

## DE LA STABILITE MECANIQUE A L'INSTABILITE ET RUPTURE DES PLAQUES DE NEIGE

### Coordonnatrice du projet :

Dominique DAUDON

Laboratoire Sols Solides Structures UMR 5521

Université Joseph Fourier, BP 53, 38041 GRENOBLE CEDEX 9

Tel : 04 76 82 70 44, Fax : 04 76 82 70 00

Organisme de tutelle : Université Joseph Fourier

Organisme Gestionnaire : Université Joseph Fourier

### Liste des laboratoires ou organismes participant au projet :

3S : Laboratoire Sols solides Structures, rattaché à Université Joseph Fourier, Institut National Polytechnique de Grenoble, Centre National de la Recherche Scientifique .

CEN : Centre d'Etude de la Neige - Météo France

Cemagref : Division ETNA, groupement de Grenoble

LERMES : Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Mécanique des Structures - CUST Université de Clermont-Ferrand.

**Résumé du projet scientifique prévu :** Le but est d'apporter un élément d'aide à la décision à l'aide d'un critère mécanique, pour améliorer la prévision et l'estimation du risque d'avalanche. On souhaite développer des outils numériques pour modéliser les mécanismes, détecter la zone et le type d'instabilité du manteau. Le précédent financement a permis de définir utilisant un indice de stabilité. Pour le financement 97-98 le projet concerne des études paramétriques larges indispensable pour connaître plus exhaustivement leur influence. Les résultats seront validés par des professionnels du milieu montagnard (guides, pisteurs, nivologues...) L'ensemble des compétences des différents partenaires est très complémentaire. La participation du LERMES de la région Auvergne permet un transfert très prometteur de compétences sur la variabilité spatiale des propriétés mécaniques des sols vers la neige

### I. Calcul d'indices de stabilité, modélisation numérique et influence de la topographie, paramètres mécaniques et topographique (3S)

Les indices de stabilité couramment admis relèvent d'un calcul d'équilibre statique d'une pente bidimensionnelle homogène soumise à la gravité. On considère la seule rupture en cisaillement dans une zone fragile.

La nouvelle définition, en 2 indices, et élargie au champ tridimensionnel, prend en compte une rupture qui peut apparaître vis à vis du cisaillement dans le plan, et d'une traction en tête. Implantés dans un code de calcul, ces indices peuvent être calculés en tout point d'un manteau neigeux stratifié maillé et fournir des informations précieuses sur le potentiel instable de la pente. Les indices minimum et leur localisation qualifient l'instabilité : Si le critère est atteint d'abord en « cisaillement » ou en « traction » on peut en déduire quelle couche joue le rôle de la plaque et quelle couche joue le rôle de couche critique ou faible

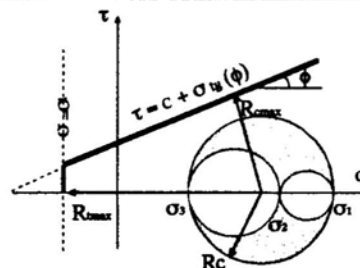
Vis à vis du cisaillement :

$$F_c = \frac{\sin \Phi (2C \cot g \Phi + \sigma_1 + \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

Vis à vis de la traction :

$$F_t = 2 \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - \sigma_t}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

stabilité théorique si  $F_t$  ou  $F_c > 1$ , sinon rupture par sécurité, coefficient de sécurité arbitraire égal à 2



critères de rupture :  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  sont les contraintes principales,  $\sigma_t$  la contrainte limite de résistance en traction,  $C$  et  $\phi$  les paramètres définissant le critère de rupture en cisaillement

#### a) Caractéristiques de la modélisation

La modélisation numérique a été effectuée à l'aide du code de calcul FLAC3D en différences finies, dans lequel le calcul des indices a été implanté à la suite du calcul des contraintes en tout point du maillage d'un manteau neigeux à 3 couches : le substrat ancien, la couche critique puis la plaque. La détection des couches critiques dans un manteau multistratifié est effectuée à l'aide d'un calcul numérique du test du coin suisse. Ce test donne rapidement quels sont les couches les plus faibles en cisaillement, et potentiellement « couche fragile » puis construire les scénarios tri-couches associés.

Le comportement de la neige a été choisi élastoplastique, la limite de plasticité étant considérée comme étant la rupture fragile du manteau. Il est donc nécessaire de disposer des paramètres élastiques et plastiques. Ils ont été choisis de façon cohérente dans la littérature ou dans les mesures in situ effectués par le laboratoire. La figure 2 fournit un exemple des résultats obtenus.

La modélisation des couches dites critiques a été effectuée soit par la prise en compte d'une couche réelle dotée d'une épaisseur faible soit par les éléments d'interface de FLAC3D. On rencontre alors 2 limitations: la nécessité de respecter les proportions des éléments maillés dans le 1<sup>er</sup> cas (temps de calculs lourds), et dans le 2<sup>ème</sup> cas la difficulté d'apprécier les paramètres mécaniques supplémentaires (rigidité tangentielle et normale, au lieu de E et  $\nu$ ), on ne peut plus calculer d'indices de stabilité pour la couche concernée, la notion de contrainte n'étant plus valide. On note de plus une « augmentation » de la stabilité dans la modélisation en interfaces par rapport à celle en couche épaisse.

Différents paramètres d'influence ont été étudiés :

- rayon de courbure positif, négatif, nul
- paramètres mécaniques : C (cohésion),  $\phi$  (angle de frottement), E (module d'Young),  $\nu$  (module de poisson)
- existence d'un défaut local, action d'un skieur

Le tableau suivant présente les caractéristiques mécaniques des différentes neiges utilisées dans cette modélisation.

Caractéristiques	E (Mpa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha_r$ (kPa)	C (kPa)	$\phi$ (°)
couche 3	40	300	5.5	8	46
couche 1	80	350	8	10	50.2
couche 2 : neige récente	0,2	100	0,4	0,5	23,7
Ou couche tendre	4	250	1,9	1,5	27,5
Ou givre de surface	1	200	2,1	1,5	27,5
Ou Couche dure	4	250	3,6	5	38,7

#### b) influence des paramètres mécaniques et de la topographie

- Les valeurs intrinsèques du **module d'Young** ne sont pas fondamentales seul est essentiel de préserver la proportionnalité entre les modules de chaque couche.
- Les **coefficients de poisson** montre que pour mieux tenir compte de la compressibilité un faible module est nécessaire (0.1) malgré les résultats expérimentaux contradictoires dans la littérature.
- L'influence de la **cohésion C** est celle que l'on peut observer théoriquement, à savoir que une augmentation de la cohésion entraîne une augmentation de la stabilité
- L'influence de l'**angle de frottement  $\phi$**  sur les indices en cisaillement est inversement proportionnelle à celui-ci. L'état de contrainte comporte donc des états de traction (due à la géométrie) et de compression (due au poids de la neige). On montre également que les directions de cisaillement maximal sont conformes au scénario réel (dans le plan pour la couche faible et sur les flancs pour la plaque).
- L'**instabilité de la pente augmente** inversement proportionnellement au rayon de courbure (bosse ou creux. Les pente les plus instables seraient les plus « planes ».

#### c) Défaut dans une pente vallonnée

En général, une rupture se produit à celle du « maillon » plus faible, le transfert de contrainte associée entraîne la rupture des maillons faibles suivants. Il s'agissait ici de voir si l'existence d'un défaut représentant une rupture locale en cisaillement dans une couche dite critique, entraînait une perte de stabilité locale, globale de l'ensemble du manteau. Ce défaut est obtenu en faisant chuter 2, 10 et 100 fois les propriétés mécaniques (E,  $\nu$ ) localement dans la couche 2.



Figure 1.a : défaut de 1m par 2m

figure 1.b : défaut de 2m par 4m

- La présence d'un défaut entraîne une **perte de stabilité très locale** : au niveau du défaut les indices sont proches de 1 alors que sur le reste de la pente ils sont 10 à 15 fois plus grand.
- L'ampleur de la chute de propriétés mécaniques dans le défaut n'est pas fondamentale ; l'instabilité passe de 1.11 à 1.08 dans la plaque pour une perte de 2 à 100 fois les propriétés courantes. La seule variabilité spatiale du manteau neigeux est telle qu'il n'est pas rare d'avoir des mesures in situ variant du simple au double en un point donné.
- La taille du défaut lorsqu'elle est « petite » devant le versant n'a pas d'influence considérable; la zone d'instabilité dans la plaque de neige supérieure reste circonscrite à celle du défaut, et ne diffuse pas dans le reste de la pente (quelque soit la finesse du maillage utilisé).
- L'influence statique d'un skieur est négligeable sur la stabilité, quelque soit sa position dans la pente, sauf s'il est situé à proximité d'un défaut.

## II. influence des paramètres temporels (Centre d'étude de la Neige- Météo France)

Les études réalisées par le Centre d'Etudes de la Neige (CEN) se sont développées selon deux axes :

- des simulations numériques du comportement mécanique de la neige avec le logiciel Flac 3D,
- des simulations Safran/Crocus/Mepra sur l'ensemble de l'hiver 98-99 pour les sites de La Plagne (Le Tougné, Bellecote, ...).

L'objectif a été de reproduire numériquement, à l'aide du logiciel Flac 3D, les comportements et résultats d'essais expérimentaux effectués en chambre froide au CEN dans les années 80 (avec le Laboratoire 3S), afin de caler les paramètres de la loi de fluage choisie.

Différents essais avaient été réalisés dans le passé, sur des neige homogènes de type grains fins et de densité comprises entre 180 et 280 kg/m<sup>3</sup> environ: des essais de compression à charge constante (fluage), à vitesse constante et à vitesse variable, des essais cycliques de compression, des essais triaxiaux.

Ces essais avaient montré que ce type de neige se comporte comme un matériau visco-élasto-plastique écrouissable. Le comportement élastique de la neige apparaissait faiblement mais existait bien lors des essais cycliques.

Le logiciel Flac 3D dispose en bibliothèque de plusieurs modèles visqueux proposant une réponse volumique élastique insuffisante pour prendre en compte la forte densification des échantillons observée au cours des essais. Le modèle Crushed-salt (initialement destinée à la modélisation du comportement du sel des carrières d'extraction) a été choisi car il prend en compte la compression visqueuse irréversible; Il demande la connaissance de nombreuses caractéristiques mécaniques non connues pour la neige: elles ont donc été déduites de la mécanique de la glace (Hobbs), ou par analyse inverse, ou pour certains paramètres, à l'ordre de grandeur à près.

La simulation numérique des essais a porté sur des « échantillons » cylindriques de 15 cm de haut et de 5 cm de diamètre (maillage cylindrique). Le programme a été développé afin de pouvoir récupérer les déformations subies par l'échantillon et ainsi visualiser les relations contrainte-déformation.

Les résultats reflètent bien les comportements notés lors des essais physiques antérieurs, et conduisent à des valeurs de contrainte-déformation cohérentes avec celles de ces essais physiques.

Ce modèle fait évoluer les caractéristiques mécaniques du matériau en fonction de la densité, mais l'influence du frittage et la formation des ponts inter grains ne sont pas encore pris en compte.

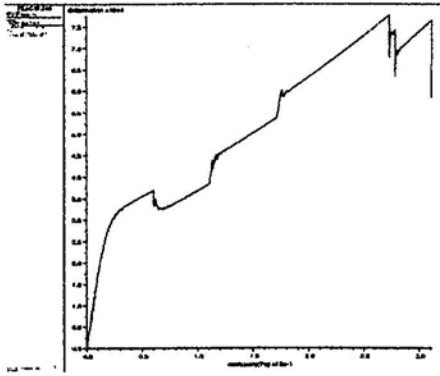


Figure 2: Simulation numérique d'une déformation avec des vitesses verticales de déformation variables (entre ,3 et 4,5 mm/min) ; évolutions de la contrainte verticale en fonction de la déformation verticale

### III. connaissance et influence de la variabilité spatiale (LERMES)

Il s'agit essentiellement d'études et mesures expérimentales de la variabilité spatiale des propriétés physiques et mécaniques du manteau , à l'échelle d'un petit couloir. Elles sont destinées à être comparées avec les simulations SAFRAN-CROCUS du CEN portant sur les profils stratigraphique et les hauteurs de neige d'une pente similaire en altitude et exposition.

Une série de sondages Pandalp (résistance à la pénétration) réalisés en croix avec un pas constant de un mètre nous permet de faire de la géostatistique en déterminant par exemple les variogrammes de l'épaisseur des couches et de la résistance. Une épaisseur minimale de couche est choisie, le sondage est découpé en n couches élémentaires et un test statistique de Student est alors mené sur le gradient de résistance à la pénétration. Suivant le résultat du test, les couches élémentaires sont soit associées soit différenciées, une valeur moyenne de résistance leur étant affectée.

Le calage sur une stratigraphie donnée est possible par variation de varier la hauteur minimale de couche et la dureté du test statistique. On cherche par la reconnaissance de couches le nombre exact de couches que l'on a pu observer lors de l'ouverture du manteau neigeux (figure 3).

La reconnaissance de l'épaisseur moyenne de chaque couche et l'écart-type sur l'ensemble des sondages de la croix est encourageants puisque pour certaines couches d'épaisseur moyenne 20 à 30 cm, l'écart-type n'est que de 2,5 cm. La même démarche est mise en place sur la résistance; avant de passer au calcul des variogrammes.

Les nombreux sondages effectués à cette occasion et par le passé sont également utilisés pour déterminer de la même manière que dans les sols, une relation entre la résistance à l'enfoncement et la cohésion de la neige, paramètre essentielle du critère de rupture en cisaillement. On s'oriente actuellement vers une relation  $Q_d = 25$  à 30 fois la cohésion. Cette relation est encore entachée d'une grande dispersion, et une classement par type de neige est à étudier.

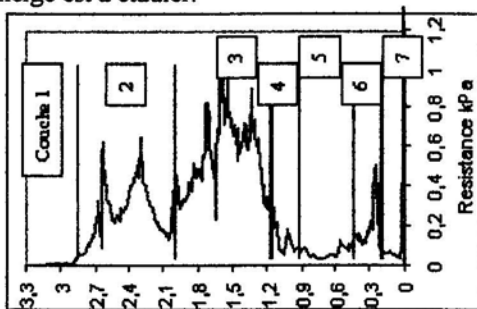


Figure 3a : Découpage en couches

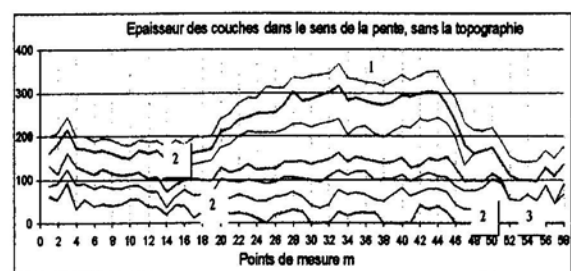


figure 3b : les couches déterminées à partir de tous les pénétrogrammes constituant la croix

### IV. choix de critère et de scénarios de rupture précédent l'écoulement (CEMAGREF)

On dispose d'un modèle numérique aux éléments finis d'une pente plane enneigé. Le modèle physique doit reproduire le mécanisme de rupture dit de couche fragile qui implique la rupture d'une couche de neige cohésive reposant sur une couche de gobelets non cohésive dite fragile. Pour ce faire nous utilisons des matériaux modèles de type poudre, se rapprochant de comportement observé dans la neige.

Sur l'inclinaison produisant la rupture a été étudié :

- Influence de l'épaisseur de la couche supérieure (figure 5) :
- Influence de l'épaisseur de la couche fragile (figure 6)

• Influence de la densité de la couche supérieure (figure 7)

Ces expériences étant filmées en vue de dessus dans un plan fixe, il a été possible par l'analyse d'image, de déterminer la chronologie de la rupture d'une plaque d'un matériau granulaire cohésif reposant sur une couche d'un matériau granulaire non cohésif.

Chronologie de la rupture

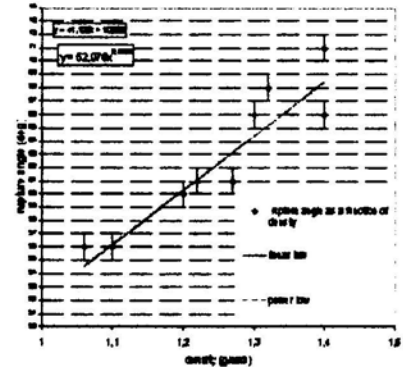
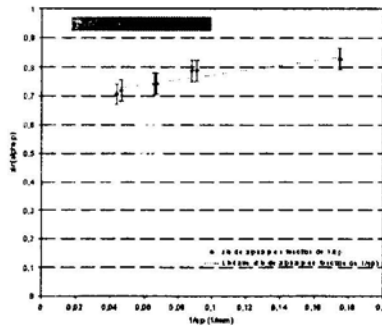
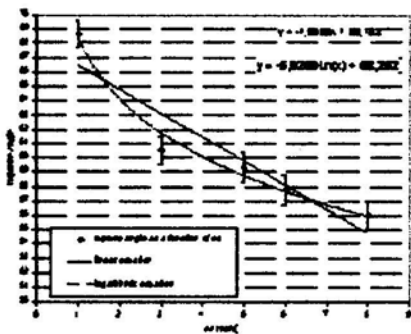
Cette chronologie est conforme à celle observée in situ pour rupture de plaque de neige. Une centaine d'essais a été réalisée.

- 1) Lorsque l'angle imposé à la pente atteint l'angle de frottement interne de la couche fragile, développement d'une bande de cisaillement.
- 2) A cet instant les ruptures en cisaillement et en traction apparaissent sur les bords et au niveau de la rupture de pente.
- 3) Enfin après une phase de fluage plastique la rupture en compression au niveau du pied de buté intervient.

Figure 5 stabilité en fonction de l'épaisseur de la plaque

Figure 6 : stabilité en fonction de l'épaisseur de la couche fragile

Figure 7: Stabilité en fonction de la densité de la couche supérieure.



**Conclusion**

Les indices définis permettent pour prévoir le caractère potentiel de l'instabilité, ils donnent une bonne idée de la limite majeure des zones instables de par la géométrie et les propriétés mécaniques du manteau considéré. Les essais expérimentaux sur modèle réduits effectués par le CEMAGREF confirme les conclusion obtenue numériquement quant l'influence, des paramètres mécaniques testés, obtenue numériquement.

Les Indices de stabilité peuvent être introduit dans des modélisations plus fines d'analyse du risque avalancheux notamment celles de Météo France pour une estimation plus locale, ou bien en choisissant une pente type dont le calcul fournirait une information supplémentaire à prendre en compte dans l'évaluation du risque. La difficulté majeure des simulation numérique reste encore la difficulté d'estimer avec justesse les paramètres mécanique de comportement, compte tenue, de complexité du matériau neige considéré. D'autre part la prise en compte de comportement fin (viscosité, interfaces) nécessitent la connaissance de nouveau paramètres à mesurer, et la nécessité de campagnes d'essais plus systématiques.

L'approche statistique pour l'intégration de la variabilité spatiale donne des résultats encourageant, même si l'on est encore loin de pouvoir les intégrer directement dans un code de calcul mécanique.

On peut néanmoins considérer que les initiations de rupture se feront dans les zones instables. Toutefois, l'évolution de la fissuration ne peut pas être étudiée uniquement à l'aide de ces calculs dit à la rupture en statique ne permettent pas de rendre compte de l'évolution rapide de la fissuration à partir de l'existence d'une rupture initiale, il faut faire appel à la mécanique dite de la rupture au sens de Griffith pour espérer reproduire l'évolution de la propagation et donc retrouver les trajets réels de la fissure dans le versant.