

MODELADO NUMERICO DE LA ESTABILIDAD DE UNA PLACA DE NIEVE EN PENDIENTE

Dominique Daudon

*Laboratoire Sols Solides Structures, Université Joseph Fourier - INPG
B.P. 53, 38041 Grenoble Cedex 9, Francia*

Jean-Laurent Burlet

*Laboratoire de Génie Civil, LERMES / CUST, Université Blaise Pascal
B.P. 206, 63174 Aubières, Francia*

Hugo H. Martinez

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo - CONICET
C.C. 405, 5500 Mendoza, Argentina*

RESUMEN

La nieve es un material cuyas propiedades mecánicas son complejas debido a su variabilidad espacial y a la permanente evolución de su microestructura. La mayoría de los modelos de la ruptura del manto nival (que produce el desencadenamiento de una "avalancha de placa") han sido realizados teniendo en cuenta las leyes de comportamiento de la Mecánica de Suelos y los criterios de estabilidad en pendiente.

Este artículo describe el modelado tridimensional del manto de nieve estratificado. El cálculo de los índices de estabilidad en cada punto de la extensión permite la descripción simultánea de la ruptura en cizallamiento de los interestratos y de la ruptura en tracción de la capa superficial inestable.

La resolución numérica del problema se efectúa por medio del software FLAC3D en elasto-plasticidad, sobre una geometría tridimensional simple.

A partir de las curvas de isovalores de índices se pueden obtener las zonas potencialmente inestables. Finalmente, la aplicación a un escenario inestable permite validar el modelo.

Palabras claves: nieve, avalancha de placa, índice de estabilidad, ley de Mohr-Coulomb, modelado numérico.

ABSTRACT

STABILITY NUMERICAL MODEL OF A SLOPE SNOW SLAB

Snow is a material whose mechanical properties are complex due to its space variability and permanent evolution of its microstructure. Most models of the snow pack break (which produces the beginning of a "slab avalanche") have been accomplished taking into account the behavior laws of the Mechanics of soils and slope stability criteria.

This paper describes a three-dimensional modelling of the stratified snow pack. Stability index calculation in each point of the extension permits the simultaneous description of the interstrata shearing break and traction break of the unstable superficial layer.

FLAC3D software performs numerical resolution of the elastic-plasticity problem, on a simple three-dimensional geometry.

From isovalue index curves can be obtained potentially unstable areas. Finally, the application to an unstable stage permits model validation.

Key words: snow, slab avalanche, stability index, Mohr-Coulomb law, numerical modelling.

1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento de la nieve puede asimilarse al de los suelos cohesivos, lo que permite su estudio mediante el uso de herramientas teórico-prácticas de la geomecánica (geostadística, métodos de perturbaciones, de diferencias finitas). El interés del presente trabajo es identificar el tipo de estructura nival que puede provocar una avalancha de placa.

Hasta el presente, las simulaciones bidimensionales consideraban un manto homogéneo por encima de la ruptura potencial elegida. De esta forma la variabilidad espacial de las propiedades del manto no se tomaba en cuenta con precisión. La simulación 3-D aquí presentada ha sido realizada utilizando el código FLAC3D (en diferencias finitas). Es por ello que nuestro interés principal es poder considerar el caso de una topografía tridimensional y proporcionar un estado de esfuerzos en cada punto del manto, ya que hasta el presente los indicadores de estabilidad han estado basados sobre cálculos globales en dos dimensiones. Los cálculos de ruptura utilizan el método de perturbaciones de Bishop (código PETAL desarrollado en el Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de Francia, utilizado para verificar las rupturas en taludes y terraplenes) para obtener un coeficiente de seguridad y para encontrar las líneas de ruptura posibles [6]. Con dicha herramienta numérica no sólo se accederá a una cartografía de índices de estabilidad sino también se podrán analizar cualitativamente los diferentes mecanismos que conducen a la ruptura, por medio de estudios paramétricos de los diferentes factores de influencia.

Primeramente se describirá la forma en la que se ha estimado la estabilidad de la placa de nieve hasta el presente, para luego poder explicar el desarrollo actual y presentar finalmente los resultados obtenidos.

2. ESTABILIDAD DEL MANTO NIVAL

2.1 *Características de una avalancha*

Desde el punto de vista fenomenológica las avalanchas de nieve son consideradas como movimientos gravitacionales rápidos [1]. No obstante, la clasificación más utilizada distingue tres tipos de avalanchas.

- *Las avalanchas de nieve polvo y seca:* se caracterizan por un aerosol muy rápido y devastador, la masa de nieve puesta en movimiento proviene de la superficie del manto.
- *Las avalanchas de fusión o de nieve húmeda:* interviene sobretodo a fines del invierno cuando el contenido de agua líquida en el seno del manto aumenta por la fusión diurna; el movimiento es lento y se asemeja al de un fluido viscoso, y comprende todo el espesor del manto nival. Su efecto destructivo debe más a la alta densidad del flujo que a su velocidad.
- *Las avalanchas de placas:* ellas se forman luego de la nevada, cuando el fuerte viento en superficie forma una placa superficial de nieve con cohesión. El anclaje de este nuevo estrato de formación eólica sobre el ya existente es deficiente. Cualquier sobrecarga, como el paso de un esquiador o una nueva nevada, es suficiente para producir a la vez la ruptura del estrato frágil en cizallamiento y en tracción.

En todas las avalanchas pueden distinguirse tres fases: inicio, escurrimiento y frenado (depósito) [1]. Las dos últimas fases son las más conocidas por la necesidad imperiosa de la defensa pasiva de construcciones o de protección de personas. La primer fase de pérdida de estabilidad que produce el inicio de la avalancha es menos conocida por la variabilidad de factores que intervienen en ella (estado termodinámico y mecánico del manto).

2.2 *Evaluación de la estabilidad mecánica del manto nival*

La búsqueda de un parámetro que permita evaluar la transición de la estabilidad a la inestabilidad del manto nival ha sido el objeto de numerosas investigaciones, especialmente en lo concerniente a las avalanchas de placa. La ruptura en cizallamiento de un estrato frágil es determinante. Teniendo en cuenta la hipótesis precedente, la posibilidad de aparición de una inestabilidad ha sido cuantificada de acuerdo a un índice de estabilidad. El mismo consiste en una comparación entre la capacidad de resistencia al cizallamiento del medio (τ_{rupt}) y el efecto de las cargas aplicadas.

La mayor simplificación reside en la no consideración de un estado de esfuerzo de tridimensional. En efecto, la estimación de los esfuerzos debidos a la sobrecarga es realizada a partir de un manto nival bidimensional infinito de pendiente y espesor constante (figura 1).



Figura 1: inicio de una avalancha de placa (corte)

Los primeros cálculos de índices de estabilidad no consideraban la inclinación topográfica del manto nival. el más simple entre ellos (*Safety Factor*), utilizado en un programa de protección de autorutas en Canadá [9] se escribe como:

$$SF = \frac{\tau_{rupt}}{\sigma_v}, \text{ con } \sigma_v = \sum \rho_i \cdot g \cdot e_i \quad (1)$$

donde ρ_i y e_i son respectivamente la densidad de masa y el espesor (normal a la pendiente) de cada capa o estrato de nieve.

El esfuerzo de ruptura en cizallamiento τ_{rupt} es evaluado experimentalmente en laboratorio o in-situ (método de Rutschblock [8]), σ_v se calcula a partir del conjunto de cargas verticales. El índice SF se asemeja a un coeficiente de rozamiento. Luego la pendiente topográfica fue introducida [5], [8] y el índice resultó más homogéneo.

Estudios experimentales han mostrado el aumento de la ruptura en cizallamiento con el crecimiento de esfuerzos normales [14]. Por medio de una ley de Mohr-Coulomb, proveniente de la Mecánica de Suelos y que relaciona la ruptura en cizallamiento y el esfuerzo normal, se obtiene el siguiente índice:

$$S = \frac{\tau_{rupt}}{\tau} = \frac{C + \text{tg}(\Phi) \cdot \sigma_n}{\tau} \quad (2)$$

donde C (Pa) y ϕ (grados) representan la cohesión y el ángulo de frotamiento interno de la nieve en la ruptura (Ley de Mohr-Coulomb). C puede ser medida experimentalmente in-situ (utilizando un marco de cizallamiento) y ϕ se calcula por la fórmula de Roch de 1966 [14]: $\text{tg}\phi = 0.08C + 0.4$ (C en kPa).

Si α es el ángulo de la pendiente, los esfuerzos tangencial τ y normal σ_n pueden escribirse como:

$$\begin{cases} \sigma_n = \sigma_v \cdot \cos(\alpha) \\ \tau = \sigma_v \cdot \sin(\alpha) \end{cases}, \text{ con: } \sigma_v = \sum \frac{\rho_i \cdot g \cdot e_i}{\cos(\alpha)} \quad (3)$$

La estabilidad corresponde a un índice S superior a uno. Es conveniente definir un coeficiente de seguridad suficiente para poder considerar el carácter "probable" de la inestabilidad: un índice comprendido entre 1,5 y 1 (como en suelos) caracterizará la posibilidad de una inestabilidad.

Varios casos de sobrecarga humana han sido estudiados. Föhn [8] estudió el efecto de sobrecarga producido por un esquiador, por un alpinista, por una máquina pisanieve y por una explosión. El aumento de esfuerzo de cizallamiento $\Delta\tau$ del esfuerzo debido al peso de la nieve depositada sobre la capa crítica es calculada considerando un manto nival en deformación plana: La sobrecarga provocada por un peatón (fuerza puntual) es, cerca de la superficie (50 cm de profundidad), es un 50% mayor a la sobrecarga provocada por un esquiador, pero decrece rápidamente a partir de los 50 cm. El índice de estabilidad S' así obtenido es validado sobre 110 sucesos avalanchosos y se ha revelado como un adecuado instrumento de predicción, especialmente en los casos de avalanchas originadas artificialmente.

Sommerfeld [18], utilizó un factor de corrección para la medida de la cohesión. Efectuada in-situ, a través de un aparato que presenta una superficie de ruptura menor (25 cm²) que la superficie real de cizallamiento durante la ruptura del manto (varios m²), la medida resultó muy puntual y no integró suficientemente la variabilidad espacial. Jamieson y Johnston [9] compararon, para una misma pendiente de 35° los índices de base (SF) y corregido (S). Ellos muestran que la corrección no resultó fundamental en la determinación de la estabilidad, ya que existe simplemente una traslación de la zona de transición de la estabilidad hacia la estabilidad (alrededor de 1.7 para SF y de 3 para S). En los dos casos el índice es satisfactorio en aproximadamente 75% de las situaciones estudiadas.

La interpretación así como el cálculo de los índices de estabilidad se comprueba de manera simple, pero la aplicación está limitada a pendientes de geometría simple (manto nival infinito de pendiente y de espesor constante en dos dimensiones). Esto indica si una pendiente es globalmente estable, pero no puede describir los fenómenos locales. Finalmente, no toma en cuenta la puesta en tracción del manto que puede, a veces, ser preponderante.

Es por lo expuesto que, deseamos definir los índices de estabilidad locales calculables en todo punto y dependientes del estado de esfuerzo tridimensional.

2.3 Índices de estabilidad F_s y F_t

En cada punto del manto nival el estado de esfuerzo está determinado por los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) y puede ser representado por el círculo de Mohr. Sobre una faz en cualquier orientación, el esfuerzo para la componente normal σ_n y la tangente τ describen el círculo. Los valores admisibles [3] son definidos a partir de la imposibilidad del círculo de Mohr de desbordar sobre un sector limitado por:

- una recta que traduce la ruptura en cizallamiento (criterio de Mohr-Coulomb de ecuación: $\tau_{rupt} = C + tg(\Phi) \cdot \sigma_n$ con Φ calculado por la fórmula de Roch [14]).
- una recta que traduce la ruptura en tracción (de ecuación donde: $\sigma_n = \sigma_t$, donde σ_t es la resistencia en tracción).

Dos índices pueden entonces caracterizar la estabilidad en todo punto. Ellos se definen como:

$$F_c = \frac{R_{s \max}}{R_c} = \frac{\sin \Phi (2C \cot g \Phi + \sigma_1 + \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (4)$$

donde R_c es el radio del círculo de Mohr, representando el estado de esfuerzos; $R_{s \max}$ la distancia del centro del círculo a la recta de Mohr-Coulomb, y F_c es el índice de estabilidad local en relación al cizallamiento.

Además,

$$F_t = \frac{R_{t \max}}{R_c} = 2 \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - \sigma_t}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (5)$$

donde $R_{t \max}$ es la distancia del centro del círculo al criterio de ruptura en tracción, F_t es el índice de estabilidad local en relación a la tracción. La figura 3 resume gráficamente el método. La inestabilidad de un punto del manto aparece cuando F_c y F_t son inferiores a 1.

Estos índices pueden así ser calculados en cada punto del manto, presentando las siguientes ventajas:

- pueden estimarse para cañadas de topografía compleja donde puede calcularse el estado de esfuerzo en todo punto;
- permiten analizar el rol de las diferentes capas de nieve en la producción de la avalancha, en el caso de un manto de estratigrafía compleja;
- permiten el estudio de la influencia de los diferentes parámetros sobre el origen de la avalancha, como por ejemplo la concavidad o la convexidad de una pendiente, el efecto de un quiebre de pendiente, la presencia de esquiadores o de rugosidades de superficie;
- posibilitan la evaluación de los volúmenes de nieve puestos en movimiento, si la línea de fisura se identifica con un isovalor del índice de estabilidad.

No obstante dichas ventajas, para que la representación local sea fácil de utilizar es indispensable poder calcular los índices en un código que evalúe el estado de esfuerzo predominante en el seno del manto sobre un gran número de puntos. Nuestra elección se ha focalizado sobre el código de cálculo « *Flac 3D* » en diferencia finitas explícita, lo que implica un esquema numérico de segundo orden sobre las variables espaciales, y de primer orden para la variable temporal [2]. Dicho código es frecuentemente utilizado en Mecánica de Suelos, y posibilita la utilización de leyes de comportamiento, la construcción de grillas con varios elementos, y ofrece una opción de cálculo para grandes deformaciones.

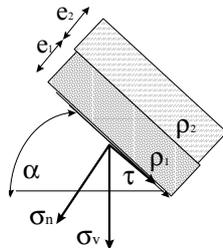


Figura 2: convención de cálculo

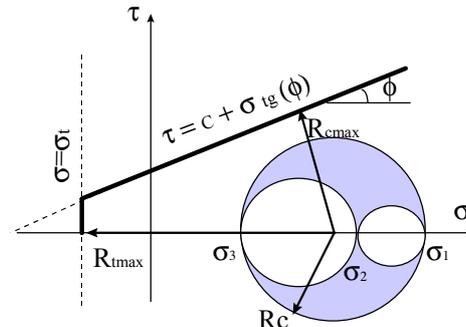


Figura 3: estado de tensión y criterio de ruptura

3. MODELADO DE UNA PLACA DE VIENTO

Para una previsión efectiva del riesgo de avalancha, han sido realizadas medidas en el terreno que responden a un determinado protocolo [4]. Un sondeo a partir del uso de un penetrómetro de suelos adaptado a nieve es seguido por una abertura del manto nival para la toma de medidas (cualitativas y mecánicas).

Para facilitar la interpretación de la información obtenida in-situ y el archivo de datos, las medidas son presentadas por el software GELINIV [7]. La figura (4) presenta un perfil estratigráfico, efectuado este invierno 1999 en la Estación de esquí de Los Penitentes. El perfil así obtenido servirá de soporte para la descripción de las medidas.

Protocolo de medidas:

Se efectúa el sondeo con el penetrómetro Pandalp, expresando la resistencia a la penetración R en kgf , para una punta 12 cm^2 , $1 \text{ kgf} = 8.333 \text{ kPa}$. Posteriormente se abre el manto para obtener el perfil vertical de temperaturas (cada 10 cm). Luego se traza el perfil estratigráfico de acuerdo a las capas existentes. Cada capa es analizada determinando en cada una de ellas:

- La forma y el diámetro de los granos: FF y Dm (en mm).
- La dureza de la capa determinada por el método del puño o de un dinamómetro de compresión.
- La densidad de masa de una muestra de volumen conocido: MV (en kg/m^3).
- El cizallamiento obtenido con un cizómetro: CI (en kPa).
- La humedad medida por un tensiómetro de agua líquida: TL.
- La última columna indica un factor de estabilidad, es decir la relación entre el esfuerzo tangencial y la resistencia al corte o cizallamiento. Dicho cálculo es unidimensional: CT.

3.1 Hipótesis de cálculo

3.1.1 Estructura del manto nival

De acuerdo a las observaciones in-situ se definen cuatro tipos de nieve diferentes en función de su densidad:

- nieve dura, $\rho=300 \text{ kg/m}^3$
- nieve frágil, $\rho=100 \text{ kg/m}^3$
- nieve intermedia, $\rho=200 \text{ kg/m}^3$
- nieve fresca, $\rho=150 \text{ kg/m}^3$

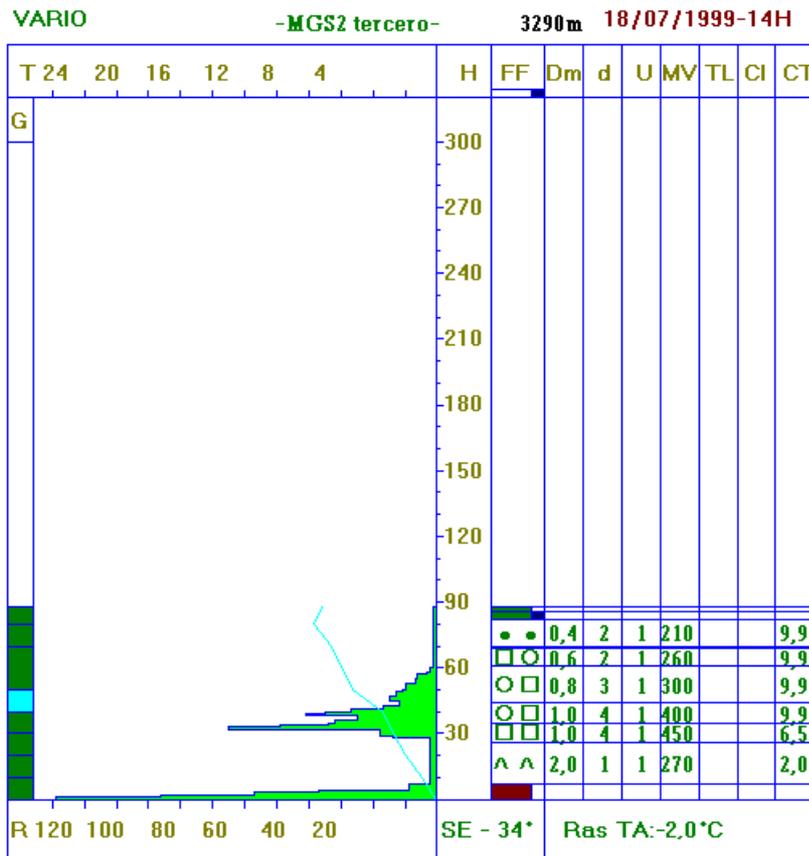


Figura 4 : perfil estratigráfico realizado en la estación de esquí Los Penitentes

Las magnitudes E (módulo de elasticidad) así como CI, ϕ y σ_t han sido fijados según los valores obtenidos teórica y experimentalmente (cuadro 1).

type de neige	ρ (kg/m ³)	C (kPa)	ϕ (°)	σ_t (kPa)	E (MPa)
neige tendre (N1)	100	0.4	23	0.4	0.22
neige intermédiaire (N2)	200	1	26	2.09	1.7
neige dure (N3)	300	8	46	5.52	15
neige fraîche (NF)	150	1	24	1.05	0.5

Cuadro 1: características elásticas y plásticas de los diferentes tipos de nieve

Para la realización de los cálculos, la nieve es considerada como un material elasto-frágil [10] y el límite de fragilidad se define por medio del criterio de Mohr-Coulomb (parámetros C y ϕ) en cizallamiento y en tracción por una resistencia límite σ_t . El coeficiente de Poisson ν se fija en 0.1 (valor extrapolado según la medida realizada por Mellor [12] en sitios de nieve más densa).

3.1.2 Representación geométrica

Se presenta aquí una cañada de 35° de inclinación, de 100m de largo y 40m de ancho, en la cual los bordes están sobreelevados en 3m en relación a la línea mayor de la pendiente, lo que desemboca sobre un valle de fondo plano. Los estratos del manto nival tienen un espesor constante sobre toda la pendiente. La geometría es simétrica (figura 5) en relación mayor de la pendiente (plan x=0). El grillado de cada estrato ha sido realizado con al menos 20 zonas en ancho, 40 en largo y 5 en altura..

Las condiciones límites son las siguientes:

- el suelo sobre el que se deposita la nieve se supone indeformable;
- los estratos están ligados unos con otros (sin elementos de interface);
- la nieve se supone anclada en la parte superior de la pendiente sobre los bordes laterales y en el límite inferior (plan $y=0$);

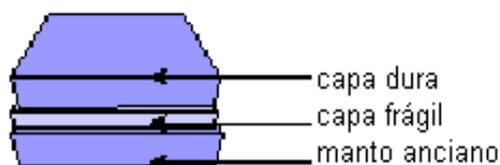


Figura 5: manto nival incluyendo una placa de viento

3.1.3 Cálculo de esfuerzos

El análisis por medio del código FLAC3D se basa en el cálculo del estado de deformaciones y en la ley de comportamiento para el cálculo de los esfuerzos en el seno del manto nival. Dicho código, explícito, se basa en el método de las diferencias finitas y permite la descripción de las grandes deformaciones. Los materiales se representan a través de los elementos poliédricos en cada zonas que el utilizador ajusta a la geometría de los objetos que va a modelar. A partir del desplazamiento de los nodos, los esfuerzos constantes sobre cada elemento tetraédrico son determinados y posteriormente combinados en la zona que nos interesa.

El cálculo de F_c y F_t ha sido implantado en FLAC3D [17]. Los dos coeficientes son constantes sobre un elemento de la grilla. La elasto-fragilidad de las placas no puede ser tomada en cuenta simplemente por si sola (destrucción de la zona, concentración de los esfuerzos). Un comportamiento elasto-plástico en pequeña deformación ha sido elegido para efectuar el cálculo del estado de esfuerzo necesario para el cálculo de F_c y F_t .

3.2 Modelización de una placa de viento

La estratigrafía de este tipo de estructura se presenta en la figura 6. Se trata de uno de los cinco casos de estratigrafías señaladas como inestables (comienzo de la estación invernal, escarcha de superficie, placa de viento, capa dura inferior y costra de recongelamiento) [1].

En las figuras 7 se trazan las curvas de isovalores de los índices de estabilidad locales calculados en cada zona de la grilla para una semipendiente (simetría en relación a la línea mayor de la pendiente). Los grises más claros corresponden a las zonas más inestables. En este ejemplo se resalta la ruptura de la capa débil en cizallamiento en toda su parte central (figuras 7a, 7b y 7c). La ruptura de la placa de viento se produce en tracción y en la periferia de la cañada (figura 7d).

Este escenario generalmente observable en el terreno valida la definición de los índices de estabilidad locales F_c y F_t ; la ruptura en cizallamiento interviene en una débil capa crítica, y la capa más rígida rompe en tracción en la proximidad de sus ligaduras con los bordes (crestas o bien proximidades de rocas).

La estimación del riesgo de avalancha (hasta el momento realizado a la escala de un macizo montañoso (previsiones del Centre d'Etudes de la Neige de MétéoFrance en Grenoble, Francia), cálculo de S o SF, puede transferirse a una escala local. Cada carta de valores de índices de estabilidad puede ayudar al experto a estimar el riesgo potencial de pérdida de estabilidad, por lo que proporciona particularmente, indicaciones cualitativas en cuanto al modo de aparición de la inestabilidad.

En otros escenarios avalanchosos estudiados pueden observarse, globalmente, los mismos fenómenos.[16]. Si bien la aparición de la ruptura corresponde a lo observado in-situ, los valores mínimos de los dos índices permanecen más elevados (1.5 a 1.8). Desde el punto de vista cualitativo el resultado es suficientemente satisfactorio, pero en el plano cuantitativo una reflexión más profunda queda por realizar, a fin de definir el dominio de variación de F característico de la inestabilidad.

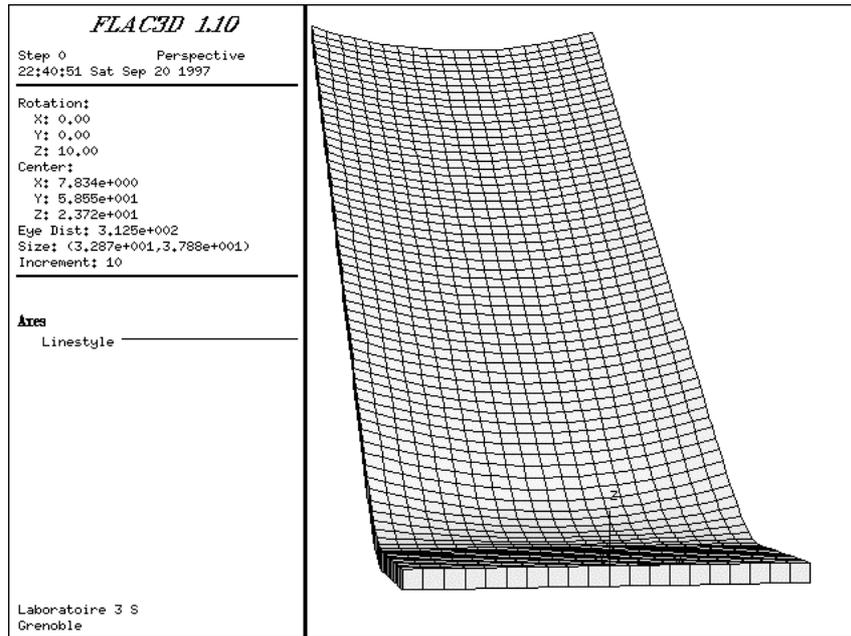
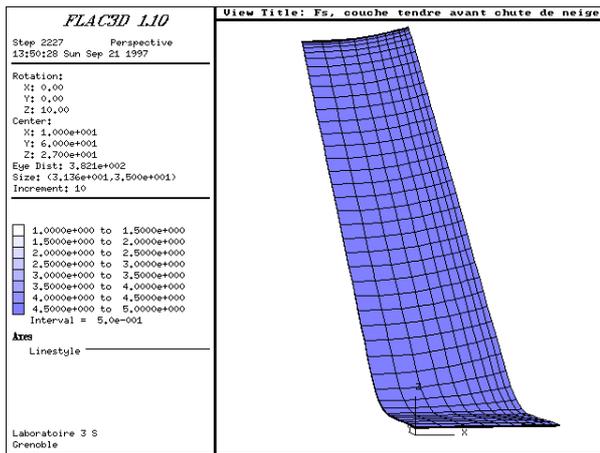
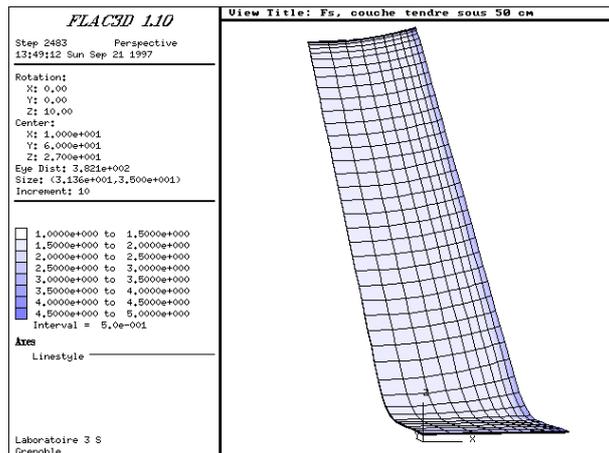


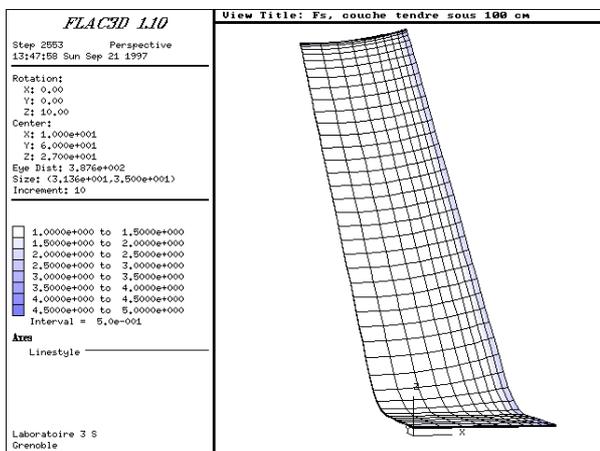
Figura 6: pendiente tridimensional



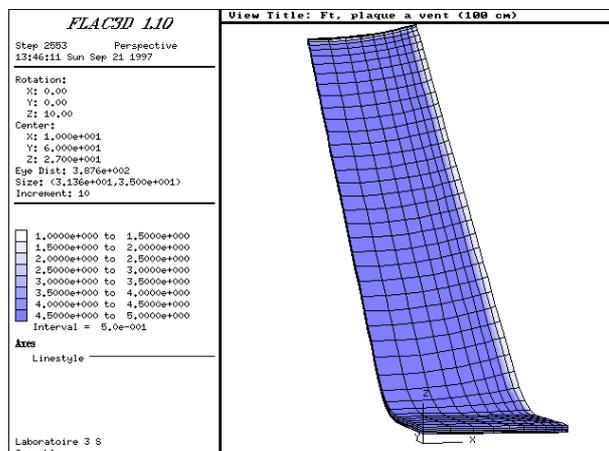
(a) cizallamiento de la capa débil (sin sobrecarga)



(b) cizallamiento de la capa débil



(c) cizallamiento de la capa débil



(d) tracción en la placa

Figura 7: modelización de la ruptura en el caso de la placa de viento

4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La modelización del comportamiento mecánico de la nieve en pendiente ha podido llevarse a cabo por medio del código FLAC3D, permitiendo así definir los índices de estabilidad locales, que indican el riesgo de ruptura del manto nival por tracción o cizallamiento.

Dicha herramienta es novedosa. Si se desea realizar un instrumento de ayuda fiable, la interpretación de los índices F_c y F_t debe ser contemplada para estudios de casos típicamente avalanchosos. No obstante hasta el presente la utilización del mismo permite la mejor comprensión de:

- las influencias respectivas de los parámetros geométricos (concavidad o convexidad de la pendiente, relación largo/ancho de la pendiente, ruptura de la pendiente, espesor de las diferentes capas) y mecánicos (valores de las diferentes constantes que intervienen en la modelización) sobre la actividad avalanchosa;
- la ley de comportamiento mejor adaptada a otras estratigrafías avalanchosas.

Varias direcciones de investigación merecen aún ser consideradas:

- la introducción de la evolución del comportamiento de la nieve en el tiempo (historia de la acumulación y de su transformación) para llevar el manto a un estado de inestabilidad.
- la transformación dinámica (y no sólo estática) debida al pasaje de un esquiador.
- los mecanismos de fisuración de pendientes inestables a fin de determinar los volúmenes puestos en juego y el rol de la topografía en la propagación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Profesor Roland GOURVES de la empresa Sols Solution (Clermont-Ferrand, Francia) la puesta a disposición de un penetrómetro Pandalp para hacer este tipo de estudios en Argentina. También agradecen a MétéoFrance por el permiso de utilización del software GELINIV, adaptado especialmente para el Hemisferio Sur. Tampoco quieren dejar de mencionar la atención recibida por parte del centro de esquí Los Penitentes (Mendoza), y en particular la ayuda del Señor Andrés GARCIA.

REFERENCIAS

- [1] ANCEY C. , « Guide neige et avalanches : connaissances, pratique, sécurité (EDISUD) 317p.
- [2] BILLAUX D., CUNDALL P. Simulation des géomatériaux par la méthode des éléments Lagrangien, Rev Franc Géotech n°63 , avril 93, p 9-21.
- [3] BOULON M. :Computation of safety factors (Plaxis course : safety factors 08.01.1996 15.01.1996) 19p.
- [4] CEN-Centre d'Etudes pour la Neige, –Pratique du sondage par battage et du profil stratigraphique.
- [5] CONWAY, H. and J. ABRAHAMSON : Snow stability index, J Glaciol., 30(106) 1984) 321-327.
- [6] DAUDON D., GOURVES R., FLAVIGNY E. PAGE Y, Mechanical modelling of snow cover rupture, Chamonix, Mayo 97.
- [7] DUMAS J-L. et R. BOLOGNESI, (1994) -GELINIV-NXLOG: Des outils pour la prévision locale. Une collaboration Franco-Suisse. Neige et Avalanche n 65, pp.2-5.
- [8] FÖHN, P.: The stability index and various triggering mechanisms (Proceedings of the Davos symposium, 199-205- IAHS Publ.n°162, 1986.
- [9] JAMIESON J. B. and JOHNSTON C. D. : Shear frame stability parameters for large-scale avalanche forecasting (A. Glaciol 18 1993) 268-272.
- [10] LACKINGER B. Supporting forces and stability of snow slab avalanches : a parameter study (A. Glaciol. 13 , 1989) 140-145.
- [11] MAC CLUNG D., SCHAERER P. :The Avalanche Handbook (The Mountainers, 1993)
- [12] MELLOR, M : A review of basic snow mechanic. IAHS Publication 114 (symposium at Grindelwald 1974), 251-291.

- [13] MONTMOLLIN V. : Introduction à la rhéologie de la neige (Thèse de l'Université scientifique et médicale de Grenoble, 1978) 280p.
- [14] ROCH A. Les variations de résistances de la neige- Publication n°69 de l'AIHS, Symposium international sur les Aspects scientifiques des Avalanches de neige , 86-99.
- [15] SCHWEIZER J. : The influence of the layered character of snow cover on the triggering of slab avalanches (A. Glaciol., 18 1993) 193-198
- [16] SCHILLINGER L. Modélisation numérique de la stabilité des plaques de neige, Rapport de DEA, Université Joseph Fourier, Grenoble, sept 97, 47p.
- [17] SCHILLINGER.L, DAUDON D. and FLAVIGNY E., 1998. Three dimensional numerical modelling of snow slab avalanches, NGI congres, 24-26 may 1998, Norvège.
- [18] SOMMERFELD R.A. A correction factor for the roch's stability index of slab avalanche release. (J. of Glaciol., 17 (75), 1976) 145-147.