

# Simulación física y numérica de las avalanchas de nieve en Francia

## Dense and powder avalanches modelling in France

M. Naaim y H. Martínez

Division Nivologie - CEMAGREF, BP 76 - 38402 Grenoble - FRANCIA

### ABSTRACT

In this paper are presented and described the main characteristics of the different kind of snow avalanches. We distinguishes two great families : dense and powder avalanches. Their releasing conditions are reminded and their dynamics and effects are described. A modelling based on Saint Venant equations (completed by a Bingham reological model) is proposed for the dense avalanches. Concerning powder avalanches their similarity with gravity currents allows to undertake a physical modelling. This physical modelling is succinctly described and the densimetric Froude similarity criterium is presented. The numerical modelling of this kind of avalanches (based on Navier-Stokes equations and on a turbulence model) is shown. The comparison between the two models is made in the case of a turbidity current. The numerical modelling allows to find global characteristics of the flow (such height and velocity of the avalanche front) and allows especially to access to the internal variables (pressure, concentration, velocity and turbulence characteristics).

**Key words:** snow, dense avalanche, powder avalanche, physical modelling, numerical modelling.

Geogaceta, 20 (6) (1996), 1375-1376  
ISSN:0213683X

### Introducción

Se designa por el termino avalancha de nieve o alud a un flujo gravitacional de nieve, que puede ser denso o en forma de aerosol. El primer tipo (probablemente laminar) sigue relativamente bien los corredores naturales sin incorporación de aire (la densidad varía entre 150 y 450 kg/m<sup>3</sup>) y alcanza velocidades del orden de 20 m/s. El segundo tipo de flujo, fuertemente turbulento, se caracteriza por una gran interacción con el aire ambiente, y por una incorporación importante de aire que reduce la densidad media del flujo. Para la producción de una avalancha aerosol se necesitan pendientes fuertes y vertientes de gran longitud. Los daños ocasionados por las avalanchas de nieve (de orden económico y humano) dependen del tipo de alud. Por ejemplo, los aerosoles tienden a arrancar árboles y techos de habitaciones, mientras que una avalancha densa tiene tendencia a destruir todo lo que encuentra en su trayecto. En el caso de climas templados, los flujos de nieve densa son los más frecuentes.

### Avalanchas densas

Nuestro modelo (Naaim 92), que se basa en la ecuaciones de Saint Venant completado por una ley reológica de tipo Bingham, es validado con las medidas realizadas in-situ por Dent. Existen otros modelos reológicos de tipo granular (macro-viscoso o inercial, propuesto por Bagnold), y otros flujos compuestos de esferas (utilizados en el National Geotechnical Institut de Noruega).

**Modelo físico:** Dos nociones importantes nos han permitido adaptar un modelo reológico para la nieve densa : la de altura crítica y la de perfil de velocidades tipo « plug ». Para valores de pendiente y cohesión de nieve predeterminados, el inicio del movimiento de la masa de nieve se produce cuando la altura de nieve supera el valor crítico que produce el desequilibrio. Los perfiles de velocidades determinados en laboratorio (por K. Nishimura y N. Maeno, 1987) han mostrado que el flujo de nieve en pendiente se compone de una zona basal muy fina, de fuerte cizallamiento, llamada « plug ». El perfil de velocidades observado y la existencia del valor de altura crítica pueden interpretar-

se como características de un fluido a umbral de movimiento, más precisamente un fluido de tipo Bingham. Este modelo permite relacionar el tensor de cizallamiento local con el gradiente de velocidades, a partir de :

$$\text{si } \tau_v < \tau \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial y} = 0$$

$$\text{si no } \tau_v = \tau + \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

El cizallamiento en el interior de la capa de nieve en reposo es :  $\tau_v = \rho g h \sin(\varphi)$ , donde  $\varphi$  representa el ángulo de la pendiente. A partir de la condición de equilibrio de un bloque de nieve sujeto a la acción de su propio peso y a la fuerza de frotamiento, se determina el valor de la altura crítica como :

$h_c = \frac{\tau}{g h \sin(\varphi)}$  a partir de la cual se supera el valor límite  $\delta_c$ , que depende del tipo de nieve.

**Modelo numérico:** A partir de la hipótesis de hidrostática y de la ley de comportamiento (Bingham u otra), integrando verticalmente las ecuaciones de Navier-Stokes, se obtiene el siguiente sis-

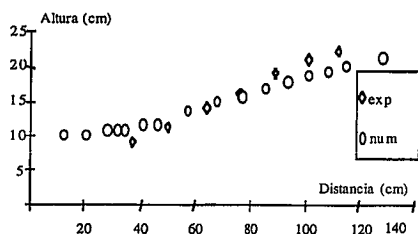


Fig. 1 - Altura del frente en función de la distancia.

Fig. 1 - Front height function of the distance.

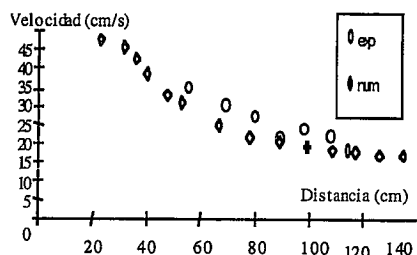


Fig. 2 - Velocidad del frente en función de la distancia.

Fig. 2 - Front velocity function of the distance.

tema hiperbólico no-lineal (ecuaciones de Saint Venant):

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} hu^2 + \frac{1}{2} g \cos(\varphi) h^2 \\ hu^2 + \frac{1}{2} g \cos(\varphi) h^2 \\ hu^2 + \frac{1}{2} g \cos(\varphi) h^2 \end{bmatrix} +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \begin{bmatrix} hv^2 + \frac{1}{2} g \cos(\varphi) h^2 \\ hu^2 + \frac{1}{2} g \cos(\varphi) h^2 \\ hu^2 + \frac{1}{2} g \cos(\varphi) h^2 \end{bmatrix} = -g h \begin{bmatrix} 0 \\ \cos(\varphi_x) \\ \cos(\varphi_y) \end{bmatrix} - \left( \frac{\tau_c}{\rho} + \bar{u} \right) \frac{\bar{u}}{\|\bar{u}\|}$$

donde h representa la altura del flujo, (u,v) las componentes del vector velocidad,  $\varphi_x$  y  $\varphi_y$  los ángulos de la pendiente según x e y. Este sistema de ecuaciones se resuelve por el método de volúmenes finitos utilizando un esquema numérico de tipo Godunov, de orden 2 en el espacio y en el tiempo.

### Avalanchas aerosol

En el caso de nieve reciente y fría acumulada en una fuerte pendiente, puede desarrollarse verticalmente una bocanada denominada aerosol, compuesta de grandes estructuras turbulentas. Este tipo de avalancha se produce a partir de condiciones iniciales particulares (por esto son menos frecuentes que las avalanchas densas). Los aerosoles se observan en pleno invierno y en altas altitudes (como en el Himalaya o en los Andes), luego de fuertes precipitaciones de nieve seca, liviana y sin cohesión. Si el espesor de la capa de nieve reciente alcanza 30 a 60 cm, un débil esfuerzo provoca la inestabilidad que genera la avalancha. El aerosol resultante se desplaza sobre la pendiente, con una velocidad que aumenta bajo el efecto de la gravedad, formándose un fuerte cizallamiento entre la masa de nieve en desplazamiento y el aire. Cuando la velocidad es importante, comienza un especie de erosión en el frente del flujo, que le quita partículas de nieve al frente de la avalancha, poniéndolas en suspensión en una zona de aire de fuerte turbulencia. Otro fenómeno entra en juego: un aumento del volumen de la avalancha (dilatación) es originado por las vibraciones debidas a la

rugosidad e irregularidad del suelo. En la parte basal del flujo, el fenómeno de erosión aumenta con la velocidad, incorporando una parte del manto nivoso en el seno de la avalancha. La existencia simultánea de los dos fenómenos anteriores provoca avalanchas extremadamente peligrosas.

**Modelo físico:** La avalancha aerosol es considerada como un flujo compuesto de una mezcla de partículas de nieve y aire, bajo el efecto de la gravedad. La diferencia de densidad entre esta mezcla y el aire es el motor de este tipo de flujo. Este fenómeno se conoce por el nombre de corriente de densidad. Como ejemplos pueden citarse: corrientes de turbidez submarinas, flujos piroclásticos provenientes de erupciones volcánicas y avalanchas aerosol. Este tipo de fenómeno puede modelizarse en cuba acuática inyectando agua salada (densa) en agua común. Las observaciones resultantes permiten obtener un análisis cualitativo sobre la forma de la avalancha (cuerpo y frente del flujo) y las medidas de densidad y velocidades. Respetando el criterio de similitud del número de Froude densimétrico (que

exige que la relación  $\frac{u}{\sqrt{ghc}}$  debe conservarse entre el modelo y la realidad) los resultados obtenidos pueden extrapolarse para el caso de las avalanchas aerosol. En la fórmula del número de Froude, u representa la velocidad, g la aceleración de la gravedad, h la altura media de la avalancha y c la concentración de partículas. Este criterio se obtiene para el caso de un flujo turbulento de baja concentración en partículas.

**Modelo numérico:** Las ecuaciones que gobiernan este tipo de flujo provienen de las leyes de conservación de la Mecánica de Fluidos. La avalancha aerosol se caracteriza por un flujo fuertemente turbulento que es descrito por el modelo

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} p \\ pu \\ pv \\ pw \\ c \\ k \end{bmatrix} + \text{div} \begin{bmatrix} pu & pv & pw \\ pu^2 + p & puv & puw \\ puv & pv^2 + p & pvw \\ puw & pvw & pw^2 + p \\ cu & cv & c(w - w_f) \\ ku & kv & kw \end{bmatrix} = \text{div} \left( u_t \vec{\nabla} \begin{bmatrix} 0 \\ pu \\ pv \\ pw \\ c \\ k \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -pg \\ 0 \\ Pr - \epsilon \end{bmatrix}$$

k-L: en el Cemagref hemos elegido un modelo de clausura que permite calcular la viscosidad turbulenta a partir del valor de la energía turbulenta k y de la longitud de mezcla L (que es del orden de la altura de la avalancha). El sistema de ecuaciones resultantes es:

donde p es la densidad media, (u, v, w) la velocidad, p la presión, ε la concentración en partículas, k la energía turbulenta, Pr la producción de la energía turbulenta, e la disipación de la energía turbulenta, wf la velocidad de caída libre de las partículas y  $\mu_t$  la viscosidad turbulenta.

A partir de una grilla que permite la utilización del método de elementos finitos, acoplado al modelo numérico de terreno correspondiente, se efectúa la resolución (sobre la grilla) de las ecuaciones escritas en forma conservativa. El esquema numérico global es de orden 2 en el tiempo y en el espacio. Para poder completar esta simulación, un modelo de erosión-acumulación ha sido desarrollado y validado a partir de medidas de «bocanadas» de densidad (mezcla de agua y partículas sólidas) obtenidas en cuba acuática. El modelo reproduce bien la altura y velocidad de desplazamiento de las bocanadas mientras que el flujo permanece turbulento.

### Referencias

Beghin P., Olagne X., 1991 - *Cold Regions Science and Technology*, vol.19.  
 Hopfinger E. J., Tochon-Danguy J. C., 1977, *Journal of Glaciology*, vol.19, p.343-356.  
 Naaim M, Ancey C., 1992, *Actes de l'université d'été des risques naturels*, Chamonix, pp 160-172.  
 Naaim M.- 1995, *La Houille Blanche*, N°5/6, pp: 56-62.  
 Naaim M. et Martinez H., 1995, *Surveys in Geophysics*, 16, 695-710.  
 Niishimura K, Maeno N., 1987, *Proceedings of the Davos Symposium*, IAHS N° 162, pp 395-404