



**HAL**  
open science

## **Erosion et entrainement par une bouffée de densité ; application aux avalanches de neige en aérosol**

Denis Brossard, Mohamed Naaim, F. Naaim-Bouvet

### ► **To cite this version:**

Denis Brossard, Mohamed Naaim, F. Naaim-Bouvet. Erosion et entrainement par une bouffée de densité ; application aux avalanches de neige en aérosol. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. <hal-03362188>

**HAL Id: hal-03362188**

**<https://hal.science/hal-03362188v1>**

Submitted on 1 Oct 2021

**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.



HAL Authorization

# Érosion et entraînement par une bouffée de densité ; application aux avalanches de neige en aérosol.

Denis Brossard, Mohamed Naaim & Florence Naaim

*Cemagref de Grenoble  
Unité de recherche ETNA  
2, rue de la papeterie, 38402 St Martin d'Hères  
denis.brossard@cemagref.fr*

## Résumé :

*Pour modéliser expérimentalement la reprise par une avalanche de neige en aérosol, nous faisons s'écouler, dans un canal, différentes bouffées salines au dessus d'un lit granulaire érodable composé de particules de PMMA. Par traitement d'images, nous avons mis en évidence que la vitesse de front est indépendante de la nature du lit (érodabilité, rugosité) mais dépend fortement des conditions initiales de bouffées (énergie potentielle). A l'inverse, le taux de croissance en hauteur des bouffées est indépendant des conditions initiales mais dépend fortement de la nature du lit. L'étude de l'évolution de la topographie du lit au passage des bouffées permet de mettre en évidence qu'en amont, l'érosion est violente, puis qu'en aval, elle est moindre et régulière. De nouvelles expériences sont en cours de réalisation pour estimer l'influence de la concentration en particules sur le pouvoir érosif de la bouffée.*

## Abstract :

*Laboratory experiments are conducted in a submerged uniform slope channel in order to improve our knowledge of snow resuspension by a powder snow avalanche. Avalanches are modeled by saline buoyant cloud in clear water. The erodible bed is made of loose particles of PMMA. Thanks to image processing, we show that the front velocity grows up with the initial size of the cloud and is independent of the bed erodibility. The height growth rate is independent of the cloud size but depends strongly on the bed nature. The study of the bed topography changes under the cloud shows that upstream the erosion is strong and downstream it is lower and regular. New experiments are conducted to assess the particles concentration influence on the cloud erosion law.*

## Mots-clefs :

**Érosion, avalanche, bouffée de densité**

## 1 Introduction

Une avalanche de neige en aérosol est un écoulement turbulent ( $Re \simeq 10^8$ ) diphasique composé d'air et de particules en suspension. La reprise désigne le phénomène de réalimentation en neige d'une avalanche au cours de son écoulement. Ce phénomène est fondamental pour expliquer la dynamique d'une telle avalanche car il permet d'augmenter son volume et contrebalance la diminution de densité de l'avalanche par incorporation d'air.

L'objet de ce travail est l'étude expérimentale de la reprise par une avalanche de neige en aérosol. Ces avalanches sont modélisées par des bouffées de densité s'écoulant sur un lit granulaire. Nous décrirons dans un premier temps le dispositif expérimental ainsi que les méthodes de mesure permettant d'estimer la hauteur et la vitesse de front des bouffées de densité au cours de leur écoulement. Nous exposerons ensuite les résultats obtenus concernant, d'une part, l'évolution de la dynamique de ces bouffées en fonction de l'érodabilité du lit et, d'autre part, la localisation sur le lit de l'érosion. Enfin, nous concluons avec les perspectives ainsi ouvertes et les évolutions du dispositif expérimental en cours de réalisation.

## 2 Description du dispositif expérimental

Le principe de modélisation des avalanches de neige en aérosol est celui utilisé entre autre par Beghin *et al.* (1981) ou plus récemment par Rastello et Hopfinger (2004). Il consiste à modéliser l'avalanche par l'écoulement d'un volume fini de fluide lourd (densité  $\rho > 1$ ) dans un fluide ambiant, ici de l'eau claire ( $\rho_a = 1$ ). Ces bouffées de gravité peuvent être réalisées de deux façons différentes : par mise en suspension de particules lourdes dans le fluide ambiant (bouffées de turbidité) ou par dissolution de sel dans ce fluide (bouffées de densité). C'est cette seconde solution que nous avons pour l'instant retenue. Le manteau neigeux est ici modélisé par une couche de particules de PMMA ( $d_{50} = 0,5 \text{ mm}$ ,  $\rho_p = 1,2$ ) composant le lit sur lequel s'écoulent les bouffées salines.

Dans une grande cuve ( $20 \text{ m}^3$ ), nous avons immergé un canal de pente constante ( $\theta = 20^\circ$ ). Ce canal de  $30 \text{ cm}$  de largeur pour une longueur  $L = 2,5 \text{ m}$  permet d'effectuer une modélisation bidimensionnelle des avalanches de neige en aérosol par lâchers de bouffées de densité. Différentes conditions initiales de bouffées sont testées : le volume  $V_0$  de solution saline ( $\rho_0 = 1,2$ ) injecté dans le canal varie entre  $2L$  et  $4L$ . Toutefois, au cours de l'injection, a lieu une dilution non quantifiable par mélange avec le fluide ambiant. La grandeur mesurable et variable caractérisant les conditions initiales est l'énergie potentielle initiale de la bouffée ( $E_p = (\rho_0 - \rho_a)V_0 g L \sin \theta$ ) qui varie entre  $3 \text{ J}$  et  $7 \text{ J}$ .

Deux types de campagnes sont menés : celles dites de références où les bouffées s'écoulent sur un lit rugueux non-érodable (papier abrasif) et celles avec érosion où les bouffées s'écoulent sur le lit granulaire érodable. Lors de ces dernières, un lit de particules est réalisé puis des bouffées successives sont lâchées ; elles s'écoulent et érodent le lit. Nous suivons, par traitement d'images, la topographie du lit de particules avant chaque lâcher. Pour chacun de ces deux types de campagnes, sont mesurées, par traitement d'images, les vitesses de front ainsi que les hauteurs des bouffées au cours de l'écoulement.

## 3 Résultats expérimentaux

### 3.1 Influence de l'érodabilité du lit sur la vitesse de front de la bouffée

L'étude de la vitesse de front dans une configuration donnée (mêmes conditions initiales, même configuration de lit) montre tout d'abord que dans notre zone de mesure cette vitesse reste sensiblement constante au cours de l'écoulement. Il est donc licite d'étudier l'influence de la configuration expérimentale sur la vitesse de front moyenne de l'écoulement. Ceci est représenté figure 1. Ces deux courbes représentent, chacune pour une configuration de lit différente, la valeur de la vitesse de front moyenne en fonction des conditions initiales de la bouffée (énergie potentielle). Ces courbes sont croissantes, c'est-à-dire que, comme le laissait supposer l'intuition, plus la bouffée initiale est grosse, plus elle s'écoulera vite.

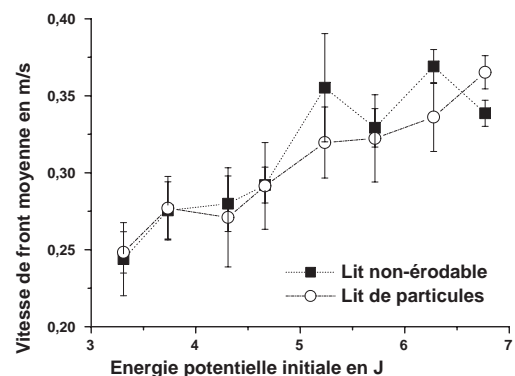


FIG. 1 – Vitesse de front moyenne pour les différentes conditions expérimentales

Ce qui est beaucoup moins intuitif, c'est que ces deux courbes sont très proches. Dans le cas

où le lit est non-érodable et dans celui où il l'est, les vitesses de front mesurées sont similaires pour des conditions initiales de bouffée identiques. En d'autres termes, il apparaît que dans notre zone d'étude, la vitesse de front n'est nullement contrôlée par la nature érodable du lit, mais uniquement par les conditions initiales de bouffée.

### 3.2 Influence de l'érodabilité du lit sur la hauteur de la bouffée

La hauteur de la bouffée dans une configuration donnée varie de façon significative au cours de l'écoulement : elle croît linéairement en fonction de la position du front (cf. figure 2a). Nous retrouvons ainsi les résultats expérimentaux et théoriques proposés par Britter et Linden (1980) et Beghin *et al.* (1981) qui prédisent un taux de croissance en hauteur  $\frac{\partial H}{\partial x_f}$  constant au cours de l'écoulement et indépendant de la taille initiale de la bouffée. La valeur de ce taux de croissance est mesurée expérimentalement. Ces mesures sont présentées figure 2b. Ce taux de croissance

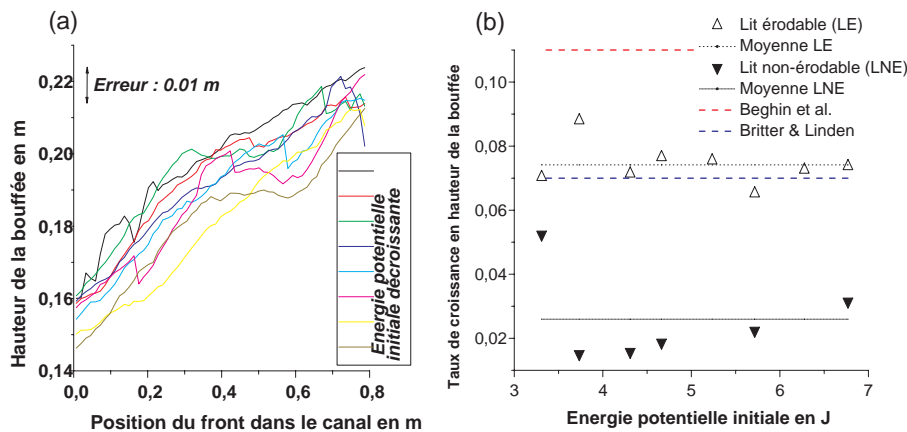


FIG. 2 – a) Hauteur de la bouffée en fonction de la position du front sur le lit érodable. b) Taux de croissance en hauteur de la bouffée dans les différentes configurations expérimentales.

semble constant dans une configuration de lit donnée, indépendamment de la taille initiale de la bouffée. Toutefois, sur lit non-érodable, notre estimation du taux de croissance (de l'ordre de 0,025) est bien inférieure à celles proposées par Britter et Linden (1980) (0,07 sur une pente de  $20^\circ$ ) et Beghin *et al.* (1981) (0,11 sur la même pente). Cette différence notable provient, à notre avis, du fait que notre lit non-érodable est un fond rugueux alors que les expériences menées par Britter et Linden (1980) et Beghin *et al.* (1981) ont été réalisées sur fond lisse. Notons aussi qu'un changement de propriétés du lit influence grandement ce taux. En effet, pour des bouffées de densité s'écoulant sur le lit de particules, le taux de croissance moyen en hauteur est trois fois supérieur à celui mesuré pour les mêmes bouffées s'écoulant sur un lit non-érodable. Cette variation ne peut être expliquée entièrement par l'augmentation de volume due à l'incorporation de particules car comme nous le verrons au paragraphe 3.3, la quantité érodée varie avec la taille initiale de la bouffée alors que le taux de croissance n'en dépend pas sensiblement.

Il apparaît donc que, à l'inverse de la vitesse de front, le taux de croissance en hauteur est, lui, indépendant de la taille initiale des bouffées mais dépend grandement de la nature du lit.

### 3.3 Localisation de l'érosion

Pour étudier la localisation de l'érosion due à l'écoulement de la bouffée, nous avons suivi le mode opératoire suivant : après avoir créé un lit de particules d'environ  $2\text{ cm}$  d'épaisseur, nous avons fait s'écouler successivement des bouffées présentant les mêmes conditions initiales. Nous relevons avant chaque lâcher, par traitement d'images, la topographie du lit le long du canal. Pour plus de clarté dans la présentation des résultats, nous avons choisi dix points de mesure disposés régulièrement le long du canal : le point C1 est le point amont, le point C10 le point aval. Ces mesures ont été réalisées pour l'ensemble des conditions initiales de bouffées. La figure 3a montre ce que nous avons obtenu au point C1 pour différentes conditions initiales.

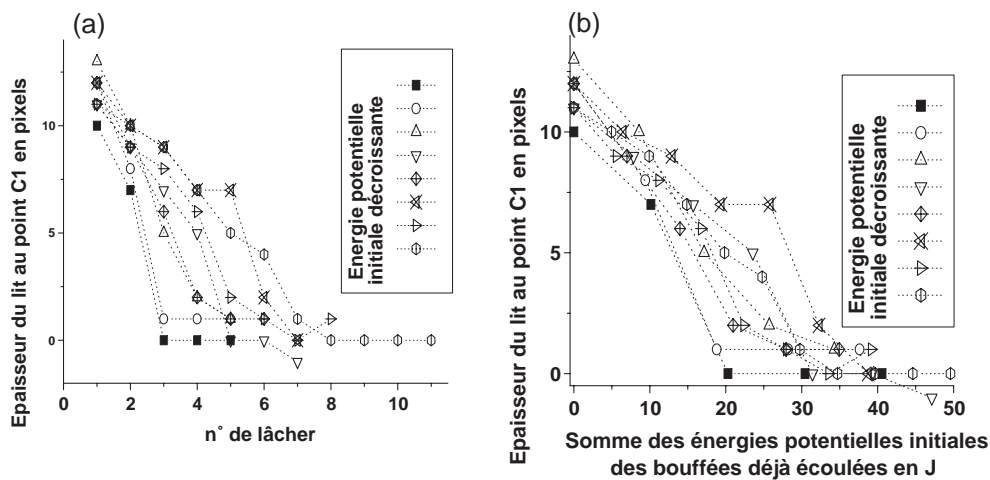


FIG. 3 – a) Épaisseur du lit au point C1 en fonction du numéro de lâcher pour les différentes conditions initiales. b) Épaisseur du lit au point C1 en fonction de la somme des énergies potentielles initiales des bouffées écoulées. Un pixel correspond à environ  $2\text{ mm}$

Il apparaît clairement que plus la taille de la bouffée est grande, plus son pouvoir érosif est fort. Ainsi, pour la plus petite bouffée, de vitesse de front moyenne d'environ  $0,25\text{ ms}^{-1}$ , le lit est complètement érodé au niveau de C1 au bout du huitième lâcher alors que, pour la plus grosse bouffée, de vitesse  $0,35\text{ ms}^{-1}$ , cet état est obtenu dès le troisième lâcher. Le pouvoir érosif de la bouffée est donc corrélé à sa vitesse : plus la bouffée va vite, plus elle érode le lit. Pour comparer les courbes obtenues en un point de mesure donné, nous avons choisi comme abscisse la somme des énergies potentielles initiales des bouffées qui se sont déjà écoulées. Les courbes en un point de mesure se superposent alors (figure 3b). Pour chacun des dix points de mesure, nous obtenons une seule courbe en moyennant les épaisseurs pour les différentes conditions initiales. Ces courbes sont représentées figure 4a. Le graphique en encart représente la valeur des écart-types obtenus lors de ces moyennes. Le graphique de la figure 4b représente la norme des pentes des courbes présentées sur la figure 4a, ce qui correspond à l'intensité de l'érosion à chaque point de mesure.

Nous pouvons remarquer que les courbes de la figure 4a suivent un faisceau, de pente d'environ  $-0,05\text{ cmJ}^{-1}$ . Les courbes représentant les points amont s'échappent successivement de ce faisceau ; l'intensité de l'érosion augmente brutalement (entre 0,1 en  $0,15\text{ cmJ}^{-1}$ ) jusqu'à

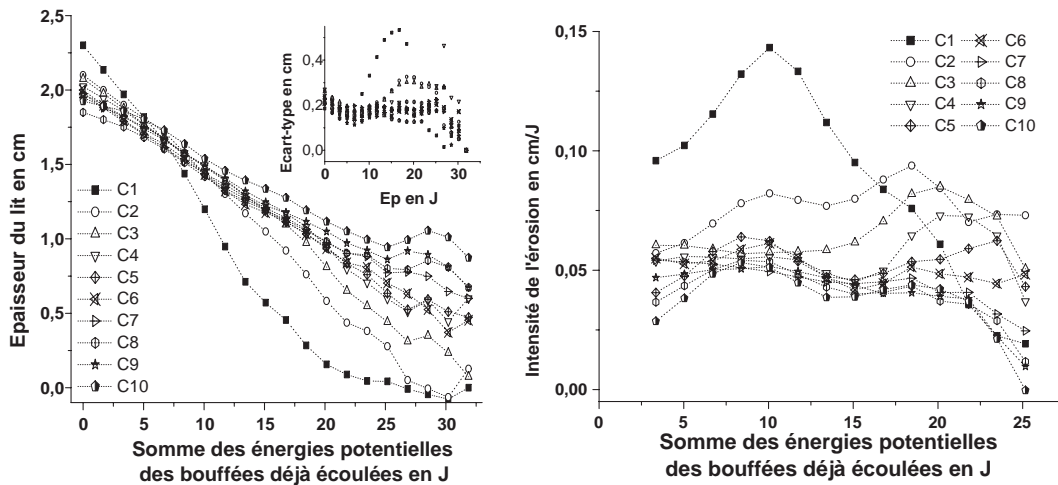


FIG. 4 – a) Topographie du lit granulaire en fonction de l'énergie potentielle initiale des bouffées déjà écoulées. b) Intensité de l'érosion aux différents points de mesure en fonction de l'énergie potentielle initiale des bouffées déjà écoulées.

ce que tout le lit de particules soit érodé. Cela confirme nos observations visuelles : au cours de son écoulement, la bouffée saline érode violemment la partie amont du lit de particules puis, en aval, l'érosion est moindre et régulière.

Hopfinger et Tochon-Danguy (1977) ou plus récemment Rastello et Hopfinger (2004) choisissent de modéliser l'érosion par une avalanche en aérosol par une fonction constante. Au regard de nos résultats, cette approximation semble valable en dehors de la partie amont du lit où la bouffée se charge en particules.

En se basant sur la loi de Meyer-Peter et Muller (1948) issue de l'hydraulique, Eames *et al.* (2001) proposent, pour des courants de gravité, la loi d'érosion suivante :

$$q_v \propto \rho_p \left( \frac{\rho}{(\rho_p - \rho)gb} \right)^{1+\alpha/2} (U - U_c)^{3+\alpha}$$

où  $q_v$  est le flux vertical de masse (érosion),  $b$  le diamètre des particules et  $U_c$  la vitesse critique d'érosion basée sur le de nombre de Shields. Au regard de nos résultats expérimentaux, cette loi ne semble pas varier dans le bon sens lors du chargement (à vitesse constante). En effet, lors du chargement de la bouffée,  $\rho$  augmente, donc d'après cette loi  $q_v$  devrait augmenter. Or nous observons, après le chargement une nette diminution de pouvoir érosif de la bouffée.

Pour expliquer cette variation, nous allons considérer la concentration en particules au sein de l'écoulement, car une augmentation de concentration à vitesse de front constante (chargement sur la partie amont du lit) diminue le pouvoir érosif de la bouffée. De plus, Kulick *et al.* (1994) montrent qu'une augmentation de la concentration en particules dans un écoulement atténue la turbulence. Ainsi, une augmentation de la concentration en particules dans un écoulement diminue son pouvoir érosif. De telles considérations ont déjà été utilisées dans des lois de chargement utilisées en transport de neige par le vent par exemple par Naaïm *et al.* (1998).

Pour étudier expérimentalement cette influence, nous envisageons de réaliser différentes bouffées de gravité de volume et de densité initiaux identiques, mais de concentration en parti-

cules variable. Afin d'augmenter la densité du fluide qui constituera la bouffée, nous prévoyons d'utiliser les deux techniques suivantes : mettre des particules en suspension ou dissoudre du sel dans l'eau. De cette façon, nous obtiendrons des bouffées de dynamiques initiales sensiblement identiques, mais de concentrations en particules différentes.

#### 4 Conclusions

Nous avons pu, grâce à notre étude (pente d'étude fixée, type de particules fixe), étudier l'interaction entre une bouffée de densité et un lit granulaire. Il ressort (paragraphe 3.2) que dans une configuration de lit fixée, le taux de croissance en hauteur de la bouffée est indépendant de la taille initiale de cette bouffée. En revanche, la nature du lit influence grandement ce taux : nous avons mesuré un facteur 3 sur ce taux pour des bouffées initialement identiques s'écoulant sur des lits différents. Parallèlement, nous avons observé que l'érodabilité du lit n'influence pas sensiblement la vitesse de front des bouffées dans notre configuration expérimentale. Cette vitesse, elle, dépend considérablement de la taille initiale de la bouffée (paragraphe 3.1).

L'étude du pouvoir érosif d'une bouffée (paragraphe 3.3) nous a montré qu'il est corrélé à la vitesse de front. Nous avons aussi observé que le pouvoir érosif d'une bouffée donnée, de vitesse de front sensiblement constante, varie beaucoup au cours de l'écoulement. Il apparaît donc que la vitesse n'est pas le seul paramètre contrôlant l'érosion. Nous pensons que la concentration en particules joue, elle aussi, un rôle dans l'expression du pouvoir érosif de la bouffée. Pour étudier cela, nous entreprenons des expériences permettant d'estimer l'érosion par des bouffées de dynamique similaires mais de concentrations initiales en particules différentes.

Ces résultats permettront de compléter l'étude de l'interaction de la bouffée avec le lit granulaire. Pour obtenir une expression analytique de cette influence, il faudra ensuite mener cette étude systématiquement pour différentes pentes de canal et pour différents types de particules.

#### Références

- Beghin, P. and Hopfinger, E. J. and Britter, R. E. 1981 Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries. *J. Fluid Mech.* **107** 407-422
- Britter, R.E. et Linden, P.F. 1980 The motion of the front of a gravity current travelling down an incline *J. Fluid Mech.* **99** 531-543
- Eames, I., Hogg, A.J., Gething, S. et Dalziel, S.B. 2001 Resuspension by saline and particle-driven gravity currents *J. Geophysical Research* **106** 14095-14111
- Hopfinger, E. J. et Tochon-Danguy, J. C. 1977 A model study of powder-snow avalanches *J. Glaciol* **19** 343-356
- Kulick, J.D., Fessler, J.R. et Eaton, J.K. 1994 Particle response and turbulence modification in fully developed channel flow *J. Fluid Mech.* **277** 109-134
- Meyer-Peter, E. et Muller, R. 1948 Formula for bed-load transport *Proc. Intl. Assoc. Hydr. Struct.Res. Stockolm* 39-64
- Naaim, M., Naaim-Bouvet, F., Martinez, H. 1998 Numerical simulation of drifting snow : erosion and deposition models *Ann. Glaciol.* **26** 191-196
- Rastello, M. et Hopfinger, E. J. 2004 Sediment-entraining suspension clouds : A model of powder-snow avalanches *J. Fluid Mech.* **509** 181-206