

Approche type "Saint Venant" pour la modélisation des avalanches rocheuses

De l'identification des lois de comportement à la prédétermination du risque

Mohamed Naaim
Division Nivologie - Cemagref
BP:76 , F-38402 Saint Martin d'Hères
Email : mohamed.naaim@cemagref.fr

Introduction

Les matériaux constitutifs des avalanches rocheuses sont des rochers fracturés et parfois de l'eau. La rhéologie des écoulements des matériaux saturés d'eau sont décrits dans [Cousot 93] qui a traité les milieux hyperconcentrés et tout particulièrement le cas des laves torrentielles boueuses. Le cas des écoulements des matériaux granulaires secs a depuis longtemps fait l'objet de recherches en termes de rhéologie. On citera les travaux pionniers de [Bagnold,54]. Depuis, plusieurs recherches théoriques ont traité des lois d'écoulements des matériaux granulaires : [Ogawa78], [Ackerman et Shen 78], [Savage,79], [Haff,83], et [Savage et Jeffrey,82] ainsi que plusieurs travaux de Savage et Hutter tant théoriques qu'expérimentaux [1,2,3]. Haff [x] a décrit les limites de l'assimilation d'un matériau granulaire à un fluide simple. Des différences importantes existent entre le grain et la molécule tant au niveau de la masse qu'au niveau du diamètre. L'interaction entre les molécules est complètement élastique alors que l'interaction grain-grain peut se faire aussi bien par choc que par friction et s'accompagne toujours de perte d'énergie. La granulométrie étalée, la forme non régulière des grains, et le fait que les chocs grain-grain ne soient pas toujours centrés, créent de nouvelles difficultés que la théorie doit prendre en compte pour l'établissement de lois de comportement pour les matériaux granulaires.

Bien que les équations de Saint Venant aient été écrites pour les écoulements hydrauliques à surface libre, leur domaine d'application s'est étendue ces dernières années à la modélisation des écoulements gravitaires rapides de fluides à rhéologie complexe tels que les avalanches rocheuses.

Modèle numérique

Dans le cas des écroulements de grande masse, nous avons développé une approche physique basée inscrite dans le formalisme de Saint-Venant, en adoptant un modèle rhéologique de type Mohr-Coulomb pour la description du comportement de l'avalanche considérée comme un fluide granulaire. Le système d'équations mathématiques ainsi déterminé est résolu par un schéma numérique de type Godunov / van Leer. Cette résolution est faite sur un maillage de type éléments finis qui permet de tenir compte de la complexité des terrains de montagnes sur lesquels se produisent les dits écoulements.

Identification des lois d'écoulement

Compte tenu de la complexité du phénomène, nous avons exploité de nombreuses sources d'informations et réalisé des expériences en modèle réduit, afin d'identifier la forme (ou

plutôt les formes) des lois d'écoulements de ce type de phénomène. En effet l'expérimentation directe est impossible. Les données globales post événements permettent alors d'observer et de caractériser les grandeurs dimensionnelles du phénomène et les expérimentations de laboratoires tentent de l'expliquer.

Loi d'écoulement de laboratoire – contribution obtenu dans le cadre de ce projet

Afin d'identifier les lois de frottement, nous avons construit et instrumenté un modèle réduit qui permet de générer des écoulements granulaires permanents et uniformes sur un fond rugueux. Ces expériences ont permis d'identifier deux régimes d'écoulements bien distincts séparés par une zone de transition.

Le premier, relativement mince et à faible nombre de Froude suit parfaitement la loi de Pouliquen (98) :

$$\frac{u}{\sqrt{gh}} = \beta \frac{h}{h_{stop}(\theta)} \quad (1)$$

Le second est à fort nombre de Froude ou à forte épaisseur d'écoulement, suit une loi hydraulique classique donné par :

$$\frac{u}{\sqrt{gh}} = \text{Cons} \tan t .$$



Figure 1 :Dispositif expérimental

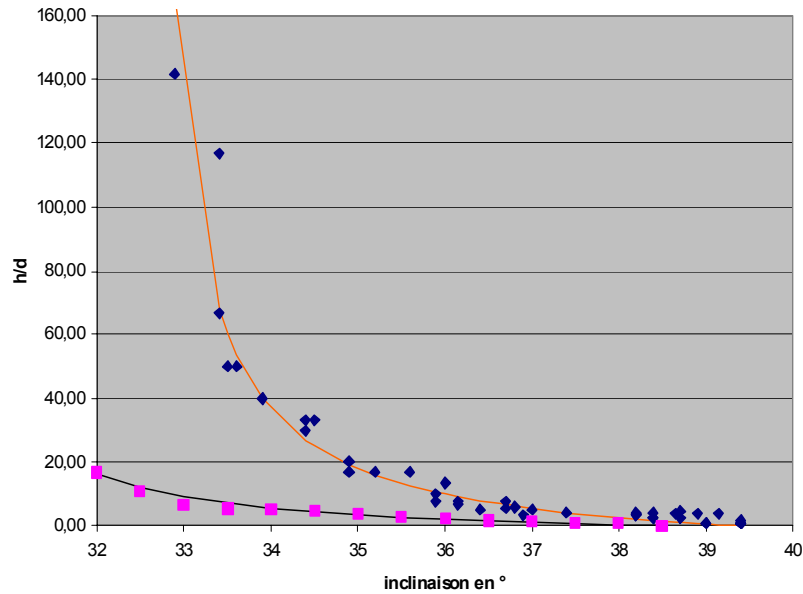


Figure 2 : H_{stop} et H_{start} correspondant aux condition de démarrage et d'arrêt en fonction de l'angle de pente

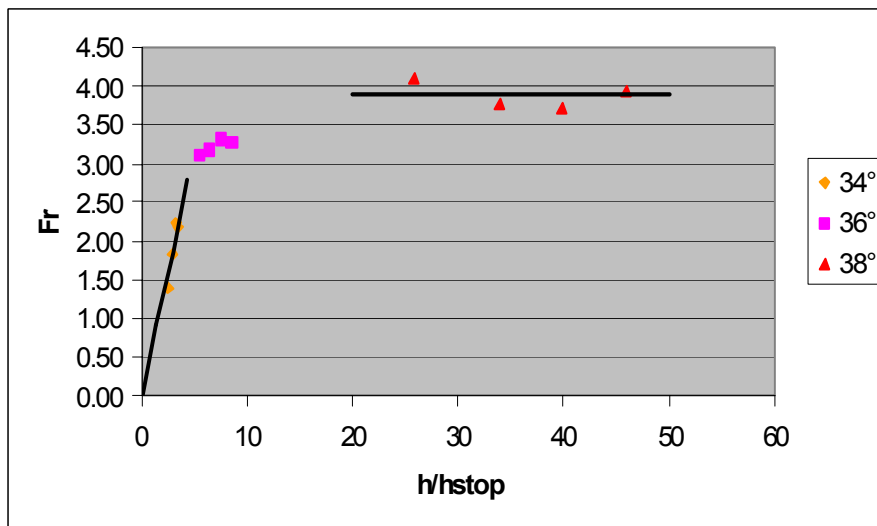


Figure 3 : Régimes d'écoulement

Entre ces deux régimes, un régime de transition existe et est difficile à quantifié.

Il est donc possible, pour les écoulements granulaires secs sur fond rugueux de décrire le comportement par deux lois distinctes, correspondant à des gamme de nombre de Froude différentes :

- $Fr < 1.4$, écoulement lent, au voisinage de l'arrêt : $\frac{u}{\sqrt{gh}} = \beta \frac{h}{h_{stop}(\theta)}$
- $Fr > 3.5$, écoulement rapide ou épais : $\frac{u}{\sqrt{gh}} = Cons \tan t$

Nous avons aussi étudié l'influence d'un faible taux d'humidité sur ces deux régimes. Le résultat est reporté sur la figure (). Le régime d'écoulement lent est relativement sensible à l'humidité. Un taux d'humidité de 1% modifie radicalement la loi d'écoulement globale en faisant disparaître complètement le régime lent.

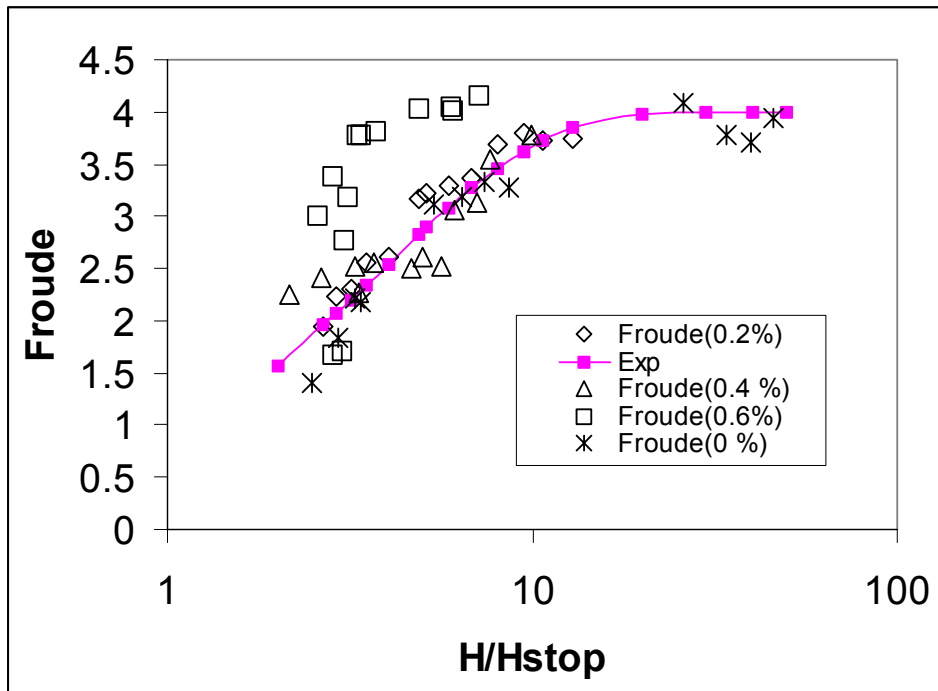


Figure 4 : influence de l'humidité

Données naturalistes – exploitées dans ce projet

François Legros () a recensé de nombreuses données géophysiques issues d'observations d'événements anciens. Il a synthétisé ces données et expliqué que la grande mobilité des mouvements de terrain pouvait être essentiellement corrélée à leur volume et à la présence ou non de l'eau. Il a retenu un schéma conceptuel de la figure ().

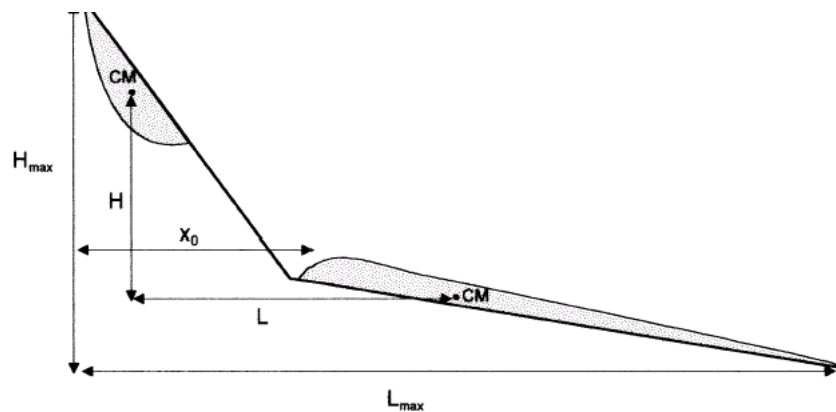


Figure : schéma de principe (d'après Legros)

Il a montré que les écroulements aériens de volume V alors la distance maximale parcourue

L_{\max} est donnée par : $L_{\max} = 8 \left[\frac{V}{10^9} \right]^{-0.15}$, le coefficient de frottement apparent μ défini

comme le rapport de la dénivelée maximale parcourue par la distance maximale parcourue est

$$\text{donnée par : } \mu = 0.16 \left[\frac{V}{10^9} \right]^{-0.15}.$$

Dans le but d'exploiter dans le cadre de notre modélisation ces précieuses données, nous avons obtenu la relation dimensionnelle qui relie la distance parcourue avant le début des processus d'arrêt, distance représentée ici par X_0 . Elle s'exprime par : $X_0 = 3560 V^{1/3}$

Nous avons utilisé notre modèle sous forme mono dimensionnelle pour la reconstitution des lois empiriques établies par Legros, en supposant que la hauteur, la largeur et la longueur initiaux de l'éroulement sont égaux.

La loi de frottement adoptée comporte une partie statique et une partie inertielle :

$$\tau = \mu \rho g h \cos(\theta) + C_t \bar{u}^2$$

Car en régime permanent cette loi de frottement se traduit bien par une loi d'écoulement à Froude constant compatible avec nos expériences de laboratoire.

$$F_r^2 = \frac{\bar{u}^2}{gh} = \frac{C_t (\tan \theta - \mu)}{\rho \cos(\theta)}$$

Sur le schéma de la figure (), en fixant la première pente à 40° et la seconde à 5° , on obtient

la relation suivante pour le coefficient de frottement inertielle: $C_t = 5.10^{-5} \left[\frac{V}{10^9} \right]^{0.41}$. Les

données assemblées par Legros, permettent donc de donner un calage de tous les paramètres de la modélisation. Ce calage est un calage général intégrant l'ensemble des classes d'éroulement et ne permet pas de prendre en compte le rôle de l'eau qui, si elle est présente modifie fortement la loi d'écoulement et donc les distance d'arrêt.

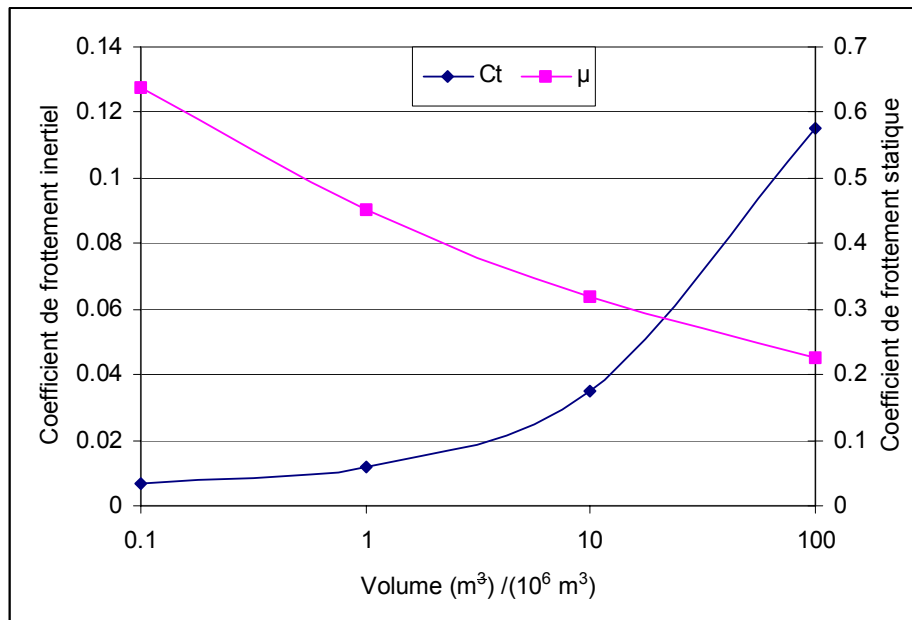


Figure : Evolution des coefficient de frottement statique et inertielle.
(reconstitution à partir des données de François Legros)

Rôle de la rugosité sur la loi d'écoulement

A partir de observations naturalistes, de nombreux auteurs (dont Legros) ont signalé une corrélation directe entre le volume de glissement et les coefficients de frottement. Mais cette corrélation soulève une difficulté. Les coefficients de frottement sont a priori fonction du matériau en mouvement et du substratum sur lequel l'écoulement se déroule. Comment concilier ces deux vérités somme toutes assez divergentes ?.

Une première réponse a été apporté par Campbel grâce à la simulation numérique. Une seconde réponse peut se trouver dans les expériences que Christine Goujon () a entreprise et publiés en 2003. Elle a mis en place un plan incliné sur lequel elle a collée des particules de diamètre d_c . Elle a ensuite lâché le même volume de matériaux de diamètre d , allant de $0.5 d_c$ à $2d_c$. Elle a montré que la longueur parcourue et la vitesse de l'écoulement étaient très différentes et dépendaient fortement du rapport $\frac{d}{d_c}$. La vitesse et la longueur parcourue

atteignent des minimums pour $\frac{d}{d_c} = 1$ et augmente de manière significative (du simple au double) quand ce rapport diminue ou augmente.

Cette expérience physique montre que quand le diamètre des particules en écoulement est grand devant le diamètre des particules constituant le substratum, le coefficient de frottement diminue de manière significative. Dans les écoulements rocheux, la ségrégation va engendré une stratification granulométrique de l'écroulement. Au fond de l'écroulement les grains seront de petites tailles, a priori des particules fines, par contre le corps et le front de l'écroulement seront formé de plus gros grains dont la taille sera d'autant plus grande que l'écroulement est volumineux. Si on considère que la taille des particules fines sera la même quelques soit la taille de l'écroulement, et si on se refaire aux expériences de Goujon qui indiquent que la rugosité diminue quand le diamètre des gros grains augmente, alors, la relation empirique entre le volume et le frottement est alors partiellement expliquée.

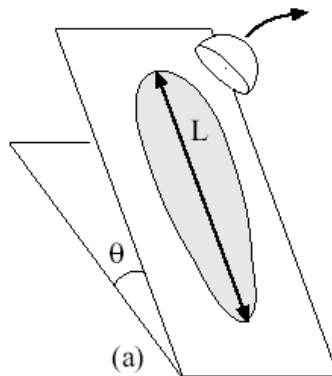


Figure : schéma de principe de l'expérience de Goujon.

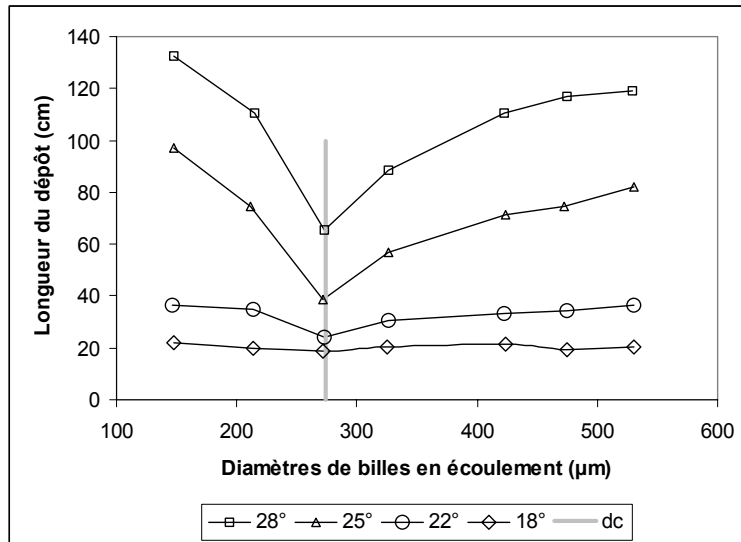


Figure : longueur du dépôt en fonction du diamètre

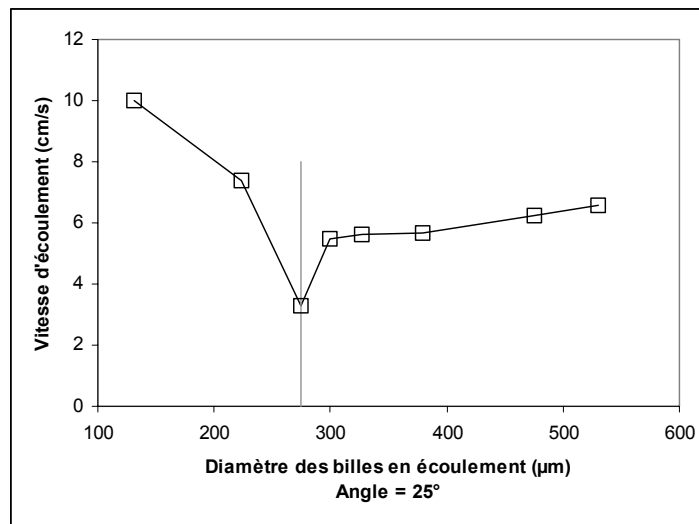


Figure : vitesse de l'écoulement en fonction du diamètre

Reconstitution d'événements réelles

Application au cas de Charmonétier

Le 24 août 1987, suite à de violents orages et des précipitations nettement au-dessus de la moyenne, une masse rocheuse d'environ 130 000 m³ s'est détachée du flanc ouest (rive gauche) de la vallée de glaciaire de l'Oisans emportant, au niveau de la Combe de Charmonétier, une partie de la route reliant les communes de Bourg d'Oisans et de Villard-Notre-Dame. La masse rocheuse fracturée mobilisée dans la zone de départ a parcouru une distance de près de 600 m pour un dénivelé total de 520 m (H).

Le cas de Charmonétier présente beaucoup d'intérêt pour la modélisation. Le travail d'enquête de terrain réalisé est très complet. Il constitue ainsi un bon site d'essai des modèles numériques tel le notre. Nous avons donc digitalisé les courbes de niveaux et réalisé un modèle numérique du terrain. Les matériaux ont été positionner dans la zone de départ sous forme de champ d'épaisseur et une vitesse nulle. L'angle de frottement des matériaux solides a

été estimé à 28° et introduit comme coefficient de frottement dans le modèle. Il est consistant avec la formule de Legros.

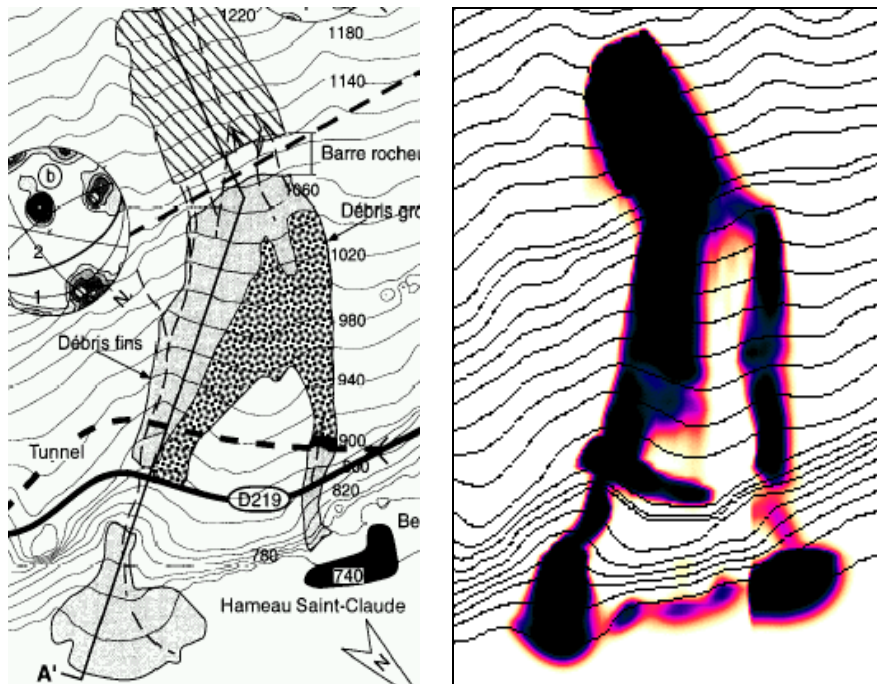
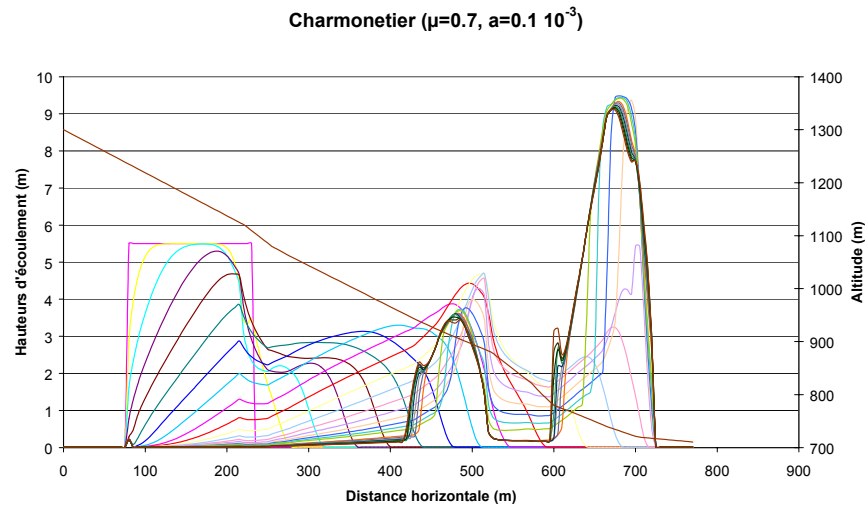
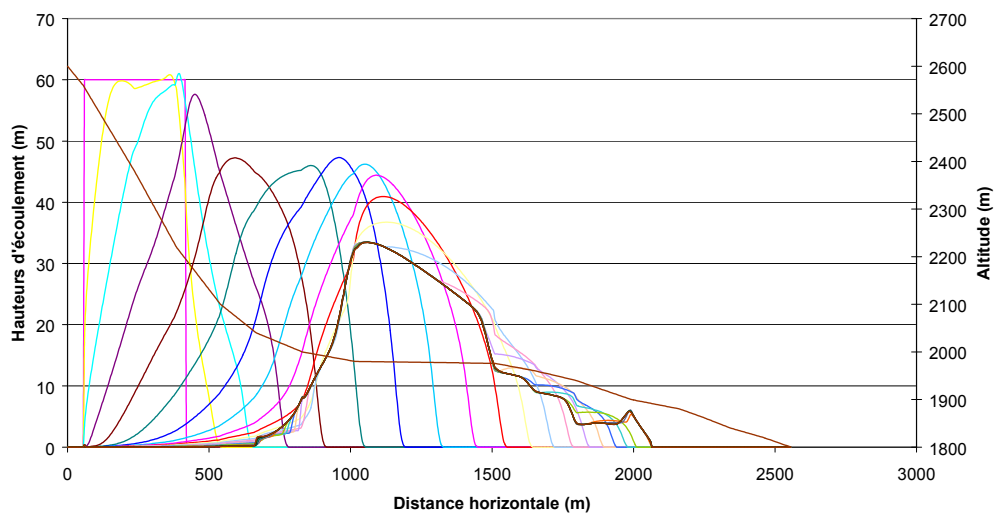
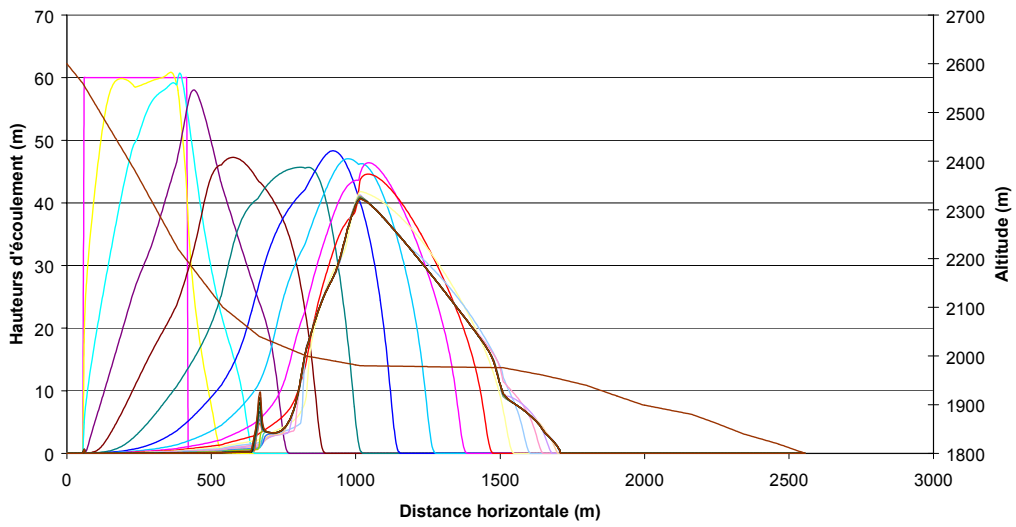


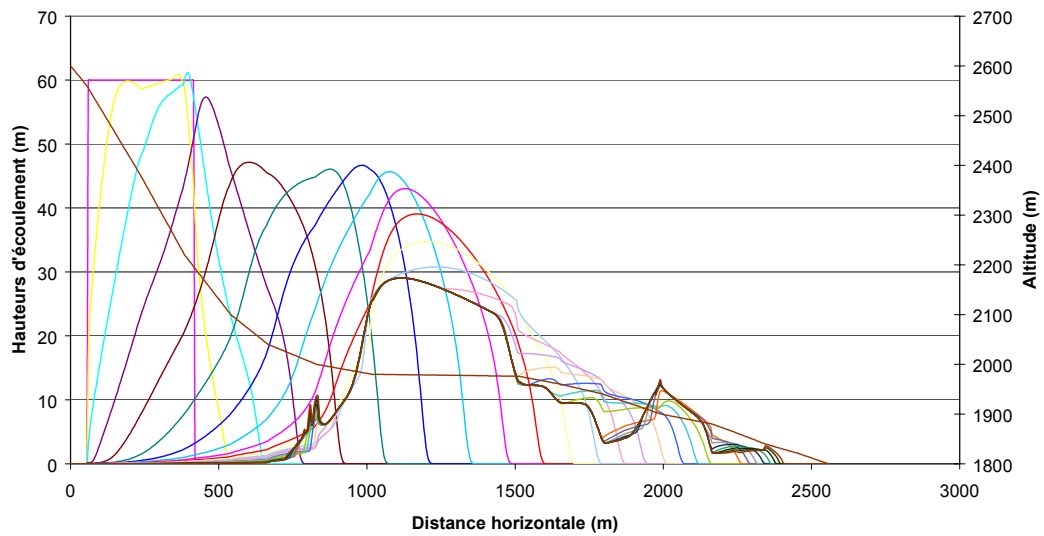
Figure xx : Zone d'écoulement et de dépôt obtenus par le modèle

Application au cas de Six des Eaux Froides

La topographie a été digitalisée par le CREALP qui a collecté les données relatives à cet écoulement. La première modélisation entreprise a été mono dimensionnelle. Elle a permis de caler le coefficient de frottement qui permet de retrouver la même extension que l'observation du terrain. Le coefficient de frottement statique qui permet de reconstituer l'évènement est égal à 0.22. Loin de la valeur théorique proposée par Legros. En effet ce glissement a interagité avec un lac, s'est chargé d'eau. Cette dernière s'est localisée à la base et s'est mélangé avec les particules fines. Ce mélange a du se comporter comme un écoulement

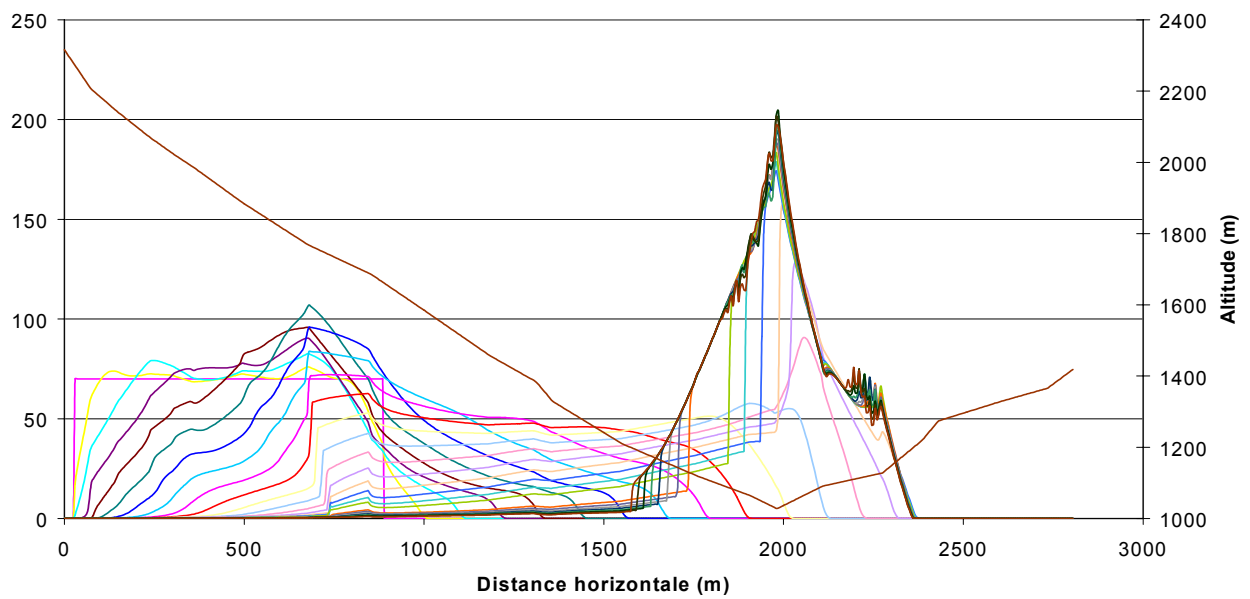
de type lave torrentielle. Ceci peut expliquer la grande distance parcourue. Ceci correspond à un seuil de contrainte de 1500 Pa.





Application au cas du ValPola

Les données ont été fournies par le PolyLa. La meilleure reconstitution de cet écoulement a été obtenue pour une valeur du coefficient de frottement statique de 0.4



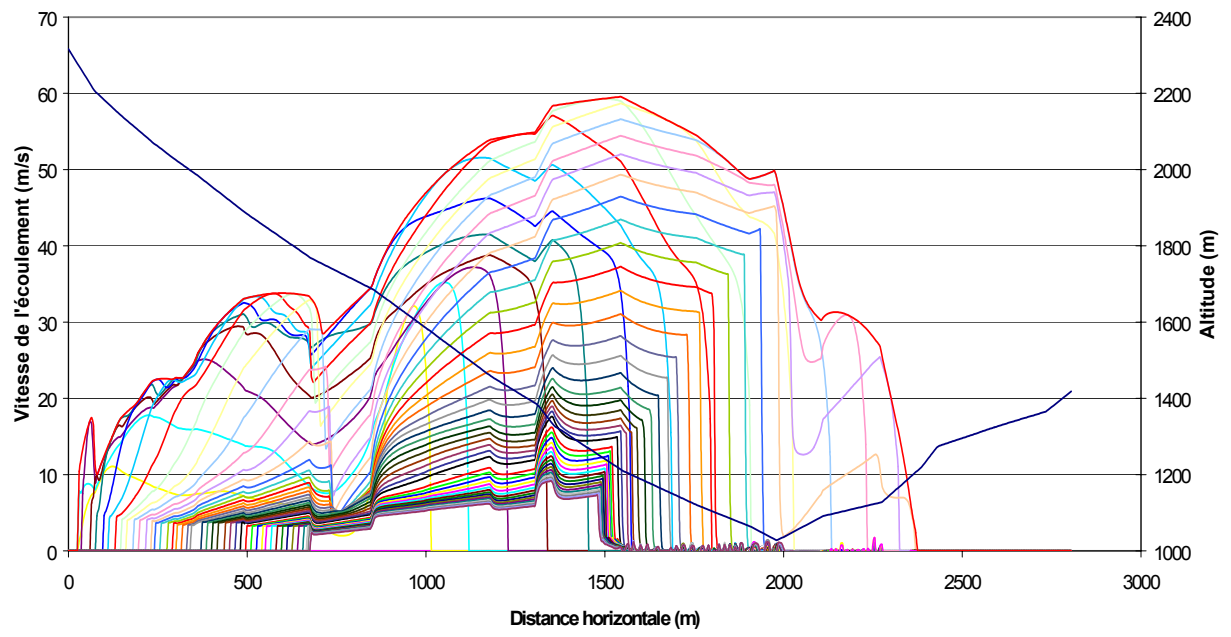


Figure : Champ des hauteur et des vitesse pour le cas de l'écroulement du ValPola