

*Modélisation numérique de la stabilité  
de plaques de neige*

Laurent SCHILLINGER  
Dominique DAUDON  
Etienne FLAVIGNY

laboratoire Sols Solides Structure  
UJF-INPG-CNRS

## 1. RAPPEL DES OBJECTIFS

Nous nous intéressons aux types de manteaux neigeux qui risquent de conduire à la formation d'avalanches de plaques. Le comportement de la neige dans ce cas est voisin de celui des sols, ce qui rend son étude possible par les outils théoriques, pratiques et informatiques de la géomécanique. Plus particulièrement, les travaux présentés ici ont été menés avec le logiciel FLAC3D.

L'intérêt d'étudier le départ des avalanches de plaques sous l'aspect mécanique est double. Il permet non seulement d'estimer quantitativement le risque avalancheux (de même que l'outil statistique), mais encore d'analyser qualitativement les différents mécanismes conduisant à la rupture.

Nous rappellerons ici brièvement de quelle manière est estimée actuellement la stabilité mécanique d'une plaque de neige, puis la démarche que nous avons suivie, et enfin nous présenterons les premiers résultats que nous avons obtenus.

## 2. STABILITE MECANIQUE DES PLAQUES DE NEIGE

### 2.1. Formation d'une avalanche de plaque

Qu'elle soit spontanée ou déclenchée, une avalanche de plaque est toujours due à l'apparition conjointe de deux phénomènes : une rupture en cisaillement et une rupture en traction (figure 1). La première se produit sous la plaque qui va « partir » ; une épaisseur de neige se rompt, formant alors un plan de glissement approximativement parallèle au sol. La seconde rupture se passe en amont de la plaque, suivant une surface à peu près perpendiculaire à la surface du manteau neigeux.

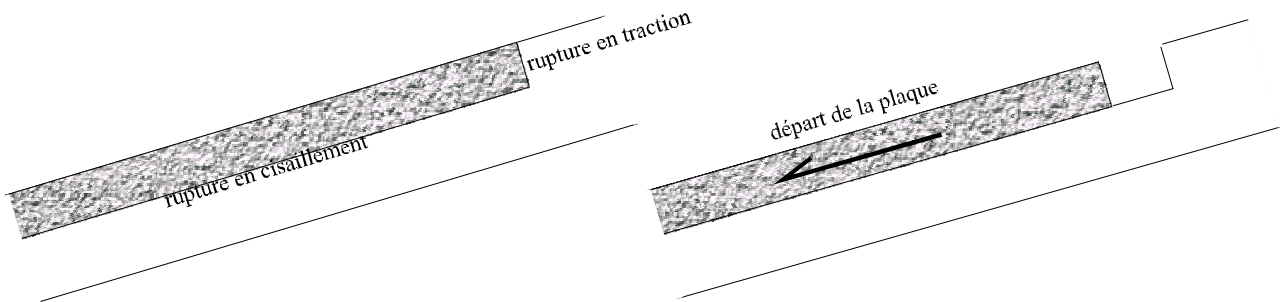


figure 1 : départ d'une avalanche de plaque (coupe)

### 2.2. Indice de stabilité F

La rupture en cisaillement a, jusqu'à présent, été considérée comme déterminante. Sa probabilité d'apparition a été quantifiée par l'indice de stabilité F, défini et utilisé depuis plus de dix ans. Il peut être calculé assez simplement pour une plaque d'épaisseur  $e$  et de densité  $\rho$  ( $\text{Kg/m}^3$ ) connues, reposant sur une surface plane. On suppose que la rupture de la neige est décrite par une loi de Mohr-Coulomb. F est le rapport de la résistance au cisaillement de cette plaque à la contrainte moyenne de cisaillement, calculées sur le plan de glissement :

$$F = \frac{\tau_{rupt}}{\tau} = \frac{C + \tan(\varphi) \cdot \sigma_n}{\tau}$$

Les contraintes au sein du manteau sont dues à son poids propre, la contrainte verticale sur le plan de glissement considéré est  $\sigma_v$  (Pa). Les valeurs de  $\sigma_n$  (Pa), contrainte normale au plan de glissement, et  $\tau$  (Pa), contrainte de cisaillement le long du plan de glissement, s'écrivent alors (figure 2) :

$$\begin{cases} \sigma_n = \sigma_v \cdot \cos(\alpha) \\ \tau = \sigma_v \cdot \sin(\alpha) \end{cases}, \text{ avec : } \sigma_v = \frac{\rho \cdot g \cdot e}{\cos(\alpha)}$$

$C$  (Pa) et  $\phi$  (deg) sont respectivement la cohésion et l'angle de frottement de la neige qui se rompt (loi de Mohr-Coulomb),  $\alpha$  (deg) est l'angle d'inclinaison de la pente.

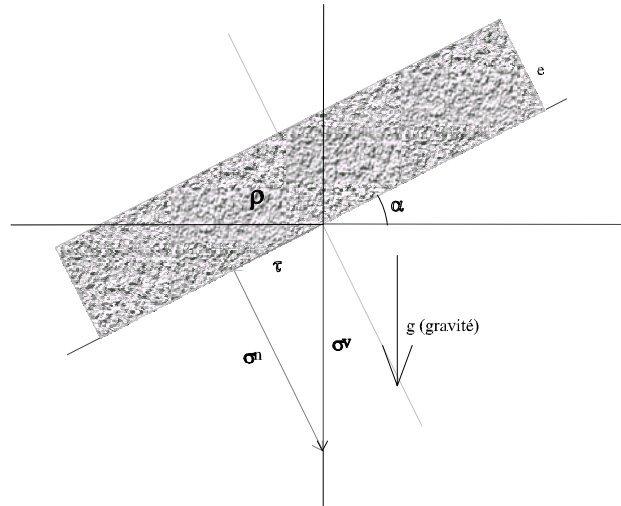


figure 2 : calcul de  $\sigma_v$ ,  $\sigma_n$  et  $\tau$

Si  $F$  est supérieur à 1, la plaque est stable, s'il est inférieur ou égal à 1 elle est instable.

Son interprétation, ainsi que son calcul, s'avère simple. De plus il a démontré sa fiabilité.

Cependant son application est limitée :

- il ne se calcule que pour des pentes de géométrie simple
- il indique si une pente est globalement stable, mais pas les zones qui sont les plus fragiles
- il ne décrit pas la rupture en traction.

C'est pourquoi nous avons préféré utiliser des indices de stabilité locaux, dont la définition, inspirée de celle de  $F$ , est donnée dans le prochain paragraphe.

### 2.3. Indices de stabilité locaux $F_s$ et $F_t$

En chaque point du manteau neigeux, l'état de contrainte est représenté par les contraintes principales  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  et  $\rho_3$  ( $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ ). Sur une facette qui passe par ce point s'exerce le vecteur contrainte  $\sigma$ , déduit des contraintes principales (figure 3a). Suivant l'orientation dans l'espace de la facette, les contraintes de cisaillement  $\tau$  et de traction  $\sigma_n$  qui s'exercent décrivent le cercle de Mohr, représenté sur la figure 3b. Son rayon est limité par :

une droite qui décrit la rupture en cisaillement (critère de Mohr-Coulomb), d'équation :

$$\tau_{rupt} = C + \tan(\phi) \cdot \sigma_n$$

une droite qui représente la rupture en traction, d'équation :  $\sigma_{rupt} = \sigma_t$ , où  $\rho_t$  est la résistance en traction

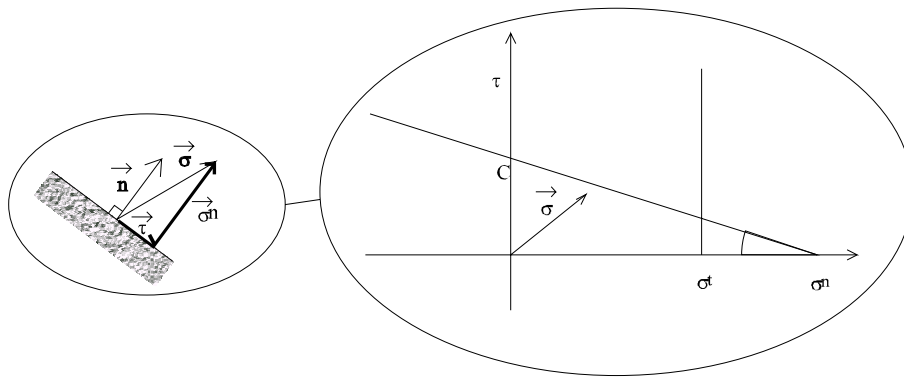


figure 3a : représentation de l'état de contrainte sur une facette dans le plan de Mohr ( $\sigma$ - $\tau$ )

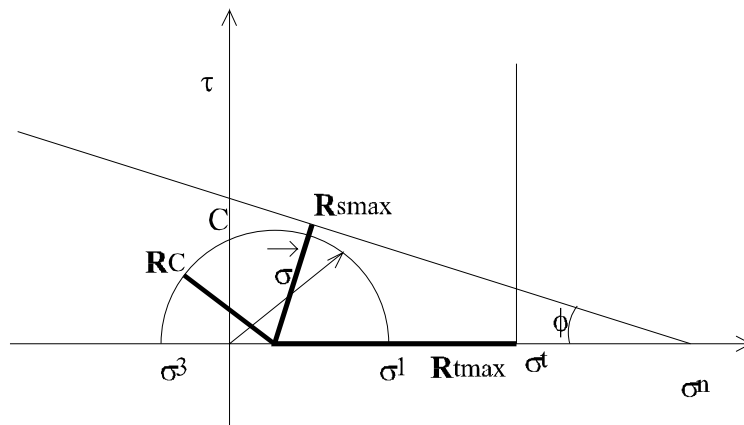


figure 3b : définition de coefficients de sécurité locaux à partir du cercle de Mohr

Deux indices doivent donc représenter la stabilité de la neige. Ils sont définis comme suit :

$$F_s = \frac{R_{s\max}}{R_c}, \text{ où } R_c \text{ est le rayon du cercle de Mohr et } R_{s\max} \text{ la distance de son centre à la droite de Mohr-Coulomb. } F_s \text{ est l'indice de stabilité local par rapport au cisaillement.}$$

$$F_t = \frac{R_{t\max}}{R_c}, \text{ où } R_{t\max} \text{ est la distance du centre du cercle au critère de rupture en traction. } F_t \text{ est l'indice de}$$

stabilité local par rapport à la traction.

- $F_s$  et  $F_t$  tendent vers l'infini lorsque l'élément de volume considéré est stable, et vers 1 s'il est proche de la rupture. Leur interprétation est donc identique à celle de  $F$ .

Le calcul de ces indices étant local, il présente, par exemple, les intérêts suivants :

- il peut être appliqué à des combes de topographie complexe
- il permet d'analyser le rôle des différentes couches de neige dans le déclenchement de l'avalanche, dans le cas de manteaux de stratigraphie complexe
- il permet une étude de l'influence de différents paramètres sur le déclenchement, comme la concavité ou la convexité de la pente, l'effet d'une rupture de pente, la présence de skieurs, la présence d'aspérités sur le sol...
- il peut, à terme, rendre possible une évaluation de la quantité de neige qui va se trouver à l'origine de l'avalanche, en identifiant la ligne de fissuration à une isovaleur

du critère

### 3. PREMIERS RESULTATS

#### 3.1. Hypothèses de calcul

##### a) Modélisation de manteaux neigeux

La neige est considérée comme un matériau élasto-plastique non associé. La limite élastique est définie en cisaillement par une loi de Mohr-Coulomb ( $C$  et  $\phi$ ) et en traction par une résistance limite  $\sigma_t$ . Son coefficient de Poisson  $\nu$  est fixé à 0.1, quel que soit le type de neige sèche considéré. Nous avons défini, en accord avec les observations de terrain, quatre qualités de neiges différentes, caractérisées par leur densité :

- neige dure,  $\rho=300 \text{ Kg/m}^3$
- neige fragile,  $\rho=100 \text{ Kg/m}^3$
- neige intermédiaire,  $\rho=200 \text{ Kg/m}^3$
- neige fraîche,  $\rho=150 \text{ Kg/m}^3$

$E$ , le module d'Young, ainsi que  $C$ ,  $\phi$  et  $\sigma_t$  ont été fixés d'après les plages de valeurs obtenues expérimentalement et publiées depuis plus de 30 ans (tableau 1).

type de neige	$\rho$ (Kg/m3)	$C$ (KPa)	$\phi$ (°)	$\sigma_t$ (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

tableau 1 : caractéristiques élastiques et plastiques des différentes neiges modélisées

##### b) Modélisation géométrique

Nous avons représenté une combe d'inclinaison  $35^\circ$ , de 100m de long, de 40m de large, dont les bords sont surélevés de 3m par rapport à la ligne de plus grande pente, et qui débouche sur un 'fond de vallée' plan et horizontal. La géométrie est symétrique (figure 3) par rapport à la ligne de plus grande pente (plan  $x=0$ ).

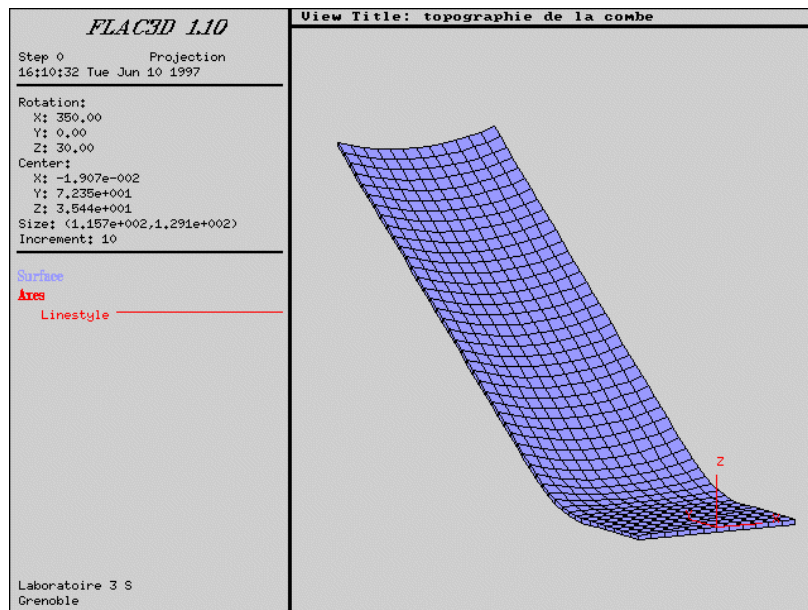


figure 4 : géométrie de la pente modélisée

Les conditions aux limites sont les suivantes :

- le sol sur lequel est déposé la neige est indéformable
- la neige est encastrée en amont de la pente, sur ses bords latéraux et en limite aval (plan  $y=0$ ).

### 3.2. FLAC3D

L'analyse repose sur le calcul en trois dimensions de l'état de contraintes et de déformations au sein du manteau neigeux par le logiciel FLAC3D. Le code de calcul, explicite, est basé sur la méthode des différences finies, et permet la description des grandes déformations. Les matériaux sont représentés par les éléments polyédriques d'une grille que l'utilisateur ajuste à la géométrie des objets à modéliser.

Le calcul de  $F_s$  et  $F_t$  a été implanté dans FLAC3D par nos soins. Ces deux coefficients sont constants sur un élément du maillage.

### 3.3. Validation des indices de stabilité locaux

#### a) Cas étudié

Nous avons cherché à modéliser la formation d'une plaque à vent. La stratigraphie est représentée à la figure 5.

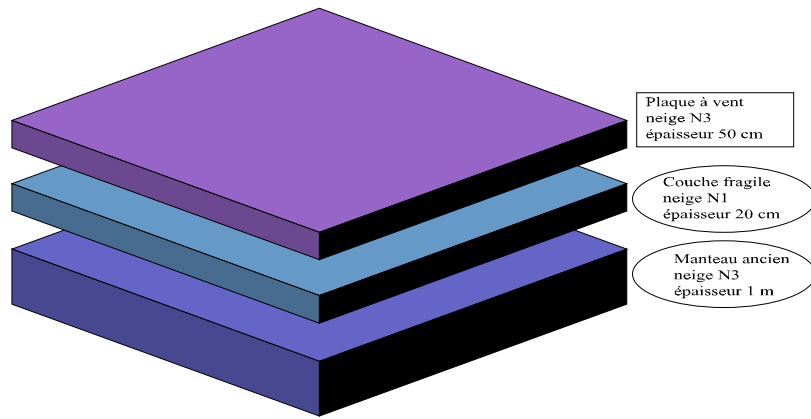


Figure 5 : stratigraphie du manteau neigeux

b) Représentation des résultats

Sur les figures 6 et 7, on a tracé des courbes d'isovaleurs des indices de stabilité locaux. Puisque la pente est symétrique, on n'en a reporté que la moitié. L'intégralité des vues est donnée en annexe.

Les couleurs les plus claires correspondent aux zones les plus instables.

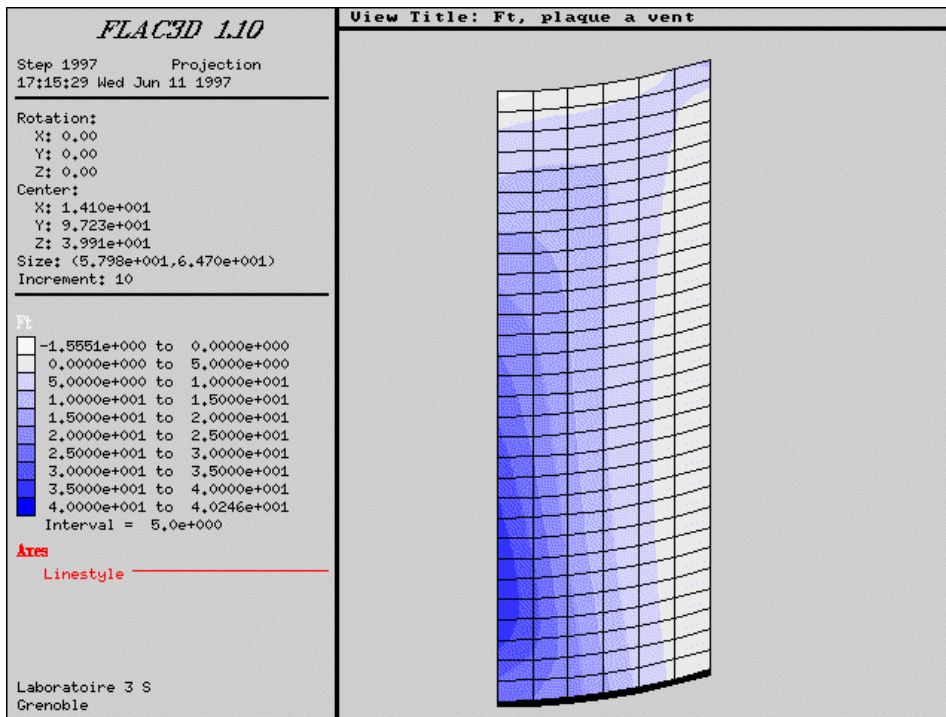


figure 6 : indice de stabilité en traction de la surface supérieure de la plaque à vent

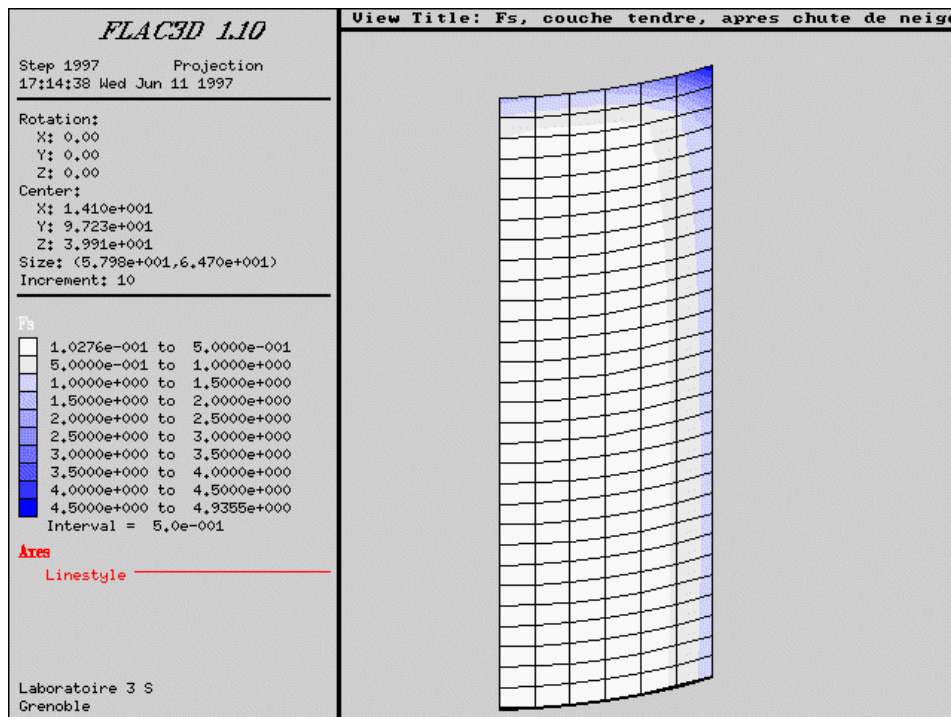


Figure 7 : indice de stabilité en cisaillement de la surface de la couche tendre en contact avec la plaque à vent

### c) Conclusions

Sur cet exemple, on met en valeur une rupture de la couche tendre en cisaillement dans toute sa partie centrale (figure 7). La rupture de la plaque à vent, quant à elle, se produit en traction et à la périphérie de la combe (figure 6).

Ces résultats valident les indices de stabilité locaux  $F_s$  et  $F_t$  car ils correspondent. En effet, ce type de manteau neigeux est un véritable piège ; des départs d'avalanche en cette situation ont déjà été observés de nombreuses fois par des skieurs et des professionnels de la montagne.

L'estimation du risque avalancheux, jusqu'alors réalisée à l'échelle de tout un massif montagneux (prévisions du Centre d'Etudes de la Neige), ou pour une pente de géométrie simpliste (calcul de  $F$ ), peut donc être menée à une échelle locale.

## 4. CONCLUSION

La modélisation du comportement mécanique de pentes enneigées peut être réalisée de manière acceptable au moyen du logiciel FLAC3D. Elle permet de définir des indices de stabilité locaux, qui renseignent sur le risque de rupture du manteau neigeux, sur le mode de rupture (traction, cisaillement), et sur la localisation des ruptures probables. L'application à une "pente" école permet de tracer des cartes d'iso valeurs des coefficients de stabilités aussi bien vis à vis de la traction que vis à vis du cisaillement. On a pu vérifier le scénario classique de la plaque à vent : critère de rupture en traction atteint en premier dans la "plaque" et critère de cisaillement atteint en premier dans la couche dite critique.

## 5. PERSPECTIVES

La poursuite logique des recherches à l'aide de cet outil pourrait être :

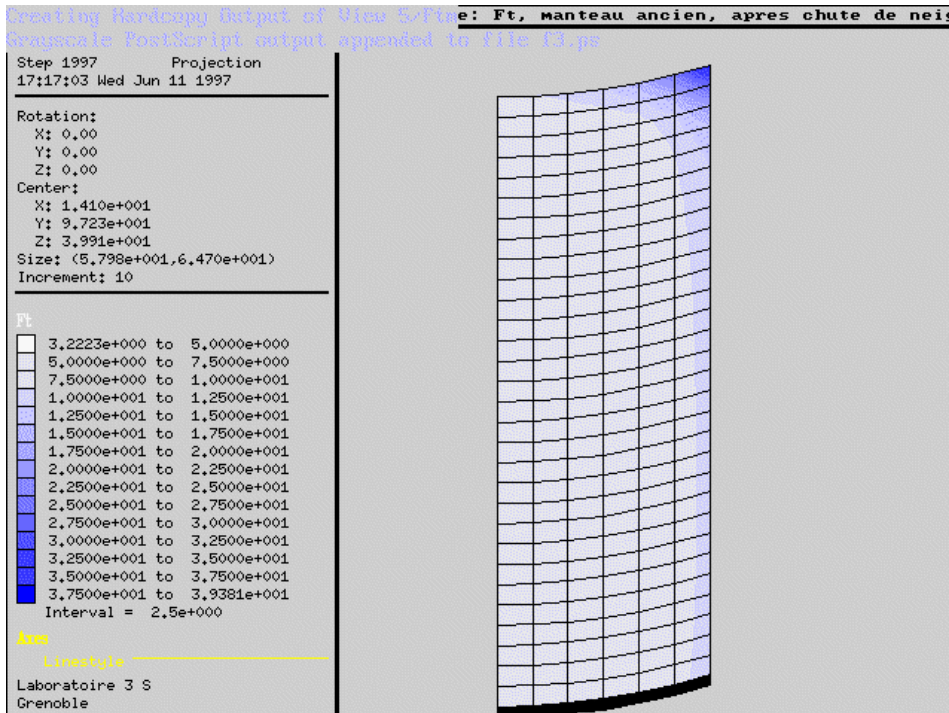
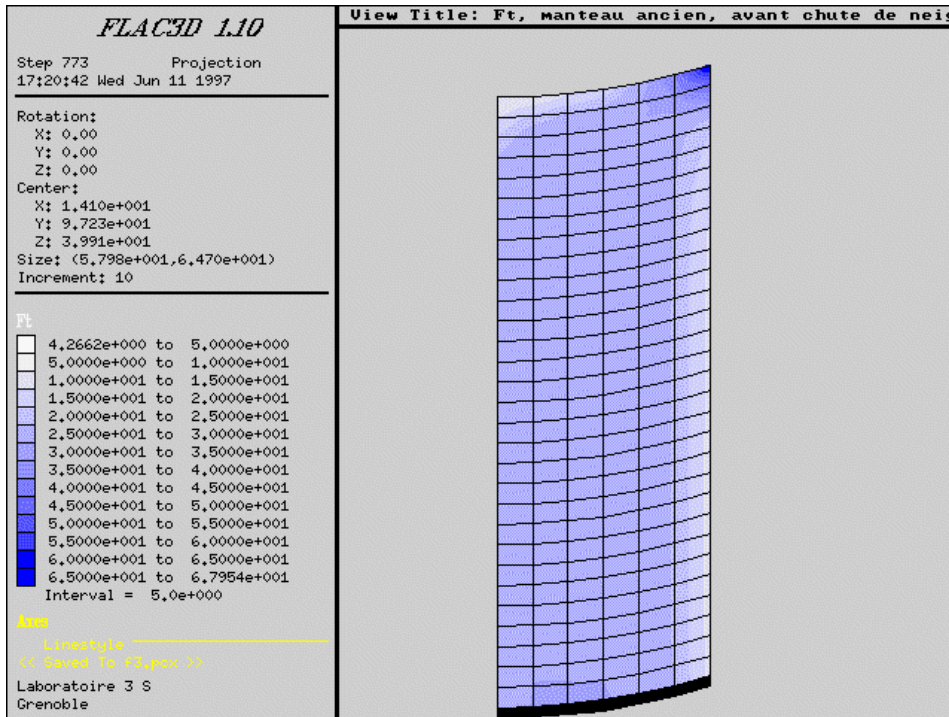
- La détermination des influences respectives des paramètres géométriques (concavité ou convexité de la pente, rapport longueur/largeur de la pente, ruptures de pente, épaisseurs des différentes couches...) et mécaniques (valeurs des différentes constantes intervenant dans la modélisation) sur l'activité avalancheuse.

- Le logiciel Flac 3D permet aussi d'introduire des "éléments" d'interface entre les couche de neige , afin de simuler au mieux les "couches critiques" d'épaisseur très faibles.
- Enfin la loi de comportement élasto-plastique reste très simpliste par rapport au comportement réel de la neige et notamment ne prend pas en compte les phénomènes différés. Leur prises en compte permettrait de simuler correctement la mise en contrainte du manteau neigeux.

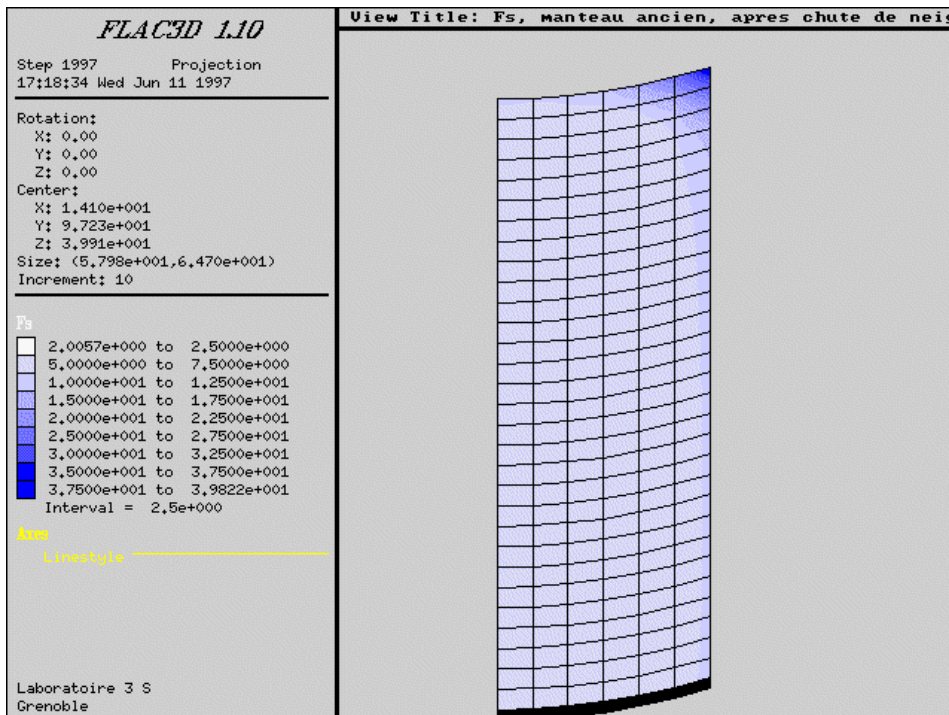
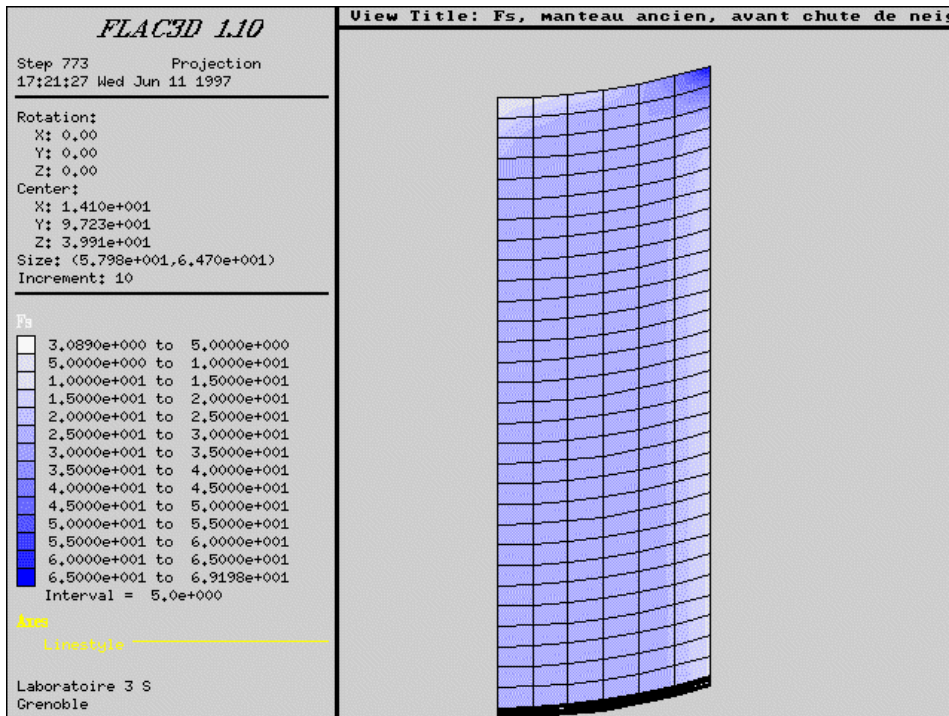
## Bibliographie

- ANCEY C. : *Guide neige et avalanches : connaissances, pratique, sécurité* (EDISUD) 317p
- BOULON M. : *Computation of safety factors* (Plaxis course : safefact 08.01.1996 15.01.1996) 19p
- CONWAY,H. and J. ABRAHAMSON : *Snow stability index* (J Glaciol., 30(106) 1984) 321-327
- FÖHN, P.M.B. : *The stability index and various triggering mechanims* (Proceedings of the Davos symposium, 09.1986) 199-205
- JAMIESON J. B. and JOHNSTON C. D. : *Shear frame stability parameters for large-scale avalanche forecasting* (A. Glaciol 1 8 1993) 268-272
- MAC CLUNG D., SCHAERER P. : *The Avalanche Handbook* (The Mountainers, 1993)
- de MONTMOLLIN V. : *Introduction à la rhéologie de la neige* (Thèse de l'Université scientifique et médicale de Grenoble, 1978) 280p
- SCHWEIZER J. : *The influence of the layered character of snow cover on the triggering of slab avalanches* (A. Glaciol., 1 8 1993) 193-198

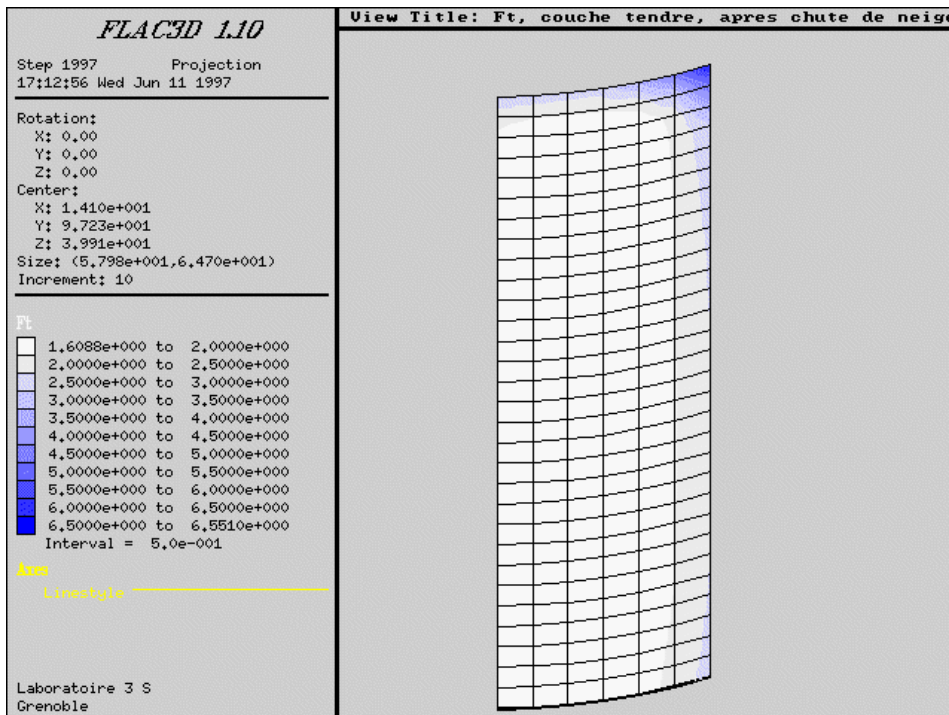
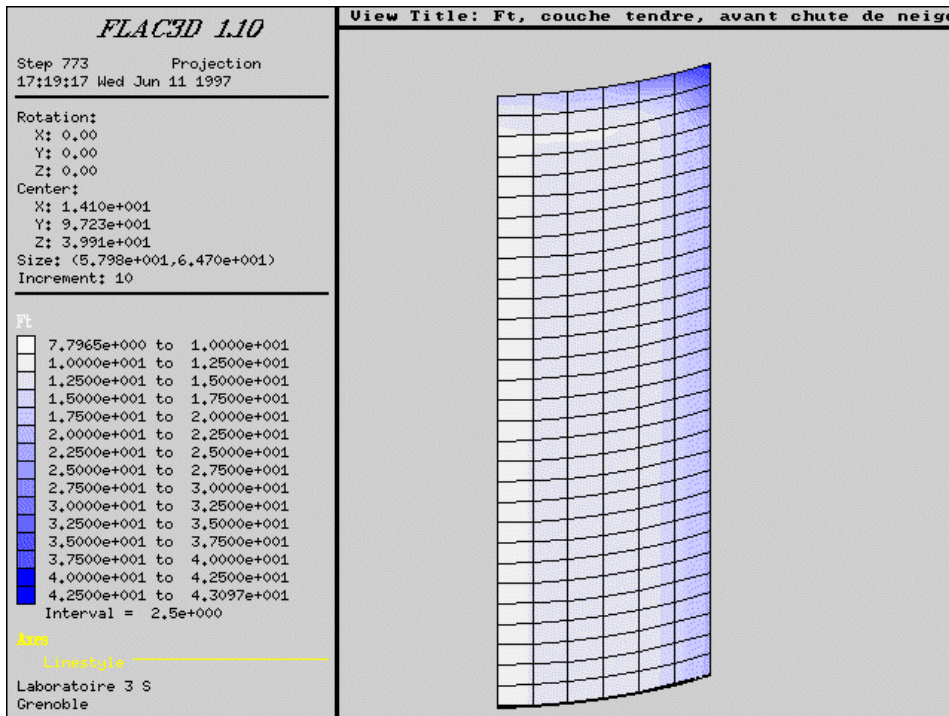
- Annexe 1 : stabilité du manteau ancien avant puis après dépôt d'une plaque à vent : stabilité par rapport à la traction



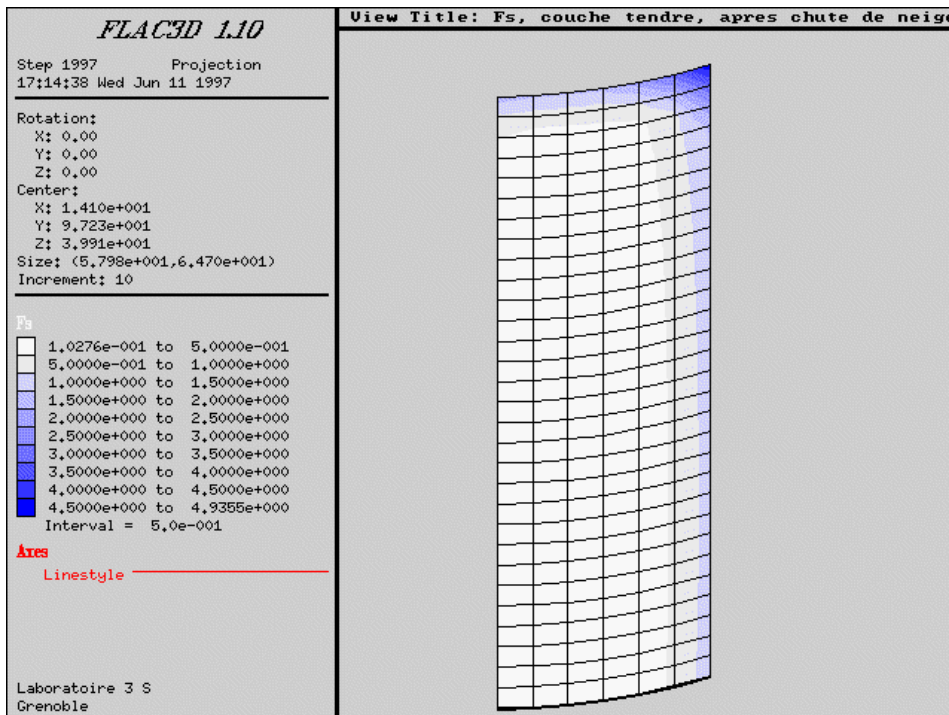
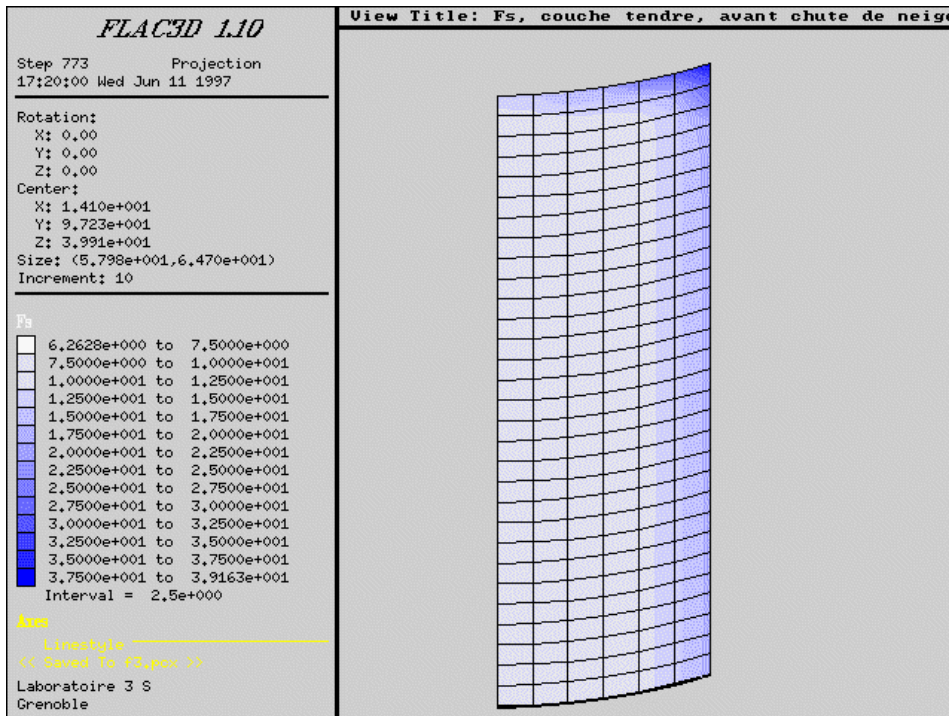
Annexe 2 : stabilité du manteau ancien avant puis après dépôt d'une plaque à vent :  
stabilité par rapport au cisaillement



Annexe 3 : stabilité de la couche tendre avant puis après dépôt d'une plaque à vent :  
stabilité par rapport à la traction



Annexe 4 : stabilité de la couche tendre avant puis après dépôt d'une plaque à vent :  
stabilité par rapport au cisaillement



Annexe 5 : stabilité de la plaque à vent :  
 stabilité par rapport à la traction puis au cisaillement

