passage de la paroi.

5.3.6 Confrontation à des expériences en l'absence d'obstacle

5.3.6.1 Ecoulements transitoires de fluide viscoplastique

Le code SPH a fait l'objet d'un grand nombre de confrontations à des solutions analytiques concernant diverses configurations d'écoulement pour des fluides Newtoniens ou de Bingham (Lachamp, 2003). Nous ne présenterons ici en détail que la confrontation à des écoulements transitoires de type rupture de barrage, pour des matériaux boueux. L'équipement expérimental utilisé est un canal incliné, rectangulaire, de 5 m de long et 30 cm de large. Le fluide mis en œuvre est un mélange d'eau et de kaolin. La procédure expérimentale est très similaire à celle présentée au chapitre 2 ou par Laigle & Coussot (1997). Les paramètres rhéologiques du matériau ont été établies indépendamment (mesures au rhéomètre et ajustement d'une loi de Herschel-Bulkley). Les mesures, effectuées avec une caméra vidéo, ont porté sur l'avancée de la position du front d'écoulement en fonction du temps.

Quatre expériences ont été menées dans des conditions similaires. Les variables d'étude sont présentées sur la Figure 5.2 et les résultats de confrontation sont présentés en Figure 5.3. Les simulations ont été menées en utilisant 2500 particules. L'excellente concordance observée entre simulations et mesures expérimentales portant sur la propagation du front, prouve la capacité de la SPH à simuler des écoulements fortement transitoires à surface libre de matériau boueux. Cette étape de validation était un préalable indispensable, permettant d'aborder dans de bonnes conditions les interactions écoulements – obstacles.

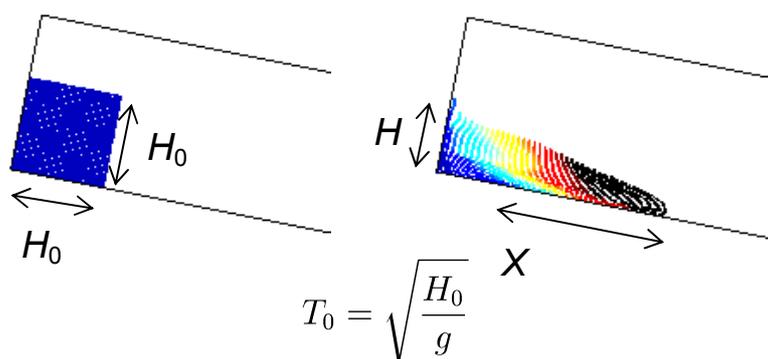


Figure 5.2 Définition des variables utilisées dans le cadre de la confrontation aux expériences de propagation de fluide boueux.

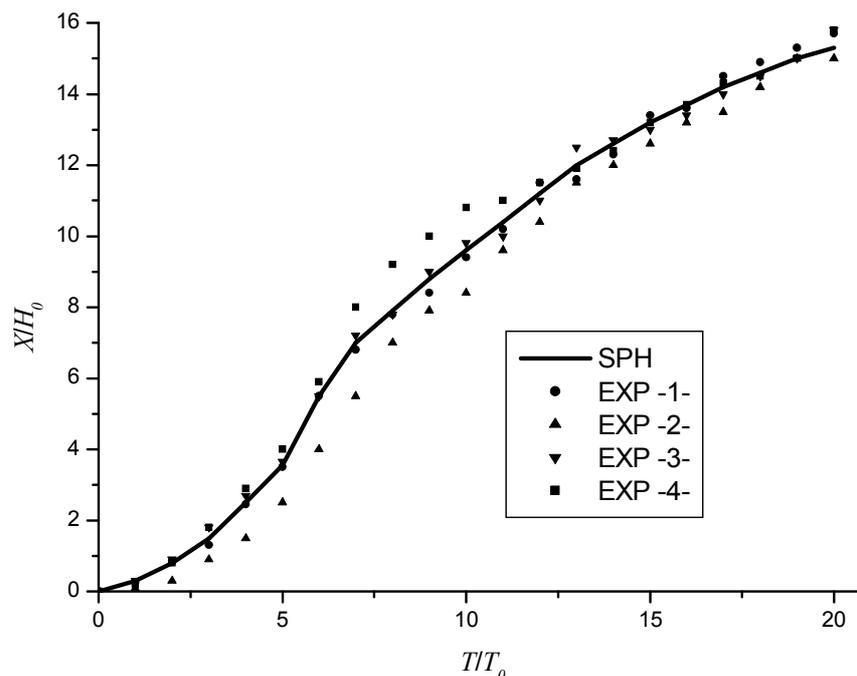


Figure 5.3 Confrontation des simulations SPH à une série d'expériences de propagation de matériau boueux. T est le temps, les autres variables (X , H_0 et T_0) sont définies en Figure 5.2.

5.3.6.2 Ecoulements granulaires

Concernant l'implémentation d'une loi granulaire dans le code SPH, un premier travail est présenté par Lachamp et al. (2002). Plus récemment, la loi d'écoulement granulaire de Jop et al. (2006) a été implémentée dans le code (Bouvarel 2007). Les simulations SPH sont ici confrontées aux solutions théoriques de la loi, qui s'appuie sur des résultats expérimentaux obtenus par Pouliquen (1999), Pouliquen & Forterre (2002) et Jop et al. (2005). Les valeurs des paramètres utilisées sont celles présentées par Jop et al. (2005, 2006), à savoir un matériau constitué de billes de verre (masse volumique de 2350 kg/m^3 environ) de diamètre $500 \mu\text{m}$, la densité du mélange est de 1637 kg/m^3 et les valeurs des paramètres sont $\mu_s = 0,38$, $\mu_2 = 0,64$ et $I_0 = 0,279$. Bouvarel (2007) a travaillé à une optimisation des paramètres numériques du code de calcul. Ce travail a porté notamment sur les conditions de lissage de la masse volumique et un choix approprié de la vitesse du son numérique, de la viscosité numérique maximum et du nombre de particules minimum, susceptibles de fournir des résultats optimaux (on notera que les temps de calcul pour chaque simulation sont de l'ordre de quelques jours). Les confrontations entre simulations et solutions théoriques sont présentées en Figure 5.4 pour le profil des vitesses, en Figure 5.5 pour le profil de pression et en Figure 5.6 pour le profil de viscosité apparente. Ces profils montrent une bonne capacité du modèle à reproduire l'allure des différents profils, avec toutefois une tendance à sous-évaluer les vitesses et la pression au fond de l'écoulement de l'ordre de 15%, ainsi qu'une assez forte dispersion des valeurs simulées de pression et de viscosité apparente. Des résultats assez similaires ont été obtenus sur les profils de coefficient de frottement $\mu(I)$ et de taux de cisaillement $\dot{\gamma}$. La forte dispersion des valeurs de viscosité apparente en surface de l'écoulement s'explique par le fait qu'à la limite, les valeurs de pression et de taux de cisaillement tendent simultanément vers 0 (d'où une indétermination de type 0 divisé par 0). Des simulations de régime transitoire ont par ailleurs été menées, mais à ce jour les résultats obtenus doivent encore être considérés comme prospectifs.

De façon globale, ces résultats encourageants ouvrent des perspectives d'utilisation de ce code dans divers domaines d'application (les avalanches de neige dense et sèche et les laves torrentielles granulaires en sont deux exemples) s'intéressant à l'écoulement de milieux granulaires. Des confrontations à d'autres types de modélisations comme la méthode des éléments discrets (Oger et al. 2005) par exemple, sont également souhaitables.

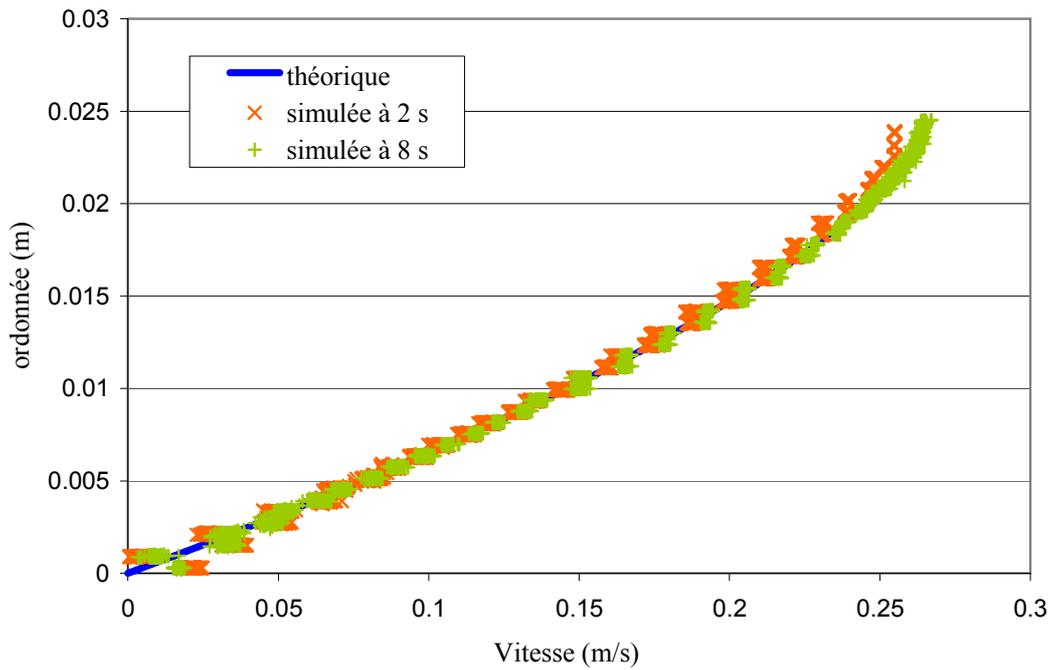


Figure 5.4 Convergence des profils de vitesse simulés vers la solution théorique pour un écoulement permanent à nombre de Froude $Fr = 0,34$ sur une pente de $22,5^\circ$

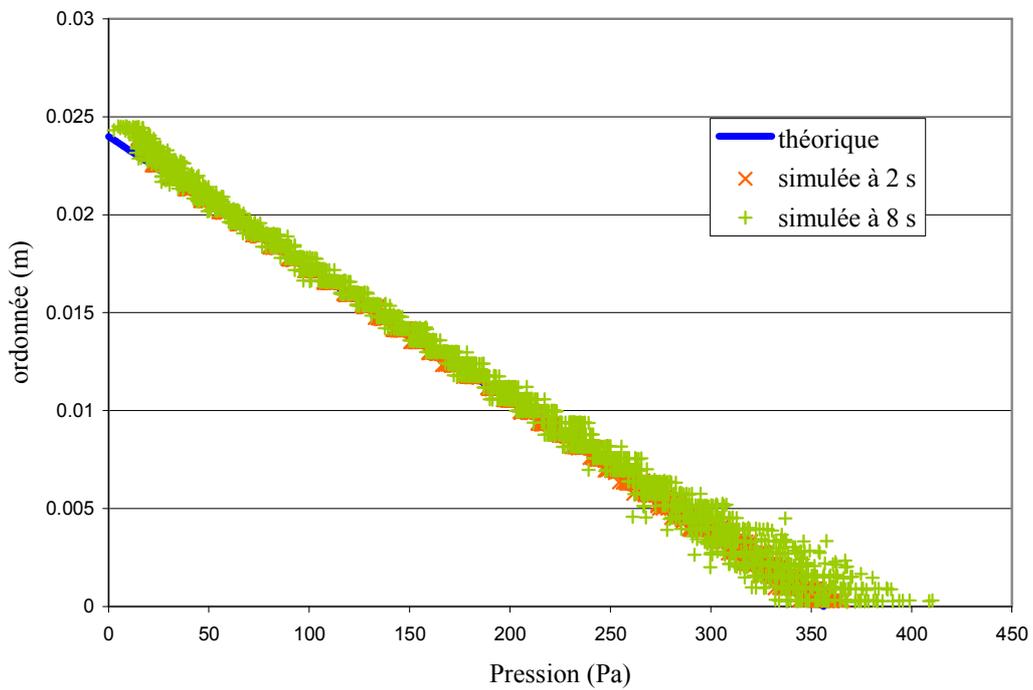


Figure 5.5 Convergence des profils de pression simulés vers la solution théorique pour un écoulement permanent à nombre de Froude $Fr = 0,34$ sur une pente de $22,5^\circ$

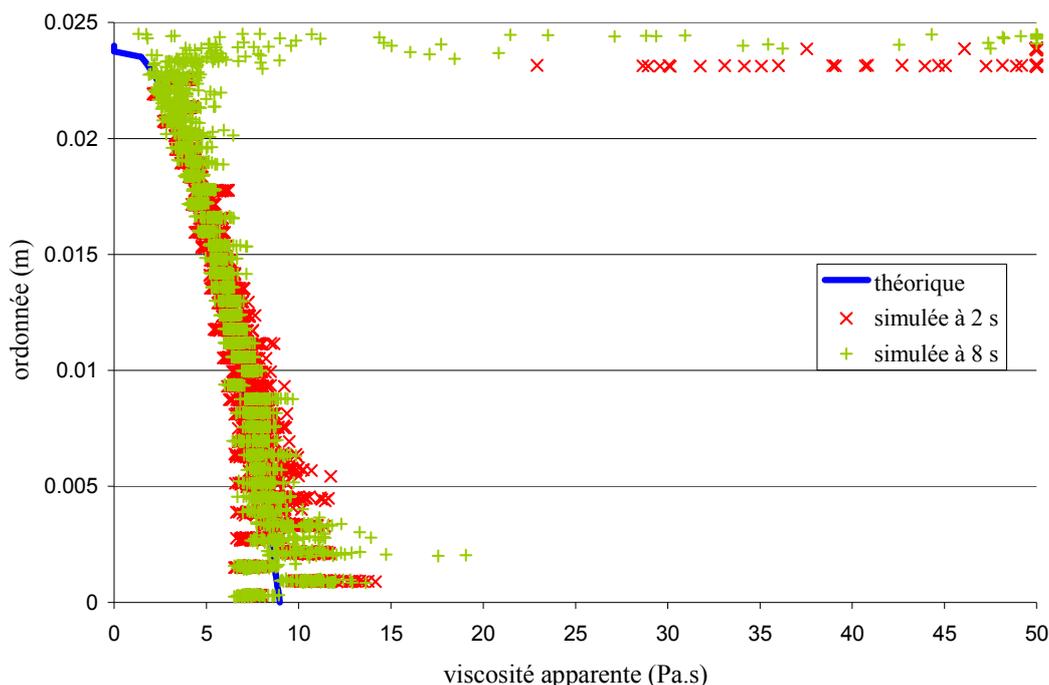


Figure 5.6 Convergence des profils de viscosité apparente simulés vers la solution théorique pour un écoulement permanent à nombre de Froude $Fr = 0,34$ sur une pente de $22,5^\circ$

5.3.7 Etude prospective de l'interaction d'écoulements transitoires avec un obstacle

5.3.7.1 Présentation des simulations

Dans cette partie, nous analysons numériquement l'effet d'un obstacle géométriquement simple sur des écoulements transitoires de fluide à seuil. Les simulations représentent un écoulement de type rupture de barrage pour un volume fini de matériau (conditions présentées en Figure 5.2). Elles sont conduites dans les conditions suivantes. On considère un fluide de Bingham dont la viscosité (en Pa.s) est donnée par :

$$\eta_{app} = \min\left(\frac{35,0}{\dot{\gamma}} + 20,0; 1000,0\right) \quad (5.19)$$

La pente du canal est constante et égale à 10% ou 20%. La hauteur initiale de matériau stocké est $H_0 = 0,3$ m (Figure 5.2). Un obstacle, constitué d'un mur perpendiculaire au fond et à l'axe du canal est disposé à l'abscisse $X_{obs} = \frac{10}{3} H_0 = 1,0$ m. La hauteur d'obstacle est $H_{obs} = 1, 2, 3, 4,$ or 5 cm. Trois points d'observation, ou capteurs numériques, sont disposés aux abscisses $X_1 = 4.H_0 = 1,2$ m, $X_2 = 5.H_0 = 1,5$ m, $X_3 = 6.H_0 = 1,8$ m (Figure 5.7). Chacun de ces capteurs enregistre la vitesse instantanée, le débit, la quantité de mouvement et l'énergie cinétique, ainsi que la valeur intégrée sur le temps de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique. Les simulations portent chacune sur un temps $T_{max} = 10$ s, qui correspond à l'établissement d'un écoulement très lent, proche de l'arrêt. Les principaux objectifs de cette étude prospective sont :

- d'évaluer l'influence de l'obstacle sur l'écoulement à l'aval de celui-ci, par comparaison entre écoulements avec et sans obstacle (ce dernier étant appelé l'écoulement de référence). Le but est ici d'évaluer les effets dissipatifs (réduction de quantité de mouvement, par exemple) dus à la présence d'un obstacle.
- d'évaluer les pressions dynamiques appliquées à l'obstacle et les comparer aux pressions développées à l'intérieur de l'écoulement de référence.

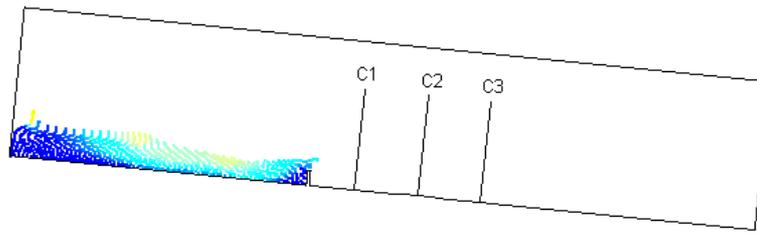


Figure 5.7 Position schématique des capteurs C1, C2 et C3 dans le canal, positionnés aux abscisses X_1 , X_2 et X_3 , respectivement.

5.3.7.2 Réduction de quantité de mouvement due à l'obstacle

On définit ici la quantité de mouvement instantanée de la façon suivante : l'écoulement étant pratiquement monodimensionnel, seule la composante de la vitesse parallèle au lit est considérée et son produit par la masse volumique est intégré sur la profondeur d'écoulement. Cette quantité de mouvement instantanée est définie par :

$$mom = \int_0^h \rho u(z).dz \quad (5.20)$$

En pratique, on la calcule en 2D en sommant les $m_i u_i$ des particules i présentes à l'intérieur d'une bande perpendiculaire au lit et de largeur Δx , le pas d'espace initial. Pour mieux représenter l'influence de l'obstacle par comparaison à l'écoulement de référence, il est utile de considérer la quantité de mouvement intégrée sur le temps et définie par :

$$imom(T) = \int_0^T mom(t).dt \quad (5.21)$$

Lorsque l'arrêt de l'écoulement est atteint, la différence de quantité de mouvement intégrée entre écoulement avec et sans obstacle est la quantité de mouvement effectivement absorbée par ce dernier. Un exemple d'évolution de la quantité de mouvement intégrée en fonction du temps est présenté en Figure 5.8, qui montre que sa réduction dépend directement de la hauteur d'obstacle (variant dans la gamme $0 \leq H_{obs} \leq 5$ cm). Un aperçu général des résultats obtenus pour différentes pentes et positions des capteurs est présenté dans le Tableau 5.1. On note également que l'influence d'un obstacle de hauteur donnée est systématiquement plus faible lorsque la pente est plus forte. La réduction peut ainsi atteindre 86% sur une pente à 10%, alors qu'elle n'atteint que 33% sur une pente à 20%. On note enfin que la réduction de quantité de mouvement intégrée augmente avec la distance séparant l'obstacle du capteur de telle sorte qu'elle est toujours plus marquée à la position de capteur X_3 qu'en X_1 . Ces résultats étant établis sur un temps relativement court ($T_{max} = 10$ s), on pouvait suspecter qu'un temps de simulation plus long était susceptible de modifier ce résultat. Une simulation a donc été menée sur un temps de 120 s, amenant à la conclusion qu'un allongement du temps ne modifiait pas substantiellement ces résultats. Une réduction de la quantité de mouvement peut avoir pour origines une réduction de hauteur ou une réduction de vitesse d'écoulement. En fait, par rapport à l'écoulement de référence, la réduction de hauteur au niveau des capteurs est généralement comprise entre 0% et 20%, tandis que la réduction de quantité de mouvement peut être nettement plus forte. On en conclut donc que la présence d'un obstacle tend essentiellement à réduire la vitesse de l'écoulement et dans une moindre mesure, sa hauteur.

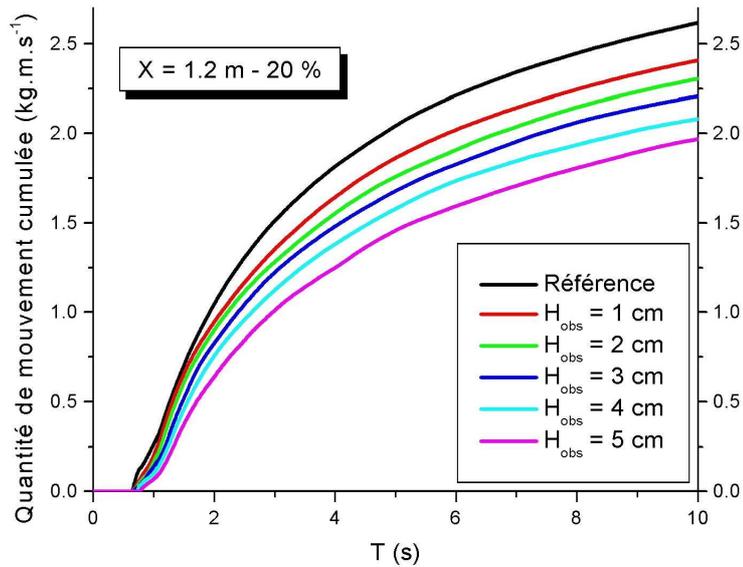


Figure 5.8 Evolution simulée de la quantité de mouvement intégrée sur le temps ($T_{max} = 10$ s) d'un écoulement observé à l'aval d'un obstacle en fonction du temps, pour différentes hauteurs d'obstacle H_{obs} (référence = absence d'obstacle). Point d'observation situé à 1,2 m en aval de l'obstacle, pente de 20%

pente	10%			20%		
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3
position capteur						
$H_{obs} = 1$ cm	0.77	0.65	0.46	0.89	0.86	0.82
$H_{obs} = 2$ cm	0.69	0.58	0.37	0.86	0.83	0.78
$H_{obs} = 3$ cm	0.62	0.51	0.27	0.82	0.79	0.74
$H_{obs} = 4$ cm	0.53	0.38	0.14	0.77	0.75	0.70
$H_{obs} = 5$ cm	0.44	0.31	0.14	0.73	0.71	0.67

Tableau 5.1 Influence de la hauteur d'obstacle H_{obs} sur la quantité de mouvement intégrée sur le temps $T_{max} = 10$ s ; comparaison à la quantité de mouvement intégrée de l'écoulement de référence

5.3.7.3 Contraintes appliquées à la structure

La réaction d'une structure à un impact dépendant de l'intensité des contraintes appliquées mais également de leur évolution temporelle, nous nous intéressons ici particulièrement à la pression maximale atteinte et au temps de montée de la sollicitation.

5.3.7.3.1 Pressions maximum appliquées à l'obstacle

Les pressions simulées sont ici observées à l'intérieur d'une fenêtre rectangulaire qui a la même hauteur que l'obstacle, une épaisseur égale à $2\Delta x$ (cf. paragraphe 5.3.3) et est localisée le long de la face amont de l'obstacle. On considère à tout instant, la pression maximale des particules situées à l'intérieur de la fenêtre. Il s'agit donc d'une pression locale associée à une particule et non d'une pression moyenne appliquée à la structure. En ce sens, les résultats ainsi obtenus sont d'un niveau de finesse conforme aux objectifs de l'étude. L'évolution de cette pression maximale en fonction du temps est donnée en Figure 5.9, pour un obstacle de hauteur $H_{obs} = 5$ cm et une pente de 20%, et comparée à la pression développée au sein de l'écoulement de référence. En pratique, la pression maximale dans l'écoulement de référence est toujours très proche de la pression hydrostatique au fond et est fortement dépendante de la profondeur d'écoulement. Sur la Figure 5.9, les écoulements avec et sans obstacle montrent tous deux un pic de pression immédiatement après le premier contact de l'écoulement sur l'obstacle. En présence d'obstacle, on observe une augmentation très rapide de la pression, suivie par une diminution très rapide, puis un pic de pression secondaire. Ce dernier n'est

toutefois pas observé pour toutes les simulations. Dans les deux cas de figure, la pression diminue ensuite, pour atteindre une valeur pratiquement constante après quelques secondes. Les simulations présentent en outre des oscillations importantes de la pression. Cependant, ces oscillations n'ont pas a priori de base physique. Leur fréquence est en effet corrélée avec la fréquence du lissage de la pression qui doit être systématiquement opéré dans le cadre de la méthode SPH appliquée aux écoulements à surface libre. Un choix optimum de cette fréquence reste à trouver. En revanche, dans le cadre des tests effectués, la fréquence de lissage n'avait pas d'influence sur la valeur du pic de pression. Plusieurs simulations ont été menées avec des hauteurs d'obstacle différentes et variant de 1 cm à 5 cm. Elles ont montré que la valeur du pic de pression augmente avec cette hauteur. Il était a priori intéressant de comparer les valeurs du pic de pression obtenue en présence d'obstacle à celles de l'écoulement de référence. Nous avons pour cela défini deux pressions de référence :

- la valeur du pic de pression de l'écoulement de référence (proche de la pression hydrostatique) est égale à $P_{ref}^{10\%} = 2200$ Pa sur une pente de 10% et $P_{ref}^{20\%} = 1800$ Pa sur une pente de 20%.
- La pression dynamique théorique de l'écoulement de référence, définie par $P_{th} = \rho \bar{U}^2$ avec ρ la masse volumique et \bar{U} la vitesse moyenne de l'écoulement sur la hauteur. Cette pression dynamique théorique de référence est égale à $P_{th}^{10\%} = 1090$ Pa sur une pente à 10% et $P_{th}^{20\%} = 1970$ Pa sur une pente à 20%.

La comparaison des valeurs des pics de pression en présence d'obstacle, aux pressions de référence est présentée dans le Tableau 5.2. On notera que la valeur du pic de pression, en présence d'obstacle, est systématiquement supérieure à la pression de l'écoulement de référence. Le rapport entre les deux reste assez modéré pour une hauteur d'obstacle $H_{obs} = 1$ cm, mais croît régulièrement en fonction de cette hauteur, jusqu'à atteindre une valeur de l'ordre de 4 pour une hauteur d'obstacle $H_{obs} = 5$ cm. On observe la même tendance par rapport à la pression dynamique théorique. Dans ce cas, le rapport entre valeur du pic et pression de référence peut atteindre des valeurs proches de 8, dans le cas d'une hauteur d'obstacle $H_{obs} = 5$ cm sur une pente à 10%.

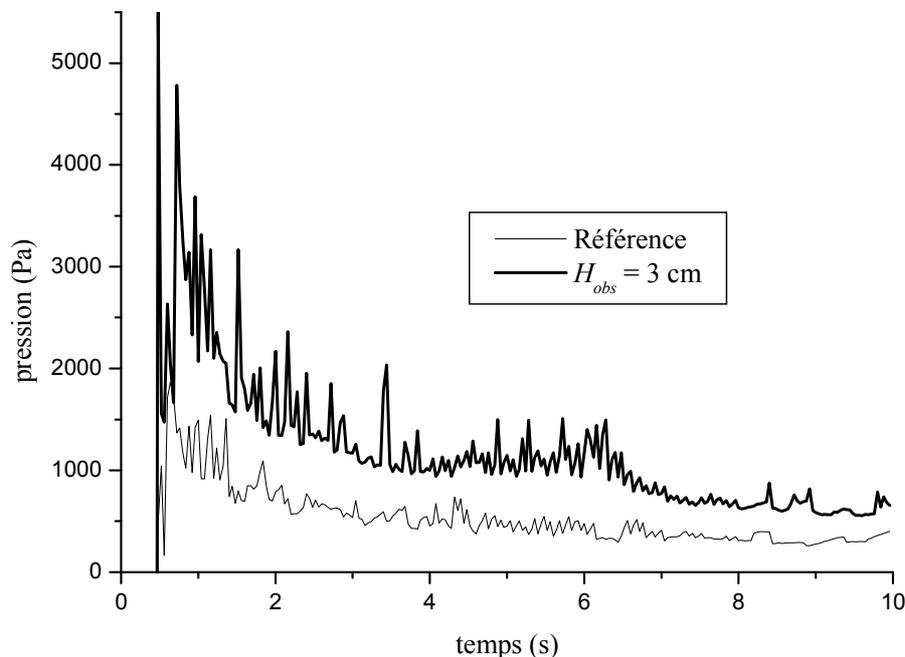


Figure 5.9 Evolution de la pression de l'écoulement de référence et de l'écoulement avec un obstacle de 3 cm sur une pente de 20%

Pression de référence	Pression maximum de l'écoulement de référence P_{ref}		Pression dynamique théorique $P_{th} = \rho U^2$	
	10%	20%	10%	20%
Pente				
$H_{obs} = 1$ cm	1.14	1.39	2.29	1.27
$H_{obs} = 2$ cm	1.82	1.94	3.67	1.77
$H_{obs} = 3$ cm	2.5	3.05	5.04	2.79
$H_{obs} = 4$ cm	3.18	3.61	6.42	3.3
$H_{obs} = 5$ cm	3.86	3.89	7.8	3.55

Tableau 5.2 Valeur du pic de pression appliqué à l'obstacle, comparée aux pressions de référence

5.3.7.3.2 Le temps de montée de la sollicitation

De façon à évaluer de façon plus précise la phase d'augmentation brutale de pression qui suit le contact entre l'écoulement et l'obstacle, une simulation a été conduite avec une fréquence élevée de stockage des données. Pour cette simulation, présentée en Figure 5.10, les résultats ont été enregistrés toutes les 10^{-4} s. Sur cette figure, l'échelle des temps a pour origine l'instant T_{con} du premier contact des particules avec l'obstacle et l'échelle des pressions est adimensionnée par la valeur du pic de pression $P_{max} = 6990$ Pa, dans ce cas. La pression augmente rapidement, pour atteindre sa valeur maximale après $7 \cdot 10^{-4}$ s. Seules deux oscillations, d'intensité limitée, précèdent le pic de pression. Ensuite, la pression diminue immédiatement, sans présenter de phase de plateau, de telle sorte que la pression moyenne (sur le temps) observée au bout de 0,2 à 0,3 s, n'est plus égale qu'à $\frac{1}{4}$ de la valeur du pic. La Figure 5.10 montre également des oscillations importantes de la pression, comme évoqué au paragraphe précédent. Leur régularité apparaît ici de façon plus nette. Le rôle de la fréquence de lissage dans la génération de ces oscillations reste un point à éclaircir.

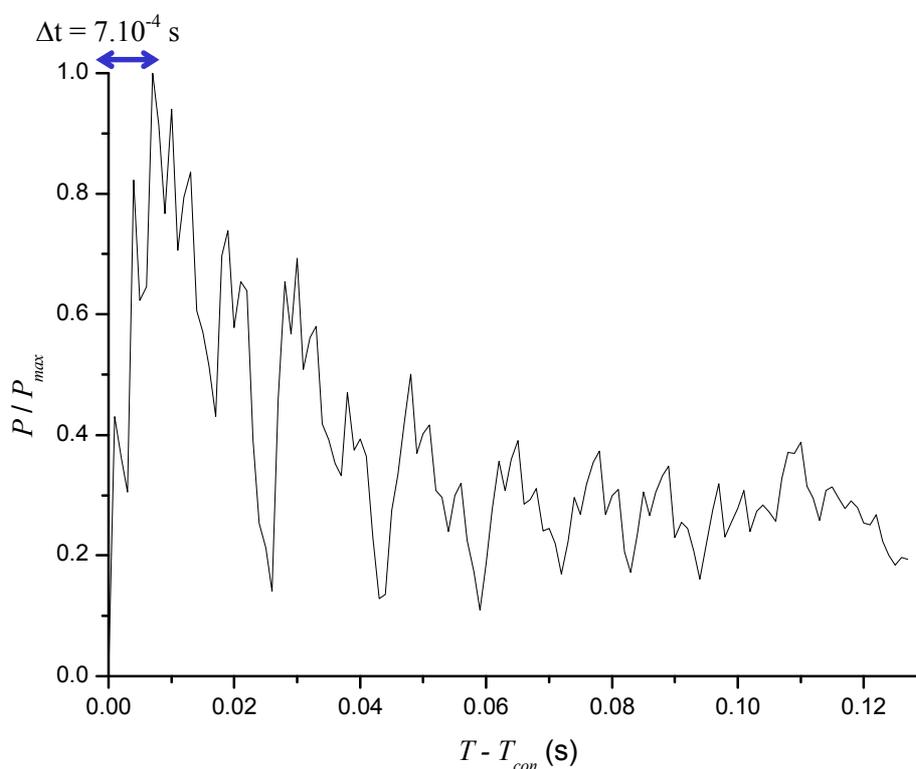


Figure 5.10 Evolution de la pression en fonction du temps pour une hauteur d'obstacle $H_{obs} = 5$ cm et une pente de 20 % ; partie détaillée mettant en évidence le temps de montée de la pression entre l'instant du premier contact et le pic ; ce temps est ici de $7 \cdot 10^{-4}$ s

5.3.7.4 Une approche des interactions qui reste à compléter et valider

La présente étude a été menée de façon prospective afin de démontrer notamment les capacités de la méthode SPH à aborder le phénomène d'interaction écoulement – obstacle. En revanche, les simulations n'ont porté que sur un nombre limité de cas de figure, ce qui n'a pas permis d'apporter d'éléments essentiels sur la phénoménologie de l'interaction. Afin de combler cette lacune et également de fournir des données en vue d'une future validation du modèle, il a été décidé de compléter l'approche numérique par une approche expérimentale de laboratoire, qui fait l'objet du § 5.4.

5.4 Etude expérimentale des interactions écoulements - obstacles

Les travaux présentés ici sont issus du travail de thèse de Didier Tiberghien soutenu en décembre 2007
- Directeur de thèse : Mohamed Naaim, Cemagref.
- Principale publication : Tiberghien et al. 2008.

5.4.1 Introduction

La présente étude expérimentale poursuit 2 objectifs principaux qui sont, pour un écoulement transitoire incident et un obstacle donnés, de caractériser les modifications de l'écoulement au voisinage amont de l'obstacle ainsi que les pressions d'impact sur celui-ci. Le dispositif expérimental mis en oeuvre est constitué d'un canal de laboratoire, dans lequel est disposé un obstacle simple et qui permet la réalisation de lâchers contrôlés de volumes finis de Carbopol[®], un fluide viscoplastique transparent. Les vitesses à l'intérieur de l'écoulement sont mesurées à l'aide de la technique de Particle Imaging Velocimetry (PIV). Un dispositif constitué d'un barreau enchâssé dans le corps de l'obstacle et relié à deux jauges de contrainte permet une mesure directe des contraintes appliquées au centre de l'obstacle. En référence aux conditions de terrain, nous nous concentrons ici sur des écoulements présentant un nombre de Froude compris entre 0,5 et 1,7 environ.

5.4.2 Dispositif et procédure expérimentaux

5.4.2.1 Le fluide modèle

Carbopol[®] (Noveon 2007) est une famille de polymères haute densité classiquement utilisés dans l'industrie cosmétique. En faible concentration (de l'ordre de 1% en volume), ils constituent un bon fluide de Herschel-Bulkley (chapitre 1), une fois neutralisés à un pH de l'ordre de 8 (Roberts & Barnes 2001). De plus, les valeurs des paramètres rhéologiques sont raisonnablement compatibles avec le respect des critères de similitude nécessaires à la simulation physique de laves torrentielles boueuses (chapitre 1). Le gros avantage du Carbopol est sa transparence qui rend possible l'utilisation de techniques de type PIV pour étudier les propriétés internes de ses écoulements. Une procédure de mesure des propriétés rhéologique de ce fluide a été mise au point et présente une très bonne reproductibilité. Dans le cadre de la présente étude, du Carbopol ETD 2623 a été utilisé. Des tests rhéologiques ont été menés afin de contrôler que ce type de Carbopol suit bien le modèle de Herschel-Bulkley, de déterminer les valeurs des paramètres de ce modèle, ainsi que l'incertitude qui leur est associée.

5.4.2.2 Le canal expérimental

Le dispositif expérimental est constitué d'un canal en plexiglas de 5,0 m de long et 0,3 m de large, dont la pente est ajustable entre 0 et 10° (Figure 5.11). Le canal est alimenté par un réservoir amont. La partie amont du canal est équipée d'un système de surverse permettant de maintenir la charge constante au-dessus d'une vanne verticale, initialement fermée. L'ouverture partielle de cette vanne permet la génération d'écoulements transitoires pour lesquels le front d'écoulement est suivi d'un régime permanent, à débit constant pendant plusieurs secondes. Un obstacle simple, de forme

rectangulaire, est disposé dans le canal dont il obstrue toute la largeur. Cet obstacle, localisé au niveau du tiers inférieur du canal, fait 2 cm d'épaisseur et sa hauteur peut être ajustée entre 2 et 6 cm.

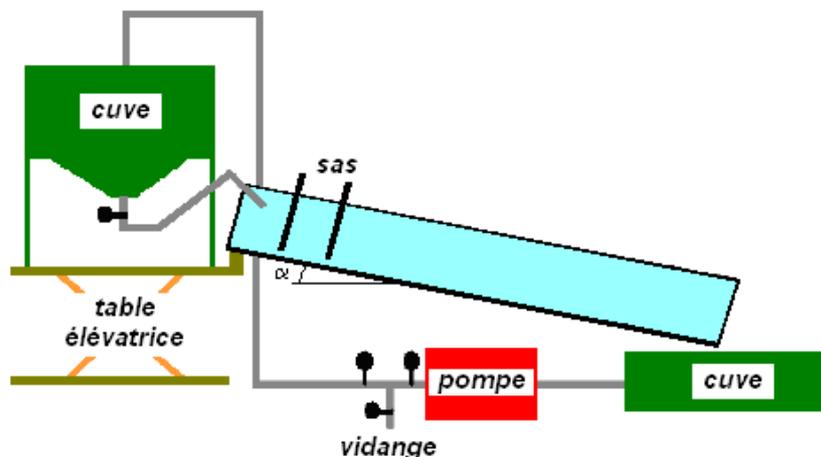


Figure 5.11 Canal expérimental

5.4.2.3 La PIV

La technique de PIV permet ici de mesurer les vitesses locales à l'intérieur de l'écoulement. Un laser est utilisé pour éclairer une tranche verticale de l'écoulement, localisée au centre du canal, parallèle aux parois latérales et en amont immédiat de l'obstacle (Figure 5.12). Des particules de polyamide de 80 μm , n'influençant pas l'écoulement, sont utilisées comme traceurs. Le dispositif est complété par une caméra vidéo, utilisée à 300 images par seconde, dont l'axe de prise de vue est perpendiculaire au plan laser et qui filme les écoulements au travers de la paroi latérale transparente du canal. Les images, une fois traitées, permettent d'évaluer le déplacement des traceurs entre deux images successives et d'en déduire les vecteurs vitesses locaux, au centre de l'écoulement et à tout instant.

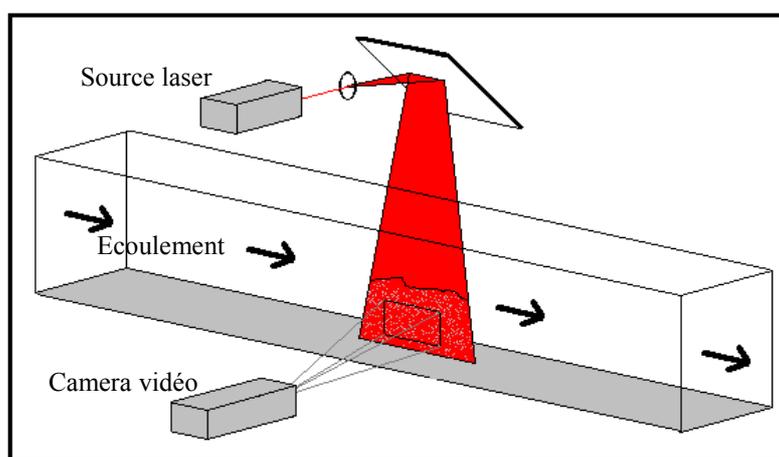


Figure 5.12 Vue schématique du dispositif de mesure par PIV

5.4.2.4 Le capteur de pression

Un capteur de pression a été spécifiquement développé dans le cadre de cette expérience et installé en position centrale dans le corps de l'obstacle (Figure 5.13). La position verticale du capteur peut être ajustée en disposant des cales en-dessous ou au-dessus du corps de l'obstacle. Ce capteur, disposé à fleur de la face amont de l'obstacle, est constitué d'une barre de 10 cm de long sur 1 cm de large, montée sur deux capteurs de force de type jauge. Ces jauges sont reliées à un système d'acquisition. Compte tenu des faibles pressions générées par les écoulements étudiés, il n'était pas envisageable de diminuer substantiellement la surface de contact entre le capteur et l'écoulement, ceci à cause des gammes de mesure des capteurs disponibles dans le commerce.

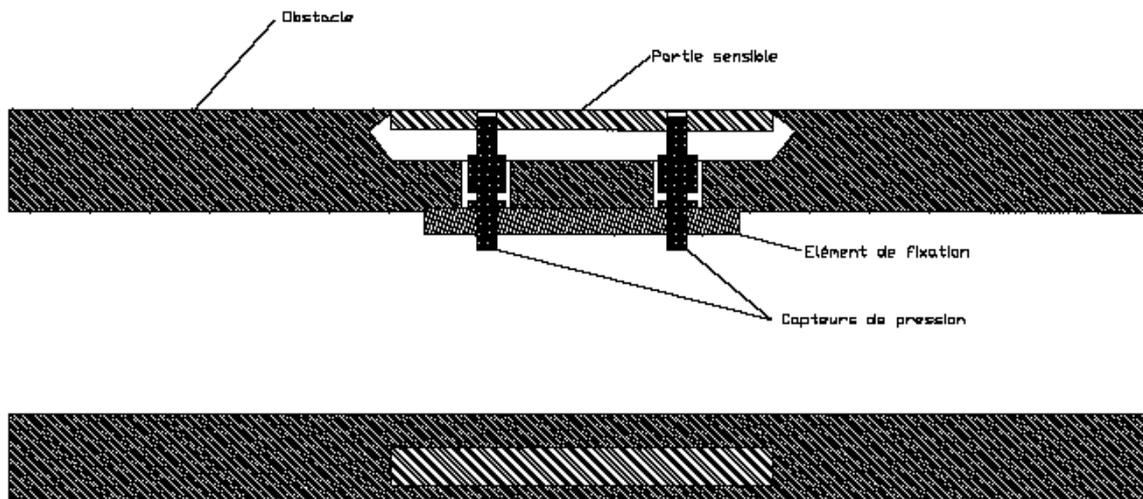


Figure 5.13 Vues en coupe et de face de l'obstacle avec le détail du dispositif de mesure de pression

5.4.2.5 Procédure expérimentale

Dans le cadre de la présente étude, différentes conditions d'écoulement ont été étudiées. Celles-ci peuvent être décrites par :

- un nombre de Froude $Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$, que nous définissons ici par une vitesse V = vitesse de propagation du front d'écoulement et h = hauteur de l'écoulement en régime permanent.
- des propriétés rhéologiques du matériau en écoulement, qui se traduisent par les deux nombres adimensionnels G et Hb (chapitre 1)
- un rapport d'élancement de l'obstacle $N_{obs} = \frac{h}{H_{obs}}$, avec H_{obs} = hauteur de l'obstacle.

Le nombre d'expériences à réaliser pour caractériser l'ensemble des conditions expérimentales possibles étant très élevé et les propriétés du matériau modèle utilisé ne permettant pas de faire varier de façon indépendante tous ces paramètres, l'étude a essentiellement porté sur l'influence des propriétés dynamiques de l'écoulement amont. En pratique, le rapport d'élancement de l'obstacle a été maintenu constant pour toutes les expériences et égal à $N_{obs} = 0,86$ et nous avons travaillé avec un seul matériau caractérisé par une concentration massique de 0,15% et les paramètres rhéologiques suivants : $\tau_c = 9,6$ Pa; $K = 6,65$ Pa.sⁿ; $n = 0,415$. Le nombre de Froude (Fr) a été retenu comme variable principale de cette étude, dont les objectifs principaux étaient de caractériser comment :

- le champ de vitesse (et notamment la zone morte à vitesse nulle, qui se forme au pied de l'obstacle) évolue durant l'impact.
- la position de la surface libre (et donc la contribution « hydrostatique » de la pression) évolue en amont de l'obstacle.
- la pression appliquée à l'obstacle (au niveau du capteur) évolue au cours de l'impact.

5.4.3 Résultats expérimentaux

5.4.3.1 Ecoulements en amont de l'obstacle

Des essais préliminaires ont montré que les caractéristiques de l'impact dépendaient largement du régime de l'écoulement incident, ce qui amène à utiliser le nombre de Froude comme critère de classification. On se concentre donc ici sur les vitesses d'écoulement au voisinage amont de l'obstacle et tout particulièrement sur la formation de la zone morte, de fluide à vitesse nulle, qui apparaît à l'amont de l'obstacle, immédiatement après l'impact. Les principales caractéristiques des écoulements

sont présentées en Figure 5.14. Elles seront détaillées ensuite, en fonction du régime de l'écoulement incident.

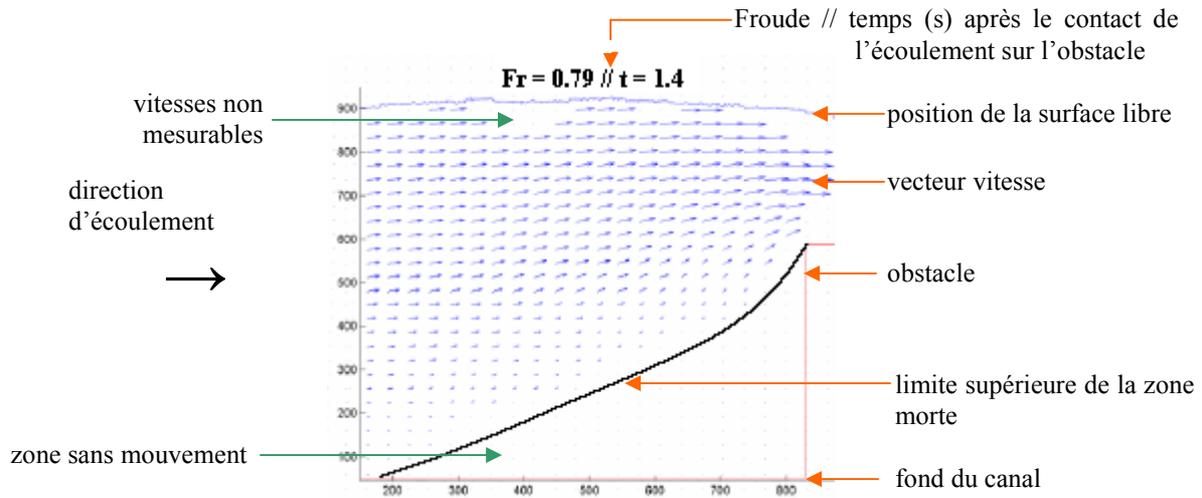


Figure 5.14 Données générales sur l'écoulement en amont de l'obstacle, les axes sont en pixels (1 pixel = 0,007 cm), l'origine des temps correspond au premier contact de l'écoulement sur l'obstacle.

5.4.3.1.1 Écoulement incident subcritique

La Figure 5.15 présente les phases successives de l'interaction écoulement – obstacle, pour un nombre de Froude de l'écoulement incident égal à 0,79. On peut observer qu'après le premier contact avec l'obstacle, le fluide se stocke progressivement en amont de celui-ci (B, C, D). La position de la surface libre s'élève et dès que la crête de l'obstacle est atteinte, un déversement apparaît (E). La hauteur d'écoulement continue à croître et la surface libre évolue sous forme d'une onde qui progresse vers l'amont (F, G). Elle ne se stabilise que lorsque le régime permanent (débit constant) est atteint (H). Durant le même temps, une zone morte de fluide au repos se forme au pied de l'obstacle et ses dimensions croissent, aussi bien en direction verticale que vers l'amont du canal. Cette zone morte se comporte schématiquement comme un tremplin, qui lorsqu'il est suffisamment développé, dévie l'écoulement incident sans modification brutale du champ de vitesses. Un tel effet tremplin a notamment été décrit par Zanuttigh & Lamberti (2006), pour des écoulements granulaires.

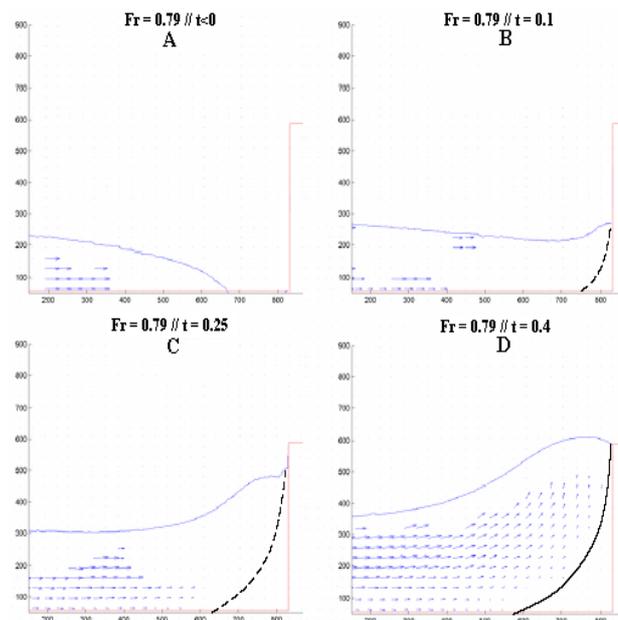


Figure 5.15 (première partie)

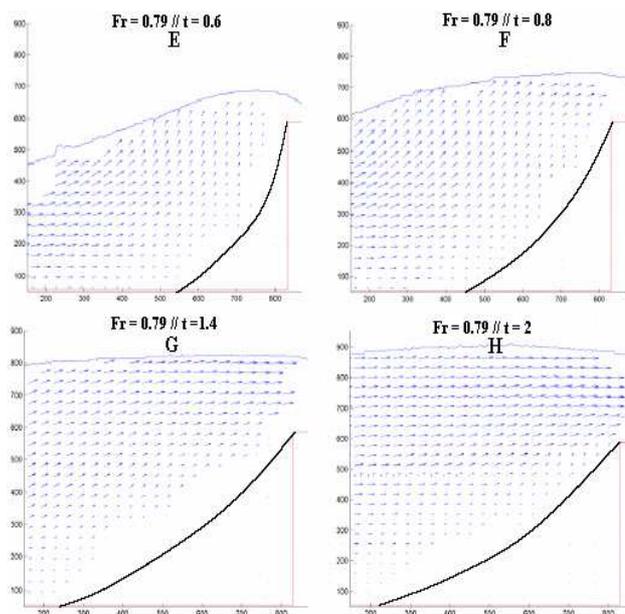


Figure 5.15 Evolution de l'écoulement en amont de l'obstacle, pour un nombre de Froude de l'écoulement incident $Fr = 0,79$; t est le temps (s), les axes sont en pixels (1 pixel = 0,007 cm)

5.4.3.1.2 Écoulement incident supercritique

La Figure 5.16 présente les phases successives de l'interaction écoulement – obstacle, pour un nombre de Froude de l'écoulement incident égal à 1,35. Très rapidement après l'impact, l'écoulement surverse au-dessus de l'obstacle (A, B). L'impact se caractérise ici par la présence d'un jet qui peut être pratiquement vertical pour des valeurs élevées du nombre de Froude de l'écoulement incident (B). Le champ de vitesse se modifie rapidement et une zone morte de taille réduite se forme au pied de l'obstacle (B). Le jet disparaît progressivement tandis que la hauteur d'écoulement en amont de l'obstacle s'accroît et que la zone morte se développe (C, D, E), jusqu'à atteindre sa taille maximale lorsque le régime permanent est atteint (F). L'extension maximale de la zone morte reste cependant plus faible que pour un écoulement incident subcritique.

5.4.3.2 **Pression appliquée à l'obstacle**

La mise en évidence de deux régimes d'impact suggère également des mécanismes de transmission de pression à l'obstacle qui peuvent être différents. Pour clarifier ce point, nous analysons la pression mesurée sur le capteur situé au centre de l'obstacle et plus particulièrement la pression dynamique. Cette pression dynamique est obtenue en soustrayant la contribution hydrostatique (calculée à partir de la hauteur d'écoulement au-dessus du capteur et en amont immédiat de l'obstacle) à la pression totale mesurée grâce au capteur. Deux conditions de régime, respectivement subcritique et supercritique, sont distinguées. Les mesures de pression ont été effectuées de façon concomitante aux mesures de vitesse et de hauteur par PIV, ce qui permet d'analyser leurs évolutions parallèles.

5.4.3.2.1 Écoulement incident subcritique

La Figure 5.17a montre que, pour le régime subcritique, la pression dynamique croît assez lentement et atteint sa valeur maximale lorsque le régime permanent est atteint, c'est-à-dire également lorsque la zone morte atteint ses dimensions maximales. Le temps de montée de la pression est typiquement de quelques secondes. Ces résultats suggèrent que la zone morte joue un rôle dans la transmission de la pression à l'obstacle.

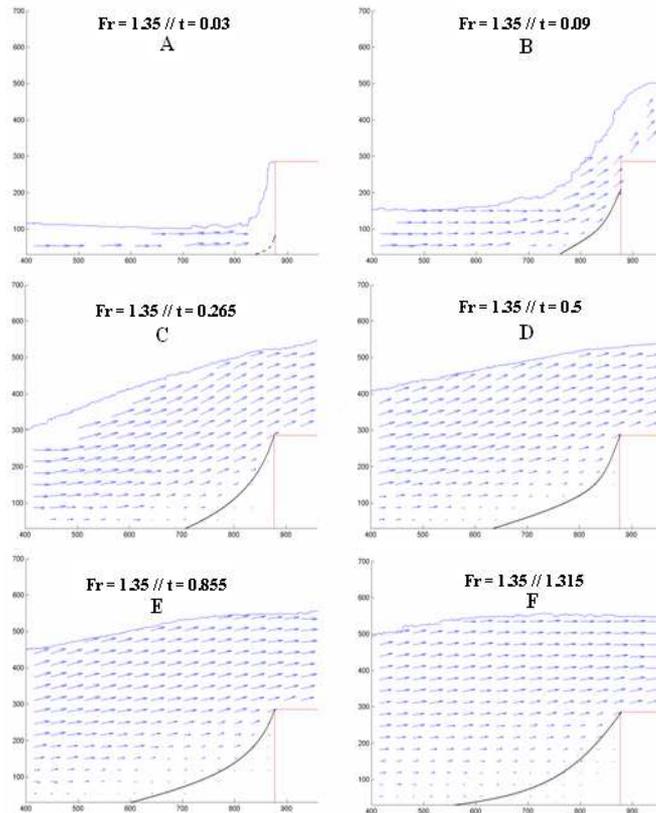


Figure 5.16 Evolution de l'écoulement en amont de l'obstacle, pour un nombre de Froude de l'écoulement incident $Fr = 1,35$; t est le temps (s), les axes sont en pixels (1 pixel = 0,009 cm)

5.4.3.2.2 Ecoulement incident supercritique

La Figure 5.17b montre que, pour le régime supercritique, la pression croît rapidement après le premier impact. Le temps de montée de la pression est typiquement de quelques dixièmes de seconde, ce qui correspond à la phase de développement du jet. La diminution de pression observée ensuite correspond à la phase de disparition du jet. On observe ensuite une très légère augmentation de la pression qui correspond au développement de la zone morte. Enfin, la pression se stabilise lorsque le régime permanent est atteint. Ces résultats suggèrent que l'impact est ici essentiellement dynamique puisque l'augmentation de pression est concomitante à l'accroissement du jet et que la zone morte, compte tenu de sa faible taille, joue probablement un rôle mineur.

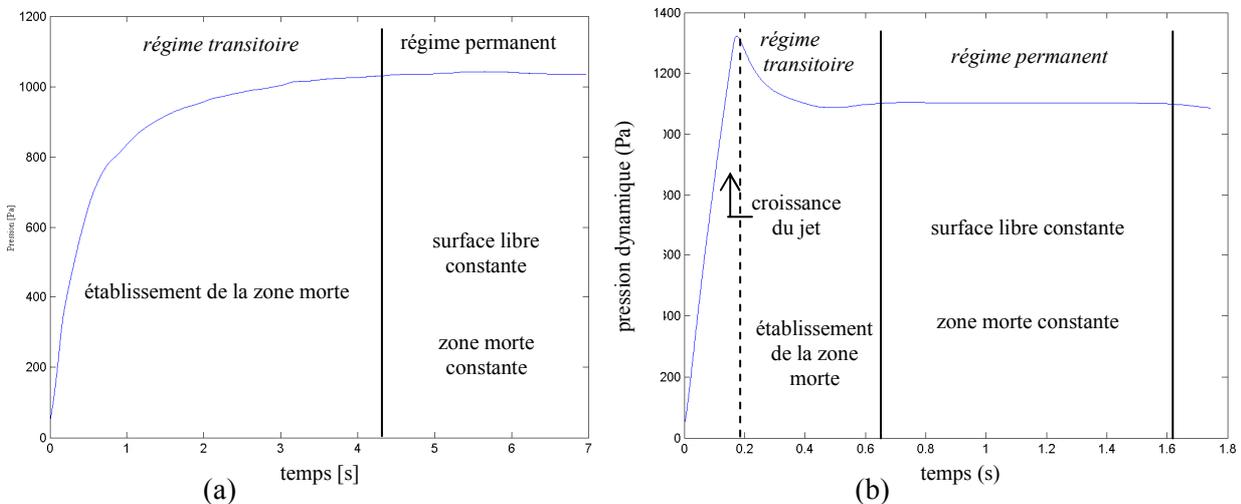


Figure 5.17 Evolutions de la pression sur l'obstacle durant la phase d'impact pour un écoulement incident subcritique (a) ou supercritique (b).

5.4.3.2.3 Variation de la pression en fonction du Froude de l'écoulement incident

L'influence du régime d'impact et donc du nombre de Froude de l'écoulement incident sur l'évolution de la pression ayant été établi, nous cherchons ici à établir une relation entre la valeur maximale de la pression dynamique et le nombre de Froude. Une expression classique de la pression dynamique s'exerçant sur un corps en mouvement dans un fluide est donnée par :

$$P_{dynamic} = \frac{1}{2} \cdot Cx \cdot \rho \cdot V^2 \quad (5.22)$$

Où, V est la vitesse relative de l'obstacle par rapport au fluide et Cx est le coefficient de traînée. L'évolution du coefficient de traînée Cx en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident est présentée en Figure 5.18. On note tout d'abord que pour des valeurs élevées du nombre de Froude, typiquement supérieures à 1,4, le coefficient de traînée tend asymptotiquement vers 2, ce qui est conforme aux résultats classiques sur la pression dynamique dans un fluide parfait. Dans ce cas, et cela a été confirmé par des modélisations non détaillées ici, la pression d'impact est déterminée par les deux variables que sont la vitesse incidente et la masse volumique du fluide. En revanche, pour des valeurs plus faibles du nombre de Froude (inférieures à 1,4), on note une forte augmentation du coefficient de traînée lorsque le nombre de Froude diminue. Des valeurs de Cx de l'ordre de 13 à 15 sont par exemple atteintes pour $Fr = 0,5$. Des résultats comparables en termes d'évolution ont été obtenus par d'autres auteurs pour d'autres matériaux (Wieghart 1975 ; Chahata et al. 2003). Il a également été établi par Pazwah & Roberston (1973) que la valeur du coefficient de traînée est plus élevée pour des fluides de Bingham que pour des fluides Newtoniens et que, de plus, une augmentation du seuil de contrainte entraîne une augmentation du coefficient de traînée. Mécaniquement, l'existence d'une contrainte seuil explique la formation d'une zone morte qui semble donc jouer un rôle important dans la transmission de la pression à l'obstacle. Cette hypothèse a été confirmée par une modélisation semi-empirique non détaillée ici et fondée sur un bilan des forces appliquées à la zone morte. Cette modélisation a permis de retrouver la tendance observée expérimentalement de l'évolution de la pression dynamique en fonction du nombre de Froude. En conséquence, pour des nombres de Froude suffisamment faibles, la pression dynamique développée sur l'obstacle ne dépend pas seulement de la vitesse incidente. Elle dépend également des caractéristiques rhéologiques du matériau qui se traduisent en pratique par des dimensions de la zone morte.

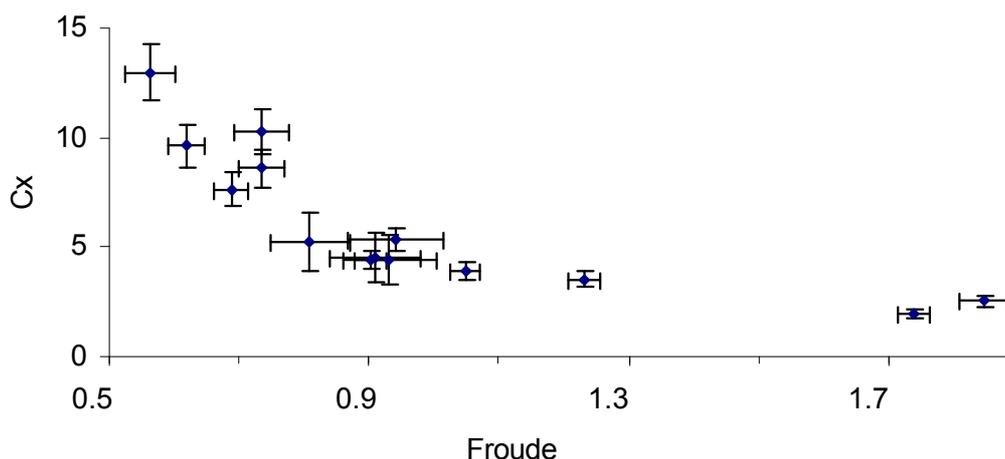


Figure 5.18 Evolution de la valeur du coefficient de traînée Cx en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident.

5.4.3.3 Régimes d'impact

Les expériences présentées ici ont mis en évidence l'existence de deux régimes d'impact en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par

Armani & Scotton (1992) qui n'avaient cependant pas pu analyser ni les caractéristiques de la zone morte, ni le lien entre les caractéristiques d'écoulement et l'évolution de la pression appliquée à l'obstacle. La transition entre ces deux régimes d'impact n'étant pas strictement donnée par un nombre de Froude égal à 1 et le rôle crucial de la zone morte ayant été établi, nous préférons ici parler de régime d'impact de zone morte, d'une part et de régime d'impact de jet, d'autre part. Schématiquement, le régime de zone morte se caractérise par une montée en pression relativement lente qui atteint son maximum lorsque le régime permanent est atteint. La zone morte joue un rôle essentiel dans la transmission des pressions à l'obstacle. Cette zone morte, à l'origine d'un effet tremplin sur l'écoulement, est déterminée par l'existence d'un seuil de contrainte du matériau. Les pressions appliquées à l'obstacle dans ce cas de figure peuvent être très supérieures à celle prédites par une approche classique de la pression dynamique. Les propriétés rhéologiques du matériau jouent ici un rôle primordial. Le régime de jet, qui en pratique est complètement développé pour des nombres de Froude supérieurs à 1,4, se caractérise par un stockage faible de matériau dans une zone morte de dimensions réduites. Pour ce régime, les effets dynamiques sont très marqués, de telle sorte que la pression dynamique appliquée à l'obstacle est très largement déterminée par la vitesse incidente et que l'approche classique de la pression dynamique est valide.

5.5 Bilan et perspectives

5.5.1 Principaux résultats obtenus

Le travail de thèse (Lachamp 2003), presque exclusivement numérique, qui a été présenté dans la première partie de ce chapitre, a permis le développement et la mise au point d'un code de calcul de type champ proche fondé sur la méthode SPH (Monaghan 1994, Rodriguez-Paz & Bonet 2004). Ce code, qui permet le calcul à un niveau fin des écoulements d'un matériau répondant à une loi de comportement quelconque, a tout d'abord été validé par confrontation à des expériences en l'absence d'obstacle pour des fluides viscoplastiques. Il a ensuite été utilisé de façon prospective pour analyser d'une part la perte de charge de l'écoulement occasionnée par la présence d'un obstacle et d'autre part pour analyser la répartition spatiale et temporelle des pressions appliquées à un obstacle lors d'un impact. L'implémentation d'une loi granulaire a par ailleurs été effectuée (Lachamp et al. 2002). Une loi de comportement granulaire a par ailleurs été implémentée (Lachamp et al. 2002, Bouvarel 2007) et confrontée avec succès à des solutions théoriques.

Le travail de thèse (Tiberghien 2007), exclusivement expérimental, qui a fait l'objet de la seconde partie de ce chapitre, a porté sur l'étude des écoulements au voisinage d'un obstacle simple et sur la mesure de la pression exercée sur cet obstacle. Ce travail a permis d'établir l'existence de deux régimes d'impact : « régime de zone morte » et « régime de jet » correspondant respectivement, dans nos conditions expérimentales, à des écoulements incidents à nombre de Froude inférieur ou supérieur à 1,4. Il a montré que, dans le cas du régime de jet, la pression dépend directement de la vitesse de l'écoulement incident, alors que pour le régime de zone morte, elle dépend aussi très largement des dimensions de la zone morte et donc des caractéristiques rhéologiques du matériau. Ces résultats sont susceptibles de faire évoluer les pratiques en termes de dimensionnement des structures de protection et de prise en compte des pressions d'impact dans les plans de zonage des aléas torrentiels.

5.5.2 Perspectives

L'étude expérimentale, menée dans le cadre de la thèse de Tiberghien (2007) a fourni des résultats extrêmement intéressants, notamment une très bonne description phénoménologique et une quantification partielle des facteurs influençant les pressions d'impact. Elle a toutefois porté essentiellement sur la caractérisation de l'influence des paramètres dynamiques de l'écoulement sur les pressions générées lors de l'impact. Elle s'est de plus limitée à des obstacles de géométrie simple, présentant un rapport d'élancement (rapport de la hauteur d'obstacle à la hauteur d'écoulement) unique et a mis en œuvre un matériau modèle aux propriétés rhéologiques constantes. Une quantification complète des facteurs déterminant les pressions d'impact nécessitera des expériences

complémentaires avec prise en compte de différentes valeurs du rapport d'élanement et des valeurs des paramètres rhéologiques.

L'analyse théorique des écoulements au voisinage d'obstacles a largement progressé grâce au travail de thèse de Lachamp (2003). Ceci se traduit dans les faits par l'existence d'un code numérique permettant une approche fine des écoulements, pour des fluides visco-plastiques ou granulaires. En revanche, ce code n'a pas encore été confronté à l'expérience. Il est donc nécessaire de faire converger les outils numériques et expérimentaux afin d'obtenir une très bonne caractérisation du phénomène d'interaction. De plus, d'une part la finesse des outils expérimentaux est inévitablement limitée et d'autre part le modèle numérique ne peut valablement être utilisé en prédétermination qu'après validation. L'idée que nous souhaitons exploiter ici est donc la suivante : valider et le cas échéant, faire évoluer le modèle numérique par confrontation à l'expérience au niveau le plus fin autorisé par cette dernière. Dès lors, le degré de confiance dans les capacités prédictives du modèle permettra de l'utiliser avec un bon degré de confiance pour obtenir des résultats dans des cas de figure pas ou est très difficilement atteignable par l'expérience (difficultés à respecter au laboratoire, les critères de similitude propres aux laves torrentielles, capacités limitées des instruments de mesure disponibles, etc.).

En complément, on peut dire que les approches menées à ce jour ne s'intéressaient pas directement à des cas de terrain. Or les enseignements que l'on peut tirer de l'étude d'ouvrages réels de protection ayant subi une rupture ou un endommagement (techniques de l'analyse inverse) peuvent être précieux pour orienter compléter et valider l'approche numérique ou expérimentale de laboratoire. Il est parait donc souhaitable d'adopter une approche combinée, à différentes échelles, seule susceptible de fournir une analyse complète des phénomènes menant à la rupture ou à l'endommagement des structures et de permettre à terme l'établissement de nouvelles règles de dimensionnement.

Chapitre 6

Travaux en cours et perspectives

6.1 Principales conclusions des travaux réalisés, traduites en axes de recherche à poursuivre ou à développer

Du point de vue de l'application, les recherches sur les risques naturels ont pour vocation de fournir des outils et méthodes en vue de la protection des biens et des personnes. Les recherches présentées dans le présent document ont fourni des modèles de propagation relativement précis, notamment pour ce qui concerne la phase d'étalement des laves torrentielles sur le cône de déjection (chapitre 3) ; l'intérêt opérationnel de ces résultats est indéniable. En revanche, dans un certain nombre de cas (écoulements chenalés avec front granulaire, érosion du chenal par une lave...) les modèles fondés sur l'hypothèse « fluide homogène » ont montré leurs limites (chapitre 2). Face à ces limites, nous avons émis l'hypothèse qu'une approche prenant explicitement en compte les hétérogénéités du matériau en écoulement était nécessaire. Celle-ci devrait s'intéresser : d'une part, aux phénomènes de **ségrégation des matériaux grossiers**, sans doute à l'origine de la **segmentation front – corps** et d'autre part, aux **interactions entre l'écoulement et le lit torrentiel**.

Des progrès notables sur la compréhension des phénomènes d'interaction écoulements - obstacles ont été enregistrés. Les approches développées ont notamment montré que l'intensité des pressions appliquées à une structure par les écoulements de laves torrentielles ne dépendait pas uniquement de la vitesse de propagation et que par exemple, des écoulements lents étaient susceptibles de générer eux aussi des pressions importantes. Ce point devrait entraîner une révision notable des pratiques opérationnelles actuelles en termes de prise en compte des forces d'impact. En revanche, ces résultats ne permettent pas encore une évaluation quantitative des dommages aux bâtiments et aux structures de protection. Un effort de recherche doit donc encore être consenti pour établir des outils d'évaluation de la **vulnérabilité structurelle** (chapitre 5) ainsi que des méthodes de dimensionnement des structures de protection.

Dans une démarche de prédétermination (celle qui est la plus fréquemment utilisée pour la prévention), nous avons montré au chapitre 4, tout l'intérêt d'une utilisation de modèles de propagation dans le cadre d'une approche par scénarios. Toutefois, une connaissance précise de la magnitude des phénomènes, préluce à une utilisation précise de ces modèles, est nécessaire. Or, à ce jour, **l'évaluation de cette magnitude souffre** de fortes incertitudes. Un effort particulier de recherche devrait donc être consenti sur ce point.

Enfin, la notion même d'incertitude est inhérente aux phénomènes naturels dont l'occurrence est aléatoire. Toutefois, une meilleure **caractérisation statistique** des données d'entrée des modèles, ainsi qu'une représentation des **incertitudes** qui pèsent sur ces données, est fortement souhaitable. En fait, ce sont surtout les propriétés statistiques des résultats et une caractérisation des incertitudes associées

qui présentent un intérêt pour le praticien. L'approche par scénarios présentée au chapitre 4 est une première ébauche de méthode répondant à ce double objectif. Elle se heurte toutefois à certaines limites telles que par exemple le problème de l'évaluation de la fréquence d'occurrence des phénomènes. Une telle évaluation, encore aujourd'hui qualitative et largement menée « à dire d'expert », devrait pouvoir bénéficier à terme, d'une bien meilleure formalisation scientifique.

Je reprends ci-après ces principaux points, en tâchant d'en détailler les enjeux, de dégager les objectifs des travaux de recherche à entreprendre et de proposer une méthodologie d'étude. Enfin, j'exprime mes perspectives personnelles par rapport à chacune de ces thématiques. J'aborde ici les enjeux relatifs aux risques torrentiels sous deux angles distincts : d'une part, les enjeux scientifiques et d'autre part les enjeux opérationnels. Par enjeux opérationnels, j'entends ici tout ce qui concerne l'application et donc l'adéquation des outils issus de la recherche à la problématique de la gestion des risques torrentiels. On notera toutefois que cette partie n'est pas elle-même exempte de thématiques de recherche, mais que celles-ci font assez peu appel aux outils des « sciences pour l'ingénieur », c'est pourquoi j'ai décidé de les traiter à part, même si cette séparation peut paraître artificielle sous certains aspects.

6.2 Vers une nouvelle approche des propriétés mécaniques des matériaux en écoulement

Notre travail a mis en évidence la pertinence mais également les limites d'une approche des écoulements des laves torrentielles dans le cadre de la mécanique des fluides homogènes. Ces limites sont notablement atteintes pour les écoulements chenalés de laves torrentielles dont la composition et donc les propriétés mécaniques varient d'un point à une autre (segmentation en front, corps et queue) ou qui présentent des interactions plus ou moins fortes avec le lit torrentiel (érosion, entraînement de matériau et donc modification des propriétés mécaniques).

6.2.1 Quelques approches existantes

Du point de vue de la modélisation des écoulements de laves torrentielles, les deux principales approches qui ne se fondent pas sur l'hypothèse « fluide homogène » sont celles développées notamment par :

- Denlinger & Iverson (2001), Iverson & Denlinger (2001) et Iverson (2003 et 2005) qui sans pour autant proposer une approche totalement biphasique, considèrent l'écoulement de matériaux granulaires fluidisés. Cette approche a fait l'objet de nombreuses confrontations à des écoulements en canal de grandes dimensions.
- Fraccarollo & Capart (2002) et Armanini et al. (2008), qui adoptent une approche résolument biphasique, fondée sur une loi d'échange entre l'écoulement et le lit. Les cas traités à ce jour portaient toutefois sur des concentrations relativement faibles et aucune loi de chargement spécifique aux laves torrentielles n'a été proposée par ces auteurs.

Ces approches ont ouvert des voies de recherche extrêmement prometteuses. En revanche, elles considèrent des granulométries resserrées et plutôt grossières. De ce fait, elles ne prennent pas en compte l'éventuelle influence d'un fluide interstitiel autre que de l'eau (l'hypothèse d'un fluide interstitiel composé d'eau et de particules colloïdales n'est pas considérée). D'autre part, elles ne proposent pas encore de représentation vraiment probante des phénomènes de ségrégation généralement observé dans les laves torrentielles réelles, notamment si elles sont chenalées.

6.2.2 Etudes prospectives relatives à l'influence du front granulaire sur l'écoulement des laves torrentielles

L'influence du front granulaire a été abordée dans le cadre de deux études prospectives. La première de ces deux études a consisté en l'analyse de l'effet d'un bloc rigide placé en tête d'un écoulement boueux, sur les caractéristiques du phénomène de propagation. Cette étude a mis en évidence que la présence du front tend à systématiquement augmenter les hauteurs d'écoulement mais peut par ailleurs

contribuer à diminuer ou augmenter la vitesse de propagation selon les cas. En fait, dans ce cas de figure, la propagation est généralement constituée d'une série de phases d'accélération et de décélération pouvant aller jusqu'à l'arrêt. Le régime stationnaire n'a pu être atteint mais une influence forte du front sur les caractéristiques de la propagation a pu être mise en évidence. La seconde de ces deux études a porté sur l'analyse du comportement de granulats constitués de cylindre de nylon dans une suspension de Carbopol®. Celle-ci étant transparente, elle permettait une observation du mouvement des granulats. Le nylon fut choisi car son rapport de masse volumique avec la suspension de Carbopol® est assez similaire à celui observé en nature entre front et corps des laves torrentielles. Cette étude a mis en évidence que des lâchers brutaux de fluide viscoplastique sur un lit granulaire génèrent une érosion, mais que celle-ci était insuffisante pour former un front. En revanche, dans le cas où la propagation fluide percute un tas de granulats, deux cas sont à distinguer : en canal large les granulats sont rapidement dispersés par le fluide et tendent à s'accumuler latéralement ; en canal suffisamment étroit, les granulats sont poussés en tête de coulée et subissent une très faible dispersion dans l'écoulement, de telle sorte que le phénomène de propagation observé présente de grandes similitudes avec le phénomène naturel.

6.2.3 Phénomènes de ségrégation et formation du front granulaire

Cette thématique fait actuellement l'objet du travail de thèse d'A. Ghemmour « Rhéologie des laves torrentielles : influence de la formation du front granulaire », débuté fin 2006 avec un co-encadrement assuré par G. Chambon au Cemagref et une direction de thèse assurée par A. Magnin du laboratoire de Rhéologie INPG-UJF-CNRS.

Enjeux

Malgré des avancées significatives ces dernières années, de nombreuses inconnues subsistent encore quant au comportement des laves torrentielles. Le traitement des phases de déclenchement (voir aussi § 6.4 et § 6.5) et de propagation en chenal se heurte encore à de nombreux verrous. Aussi bien la formation du front que son comportement mécanique ou son effet sur l'écoulement global de la lave torrentielle restent mal connus. Il en découle une faible capacité à caractériser les écoulements chenalisés (hauteur et vitesse, notamment) et donc à aborder toute une série de problèmes opérationnels (identification des débordements, conception et dimensionnement de structures de protection adaptées, etc.).

Objectifs

Dans le contexte évoqué ci-dessus, notre objectif général est d'établir les lois régissant l'évolution de la charge solide en matériaux granulaires (non colloïdaux) à l'intérieur d'un écoulement à forte charge solide avec présence d'un fluide interstitiel constitué tout à la fois d'eau et de particules fines (colloïdales). Plus particulièrement, nous nous intéressons à la formation et à l'influence du front granulaire sur la propagation. Les questions qu'il convient de traiter peuvent être exprimées de la façon suivante :

- Quels sont les conditions et les mécanismes de ségrégation aboutissant à la formation d'un front granulaire à partir d'un mélange homogène de grains dans un fluide à seuil ? L'existence d'un front correspond-elle à un état stable de l'écoulement ?
- Quel est l'effet du front sur les caractéristiques de l'écoulement ? En particulier, peut-on rendre compte de l'écoulement global corps – front par une loi de comportement effective ?
- L'existence du front permet-elle d'expliquer le caractère transitoire de l'écoulement des laves torrentielles, c'est-à-dire la propagation de bouffées apparemment indépendantes les unes des autres ?

Outre la compréhension des processus d'interaction entre corps et front des laves torrentielles, cette étude introduit une inflexion forte dans notre démarche car elle ne repose plus sur l'hypothèse d'un fluide homogène. De ce point de vue, elle doit être considérée comme un préalable au développement de nouvelles approches de modélisation fondées sur l'hypothèse d'un comportement diphasique des écoulements de laves torrentielles.

Méthodologie

L'idée originale exploitée dans le cadre de la thèse d'A. Ghemmour est de considérer le matériau de lave torrentielle comme constitué de deux phases : un fluide interstitiel (eau et particules fines) présentant des propriétés de fluide viscoplastique et des granulats en concentration très élevée, pouvant subir des phénomènes de ségrégation au sein de l'écoulement. Nous avons pris le parti d'aborder l'étude du front de façon essentiellement expérimentale, avec l'ambition de parvenir à une description fine des processus physiques et mécaniques mis en œuvre. Ainsi, des écoulements de fluide modèle viscoplastique (suspension de Carbopol®) chargés en granulats, sont étudiés expérimentalement sur un tapis roulant incliné qui permet de rendre fixe le front d'écoulement dans le référentiel du laboratoire. Ce type de dispositif a déjà été utilisé avec succès dans le cadre d'études sur les laves torrentielles par Davies (1988) et Hübl & Steinwendtner (2000a). Il permet de réaliser des écoulements de longue durée, ce qui permet d'étudier finement les phénomènes transitoires relativement lents comme les effets de ségrégation dynamique, ou de réaliser des écoulements stationnaires bien établis garantissant l'obtention de mesures « rhéométriques ». Deux classes d'expériences sont prévues :

- Etude des effets de ségrégation et de migration des particules dans un mélange constitué d'un fluide à seuil et de grains. En parallèle, la question de la rhéologie d'une suspension de grains dans un fluide à seuil sera abordée.
- Etude des caractéristiques et des régimes d'écoulement d'un système corps – front constitué de la juxtaposition d'un fluide à seuil et d'un matériau frictionnel de type assemblée granulaire.

Dans les deux cas, l'influence de paramètres tels que les propriétés rhéologiques du fluide à seuil utilisé, la taille des grains, leur forme, voire leur distribution granulométrique, sera explorée. Il conviendra également de respecter au mieux les conditions de similitude physique afin d'avoir la possibilité ensuite d'extrapoler les résultats à des situations réelles.

A ce jour, les expériences ont été réalisées avec des matériaux simplifiés garantissant une séparation d'échelles nette entre les effets portés par le fluide à seuil et les effets portés par les grains. Il s'agit là d'une simplification nécessaire afin de bien identifier les différents processus mis en œuvre.

Perspectives personnelles concernant cette thématique

Il s'agit là pour moi d'une thématique prioritaire pour les toutes prochaines années. Au-delà du travail de thèse en cours, un autre sujet est en cours d'élaboration pour ce qui concerne les interactions entre écoulement et lit érodable (cf. paragraphe 6.4).

6.3 Vers une meilleure évaluation de la vulnérabilité structurelle

Cette thématique est ici déclinée sous forme d'un sujet de thèse qui s'inscrit dans la lignée des thèses de Lachamp (2003) et Tiberghien (2007). Ce sujet, déjà rapidement évoqué en fin du chapitre 5, a été accepté par la Direction Scientifique du Cemagref et fait actuellement l'objet d'une recherche de financement.

Enjeux

L'évaluation des dommages aux infrastructures humaines, ainsi que la réalisation de structures de protection pérennes, sont deux éléments essentiels de la prévention contre les risques naturels. Pour autant, concernant les laves torrentielles comme d'autres aléas gravitaires rapides, les moyens de prévention sont encore actuellement définis de façon essentiellement empirique. Les rares études scientifiques menées sur ce sujet n'ont pas encore fourni les outils opérationnels nécessaires à une évaluation précise des dommages ou au dimensionnement des structures soumises aux impacts dynamiques générés par de tels phénomènes.

Objectifs

L'objectif général est ici l'établissement de nouvelles règles relatives au dimensionnement des ouvrages de protection ou d'évaluation de l'endommagement des infrastructures humaines. Un objectif secondaire est également l'établissement de lois d'écoulement permettant la prise en compte

de l'influence des structures à l'échelle de l'écoulement complet, dans le cadre d'une modélisation numérique de type champ moyen. Les approches que nous avons développées à ce jour se positionnaient nettement sous l'angle de la mécanique des fluides en faisant l'hypothèse d'un obstacle fixe et rigide. A ce jour, il reste nécessaire de faire converger l'approche numérique et l'approche expérimentale, qui sont restées disjointes. L'enjeu est ici de produire un outil nous permettant de dépasser les problèmes d'échelle et notamment de similitude inhérents à l'expérience. Il est également nécessaire de s'intéresser à des géométries de structures plus réalistes, à des matériaux plus représentatifs du milieu naturel (présence de blocs, granulométrie étendue...) et d'envisager l'exploitation des observations existantes concernant l'endommagement d'infrastructures humaines.

Méthodologie

La méthodologie à mettre en œuvre devrait comporter les points suivants :

- L'étude expérimentale menée dans le cadre de la thèse de D. Tiberghien a fourni des résultats extrêmement intéressants. Elle a toutefois porté essentiellement sur la caractérisation de l'influence des paramètres dynamiques de l'écoulement sur les pressions générées lors de l'impact. Elle s'est en outre limitée à des obstacles de géométrie simple, présentant un nombre d'aspect (rapport de la hauteur d'obstacle à la hauteur d'écoulement) unique et a mis en œuvre un matériau modèle aux propriétés rhéologiques constantes. Ces résultats ont permis une très bonne description phénoménologique et une quantification partielle des facteurs (essentiellement dynamiques) influençant les pressions d'impact. Une approche complète de ces facteurs nécessitera des expériences complémentaires avec prise en compte notamment de différentes valeurs du nombre d'aspect et des paramètres rhéologiques du matériau.
- Le code SPH, dédié à l'étude des interactions écoulements – obstacles, constitue un outil théorique de grand intérêt. En revanche, ce code n'a pas encore été confronté à l'expérience. Il est donc proposé ici de faire converger ces deux outils numériques et expérimentaux afin de bâtir un cadre solide permettant une généralisation des résultats obtenus. En effet, la finesse des outils expérimentaux est inévitablement limitée. L'idée est donc ici de valider et le cas échéant de faire évoluer le modèle numérique par confrontation à l'expérience au niveau le plus fin autorisé par cette dernière. De nombreux résultats expérimentaux sont désormais disponibles et autorisent une telle confrontation. Dès lors, le degré de confiance dans les capacités prédictives du modèle permettra de l'utiliser dans des cas de figure difficilement atteignables par l'expérience, notamment en raison des difficultés à respecter au laboratoire, les critères de similitude propres aux laves torrentielles.
- En complément, on peut dire que les approches menées à ce jour ne s'intéressaient pas directement à des cas de terrain. Or les enseignements que l'on peut tirer de l'étude d'ouvrages réels de protection ayant subi une rupture ou un endommagement (techniques de l'analyse inverse) peuvent être précieux pour orienter compléter et valider l'approche numérique ou expérimentale de laboratoire. Sur ce point, la technique d'analyse inverse, qui permet une interprétation des dommages observés en termes de contraintes les ayant générées, est tout à fait prometteuse. Elle permettra à terme d'aborder le problème des interactions à différentes échelles et à ce titre, la future plate-forme expérimentale Ecoulements, Ouvrages, Risques, développée en partenariat avec les membres du GIS Vulnérabilité des Ouvrages aux Risques constituera un outil supplémentaire d'investigation à une échelle intermédiaire.

Perspectives personnelles concernant cette thématique

Il s'agit là d'une thématique forte au sein de mes activités actuelles et compte tenu des enjeux, elle restera pour moi un axe prioritaire au cours des toutes prochaines années. Un certain nombre de travaux de thèse devront encore s'intéresser à ce sujet au cours des années à venir.

6.4 Etude de la déstabilisation d'un lit torrentiel par un écoulement de lave torrentielle

Cette thématique est ici déclinée sous forme d'un sujet de thèse construit en collaboration avec G. Chambon et F. Nicot. Ce sujet a été accepté par la Direction Scientifique du Cemagref et fait actuellement l'objet d'une recherche de financement.

Enjeux

Les phénomènes d'échange entre le lit torrentiel et l'écoulement, par érosion du fond et des berges, ont été identifiés comme une cause probable des difficultés rencontrées pour simuler les écoulements chenalés de laves torrentielles (chapitre 2). Ces phénomènes peuvent être à l'origine du déclenchement des laves torrentielles, mais surtout d'une forte évolution de leur volume en cours d'événement. Si les processus érosifs sont importants, le volume total de la coulée peut être fortement augmenté (d'un facteur de l'ordre de 10 pour l'événement du 22 août 2005 sur le torrent d'Armanette aux Contamines-Montjoie, Haute-Savoie, par exemple). On peut d'ailleurs dans certains cas (exemple cité ci-dessus) observer une déstabilisation massive du lit avec des enfoncements de plusieurs mètres. Cet apport supplémentaire en matériau solide est susceptible d'affecter non seulement le volume, mais également les propriétés mécaniques du matériau en écoulement, avec des conséquences pratiques qui peuvent être très importantes. Par exemple, le volume de l'événement de 2005 sur le torrent d'Armanette aurait très difficilement pu être appréhendé avec les outils de prédétermination existants. Seul un événement historique de magnitude comparable aurait permis à un expert d'envisager a priori l'occurrence d'un phénomène d'une telle ampleur.

Etat des connaissances sur les interactions entre écoulements des laves torrentielles et le lit torrentiel.

Ainsi, l'interaction entre écoulements de laves et lit torrentiel peut jouer un rôle prépondérant à la fois sur la génération et la propagation des coulées. Cependant, les processus régissant ces interactions ont, à ce jour, fait l'objet de très peu d'études et restent mal connus, y compris d'un point de vue qualitatif (Hung et al. 2005). Les quelques approches théoriques existantes (Sassa & Wang 2005) ne traitent le problème que de façon partielle ou sur la base d'hypothèses restrictives. Quelques études se sont intéressées à l'influence d'un chargement progressif en matériau solide sur l'écoulement. Une première approche possible pour aborder ce problème de façon théorique consiste à décrire l'écoulement par un modèle biphasique. Quelques auteurs traitent ainsi les laves torrentielles comme un mélange de matériau granulaire et d'eau, sans toutefois prendre en compte toute l'étendue granulométrique observée dans la nature et de ce fait en négligeant les effets d'un fluide interstitiel généralement non-newtonien. En terme de modèle biphasique appliqué aux laves, le plus avancé actuellement d'un point de vue théorique est celui proposé par Armanini et al. (2008), qui traite des écoulements transitoires en présence d'un fond mobile et a pu être confronté avec succès à des événements de terrain. Toutefois, même si une approche de type biphasique permet intrinsèquement de traiter les interactions entre l'écoulement et le lit moyennant l'utilisation d'une loi de chargement appropriée (mais non encore établie dans le cas spécifique des laves torrentielles), les modèles existant à ce jour se situent tous dans des gammes de concentration faible et de ce fait, sont très discutables pour des applications aux laves torrentielles. Une alternative aux modèles biphasiques, qui sont souvent très complexes, consiste à rester dans le cadre d'une loi de comportement effective pour le fluide mais à rechercher comment les paramètres de cette loi varient, notamment avec la concentration solide (Ancey & Jorrot 2001, Mahaut et al. 2007). Toutefois, ces approches se situent résolument dans le cadre de la mécanique des fluides et ne prennent en considération les propriétés et le comportement mécanique du matériau constituant le lit que de façon très simplifiée. A notre connaissance, jusqu'à un passé très récent, seul Takahashi (1991) a pris en compte de façon explicite (mais schématique) les propriétés des sols constituant le lit torrentiel, afin de traiter le problème de la déstabilisation d'un massif granulaire homogène sous l'effet d'un écoulement d'eau, son optique étant d'appréhender la formation des laves torrentielles par ce processus. Très récemment, les bases d'une approche de la déstabilisation du lit torrentiel par le passage d'une lave, ont été posées par Bowman et al. (2008) en couplant des approches de mécanique des fluides et de mécanique des sols.

Problématique

Une compréhension approfondie des interactions entre l'écoulement des laves torrentielles et le lit torrentiel serait déterminante pour la prise en compte de trois phénomènes majeurs de la propagation :

- le chargement par érosion avec corrélativement augmentation du volume de matériau mobilisé.
- la modification des propriétés physiques et rhéologiques du matériau en écoulement par introduction de granulats supplémentaires.
- la ségrégation inverse des blocs, qui amène à la formation d'un front.

Le phénomène de ségrégation fait actuellement l'objet du travail de thèse d'A. Ghemmour, qui a été présenté au paragraphe 6.2.3. Concernant la déstabilisation du lit torrentiel, la problématique générale peut être formulée de la façon suivante. Les lits torrentiels sont constitués de sols à forte pente, notamment dans la partie haute du bassin versant. Or, ces lits torrentiels peuvent naturellement être en limite de stabilité pour deux raisons : leur pente forte et le degré de saturation en eau du sol qui les constitue. En outre, la perméabilité de ces sols est variable d'un cas à l'autre : forte lorsqu'ils sont constitués de matériau grossier, plus faible notamment lorsqu'ils présentent une matrice fine argileuse. La stabilité et les phénomènes de rupture au sein de tels matériaux lors de chargements quasi-statiques ont déjà fait l'objet de travaux de recherche de nature essentiellement académique (Nova 1994, Petrik 1993, Darve et al. 2004, Darve & Vardoulakis 2005, Nicot et al. 2007). En revanche, concernant l'influence de phénomènes dynamiques externes sur la rupture, seul le cas des séismes a fait l'objet d'investigations approfondies. De façon plus détaillée, le passage d'une lave torrentielle agit par l'intermédiaire :

- d'une contrainte de cisaillement appliquée à la surface du sol.
- d'une contrainte normale additionnelle.
- sans doute également par l'intermédiaire de la pression du fluide interstitiel, très variable d'un point à un autre de l'écoulement de lave torrentielle (Iverson 2005) et avec des intensités d'érosion différentes selon que le sol constituant le lit est en conditions drainées ou non drainées (Bowman 2008).
- de plus, une lave torrentielle est un phénomène très transitoire (front d'écoulement raide), son passage se traduit donc par de fortes variations temporelles des contraintes appliquées au sol sous-jacent (effets dynamiques).

Objectifs

Les objectifs scientifiques à atteindre peuvent se formuler de la façon suivante. Il s'agit d'acquérir une connaissance approfondie :

- des mécanismes de rupture au sein du sol soumis aux contraintes additionnelles générées par le passage de la lave torrentielle (réarrangement des contraintes, localisation des zones de rupture dans le sol...).
- de la dynamique de mise en mouvement du matériau du sol, c'est-à-dire du passage de conditions statiques à des conditions dynamiques (processus de fluidification).
- des mécanismes d'incorporation du matériau solide provenant du sol à l'écoulement.
- de l'influence de l'incorporation de matériau solide sur la rhéologie du matériau fluide en écoulement.
- de la modification des caractéristiques globales de l'écoulement.

Ainsi, il apparaît souhaitable de traiter à la fois les problèmes de la déstabilisation du lit par le passage de la lave et de la modification des propriétés d'écoulement de la lave par incorporation des matériaux du lit. De plus, la modification des caractéristiques globales d'écoulement entraînant inévitablement une modification des conditions de déstabilisation, une approche entièrement couplée est nécessaire.

Méthodologie proposée

Pour avancer sur l'analyse de la déstabilisation du sol soumis en surface à la sollicitation exercée par la lave, il est proposé d'exploiter les approches récemment développées (Darve et al. 2004, Nicot &

Darve 2006 et 2007) dans le domaine de la géomécanique. Un certain mode de rupture, appelé usuellement rupture diffuse (car se développant sans signe apparent de localisation dans le champ de déformation) au sein d'un géomatériau, peut être décrit comme une bifurcation, détectée par l'annulation du travail du second-ordre. Cette approche, appelée également perte de maintenabilité, est intéressante car elle permet, par exemple, de décrire l'occurrence de ruptures catastrophiques dans les pentes naturelles. Il semble donc pertinent d'exploiter cette approche dans le contexte décrit ici, afin d'une part de prédire l'occurrence de phénomènes de rupture au sein du sol, et d'autre part afin d'évaluer le volume de matériau mobilisable. L'étude théorique de la déstabilisation devrait comporter les phases suivantes :

- analyse théorique des conditions de rupture et des volumes mobilisables dans le sol pour différentes hypothèses de saturation, en conditions drainées ou non drainées. La prise en compte d'un fluide interstitiel est un élément nouveau qui exigera d'étendre la théorie actuelle de perte de maintenabilité. En outre, il est proposé d'examiner l'influence de l'existence d'une distribution de ponts solides entre les particules de sols (cas des sols cohésifs) sur l'initiation du phénomène de rupture.
- modélisation numérique du problème en s'appuyant sur des approches couplées éléments discrets – méthodes continues permettant de rendre compte à la fois d'un massif granulaire et d'un écoulement fluide. Pour la partie continue, l'utilisation de notre code SPH (chapitre 5) est envisagée. Ces simulations permettront de confirmer les prédictions de l'approche théorique, mais aussi d'examiner les modifications des propriétés de l'écoulement par le chargement. En parallèle, une analyse dimensionnelle du problème devrait permettre d'orienter le choix de conditions expérimentales propres à l'étude couplée des comportements du sol et de l'écoulement fluide.

Concernant l'influence de la déstabilisation du lit sur l'écoulement, il est proposé dans un premier temps d'aborder le problème de façon prospective en restant dans le cadre restreint de la mécanique des fluides. Ceci sera fait en s'appuyant notamment sur les travaux existants ou en cours concernant la migration de particules solides dans un fluide viscoplastique et la modification des propriétés rhéologiques d'un tel fluide par ajout de particules granulaires (thèse en cours d'A. Ghemmour, Ancy & Jorrot 2001, Mahaut et al. 2007). Par ailleurs, ces effets sont vraisemblablement à l'origine du développement d'hétérogénéités spatiales et temporelles au sein des coulées de laves torrentielles. L'influence de ces hétérogénéités sur la dynamique globale des coulées (vitesse, hauteur) devra être étudiée. Il est ici envisagé une approche expérimentale qui consisterait en la génération, au laboratoire, d'écoulements à surface libre de fluides à seuil susceptibles d'incorporer des massifs granulaires placés sur leur trajectoire. Une analyse du comportement rhéologique moyen des coulées constituées de mélanges fluide – grains devra également être menée, soit par analyse directe des profils de vitesse locaux, soit si la taille de grain le permet, par prélèvement direct et analyse au scissomètre. Pour toutes ces études, l'influence des propriétés rhéologiques du fluide (seuil de contrainte, viscosité) et du sol (densité, structure initiale) sera examinée.

Perspectives personnelles concernant cette thématique

Il s'agit là pour moi d'une thématique prioritaire pour les toutes prochaines années, pour des raisons qui sont d'une part son intérêt opérationnel et d'autre part, l'intérêt du problème scientifique à résoudre, qui ouvre d'importantes perspectives de rapprochement mécanique des fluides - mécanique des sols.

6.5 Vers une meilleure évaluation de la magnitude des phénomènes

Enjeux

La connaissance de la magnitude des phénomènes et tout particulièrement l'évaluation des volumes des événements, constituent une donnée d'entrée tout à fait essentielle aux modèles de propagation, notamment dans une logique de prédétermination. Or, à ce jour, les outils et méthodes disponibles sont majoritairement empiriques ou statistiques et souffrent d'une forte incertitude (chapitre 4). La prise en compte du phénomène d'érosion du chenal et de ses berges par un écoulement peut, dans certains cas,

être très importante (Hungar et al. 2005). De ce point de vue, l'amélioration de la modélisation des écoulements, telle qu'évoquée au paragraphe 6.4 pourrait être déterminante. Toutefois, à l'heure actuelle, le lien entre l'étude des mécanismes de déclenchement (qui bénéficie désormais d'une bonne connaissance [Laugier & Cojean 2001]) et l'estimation des volumes, nécessaire à une approche en prédétermination, est encore imparfaitement assuré. L'ensemble des outils et méthodes d'approche n'a d'ailleurs sans doute pas été exploité avec le même degré d'intensité.

Objectifs

L'objectif serait ici de faire converger les différents types d'approches susceptibles de permettre une évaluation en prédétermination de la magnitude des phénomènes et surtout d'associer une fréquence de retour à cette magnitude (ce qui est très rarement le cas actuellement, mais est tout à fait essentiel à la définition d'un niveau d'aléa).

Méthodologie

Des études récentes portant sur l'évolution de la recharge sédimentaire dans les bassins versants à laves torrentielles (Veyrat-Charvillon 2005) ont ouvert des pistes intéressantes qu'il conviendrait de poursuivre et d'approfondir. De façon globale, malgré quelques études d'un grand intérêt (Rickenmann 1995, Bonnet-Staub 1998, Bardou 2002) les outils proposés par la géomorphologie sont restés à ce jour relativement sous exploités. Une telle exploitation devrait permettre d'une part, une meilleure quantification des phénomènes et d'autre part, renforcer notre capacité de « lecture » des indices d'événements anciens au terrain (témoins muets, utilisation de la dendrochronologie...). C'est donc un ensemble de communautés scientifiques partiellement disjointes qu'il conviendrait de mobiliser sur ce thème de la magnitude des laves torrentielles. Outre les géomorphologues déjà évoqués, on peut songer aux mécaniciens des sols, aux spécialistes des glissements de terrain, aux hydrologues...et même aux historiens pour ce qui concerne la fourniture de données sur des événements anciens pouvant faire l'objet d'études statistiques.

Perspectives personnelles par rapport à cette thématique

Cette thématique ne se situe pas directement au cœur de mon domaine de compétence, mais constitue un enjeu fort pour une utilisation opérationnelle pertinente des modèles de propagation. A ce titre je souhaite jouer un rôle moteur dans la construction de collaborations dont certaines sont déjà engagées (internes avec F. Liebault ou externes, avec les universités de Caen et de Strasbourg) visant à étudier ce thème de façon pluridisciplinaire.

6.6 Vers une meilleure prise en compte de l'incertitude

Enjeux

Les différentes approches présentées dans les paragraphes précédents devraient permettre de réduire les fourchettes d'incertitude qu'il est nécessaire de gérer dans le cadre d'une approche de type prédétermination. Toutefois, il est fort peu probable que ces incertitudes puissent à terme être toutes fortement réduites. De plus, la variabilité est un caractère intrinsèque des phénomènes naturels qui peut se traduire par une probabilité d'occurrence et plus généralement par les propriétés statistiques d'un phénomène d'intensité donnée. Or, pour le praticien travaillant à la définition de mesures de prévention, qui voudrait connaître l'intensité (vitesse d'écoulement et donc dommages générés) et la probabilité d'occurrence (une fois tous les 10 ans, 100 ans, 1000 ans ?) des phénomènes susceptibles d'affecter un point donné de l'espace (une habitation, par exemple), il s'agit là de données cruciales. Evaluer des intensités et les probabilités associées, à un niveau local, est a priori envisageable si l'on connaît les propriétés statistiques des processus et valeurs des paramètres qui déterminent l'écoulement. Sur le principe, l'utilisation de modèles d'écoulement dans lesquels les valeurs des données d'entrée (de propriétés statistiques supposées connues) sont aléatoirement imposées, permettent ce type d'évaluation, comme cela a été démontré par Ancey (2005), pour les avalanches. Toutefois, le problème rencontré actuellement pour les laves torrentielles est la méconnaissance des propriétés statistiques des données d'entrée des modèles susceptibles d'être mis en œuvre. L'approche par scénarios, présentée au chapitre 4, constitue un palliatif qui à défaut de fournir des résultats

quantitatifs, permet une représentation qualitative, déjà fort utile au praticien. Un problème complémentaire concerne l'incertitude sur les données, leur évaluation, leur propagation et leur représentation.

Objectifs

Un premier objectif est ici d'obtenir une meilleure caractérisation des propriétés statistiques des données d'entrée des modèles de propagation des laves torrentielles. Un second objectif est d'étudier comment les incertitudes qui pèsent sur les données d'entrée peuvent être évaluées, comment elles se traduisent en incertitudes sur les résultats et comment les représenter.

Méthodologie

Du point de vue de la formalisation statistique, elle a fait l'objet du travail de thèse d'Eckert (2007) qui s'est appliqué à développer une approche bayésienne visant notamment à appréhender les caractéristiques statistiques des principaux paramètres intervenant dans un modèle de propagation d'un phénomène naturel, en l'occurrence les avalanches. Ces dernières bénéficient de bases de données très importantes qui ont rendu possible une telle approche. Il n'est malheureusement pas certain que les phénomènes torrentiels puissent bénéficier d'un tel apport en termes de quantité de données. Toutefois, compte tenu des enjeux, une tentative d'application portant sur les phénomènes torrentiels est envisagée.

Une réflexion de fond sur la représentation, la caractérisation de l'incertitude et sa prise en compte dans le cadre d'un processus décisionnel, fait actuellement l'objet, au Cemagref, du travail de thèse de J.-M. Tacnet (Tacnet et al. 2005), qui s'intéresse tout particulièrement aux phénomènes torrentiels. Ce travail s'applique à fournir des outils et méthodes de construction de scénarios, de propagation des incertitudes et d'analyse de la démarche de l'expert en s'appuyant sur différents niveaux de formalisation quantitatifs et qualitatifs, qu'il s'agit de mixer.

Perspectives personnelles par rapport à cette thématique

Bien que ne se situant pas au cœur de ma démarche scientifique, je compte contribuer à cette thématique par l'intermédiaire de collaborations. Une telle étude repose notamment très largement sur la mise en œuvre de modèles de propagation et requiert donc des compétences et des outils tels que ceux que j'ai développés au cours de ces dernières années et que je continue à développer à ce jour.

6.7 Développements orientés vers l'opérationnel

L'évaluation et la réduction des aléas naturels constituent des axes principaux de la réduction des risques et à ce titre sont des enjeux opérationnels extrêmement importants. Toutefois, elles peuvent être abordées de façon essentiellement technique et à ce titre, leur évolution repose directement sur les avancées scientifiques dans le cadre de ce que l'on dénomme sous le vocable de « sciences pour l'ingénieur ». Ces avancées ont été évoquées aux paragraphes précédents. C'est pourquoi nous aborderons ici uniquement ce qui concerne d'une part la vulnérabilité (non structurelle) et d'autre part l'expertise. On notera toutefois que deux thèmes extrêmement importants émergent actuellement et devront faire l'objet d'études particulières : le **changement climatique** et la **gestion des situations de risque imminent**. Les modélisations développées à ce jour permettront l'analyse de scénarios. Cependant, l'établissement même de ces scénarios devra faire l'objet de collaborations spécifiques avec notamment des climatologues ou météorologues, d'une part et des gestionnaires du risque (Sécurité Civile, par exemple) d'autre part.

6.7.1 Vers une meilleure évaluation de toutes les composantes de la vulnérabilité

Enjeux

Contrairement aux aléas, la vulnérabilité, ou plus exactement devrait-on dire les vulnérabilités, a fait l'objet d'un nombre limité d'études. La réduction de la vulnérabilité passe largement par la mise en place de mesures de protection dites « non structurelles » relatives à l'occupation des sols (zonage réglementaire des plans de prévention des risques [PPR]) ou des dispositifs d'alerte. La caractérisation

de l'aléa n'est pas suffisante pour produire une décision de gestion et notamment de limitation réglementaire de l'occupation des sols. L'analyse des différents types de vulnérabilité (structurelle, économique, humaine...) est donc essentielle. Cependant, à ce jour, concernant les risques gravitaires en montagne, seule la vulnérabilité structurelle fait l'objet d'études approfondies (contrairement aux autres types de vulnérabilités, elle est la seule à pouvoir être abordée exclusivement dans le cadre des sciences pour l'ingénieur). Dans ce contexte, des critères de priorité entre les contraintes techniques, économiques et sociales sont utilisés de façon souvent subjective dans le processus de prise de décision.

Objectifs

L'objectif principal serait ici de pallier au manque d'outils et de méthodes permettant une qualification objective de la vulnérabilité et une formalisation accrue des processus de prise de décision.

Méthodologie

Mieux établir les critères d'évaluation de la vulnérabilité dans son ensemble requiert de faire appel aux sciences humaines et sociales dont les chercheurs se sont penchés sur ce problème dans des contextes cependant souvent différents (crises sanitaires, par exemple). Ces scientifiques (économistes, politologues, sociologues...) possèdent les outils et méthodes d'analyse des éléments qui concourent à la prise de décision et à la gestion. Leur expérience des interrelations existant entre acteurs locaux (publics, privés, institutionnels...) serait d'une aide précieuse pour la compréhension des processus de gestion des risques naturels sur les territoires de montagne. Les difficultés d'un tel rapprochement ont été maintes fois évoquées : absence de vocabulaire et de concepts partagés, logiques scientifiques parfois divergentes. Mais l'enjeu mérite une poursuite des efforts et de toute évidence, un tel rapprochement est fortement attendu par les instances de programmation de la recherche (ANR, Union Européenne via les programmes PCRD notamment).

Pour progresser dans cette voie, il paraît également nécessaire de renforcer la coopération avec l'ensemble des opérateurs de la gestion des risques : collectivités territoriales, administrations centrales, services déconcentrés, bureaux d'études privés, assureurs, acteurs privés. le point d'entrée tout désigné d'une telle démarche étant à notre sens les services déconcentrés de l'Etat (services de restauration des terrains en montagne, notamment) ayant compétence en matière de risques naturels, qui possèdent une connaissance opérationnelle de cette problématique, qu'il s'agirait d'analyser et de formaliser.

Perspectives personnelles concernant cette thématique

Bien qu'il s'agisse d'une thématique un peu éloignée du corps de compétences développées jusqu'à ce jour, je compte poursuivre les collaborations avec des chercheurs en sciences humaines et sociales, initiées notamment autour du travail de thèse de V. Boudières. Actuellement (début 2008), la préparation d'une réponse à l'appel d'offres de l'Union Européenne dans le cadre du 7^e PCRD, me permet de rentrer encore davantage dans cette logique de collaboration entre sciences pour l'ingénieur et sciences sociales. Une telle collaboration constituera inévitablement un axe fort du futur projet si celui-ci est financé.

6.7.2 La place de l'expert

Du point de vue de l'**expertise** (que nous définirons ici comme « la mise en œuvre d'un savoir scientifique en réponse à la demande d'un décideur, sachant que cette réponse est destinée à être intégrée dans un processus de décision » [Roqueplo 1997]), les outils et méthodes directement issus de la recherche sur les aléas offrent des supports de raisonnement tout à fait intéressants, mais l'expertise ne se résume pas à sa dimension purement technique. Elle reste un domaine d'intervention pluriel, où peuvent se côtoyer des spécialistes d'horizons divers, et qui trouve sa place dans un contexte local et décisionnel qui ne peut être ignoré de l'expert, même si par définition il se doit de rester le plus neutre et le plus objectif possible. La façon dont est abordée la vulnérabilité est également essentielle. L'absence de critères clairement établis, permettant une qualification de cette dernière, rajoute un facteur d'indétermination (§ 6.7.1). Dans ce contexte, le développement d'une capacité d'expertise de

haut niveau sur les risques naturels en montagne et au-delà, la mise en commun et la confrontation des outils et méthodes de prévention, qu'ils soient de nature technique ou réglementaire restent globalement peu structurées. Ce manque d'une culture commune de l'expertise prise au sens large (incluant la technique, mais aussi la gestion du risque, la connaissance des processus décisionnels, les aspects réglementaires et juridiques, etc.) limite l'émergence d'une réflexion commune et donc toute tentative de formalisation du raisonnement de l'expert, ainsi que la définition de critères précis d'évaluation partagés par tous et qui pourraient servir de base à une future charte de qualité. Par manque de structure de collaboration et d'échange de taille suffisante, l'expert ne peut généralement s'appuyer sur un collectif constitué et reste souvent seul face à des problématiques dont il ne maîtrise pas nécessairement toutes les facettes, mais qui engagent fortement sa responsabilité. La construction d'expertises collectives a déjà été menée dans le domaine du risque sanitaire, par exemple, et a été jugée satisfaisante. Un tel dispositif devrait faire l'objet d'une attention particulière afin de juger de la pertinence d'une transposition au domaine des risques naturels.

Perspectives personnelles concernant cette thématique

Ayant mené ou ayant contribué activement à la réalisation d'un certain nombre d'études et expertises (activité liée fortement à mon statut d'ingénieur du ministère de l'agriculture), la question de la place de l'expert dans le processus décisionnel présente pour moi un intérêt tout particulier. Je ne souhaite pas faire de ce point une thématique prioritaire à court terme. Néanmoins, je souhaite m'impliquer progressivement davantage dans les réflexions qui s'engagent sur ce thème, à l'initiative notamment du Cemagref.

Références bibliographiques

- Ancey C., 1997. Rhéologie des écoulements granulaires en cisaillement simple : Application aux laves torrentielles granulaires, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Paris.
- Ancey C., 1999. Note de synthèse sur la rhéologie des laves torrentielles. Rapport interne Cemagref. 13 p.
- Ancey C. & Jorrot H., 2001. Yield stress for particle suspensions within a clay dispersion. *J. Rheol.* 45: 297-319.
- Ancey C., 2005. Monte Carlo calibration of avalanches described as Coulomb fluid flows. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A* 363: 1529-1550.
- Ancey C., 2007. Plasticity and geophysical flows: A review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 142: 4-35.
- Armanini A. & Scotton P., 1992. Experimental analysis on the dynamic impact of a debris flow on structures. In: proceedings of the international symposium Interpreavent 1992, Bern Switzerland, 6:107-116.
- Armanini A., Fraccarollo L. & Rosatti G., 2008. Two-dimensional simulation of debris flows in erodible channels. *Computers & Geosciences* (à paraître).
- Atapattu D.D., Chhabra R.P. & Uhlherr P.H.T., 1995. Creeping sphere motion in Herschel-Bulkley fluids: flow field and drag. *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, 59: 245-265.
- Bardou E., 2002. Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin. Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Département de Génie Civil. 171 p.
- Bathurst J. C., Crosta G. B., Garcia-Ruiz J. M., Guzzetti F., Lenzi M. A. & Rios Aragüés S., 2003. DAMOCLES : Debris-fall assessment in mountain catchments for local end-users. Proceedings of the 3rd International Conference "Debris-Flow Hazards Mitigation", Davos, Switzerland, 10-12 september 2003, D. Rickenmann & C.-L. Chen (Eds.), MILLPRESS: 1073-1083.
- Berger R. C., 1994. Strengths and Weaknesses of Shallow Water Equations in Steep Open Channel Flow. Proceedings of the 1994 Conference on Hydraulic Engineering, G. V. Cotroneo & R. R. Rumer (Eds.): 1257-1261.
- Bonnet-Staub I., 1998. Mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans les Alpes françaises – Contribution à la maîtrise du risque. Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris. 237 p.
- Bonnet-Staub I., 2001. Une méthodologie d'analyse et de cartographie de l'aléa « initiation de laves torrentielles »-application au torrent du Bragousse (France). *Bull. Eng. Geol. Environ.* 59(4): 319-327.

- Bouvarel R., 2007. Validation d'un code de calcul par la méthode SPH. Mémoire de Master 2 Modélisation et Simulation en Mécanique, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Bowman E. T., Imre B., Laue J. & Springman S. M., 2008. Geotechnical centrifuge modeling of debris flows. In Proceedings of the fourth international conference, debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment, Chengdu, China, 10-13 September 2007.
- Brochot S., Marchi L., Lang M., 2002. L'estimation des volumes des laves torrentielles: méthodes disponibles et application au torrent du Poucet (Savoie). Bull. Eng. Geol. Environ. 61: 389-402.
- Chehata D., Zenit R. & Wassgren C. R., 2003. Dense granular flow around an immersed cylinder. Physics of Fluids 15 (6): 1622-1631.
- Chen C.L., 1988a. Generalized viscoplastic modeling of debris flow. Journal of Hydraulic Engineering 114 (3): 237-258.
- Chen C.L., 1988b. General solutions for viscoplastic debris flow. Journal of Hydraulic Engineering 114 (3): 259-282.
- Cojean R. & Gènevois R., 1999. Debris-flow triggering – technical report – debris-flow risk. Contract n° ENV4-T96-0253. CECDGXII, Bruxelles, 39 p.
- Coussot P., 1992. Rhéologie des boues et des laves torrentielles. Etude de dispersions et de suspensions concentrées. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble. 420 p.
- Coussot P., 1994. Steady laminar flow of concentrated mud suspensions in open channel. Journal of Hydraulic Research 32(4): 535-559.
- Coussot P. & Piau J.-M., 1994. On the behavior of fine mud suspensions. Rheologica Acta, n° 33, pp. 175-184.
- Coussot P. & Piau J.-M., 1995. A large-scale field coaxial cylinders rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions. J. Rheol. 39: 105-125.
- 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 p.
- Coussot P., Proust S. & Ancey C., 1996. Rheological interpretation of deposits of yield stress fluids. Journal of non-newtonian fluid mechanics 66: 55-70.
- Coussot P., 1997. Mudflow rheology and dynamics. IAHR monograph, BALKEMA.
- Coussot, P., Laigle, D., Arattano, M., Deganutti, A. & Marchi, L., 1998. Direct determination of rheological characteristics of debris flow. Journal of Hydraulic Engineering 8: 864-868.
- Cunge J.A., Holly F.M. & Verwey A., 1980. Practical Aspects of Computational River Hydraulics. Pitman, London, England.
- Darve F., Servant G., Laouafa F. & Khoa H.D.V., 2004. Failure in geomaterials, continuous and discrete analyses. Comp. Methods Appl. Mech. Engrg. 193: 3057-3085.
- Darve F. & Vardoulakis I., 2005. Instabilities and degradations in geomaterials. Darve and Vardoulakis (Eds.), Springer publ.
- Davies T. R. H., 1988. Debris-flow surges – A laboratory investigation. Versuchsanst. Für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zurich, Switzerland, 122 p.
- Denlinger R. P. & Iverson R. M., 2001. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain 2. Numerical predictions and experimental tests. Journal of Geophysical Research 106(B1): 553-566.
- Denlinger R. P. & Iverson R. M., 2004. Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 1. Theory and computation. Journal of Geophysical Research 109(F01014).
- Eckert N., 2007. Couplage données historiques-modélisation numérique pour la prédétermination des avalanches : une approche bayésienne. Thèse de doctorat en statistique appliquée aux sciences de l'environnement, AgroParisTech. 282 p.
- Fraccarollo L. & Toro E. F., 1995. Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems. Journal of Hydraulic Research 33: 843-864.
- Fraccarollo L. & Capart H., 2002. Riemann wave description of erosional dam-break flows. Journal of Fluid Mechanics 461: 183-228.
- Garcia-Martinez R. & Lopez J. L., 2005. Debris flows of December 1999 in Venezuela. In: M. Jakob & O. Hungr (eds.) Debris-flow hazards and related phenomena. Springer-Praxis books in geophysical sciences, SPRINGER-VERLAG: 519-538.
- Gray J. M. N. T., Tai Y.-C. & Noelle S., 2003. Shock waves, dead zones and particle-free regions in rapid granular free-surface flows. J. Fluid Mech. 491: 161-181.

- Guadagno F. M. & Revellino P., 2005. Debris avalanches and debris flows of the Campania Region (southern Italy). In: M. Jakob & O. Hungr (eds.) Debris-flow hazards and related phenomena. Springer-Praxis books in geophysical sciences, SPRINGER-VERLAG: 489-518.
- Harten A., Lax P. D. & Van Leer B., 1983. On upstream differencing and Godunov-type schemes for hyperbolic conservation laws. *SIAM Rev.* 25: 35-61.
- Heumader J., 2000. Technical debris-flow countermeasures in Austria – A review. In: G. F. Wieczorek & N. D. Naeser (eds.) Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings of the 2nd International DFHM Conference, Taipei, Taiwan. BALKEMA: 553-564.
- Holzinger G., Hübl J., 2005. Experiments dealing with impact forces caused by debris flows. In Geophysical Research Abstracts: European Geosciences Union, April, 2005, Wien, Vol. 7.
- Hübl J. & Steinwendtner H., 2000a. Estimation of rheological properties of viscous debris flows using a belt conveyor. *Phys. Chem. Earth (B)* 25(9): 751-755.
- Hübl J. & Steinwendtner H., 2000b. Zweidimensionale Modellierung von Murgängen anhand zweier ausgewählter Beispiele in Österreich. Internationales Symposium, Interpraevent 2000, Villach/Österreich, Tagungspublikation, Band 3: 179-190.
- Hübl J. & Fiebiger G., 2005. Debris-flow mitigation measures. In: M. Jakob & O. Hungr (eds.) Debris-flow hazards and related phenomena. Springer-Praxis books in geophysical sciences, SPRINGER-VERLAG: 445-487.
- Hungr O., Morgan G. C. & Kellerhals R., 1984. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal* 21: 663-677.
- Hungr O., 2005. Classification and terminology. In: M. Jakob & O. Hungr (eds.) Debris-flow hazards and related phenomena. Springer-Praxis books in geophysical sciences, SPRINGER-VERLAG: 9-23.
- Hungr O., McDougall S. & Bovis M., 2005. Entrainment of material by debris flow. In: M. Jakob & O. Hungr (eds.) Debris-flow hazards and related phenomena. Springer-Praxis books in geophysical sciences, SPRINGER-VERLAG: 135-158.
- Hürlimann M., 2000. Back analysis of Swiss debris flows events, Description of the results obtained from the FLO-2D simulations carried out during 2000. Report of Swiss Federal Institute WSL, Water Soil and Rock Movements: 2-14.
- Hutter K., Svendsen B. & Rickenmann D., 1996. Debris-flow modeling: A review. *Continuum Mechanics and Thermodynamics* 8 (1996): 1-35.
- Iverson R. M. & Denlinger R. P., 2001. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research* 106(B1): 537-552.
- Iverson R. M., 2003. The debris-flow rheology myth. Proceedings of the 3rd International Conference “Debris-Flow Hazards Mitigation”, Davos, Switzerland, 10-12 september 2003, D. Rickenmann & C.-L. Chen (Eds.), MILLPRESS: 303-314.
- Iverson R. M., Logan M. & Denlinger R. P., 2004. Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 2. Experimental tests. *Journal of Geophysical Research* 109: F01015.
- Iverson R., 2005. Debris-flow mechanics. In: M. Jakob & O. Hungr (eds.) Debris-flow hazards and related phenomena. Springer-Praxis books in geophysical sciences, SPRINGER-VERLAG: 105-134.
- Jin M. & Fread D. L., 1999. 1D modeling of mud/debris unsteady flows. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(8): 827-834.
- Johnson A.M., 1970. *Physical processes in Geology*. W.H. Freeman, San Francisco, 577p.
- Jop P., Forterre Y. & Pouliquen O., 2005. Crucial role of sidewalls for free surface granular flows: consequences for the rheology. *Journal of Fluid Mechanics* 541, 167-192.
- Jop P., Forterre Y. & Pouliquen O., 2006. A constitutive law for dense granular flows. *Nature* 441: 727-730.
- Lachamp P., Naaim M., Faug T. & Laigle D., 2002. Simulation of the effect of defense structures on granular flows, using SPH. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2: 203-209.
- Lachamp P., 2003. Modélisation numérique de l'effet d'un obstacle sur les écoulements de fluides à seuil par la méthode SPH. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier, Grenoble 1.
- Laigle, D. & Coussot, P. 1997. Numerical Modeling of Mudflows. *Journal of Hydraulic Engineering* 123(7): 617-623.

- Laigle D., 1997. A two-dimensional model for the study of debris flow spreading on a torrent debris fan, Proceedings of the 1st International Conference “Debris-Flow Hazards Mitigation”, San Francisco, California, USA, 7-9 august 1997. C.-L. Chen (Eds.) American Society of Civil Engineers: 123-132.
- Laigle D. & Marchi L., 2000. Example of mud/debris-flow hazard assessment, using numerical tools, Proceedings of the 2nd International Conference “Debris-Flow Hazards Mitigation”, Taipei, Taiwan, 16-18 august 2000, G. F. Wieczorek & N. Naeser (Eds.), BALKEMA: 417-424.
- Laigle D., Hector A.-F., Hübl J. & D. Rickenmann D., 2003a. Comparison of numerical simulation of muddy debris flow spreading to records of real events. Proceedings of the 3rd International Conference “Debris-Flow Hazards Mitigation”, Davos, Switzerland, 10-12 september 2003, D. Rickenmann & C.-L. Chen (Eds.), MILLPRESS: 635-646.
- Laigle D., Naaim M., Saramito P., Neyret F. & Cani M.-P., 2003b. Coulées de boue et avalanches virtuelles : un outil visuel de communication et de caractérisation pour les risques naturels en montagne, Ingénieries-EAT, n° spécial « Risques naturels et aménagement du territoire »: 129-138.
- Laigle D., Hector A.-F., Hübl J. & Rickenmann D., 2006. Confrontation de la simulation numérique de l'étalement de laves torrentielles boueuses à des observations d'événements réels. La Houille Blanche (6/2006): 105-112.
- Laigle D., Lachamp P. & Naaim M., 2007. SPH-based numerical investigation of mudflow and other complex fluid flow interactions with structures. Computational Geosciences 11(4): 297-306.
- Laugier P. & Cojean R., 2001. Analyse de scénarios d'événements « laves torrentielles » dans le bassin versant de l'Arbonne (Bourg-Saint-Maurice, Savoie, France). Revue Française de Géotechnique 95-96: 41-54.
- Liu F.K. & Mei C.C., 1989. Slow spreading of a sheet of Bingham fluid on an inclined plane. Journal of Fluid Mechanics 207: 505-529.
- Lucy L. B., 1977. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. Astronomical Journal 82(12): 1013-1024.
- Mahaut F., Ovarlez G. & Coussot P., 2007. Suspension de particules dans un fluide à seuil : approche expérimentale. In Actes du 18eme Congrès Français de Mécanique.
- Major J.J. & Pierson T.C., 1992. Debris flow rheology : experimental analysis of fine-grained slurries. Water Resources Research 28(3): 841-857.
- Malet J.-P., Maquaire O., Locat J. & Rémaitre A., 2004. Assessing debris flow hazards associated with slow moving landslides: methodology and numerical analyses. Landslides 1(1): 83-90.
- Malet J.-P., Laigle D., Rémaitre A. & Maquaire O., 2005. Triggering conditions and mobility of debris flows associated to complex earthflows. Geomorphology 66(1-4): 215-235.
- Marchi L. & Brochot S., 2000. Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises : morphométrie et processus de transport solide torrentiel. Revue de Géographie Alpine 88: 23-38.
- Marchi L., Arattano M. & Deganutti A. M., 2002. Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). Geomorphology 46(1-2): 1-17.
- Marchi L. & D'Agostino V., 2004. Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. Earth Surface Processes and Landforms 29: 207-220.
- Monaghan, J. J. & Gingold, R. A., 1983. Shock simulations by the particle method SPH. J. of Comp. Phy. 52: 374-389.
- Monaghan J. J., 1988. An introduction to SPH. Comp. Phys. Comm. 48: 89-96.
- Monaghan J. J., 1989. On the problem of penetration in particle methods. Journal of Computational Physics 82: 1-15.
- Monaghan J. J., 1994. Simulating free surface flow using SPH. Journal of Computational Physics 110: 399-406.
- Nicot F. & Darve F., 2006. Micro-mechanical investigation of material instability in granular assemblies. Int. J. of Solids and Structures 43: 3569-3595.
- Nicot F., Darve F. & Khoa, H.D.V., 2007a. Bifurcation and second-order work in geomaterials. Int. J. Num. Anal. Methods in Geomechanics 31: 1007-1032.
- Nicot F. & Darve F., 2007c. A micro-mechanical investigation of bifurcation in granular materials. Int. J. of Solids and Structures 44: 6630-6652.
- Nova R., 1994. Controllability of the incremental response of soil specimens subjected to arbitrary loading programs. Journal of Mechanical behavior of Materials 5(2): 193-201.

- Noveon 2007. website: <http://www.homecare.noveon.com/products/carbopol/carbopol.asp>
- Oger L., Ammi M., Valance A. & Beladjine D., 2005. Discrete Element Method to study the collision of one rapid sphere on 2D and 3D packing. *Eur. Phys J. E.* 17: 467-476.
- O'Brien J. S., Julien P. Y. & Fullerton W. T., 1993. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering* 119(2): 244-261.
- Parsons J. D., Whipple K. X. & Simoni A., 2001. Experimental study of the grain-flow, fluid-mud transition in debris flows. *Journal of Geology* 109: 427-447.
- Patra A. K., Bauer A. C., Nichita C. C., Pitman E. B., Sheridan M. F., Bursik M., Rupp B., Webber A., Stinton A. J., Namikawa L. M., Renschler C. S., 2005. Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 139: 1-21.
- Pazwash H. & Robertson J. M., 1975. Forces on bodies in Bingham fluids. *Journal of Hydraulic Research* 13 (1): 35-55.
- Petryk H., 1993. Theory of bifurcation and instability in time-independent plasticity. In Q.S. Nguyen (Ed.), *Bifurcation and stability of dissipative systems*, CISM Courses and Lectures, Springer 327: 95-152.
- Phillips C.J. & Davies T.R.H., 1991. Determining rheological parameters of debris flow material. *Geomorphology* 4: 101-110.
- Piau J.-M., 1996. Flow of a yield stress fluid in a long domain. Application to flow on an inclined plane. *Journal of Rheology* 40(4): 711-724.
- Pierson T. C., 2005. Hyperconcentrated flow – transitional process between water flow and debris flow. In: M. Jakob & O. Hungr (eds.) *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer-Praxis books in geophysical sciences, SPRINGER-VERLAG: 159-202.
- Pouliquen O., 1999. Scaling laws in granular flows down rough inclined planes. *Phys. Fluids* 11: 542-548.
- Pouliquen O. & Forterre Y., 2002. Friction law for dense granular flows: application to the motion of a mass down a rough inclined plane. *J. Fluid Mech.* 453: 133-151.
- Richard D., 1995. Les torrents à laves torrentielles dans les départements alpins. Situations génératrices et essai de typologie. Rapport interne Cemagref. 55 p.
- Rickenmann D. & Koch T., 1997. Comparison of debris flow modeling approaches. In *Proceedings of the 1st International Conference "Debris-Flow Hazards Mitigation"*, San Francisco, California, USA, 7-9 august 1997. C.-L. Chen (Eds.) American Society of Civil Engineers: 576-585.
- Rickenmann D., 1999. Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards* 19: 47-77.
- Rickenmann D. & Weber D., 2000. Flow resistance of natural and experimental debris flows in torrent channels. In: G. F. Wieczorek & N. D. Naeser (Eds.) *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, *Proceedings of the 2nd International DFHM Conference*, Taipei, Taiwan. BALKEMA: 245-254.
- Rickenmann D., Laigle D., McArdell B. W. & Hübl J., 2006. Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. *Comp. Geos.* 10: 241-264.
- Roberts G. P. & Barnes H. A., 2001. New measurements of the flow-curves for Carbopol dispersions without slip artifacts. *Rheologica Acta* 40 (5): 499-503.
- Rodriguez-Paz M. X. & Bonet J., 2004. A corrected smooth particle hydrodynamics method for the simulation of debris flows. *Numerical Methods for Partial Differential Equations* 20: 140-163.
- Roe P. L., 1981. Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes. *J. Comp. Phys.* 43: 357-372.
- Roqueplo P., 1997. *Entre savoir et décision, l'expertise scientifique*, Colloque Sciences en questions. INRA Editions.
- Saramito P. & Roquet N., 2002. Éléments finis et adaptation de maillage pour les écoulements de fluides à seuil. 34^{ème} congrès national d'analyse numérique, Anglet, 27-31 mai 2002.
- Sassa K. & Wang G. H., 2005. Mechanism of landslide-triggered debris flows: Liquefaction phenomena due to the undrained loading of torrent deposits. In: M. Jakob & O. Hungr (eds.) *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer-Praxis books in geophysical sciences, SPRINGER-VERLAG: 81-104.
- Savage S. B. & Hutter K., 1989. The motion of finite mass of granular material down a rough incline. *J. Fluid Mech.* 199: 177-215.

- Schuster R. L., 2000. Outburst debris-flows from failure of natural dams. In: G. F. Wieczorek & N. D. Naeser (eds.) Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings of the 2nd International DFHM Conference, Taipei, Taiwan. BALKEMA: 29-42.
- Stoker J.J., 1957. Water waves. Interscience, New York.
- Tacnet J.-M., Laigle D., Berger F., Dorren L. & Nedellec J.-L., 2005. Expertise des risques naturels gravitaires en montagne et estimation du risque résiduel : un exemple de la contribution et des limites actuelles des systèmes d'information. SIRNAT 2005 – Systèmes d'information et risques naturels : de la prévention à la gestion de crise, Montpellier, 10 – 11 mars 2005.
- Takahashi T., 1991. Debris flow, IAHR monograph, BALKEMA.
- Takahashi T., 2007. Debris Flow, Mechanics, Prediction and Countermeasures. Taylor & Francis/ BALKEMA.
- Tiberghien D., 2007. Etude expérimentale des interactions entre un écoulement à surface libre de fluide viscoplastique et un obstacle. Application aux laves torrentielles boueuses. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier, Grenoble 1.
- Tiberghien D., Laigle D., Naaim M., Thibert E., Ousset F., 2008. Experimental investigation of the interaction between mudflow and an obstacle. In proceedings of the 4th international conference Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Chengdu (China) 10-13 September 2007 (à paraître).
- Toro E. F., 1999. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction. SRINGER-VERLAG.
- Veyrat-Charvillon S., 2005. Elaboration d'une méthode de prédiction du volume maximal d'une lave torrentielle. Thèse de doctorat de l'université Blaise Pascal – Clermont-Ferrand 2.
- Vila J.P., 1986a. Sur la théorie et l'approximation numérique de problèmes hyperboliques non linéaires, applications aux équations de Saint Venant et à la modélisation des avalanches de neige dense. Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, 481 p.
- Vila J.P., 1986b. Simplified Godunov Schemes for 2x2 Systems of Conservation Laws. Journal of Numerical Analysis 23(6): 1173-1192.
- Wiegardt K., 1975. Experiments in granular flow. Annual Review of Fluid Mechanics 7: 89–114.
- Zanuttigh B. & Lamberti A., 2006. Experimental analysis of impact of dry avalanches on structures and implication for debris flows. Journal of Hydraulic research 44(4): 522-534

Annexe

Curriculum Vitae détaillé

A.1 Curriculum vitae

Etat civil :

Dominique LAIGLE

Date de naissance : 22 mars 1965

Nationalité : française

Emploi actuel : Ingénieur du ministère de l'agriculture, employé par le Cemagref

Affectation actuelle : Unité de recherche Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches du Cemagref de Grenoble

Fonction : Ingénieur-chercheur

Diplômes :

Ingénieur de l'ENGEES, septembre 1988

DEA « sciences et techniques de l'eau » de l'université Louis Pasteur de Strasbourg, septembre 1988 (mention Bien)

Doctorat de l'université Louis Pasteur de Strasbourg, spécialité « sciences et techniques de l'eau », mars 1991 : « une application de la modélisation mathématique et de l'optimisation de paramètres à la dynamique de l'eau et des nitrates dans un sol agricole » (mention : Très Honorable)

Intégré au corps des **Ingénieurs de Génie Rural, des Eaux et des Forêts** le 15 mars 2005, par concours interne exceptionnel du ministère chargé de l'agriculture.

A.2 Encadrements

A.2.1 Doctorants

Codirections :

Philippe Lachamp (2000-2003) INPG/UJF, école doctorale « Terre, Univers, Environnement », Modélisation numérique de l'effet d'un obstacle sur les écoulements de fluides à seuil par la méthode SPH. Directeur de thèse : Sedat Tardu (LEGI, UMR 5519). Thèse soutenue le 12 décembre 2003 (répertoriée parmi les 21 thèses exceptionnelles soutenues à l'UJF entre 2003 et 2005).

Didier Tiberghien (2004-2007) INPG/UJF, école doctorale « Terre, Univers, Environnement ». Etude expérimentale de l'interaction d'un écoulement à surface libre de fluide à seuil avec un obstacle. Application aux laves torrentielles boueuses. Directeur de thèse : Mohamed Naaim (Cemagref, UR ETNA). Thèse soutenue le 14 décembre 2007.

Assia Ghemmour (2006-2009) (co-encadrement avec Guillaume Chambon) INPG/UJF, école doctorale « Terre, Univers, Environnement », thème : rhéologie des laves torrentielles, influence et formation du front granulaire. Directeur de thèse : Albert Magnin (laboratoire de rhéologie, UMR 5520)

Autres contributions à l'encadrement de doctorants :

Vincent Boudières (2004-2007) Contribution au montage scientifique de la thèse UJF / IGA, école doctorale « sciences de l'homme, du politique et du territoire ». Contribution à l'analyse des politiques locales de gestion des risques sur les territoires touristiques de montagne.

Barbara Zanuttigh (2001) collaboration avec l'université de Bologne (Italie), échange PAI. Analysis of debris wave development with one-dimensional shallow-water equations

Mariolina Papa (1998) collaboration avec l'université de Bologne (Italie). Comparison of one-dimensional simulations of debris-flows to real events.

A.2.2 DEA, Master-2 recherche

Didier Tiberghien (2004), Master-2 de l'école doctorale « Terre, Univers, Environnement », Etude expérimentale d'un fluide à seuil, application aux laves torrentielles boueuses.

Anne-Françoise Hector (2002), DEA Mécanique et ingénierie, option sciences de l'eau de l'ULP Strasbourg et diplôme ingénieur ENGEES, Comparison between results of a numerical modelling of muddy debris flow spreading and real events (en collaboration avec l'Université Bodenkultur de Vienne, Autriche)

Emmanuel Mignot (2002), DEA Mécanique des Fluides et Transferts, Caractérisation rhéologique du Carbopol Ultrez 10 et mise en oeuvre pour l'étude expérimentale des interactions entre front et corps des laves torrentielles

Noémie Varado (2001), DEA MMGE et diplôme ingénieur ENGEES, Analyse du débordement latéral d'une lave torrentielle boueuse.

Philippe Lachamp (2000), DEA de mathématiques appliquées et diplôme ingénieur ESM2 Marseille, Influence d'un obstacle sur l'écoulement à surface libre d'un fluide visqueux, Modélisation numérique bidimensionnelle par la méthode SPH.

Frédéric Peillon (1997), DEA MFT et diplôme ingénieur ENGEES, Analyse de l'effet du front granulaire sur l'écoulement d'une lave torrentielle.

A.2.3 Diplômes de fin d'études d'écoles d'ingénieurs, Master-2 professionnel

Romain Bouvarel (2007), Master professionnel modélisation et simulation en mécanique, UJF Grenoble, Validation d'un code de calcul par la méthode SPH.

Sabahattin Dizdar (2006), Master professionnel modélisation et simulation en mécanique, UJF Grenoble, Smooth Particle Hydrodynamics pour les bac+5.

Christophe Gros (1995-1996), ENGEES, Contribution à l'adaptation aux conditions complexes du terrain d'un modèle d'écoulement des laves torrentielles boueuses.

Guillaume Sylvan (1995), Ecole Polytechnique, Modélisation du transport solide en torrent en conditions de fortes variations temporelles de la géométrie du chenal.

Nicolas Kraak (1995), ENSEEIHT, Confrontation d'un outil de modélisation des laves torrentielles à des événements de terrain.

François-Xavier Cereza (1994-1995), ENGEES, Ecoulements bidimensionnels de laves torrentielles boueuses, Confrontation de la théorie à l'expérimentation par le biais d'un outil de modélisation numérique.

Sigrun Felgentreff et Marie Al-Hallak (1993), année spéciale ENSHMG, Etude de l'arrêt de vagues de laves torrentielles.

A.2.4 Autres encadrements

Sophie Schuster (2004), Maitrise faculté de géographie d'aménagement, ULP Strasbourg, Etude des méthodes de suivi et de prévention des risques de vidange des lacs glaciaires, Modélisation du risque de vidange du lac supraglaciaire de Rochemelon sur la commune de Bessans, dans la vallée de la Haute Maurienne (Savoie).

Céline Degrave (2001), Maitrise faculté de géographie d'aménagement, ULP Strasbourg, La catastrophe glaciaire de Tête Rousse de 1892, Description, analyse et proposition d'étude du risque actuel dans la vallée de Saint-Gervais-les-Bains (Haute-Savoie).

Julien Deffayet (2001), DUT génie thermique et énergie, Grenoble, Etude des débordements de lave torrentielle boueuse.

Claire Odello et Jérôme Ardin (1994), licence de physique et applications UJF Grenoble, Etude de l'écoulement des laves torrentielles en bidimensionnel.

Arnaud Molié (1993), licence de physique et applications UJF Grenoble, Etude expérimentale de l'écoulement des laves torrentielles.

A.3 Contributions à l'organisation de colloques scientifiques

Chairman de la session « mechanics of debris flows II », 4th International Conference “Debris-Flow Hazards Mitigation”, Chengdu, China, 10-13 September 2007

Chairman de la session « application of debris-flow simulation models », 3rd International Conference “Debris-Flow Hazards Mitigation”, Davos, Switzerland, 10-12 September 2003

Chairman de la session « debris-flow initiation processes », 2nd International Conference “Debris-Flow Hazards Mitigation”, Taipei, Taiwan, 16-18 August 2000.

Membre permanent depuis 2001 du comité consultatif international (advisory committee) d'organisation de la conférence « Debris-Flow Hazards Mitigation : Mechanics, Prediction and Assessment »

Organisateur du premier workshop du projet Debris-Flow Risk, Grenoble, 13 – 14 juin 1997

Coorganisateur des séminaires internes de l'unité de recherche Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches du Cemagref

A.4 Actions d'évaluation

Evaluations d'articles pour le compte de :

- Journal of Hydraulic Engineering, ASCE
- Computers & Geosciences
- International Journal for Numerical Methods in Engineering
- International Journal of Computational Fluid Dynamics
- Italian Geotechnical Journal

Expert pour le compte du Fonds National Suisse

A.5 Projets de recherche

A.5.1 Projets européens

Coordinateur des actions de recherche du Cemagref et représentant officiel de l'établissement dans le cadre des 3 projets PCRD suivants :

Contributions personnelles portant sur la réalisation et la coordination des travaux de recherche de l'établissement dans le cadre de ces projets, la production des rapports scientifiques (rapports de groupes de tâches et rapports de partenaire) et financiers, la participation aux réunions de projet au titre de représentant officiel du Cemagref et la gestion financière des subventions allouées.

THARMIT

Projet 5^e PCRD EVG1-CT1999-0001 (2000-2003): Torrent hazard control and risk mitigation in the European Alps. Partenaires : BOKU, WSL, Armines-CGI, CNR-IRPI, Universités de Berlin, Padoue, Trente, Bologne, Utrecht. Projet composé de 7 groupes de tâches :

WP 1: Monitoring and data-base

WP 2: Improvement of existing models

WP 3: Evaluation and comparison of existing numerical models

WP 4: Geologic, geomorphologic and geomechanic studies and approaches to hazard assessment

WP 5: GIS modelling, hazard assessment and zoning

WP 6: Technical countermeasures and warning systems

WP 7: Guidelines to end-users

Contributions personnelles : forte implication dans la phase de définition des objectifs scientifiques du projet, contributions aux WP 2, WP 3 et WP 6, responsable du WP 7.

DEBRIS-FLOW RISK

Projet 4^e PCRD ENV4-CT96-0253 (1996-1999): Debris flow management and risk assessment in the Alpine region. Partenaires : Armines-CGI, Laboratoire de rhéologie (UJF), CNR-IRPI, Universités de Bologne, Padoue, Trente et Florence, ONF-RTM. Projet composé de 4 groupes de tâches :

Task A: debris flow triggering

Task B: Debris flow rheology and flow resistance

Task C: Mathematical modelling and risk assessment

Task D: Field monitoring and real time management of debris flows

Contributions personnelles aux tâches B et C.

DEBRIS-FLOW

Projet 3^e PCRD EV5V-CT94-0453 (1994-1996) : Contribution to the reduction of debris flow damage, with the analysis of triggering factors, initiation, propagation and deposition phenomena in the Alpine

region. Partenaires : Armines-CGI, Universités de Trente et de Berne, CNR-IRPI, Geo 7 Berne (cabinet d'études), ONF-RTM. Projet composé de 6 groupes de tâches :

Task 1: Review of available data about debris flows, and factors which control the initiation, the propagation and the deposition phenomena

Task 2: Back analysis of debris flow events. Typology of debris flows

Task 3: Test areas in instrumented watersheds

Task 4: Numerical modelling of the initiation of debris flows via land-sliding

Task 5: Numerical and physical modelling of the propagation of debris flows

Task 6: Definition of a debris flow damage reduction methodology

Contributions personnelles aux tâches 1, 2, 5 et 6.

Autres contributions à des projets européens :

IRASMOS

STREP du 6^e PCRD n°018412 (2005-2007): Integral risk management of extremely rapid mass movements. Partenaires : WSL/SLF, BOKU, NGI, Météo-France, Politecnico Milan, Universités de Trente et de Pavie. Projet composé de 5 groupes de tâches :

WP 1: From cause to forecasting

WP 2: Countermeasures

WP 3: Hazard mapping and assessment

WP 4: Vulnerability

WP 5: Integral risk management

Contributions personnelles prévues sur l'ensemble des WP pour ce qui concerne les phénomènes torrentiels.

GLACIORISK

Projet 5^e PCRD EVG1-2000-00512 (2000-2003): Survey and prevention of extreme glaciological hazards in European mountainous regions.

Contribution personnelle : mise en place d'outils de simulation numérique d'écoulements torrentiels résultant de la rupture d'un lac proglaciaire, application au lac glaciaire de Rochemelon (Savoie).

Connexion des réseaux de données et mise en commun des connaissances et des expériences pour la gestion des risques d'inondations en région alpine

Projet Interreg II France-Italie (1994-1999). Partenaire principal : Politecnico de Turin.

Contribution personnelle portant sur la confrontation d'un outil numérique de calcul des écoulements de laves torrentielles à un événement de terrain.

A.5.2 Projets nationaux

OPALE

Projet ANR-RGCU (2005-2008) : Ouvrages de protection et bâtiments pavillonnaires soumis à l'action des avalanches : sollicitation, réponse, dimensionnement. Partenaires : GIS VOR¹.

Contribution personnelle : responsable de la tâche « analyse de l'interaction écoulement / ouvrages – modélisation numérique »

BARALTISUR

Projet RDT (risque, décision, territoire) du MEDD (2007-2008), dont l'objectif est la rédaction d'un guide technique pour la conception, la réalisation et le suivi des retenues d'altitude, notamment celles

¹ Vulnérabilité des Ouvrages aux Risques – UR ETNA du Cemagref ; laboratoire 3S, LGIT, LGCA (UJF – INPG Grenoble) ; LOCIE - ESIGEC (Université de Savoie), URGC - INSA Lyon, CETE Lyon.

destinées à l’approvisionnement en eau pour la production de neige de culture. Partenaires : unités de recherche ouvrages hydrauliques du Cemagref (Aix-en-Provence et Bordeaux), EDF, ISL (cabinet d’études).

Contribution personnelle : responsable de la tâche : « définition des aléas naturels susceptibles d’affecter une retenue ».

Interaction entre un écoulement à surface libre de fluide complexe et un obstacle, application aux laves torrentielles et aux avalanches

Projet financé par la Fondation MAIF (2005-2008). Financement principal du travail de thèse de D. Tiberghien Contribution personnelle : responsable de projet.

Risques naturels en montagne : mouvements de terrain et risques hydrologiques associés et induits

Projet financé par la Fondation MAIF, (1998-2001). Partenaires : Armines-CGI, LCPC, CETE Lyon, ONF-RTM.

Contribution personnelle : développement d’une méthodologie d’étude des risques liés aux écoulements de laves torrentielles, allant de la phase de déclenchement à la phase d’étalement et d’arrêt, s’appuyant sur des outils de simulation numérique.

Modélisation numérique des écoulements de laves torrentielles

Projet PNRH (1993-1994). Développement d’un outil numérique de simulation des écoulements à surface libre de fluide complexe, adapté aux laves torrentielles

Contribution personnelle : responsable de projet.

A.5.3 Projets régionaux

Coulées de boue et avalanches virtuelles : un outil visuel de communication et d’aide à la décision pour les risques naturels en montagne

Projet financé par le Pôle Grenoblois Risques naturels (2001). Partenaires : LMC – IMAG, GRAVIR - INRIA Rhône-Alpes, LEGI.

Contributions personnelles : réalisation de simulations d’écoulements torrentiels en conditions de terrain, dans l’optique d’une représentation visuellement réaliste du phénomène et mise au point de techniques de génération de maillages de calcul adaptatifs, pour ce type d’écoulement.

A.5.4 Projets d’établissement

Coulées de boue et avalanches virtuelles : un outil visuel de communication et d’aide à la décision pour les risques naturels en montagne

Projet ASS (action scientifique structurante) Risques Naturels (2002). Financement complémentaire du projet précédent

Contribution personnelle : responsable de projet.

A.6 Etudes et expertises

Membre du comité de rédaction d’un guide de recommandations pour la conception, la réhabilitation et le suivi des retenues d’altitude, (2007-2008).

Membre du comité d’experts chargé de la rédaction du guide méthodologique PPR (Plan de Prévention des Risques) « crues des torrents et rivières de montagne », pour le compte du ministère de l’Ecologie, 2005-2006.

Service de Restauration des terrains en Montagne, Délégation nationale chaîne des Pyrénées. Forêt domaniale de la neste du Louron, bassin versant du Rioulong. Etude de l'aléa « laves torrentielles » sur le cône de déjection du torrent du Rioulong, 2005.

Préfecture du Puy-de-Dôme, maîtrise d'ouvrage déléguée : DDE du Puy-de-Dôme, expertise réalisée via un groupement conjoint BRGM – LRPC – Cemagref. Phénomènes de type coulée de boue et écoulements torrentiels au lieu-dit « Les Egravats », commune du Mont-Dore (63). Caractérisation de l'aléa torrentiel et dimensionnement des ouvrages de protection passive, 2004.

Préfecture de la Savoie, protection civile. Contribution à la gestion de la situation de crise engendrée par le risque de rupture du lac pro-glaciaire de Rochemelon, commune de Bessans (73). Caractérisation hydraulique des conséquences potentielles à l'aval, sur la base de différents scénarios de rupture, 2004.

Service de Restauration des Terrains en Montagne de la Savoie. Analyse des processus hydrauliques et de transport solide pouvant résulter d'une possible débâcle du lac supra-glaciaire de Rochemelon, conséquences sur la vallée du Ribon et sur la plaine de Bessans (73), 2003.

Service de Restauration des Terrains en Montagne des Alpes de Haute-Provence. Analyse des risques potentiels pour la ville de Digne-les-bains (04) des phénomènes de laves torrentielles ou de transport solide pouvant résulter de l'activité du glissement de terrain de Villard-des-Dourbes, 2003.

Direction Départementale de l'Équipement des Hautes-Alpes. Calcul du temps de propagation probable d'une lave torrentielle survenant dans le torrent du Riou Sec, commune de l'Argentière-la-Bessée (05), 1997.

Service de Restauration des Terrains en Montagne de la Haute-Savoie. Etude des risques hydrauliques liés à la débâcle potentielle d'une retenue naturelle sur le torrent de la Chaise, commune de St Ferreol (74), 1995.

Syndicat intercommunal du torrent du Bresson, communes de Saint-Vincent-de-Mercuze et du Touvet. Torrent du Bresson : Etude préalable à l'aménagement. 1993.

Plusieurs appuis ponctuels au profit notamment de différents services départementaux de Restauration des Terrains en montagne, de l'EPFL, de Sogreah, etc.

A.7 Enseignements

A.7.1 Formation initiale

« Connaissance des laves torrentielles », Cours de troisième cycle de l'école doctorale « Terre, Univers, Environnement » (3 heures/an, 1997 - 2005)

« Hydraulique torrentielle », ENGEES Strasbourg (6 heures/an, 1994 - 1999)

« Hydraulique des laves torrentielles », Polytech'Grenoble, option géotechnique (3 heures/an, 2001 – 2004)

« Les crues torrentielles », Master Géosciences Appliquées à l'Ingénierie de l'Aménagement, Université de Savoie (5 heures en 2007)

A.7.2 Formation continue

Organisateur de la session de formation destinée aux services de Restauration des Terrains en Montagne : « Laves torrentielles : spécificités, méthodes de diagnostic et outils d'aide à l'expertise », octobre-novembre 2006.

Coorganisateur et encadrant de l'Université européenne d'été sur les risques naturels (2005). Thème : « laves torrentielles », Courmayeur (Italie), 18-24 septembre 2005.

Encadrant de l'Université européenne d'été sur les risques naturels (2001). Thème : « risques torrentiels », Serre-Chevalier, 10-15 septembre 2001.

Intervenant dans plusieurs sessions de formation continue, organisées par le Cemagref ou l'ENGREF, destinées aux praticiens français (notamment ingénieurs et techniciens des services de Restauration des Terrains en Montagne) thème : « hydraulique torrentielle et outils pratiques », sessions en 1998, 1999, 2002 et 2007.

A.8 Partenariat principal

National :

- Armines-CGI - Ecole des Mines de Paris : projets PCRD « Debris-flow », « Debris-Flow Risk », « THARMIT », projet Fondation MAIF « Risques naturels en montagne »
- Laboratoire de Rhéologie UJF-Grenoble : projet PCRD « Debris-Flow Risk »
- Fédération de recherche RNVO : projet ANR « OPALE »
- Laboratoire LMC - IMAG : projets PGRN et ASSRN « coulées de boue et avalanches virtuelles »
- GRAVIR - INRIA Rhône-Alpes : projets PGRN et ASSRN « coulées de boue et avalanches virtuelles »
- LEGI : projets PGRN et ASSRN « coulées de boue et avalanches virtuelles »
- Faculté de géographie - Université de Strasbourg : publications, projets soumis
- Laboratoire Géophen - Université de Caen : publications, projets soumis
- Département de génie mathématique - INSA de Toulouse : appui à la thèse de P. Lachamp

Européen :

- Institut des risques naturels alpins - Université Bodenkultur (Vienne) : projet PCRD « THARMIT » et « IRASMOS »
- Division risques naturels - WSL (Zurich) : projet PCRD « THARMIT » et « IRASMOS »
- DISTART - Université de Bologne : projets PCRD « Debris-Flow Risk » et « THARMIT », accueil M. Papa, échange PAI B. Zanuttigh, P. Lachamp, T. Faug.
- Département génie-civil - Université de Trente : projets PCRD « Debris-flow », « Debris-Flow Risk » et « THARMIT »
- Département de géologie - Université de Padoue : projets PCRD « Debris-Flow Risk » et « THARMIT »
- Département des sciences de la Terre - Université de Florence : projet PCRD « Debris-Flow Risk »
- Faculté des sciences géographiques - Université d'Utrecht : projet PCRD « THARMIT »
- Institut des sciences géographiques - Université libre de Berlin : projet PCRD « Debris-Flow Risk » et « THARMIT »
- CNR-IRPI (Turin et Padoue) : projets PCRD « Debris-flow », « Debris-Flow Risk » et « THARMIT »
- Département d'hydraulique - Politecnico de Turin : projet Interreg II France-Italie «Connexion des réseaux de données...»
- Laboratoire d'hydraulique environnementale - Ecole polytechnique fédérale de Lausanne : projets soumis.

Contacts internationaux :

- Université Lincoln (Nouvelle-Zélande)
- Université centrale du Venezuela
- United-States Geological Survey
- Université de Taipei (Taïwan)

A.9 Publications

A.9.1 Chapitres d'ouvrages

Guide méthodologique « Plans de prévention des risques naturels (PPR) : crues torrentiels » (2007). Rédaction du chapitre : La problématique des crues des torrents de montagne. Ouvrage coordonné par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. A paraître à la Documentation Française.

Guide méthodologique « Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi des retenues d'altitude » (2008). Rédaction des chapitres : Etude des aléas spécifiques aux zones de montagne, Ouvrages de protection contre les aléas naturels et Phénomènes torrentiels potentiellement générés en cas de rupture. A paraître aux Editions du Cemagref.

A.9.2 Revues référencées à l'ISI

D. Laigle, P. Lachamp, M. Naaim (2007), SPH-based numerical investigation of mudflow and other complex fluid flow interactions with structures, *Computational Geosciences*, 11(4): 297-306.

D. Rickenmann, **D. Laigle**, B. W. McArdeall, J. Hübl (2006), Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events, *Computational Geosciences*, 10(2): 241-264.

D. Laigle, A.-F. Hector, J. Hübl, D. Rickenmann (2006) Confrontation de la simulation numérique de l'étalement de laves torrentielles boueuses à des observations d'événements réels. *La Houille Blanche* (6/2006): 105-112.

J.-P. Malet, **D. Laigle**, A. Remaître, O. Maquaire (2005), Triggering conditions and mobility of debris flows associated to complex earthflows, *Geomorphology*, 66(1-4): 215-235.

P. Coussot, **D. Laigle**, M. Arattano, A. Deganutti, L. Marchi (2000) Direct determination of rheological characteristics of debris-flows (discussion), *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 126(2): 158-159.

P. Coussot, **D. Laigle**, M. Arattano, A. Deganutti, L. Marchi (1998) Direct determination of rheological characteristics of debris-flows, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 124(8): 865-868.

D. Laigle, P. Coussot (1997), Numerical modeling of mudflows, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 123(7): 617-623.

D. Laigle, P. Coussot (1994), Modélisation numérique des écoulements de laves torrentielles, *La Houille Blanche*, n° 3-1994 : 50-56.

P. Coussot, **D. Laigle** (1994), Etude des laves torrentielles sur modèle réduit en similitude des phénomènes torrentiels, *La Houille Blanche*, n° 3-1994 : 44-49.

A.9.3 Autres revues

D. Laigle, M. Naaim, P. Saramito, F. Neyret, M.-P. Cani (2003), Coulées de boue et avalanches virtuelles : un outil visuel de communication et de caractérisation pour les risques naturels en montagne, *Ingénieries-EAT*, n° spécial « Risques naturels et aménagement du territoire » : 129-138.

P. Lachamp, T. Faug, M. Naaim, **D. Laigle** (2002), Simulation of the effect of defence structures on granular flows using SPH, *Natural Hazards and Earth System Sciences* (2002) 2: 203-209.

D. Laigle (1998), La modélisation des écoulements de laves torrentielles boueuses, de la validation en laboratoire au zonage des risques sur le terrain, *Ingénieries-EAT* n° 15 : 79-88.

D. Laigle, J. Kugler, H. Kobus, L. Zilliox (1990), Contamination des eaux souterraines par les nitrates, *Recherches et applications dans le cadre de la coopération franco-allemande, Hydrogéologie*, 1(1990) : 51-60.

A.9.4 Actes de colloques à comité de lecture international

D. Tiberghien, **D. Laigle**, M. Naaim, E. Thibert, F. Ousset (2007), Experimental investigation of mudflow-structure interactions, à paraître dans : *Proceedings of the 4th International Conference “Debris-Flow Hazards Mitigation”*, Chengdu, China, 10-13 September 2007.

J.-P. Malet, A. Remaître, **D. Laigle**, J. Locat, O. Maquaire (2004), Cross-calibration of two debris-flow runout models on a clay-shales catchment of Southeast France. *Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides*, Rio de Janeiro, Brazil, June 2004. Edited by W. Lacerda. BALKEMA 2004, 1367-1373.

D. Laigle, A.-F. Hector, J. Hübl, D. Rickenmann (2003), Comparison of numerical simulation of muddy debris flow spreading to records of real events, *Proceedings of the 3rd International Conference “Debris-Flow Hazards Mitigation”*, Davos, Switzerland, 10-12 september 2003, Edited by D. Rickenmann & C.-I. Chen, MILLPRESS 2003, 635-646. (oral presentation).

A. Remaître, **D. Laigle**, C. Ancey, J.-P. Malet, O. Maquaire (2003), Torrential hazard assessment using a debris-flow runout model, *Proceedings of the International Conference on Fast Slope Movements: Prediction and Prevention for Risk Mitigation*. 11-13 May 2003, Sorrento, Italy, Edited by L. Picarelli, Pàtron Editore: Bologna, 445-452.

D. Laigle, L. Marchi (2000), Example of mud/debris-flow hazard assessment, using numerical tools, *Proceedings of the 2nd International Conference “Debris-Flow Hazards Mitigation”*, Taipei, Taiwan, 16-18 august 2000, Edited by G. F. Wiczorek & N. Naeser, BALKEMA 2000, 417-424. (oral presentation).

D. Laigle (1997), A two-dimensional model for the study of debris flow spreading on a torrent debris fan, *Proceedings of the 1st International Conference “Debris-Flow Hazards Mitigation”*, San Francisco, California, USA, 7-9 august 1997, Edited by C.-I. Chen, American Society of Civil Engineers, 123-132. (oral presentation).

D. Laigle (1996) Two-dimensional modelling of debris flows spreading on alluvial fans. *Proceedings 2nd International Conference on Hydroinformatics*, Zurich, Switzerland, 9-13 September 1996, Vol. 1, Edited by A. Muller, BALKEMA 1996, 651-657. (oral presentation).

D. Laigle, P. Coussot (1994), Numerical modelling of debris flow dynamics, *Proceedings of the international workshop on floods and inundations related to large earth movements*, Edited by A. Armanini, Trent, Italy, 4-7 October 1994, A11.1-A11.11 (oral presentation).

A.9.5 Autres communications à un congrès international

D. Laigle, P. Lachamp, M. Naaim (2005) Theoretical study of debris flow – structure interactions using a SPH-based numerical model, Abstract, In: European Geosciences Union : 1st General Assembly of the European Geosciences Union , 25-30 April 2005, Vienna, Austria; Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 03089, 2005. (oral presentation).

D. Rickenmann, B.W. McArdeell, **D. Laigle** (2004) Comparison of debris flow simulations with field events. Abstract, In: European Geosciences Union: 1st General Assembly of the European Geosciences Union, 25-30 April 2004, Nice, France; Geophysical Research Abstracts, Vol. 6, 04138, 2004.

P. Lachamp, T. Faug, M. Naaim, **D. Laigle** (2004) Implementation of a friction law in SPH formalism to simulate granular flows. Abstract, In: European Geosciences Union: 1st General Assembly of the European Geosciences Union, 25-30 April 2004, Nice, France; Geophysical Research Abstracts, Vol. 6, 02491, 2004.

A. Remaitre, J.-P. Malet, O. Maquaire, **D. Laigle**, C. Ancey, J. Locat (2003) Torrential hazard assessment using a debris-flow runout model. The case of the Faucon stream. International conference on fast slope movements, prediction and prevention for risk mitigation, Napoli & Sorrento, 11-13 May 2003. (poster)

D. Laigle (2000) Numerical modelling of mud/debris flows: from the validation at the laboratory to the zoning of hazards in the field, Proceedings of the congress: The debris-flow disaster of December 1999 in Venezuela, Caracas, Venezuela, 27 November – 1 December 2000.

D. Laigle, P. Frey (1999) Mud/debris-flows hazard assessment on a torrent alluvial fan with the help of numerical model. Open session on mass movements, monitoring, modelling and mapping. EGS XXIV general assembly, Den Haag (Netherlands), 19-23 April 1999.

D. Laigle (1999) Numerical modelling of mud/debris-flows and risk assessment on a torrent alluvial fan. Proceedings of the XXVIII IAHR Congress “Hydraulic Engineering for Sustainable Water Resources Management at the Turn of the Millennium”, Graz, Austria, 22 - 27 August 1999. CD-ROM. (poster).

P. Coussot, **D. Laigle** (1997) Rhéologie et lois d'écoulement des laves torrentielles boueuses. Séminaire sur les laves torrentielles, EPF-Lausanne, 25 février 1997. (présentation orale).

D. Laigle, P. Coussot (1995): Numerical modelling of debris flow dynamics, Proceedings of the “Pierre Beghin” international workshop on rapid gravitational movements, Grenoble, 6-10 December 1993. Cemagref-Editions (oral presentation)

D. Laigle, P. Coussot (1994) 1-dimensional modelling of debris-flows. EGS, XXI General Assembly, Grenoble, 25-29 April 1994. (oral presentation + poster)

A.9.6 Communications à un congrès national

J.-M. Tacnet, **D. Laigle**, F. Berger, L. Dorren, J.-L. Nedellec (2005) Expertise des risques naturels gravitaires en montagne et estimation du risque résiduel : un exemple de la contribution et des limites actuelles des systèmes d'information. SIRNAT 2005 – Systèmes d'information et risques naturels : de la prévention à la gestion de crise, Montpellier, 10 – 11 mars 2005

D. Laigle (1998) La modélisation des écoulements de laves torrentielles boueuses. De la validation au laboratoire au zonage des risques sur le terrain. Actes du séminaire de rhéologie, Paris, 19-20 mai 1998. Cemagref-Editions

P. Coussot, **D. Laigle**, M. Arattano, A. M. Deganutti, L. Marchi (1996) Determinazione delle caratteristiche reologiche di un debris flow. XXV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Torino, 16-18 settembre 1996, Vol I, 124-135 (en italien).

D. Laigle (1995): Modélisation bidimensionnelle des étalements de laves torrentielles. Actes du séminaire inter-chercheurs. Les modèles au Cemagref : formulation validation pertinence, tome1, Gif-sur-Yvette, 12-13 octobre 1995, Cemagref Editions. (présentation orale)

D. Laigle, P. Coussot, (1993) Modélisation numérique des laves torrentielles. Colloque de la Société Hydrotechnique de France « Le fond des rivières et du littoral » Paris, novembre 1993. (présentation orale)

A.10 Conférencier invité

Panel discussion - “recent developments in debris-flow hazards prediction and assessment”, 4th International Conference “Debris-Flow Hazards Mitigation”, Chengdu, China, 10-13 September 2007

Ecole thématique CNRS – Université de Marne-la-vallée « risques mouvements de terrain : méthodes et applications », Marne-la-vallée 3-7 octobre 2005. Titre de l’intervention : « La propagation des laves torrentielles : modélisation et simulations numériques ».

Colloque 2005 du projet Interreg III-A-Alcotra, Risques hydrogéologiques en montagne : parades et surveillances, Albertville, 7-9 juin 2005. Titre de l’intervention : « Risques d’obstruction des cours d’eau et débâcles brutales »

THARMIT course « debris and mud flows: practical tools for hazard assessment, technical countermeasures and warning systems for the mitigation of risk » organized by the CUDAM faculty of engineering, Trent (Italy), Oct. 28 – Nov. 1, 2003. Title of lecture: “Depth integrated phenomenological laws; theoretical models and empirical expressions. Sediment transport analogies”

Journées Savoisiennes de mathématiques appliqués, équations de Saint-Venant, théorie et applications, organisées par le laboratoire de mathématiques de l’Université de Savoie, Le Bourget-du-lac, 16-17 mai 2002, Titre de l’intervention : « Equations de Saint-Venant pour les fluides géophysiques à rhéologie complexe, exemples d’application aux avalanches et aux coulées de boue ».

Séminaire de l’équipe Equations aux Dérivées Partielles, Laboratoire de Modélisation et Calcul de l’IMAG-UMR 5523, 31 janvier 2002. Titre de l’intervention : « Modèles de champ moyen et de champ proche pour l’étude des écoulements à surface libre de matériaux visco-plastiques ou granulaires : application aux laves torrentielles »

Panel discussion - “technology transfer from debris-flow mechanics to hazard prediction and assessment”, 2nd International Conference “Debris-Flow Hazards Mitigation”, Taipei, Taiwan, 16-18 August 2000

Résumé

Les laves torrentielles sont des phénomènes gravitaires rapides qui peuvent se déclencher, notamment à la faveur d'événements météorologiques intenses. Ces phénomènes peuvent générer des dégâts importants aux infrastructures et menacer la vie humaine. Les écoulements des laves torrentielles sont abordés ici principalement dans le cadre de la mécanique des fluides homogènes. Dans une première partie, sont présentées les principales caractéristiques du déclenchement et de la propagation du phénomène, ainsi que les hypothèses et grands axes de la démarche scientifique exposée dans la suite du document. Dans une deuxième partie, est présenté un modèle de type champ proche dédié à la simulation d'écoulements chenalisés de laves torrentielles. Des simulations sont confrontées à des résultats expérimentaux de laboratoire et à des observations de terrain. Dans une troisième partie, est présenté un modèle de type champ proche dédié à la simulation d'étalements de laves torrentielles sur un cône de déjection. Des simulations sont confrontées à des résultats expérimentaux de laboratoire et à des observations de terrain. Dans une quatrième partie est présentée une démarche de prédétermination des caractéristiques d'écoulement des laves torrentielles, fondée sur l'utilisation de scénarios. Quelques méthodes d'évaluation de la magnitude des phénomènes et des propriétés rhéologiques du matériau qui les compose sont présentées. L'approche par scénarios est illustrée par un exemple de terrain. Dans une cinquième partie, sont abordées les interactions écoulements – obstacles, de façon numérique grâce à un modèle de type champ proche puis de façon expérimentale. Enfin, dans une sixième partie, est dressé un bilan des résultats personnels obtenus à ce jour et des perspectives en termes de futurs travaux de recherche sont exposées.

Abstract

Modelling of rapid gravity-driven flows. Application to the mud and debris-flow risk management.

Mud and debris-flows are rapid gravity-driven phenomena which can be triggered after intense rainfall. Such phenomena can generate damage to infrastructure and threaten human lives. Here, mud and debris-flows are mainly considered in the framework of homogeneous fluid mechanics. In the first part, the main features of mud and debris-flow triggering and propagation are presented, as well as the assumptions and main axes of the scientific approach exposed in the present document. In the second part, a numerical model is presented; it aims at simulating mud and debris-flows in channels. Simulations are compared to laboratory experiments and field observations. In the third part, a numerical model is presented; it aims at simulating the spreading of mud and debris-flows onto alluvial fans. Simulations are compared to laboratory experiments and field observations. In the fourth part, a scenario-based approach is presented; it aims at predicting mud and debris-flow features. Several methods of magnitude assessment and evaluation of the rheological properties of mud and debris-flow material are also presented. The scenario-based approach is exemplified by a field study. In the fifth part, flow – structures interactions are considered, using numerical and experimental approaches. In the sixth part, main personal results are summarised and perspectives of future research work are presented.