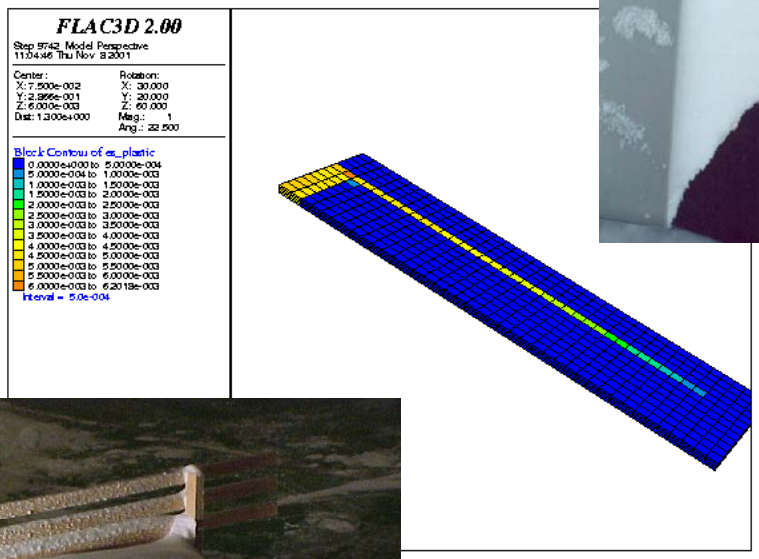
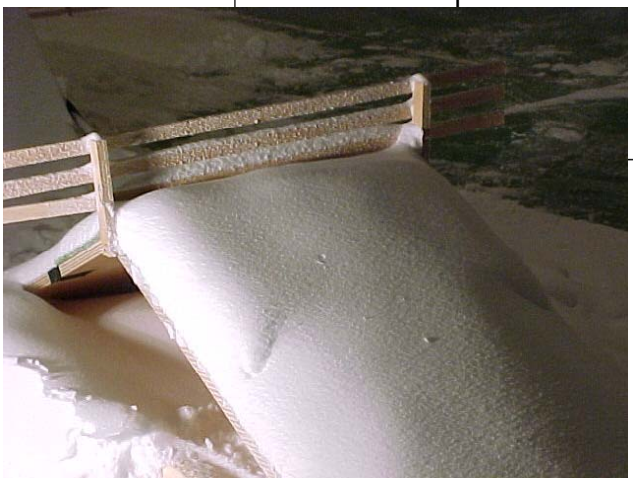
Analyse de la rupture d'une couche cohésive reposant sur une couche fragile





Cemagref METEO FRANCE 3S LTPCM

Rapport final – Décembre 2001

SOMMAIRE

Chapitre 1 : Analyse de la rupture d'une couche cohésive sur une couche fragile par expérimentation en laboratoire

1. Contexte générale de la recherche **1**
2. Le matériau modèle de plaque **2**
2.1. Caractéristiques morphologiques **4**
2.2.Caractéristiques mécaniques **5**
3. La densité et le comportement **7**
4. Test sur poudre en laboratoire **12**
5. Résultats **14**
5.1. La stabilité en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure **14**
5.2. La stabilté en fonction de l'épaisseur de la couche fragile **16**
5.3. Stabilité en fonction de la densité **18**
5.4. Stabilité en fonction de la morphologie du substratum **18**
5.4. Stabilité en fonction de la distribution de la plaque pour une structure concave **19**
5.5. Stabilité en fonction de la morphologie de la plaque, lien avec le transport de la neige par le vent **21**
6. Localisation de la rupture en traction en fonction de la topographie **32**
6.1. Résultats **33**
6.2. Discussion **34**
7. Chronologie de la rupture **34**
8. Tests sur neige artificielle **36**
8.1. Comparaison avec les tests en laboratoire **37**
8.2. Remarque sur la poudre de $CaCO_3$ **39**

Chapitre 2 : Simulations numériques des expériences physiques de rupture réalisées au Cemagref

1. Introduction **43**
2. Simulation sur la base des caractéristiques fournies **44**
2.1. Principe de la simulation **44**
2.2. Résultats de cette série de simulation **46**
3. Simulations avec modifications de certaines propriètés mécaniques ou de la géométrie de la maquette **50**
3.1. Modification de la butée avant **50**
3.2. Influence relative de certains paramètres **51**
3.3. Simulations en supposant une perte de résistance du matériau cohésif en fonction des déformations plastiques **52**
4. Conclusions **54**

Chapitre 3 : Mécanique de la rupture pour la neige, mesure in situ de la ténacité et modélisation numérique

1. Introduction **57**
2. Campagne de mesure expérimentale **57**
2.1. Dispositif en mode I **58**
2.2.Protocole expérimental **58**
2.3. Problèmes et améliorations **58**
2.4. Dispositif de mesure de la ténacité en mode II : **60**
3. Modélisation par calculs Eléments Finis des dispositifs **61**
3.1. Vérification des dispositifs **62**

3.2. Extraction des coefficients de concentrations de contraintes **62**
4.Résultats de nos mesures : 64
5. Analyse et comparaison avec Michot et Kirchner : 66
5.1. Ténacité en mode I : **66**
5.2.Ténacité en mode II : **66**
6. Modélisation numérique par la méthode des Eléments Discrets **67**
7. Conclusion et perspectives : **69**

Chapitre 1 : ***Analyse de la rupture d'une couche cohésive reposant sur une couche fragile par expérimentations physiques en laboratoire***

L. VIDAL (Cemagref – Transmontagne), M. NAAIM (Cemagref), F. NAAIM (Cemagref)

Ce chapitre traite de la simulation physique d'expériences de rupture de plaques, qui ont été réalisées dans les laboratoires du Cemagref. Certaines simulations ont fait l'objet de modélisations numériques effectuées au CEN et présentées dans le chapitre suivant. Ces travaux se sont inscrits dans le cadre de la thèse de Lionel Vidal, thèse soutenue en juin 2001.

1 Contexte générale de la recherche

L'avalanche est généralement définie comme un écoulement de neige le long d'une pente sous l'effet de la gravité. On distingue trois zones d'écoulement, avec des caractéristiques différentes :

- La zone de départ où une certaine fraction du manteau neigeux en place se met en mouvement à la suite du développement d'une rupture en son sein.
- La zone d'écoulement où cette masse de neige prend de la vitesse et dévale la pente.
- La zone d'arrêt où l'écoulement commence à ralentir avant de s'arrêter pour former un dépôt.

Cet écoulement peut se faire sous différentes formes :
- La forme dense, dans laquelle l'écoulement est laminaire et composé souvent de neige de forte densité. Ce type d'écoulement suit relativement bien la topographie et, est susceptible, de par la forte poussée dynamique qu'il exerce sur un obstacle qu'il rencontre, de générer des dégâts conséquents dans sa zone d'arrêt.
- La forme aérosol dans laquelle l'écoulement incorpore une forte quantité d'air au sein duquel les particules de neige sont en suspension. Cet écoulement est fortement turbulent et peut ignorer la topographie lors de son parcours. Pour se former, un tel écoulement nécessite une pente raide et suffisamment longue. Il concerne souvent les neiges froides et sèches et s'initie donc fréquemment dans les zones de départ à forte altitude. Les dégâts générés par ce type d'écoulement sont souvent liés à l'effet de souffle de l'avalanche aérosol *(toitures arrachées, vitres soufflées…)*
- La forme dite mixte dans laquelle l'écoulement s'initie sous sa forme dense puis prend de la vitesse et ce faisant, développe une forme aérosol par érosion de la neige en surface de la phase dense. Ce type d'écoulement est particulièrement dangereux car il combine les deux types de dégâts précédents.

Ces différents types d'écoulements ne sont pas uniquement liés à la qualité de la neige mise en jeux dans la zone de départ, mais aussi à la topographie de la zone d'écoulement. En effet, s'il est courant d'associer l'écoulement dense à une qualité de neige humide *(ce qui est souvent le cas),* et l'écoulement aérosol à une neige froide et peu dense, il n'en va pas toujours ainsi. En effet, l'écoulement de forme dense peut être composé de neige froide mais ne pas s'écouler sur une pente suffisamment longue et soutenue pour qu'un aérosol puisse se développer. Ainsi, un manteau neigeux initialement composé de neige froide peut générer ces trois types d'écoulements. A l'inverse, si une neige humide peut générer un écoulement dense il lui sera impossible de développer un aérosol.
Or la mise en mouvement de neige froide et sèche dans la zone de départ se fait le plus souvent par la rupture d'une plaque, par opposition aux ruptures en poire concernant les neiges fortement humides rencontrées en fin de saison.
C'est sur ces types de ruptures de plaques de neige froide que nous nous focaliserons, puisqu'elles sont susceptibles de générer les trois types d'écoulements possibles.
La rupture de plaque à cette particularité qu'elle peut concerner, par son extension latérale et par l'épaisseur du manteau neigeux où elle se développe, une fraction considérable du manteau neigeux. Ainsi on reporte des ruptures de plaques sur près d'un kilomètre de largeur. De même des ruptures de plaques d'une épaisseur de plus de dix mètres sont reportées fréquemment.
Ainsi la rupture de plaque a la capacité de mettre en mouvement une quantité considérable de neige dans la zone de départ *(plusieurs centaines de milliers de mètres cubes ne sont pas rares dans des cas d'avalanches extrêmes dîtes avalanches majeures).* C'est cette rupture qui, par son occurrence, conditionne la formation et l'amplitude d'une avalanche en mettant en mouvement un certain volume de neige d'une certaine qualité.
La connaissance du volume de neige potentiellement mobilisable dans la zone de départ d'une avalanche est un paramètre capital pour la démarche de modélisation de son écoulement, à la base de l'ingénierie moderne sur le sujet. Le premier objectif est ainsi d'aider à une meilleure prise en compte de certains paramètres pour aboutir à une meilleure estimation du volume potentiellement mobilisable par une rupture dans une zone de départ.
D'autre part, le comportement du manteau neigeux relève d'une grande complexité, liée à l'étendue des multiples paramètres intervenant dans sa stabilité. Il paraît ainsi difficile, voir parfois impossible, de préciser lesquels de ces paramètres sont pertinents pour décrire les mécanismes de ruptures. Il est ainsi légitime d'accorder une attention particulière à ces mécanismes de façon à mieux comprendre comment ils interviennent pour mener le manteau neigeux à la rupture.
A partir de la connaissance tant théorique que pratique concernant le phénomène de rupture du manteau neigeux, il s'est agit de mettre en œuvre un certain nombre d'expériences, que nous décrirons, de façon à compléter et valider par l'expérience, la connaissance sur le sujet. Nous nous sommes en outre employés à apporter le point de vue novateur de l'expérience, permettant de donner des éléments d'explication sur des situations généralement reconnues, mais pour lesquelles les arguments sont souvent uniquement

théoriques.
L'étude bibliographique articulée autour de la mécanique de la neige mais aussi de la mécanique des milieux granulaires ne sera pas présentée dans ce chapitre mais est disponible dans la thèse de L. Vidal intitulée « Modélisation de la rupture d'une plaque de neige et mode de fonctionnement d'une couche fragile »

Comme nous allons le voir, notre étude de la rupture du manteau neigeux, et des conditions dans lesquelles elle se manifeste, repose sur une démarche de modélisation physique qui sera complétée dans le chapitre suivant par une modélisation numérique. Lors de cette démarche de modélisation, certaines simplifications ont été faites de façon à travailler sur un nombre de paramètres réduits mais pertinents. Le second but de ce travail étant ainsi de mieux appréhender, sur une réalité simplifiée, la complexité des mécanismes de rupture des plaques et les paramètres physiques qu'elle met en jeu.
Dans le cas général, la stratification complexe du manteau neigeux rend difficile l'étude de sa stabilité et donc la détermination du volume de neige mobilisable dans la zone de départ. Cependant, un cas particulier se révèle être accessible à la modélisation : il s'agit d'une structure bi-couche composée de deux types de neige de propriétés mécaniques différentes. Ce cas se trouve être celui que l'on retrouve souvent impliqué dans le déclenchement des avalanches majeures et donc celui qui présente le plus d'intérêt en terme d'étude, opérationnellement. C'est dans ce cadre de système bi-couche que nous nous plaçons.
L'étude de la stabilité du manteau neigeux fait l'objet, depuis une vingtaine d'années, de recherches visant à comprendre les mécanismes conduisant à sa rupture.
Le matériau neige en tant que tel a fait l'objet d'études rhéologiques *(CEN, laboratoire 3S, CREEL entre autres)* qui ont permis de mettre en évidence une large gamme de comportements en fonction du type de neige étudié.
Des modèles numériques aux éléments finis sont actuellement utilisés de manière à simuler la stabilité d'une pente *(CEN, laboratoire 3S, Ifena entre autres).*
C'est dans le cadre de cette recherche que nous nous insérons et tentons, comme nous allons le montrer, d'apporter une connaissance plus spécifique de certains mécanismes de rupture du manteau neigeux. En particulier, la spécificité de notre approche repose sur une étude aux échelles microscopique et macroscopique du problème de la stabilité ainsi que sur l'usage de matériaux granulaires adaptés pour la réalisation de tests à échelle réduite en laboratoire.
Dans ce chapitre nous nous attacherons donc à décrire les différentes expériences que nous avons réalisées pour tenter de quantifier le rôle de certains paramètres macroscopiques intervenant dans le mécanisme de rupture du manteau neigeux. Dans ce qui suit, le comportement précis de la couche fragile est ignoré de façon à ce concentrer sur le comportement de la couche supérieure. La couche fragile sera ainsi assimilée à un simple plan de glissement et son comportement ne sera abordé qu'au chapitre suivant.
Nous présenterons dans un premier temps les matériaux granulaires modèles que nous avons utilisés pour reproduire un comportement se rapprochant au plus près de celui de la neige, ainsi que les propriétés mécaniques caractéristiques de ces matériaux et les précautions qu'elles imposent dans la mise en place et la réalisation des échantillons sur lesquels les tests ont été réalisés.
Les résultats issus des tests en laboratoire et en soufflerie climatique seront présentés puis un parallèle sera fait avec le cas de la neige.

2 Le matériau modèle de plaque

Afin de pouvoir réaliser nos expériences en laboratoire, la première nécessité était de trouver un matériau granulaire cohésif permettant de reproduire au mieux le comportement de la neige composant les plaques. Le comportement du matériau choisit devait pouvoir être élasto-plastique et avoir une résistance en traction compatible avec les ruptures en traction que nous voulions lui voir développer lors de la rupture des plaques qu'il modéliserait.
Après avoir envisagé différents matériaux, le carbonate de calcium $CaCO_3$ nous a semblé le plus adapté pour mener les expériences de rupture de plaques en laboratoire que nous envisagions.
Les premiers tests menés avec ce matériau reposant sur une couche de sable nous ont en effet satisfaits, le matériau faisant preuve d'une cohésion suffisante pour rester en place sur des pentes raides *(de l'ordre de 50 °)* et faire l'objet d'une rupture en traction au niveau d'une ligne d'ancrage amont *(nous verrons plus loin le protocole expérimental)*.
Les tests triaxiaux menés sur ce matériau au Cemagref de Bordeaux ainsi que les résultats bibliographiques démontrent un comportement mécanique élasto-plastique, une résistance en traction non négligeable et une dépendance du comportement en fonction de la densité et de l'histoire de charge du matériau.

Dans ce qui suit nous allons donc décrire le $CaCO_3$ et voir en quoi son comportement se rapproche suffisamment de celui de la neige pour qu'il puisse être envisageable de l'utiliser pour reproduire le comportement de cette dernière en laboratoire. Malheureusement, un aspect qui demeure semble-t-il inaccessible à l'expérience de laboratoire est le caractère évolutif de la neige en fonction de ses transformations thermodynamiques ainsi que l'influence de la température sur son comportement. En effet le matériau que nous allons décrire a un comportement indépendant de la température et est thermodynamiquement stable. Comme nous le verrons, le seul moyen de jouer sur sa rigidité et sa résistance en traction et en cisaillement est de modifier sa densité apparente.

2.1 Caractéristiques morphologiques

Le $CaCO_3$ est une poudre classée dans la catégorie des poudres relativement cohésives puisque son indice d'Hausner H_r est égal à 1,37 *(d'après N. Fatha 1988).* Cet indice est égal au rapport entre les masses volumiques tassées et non tassées des poudres et détermine leur nature cohésive ou au contraire coulante: H_r >1,4 caractérise les poudres cohésives, H_r <1,2 caractérise les poudres coulantes, 1,2< H_r <1,4 caractérise un comportement intermédiaire. Le H_r = 1,37 du $CaC0_3$ le classe donc à la limite des poudres cohésives dans un comportement encore intermédiaire. Son coefficient d'uniformité C_u (rapport entre les diamètres moyens à 60% et 10 % en volume) est de 4,81, ce qui traduit une distribution granulométrique étalée. En effet, une étude au granulomètre laser *(voir figure 1)* fait apparaître une distribution granulométrique en volume centrée sur 21,66 µm pour des diamètres de grains s'étalant entre les valeurs extrêmes de 0,4 à 100 µm *(d'après N. Fatha, données non publiées).*

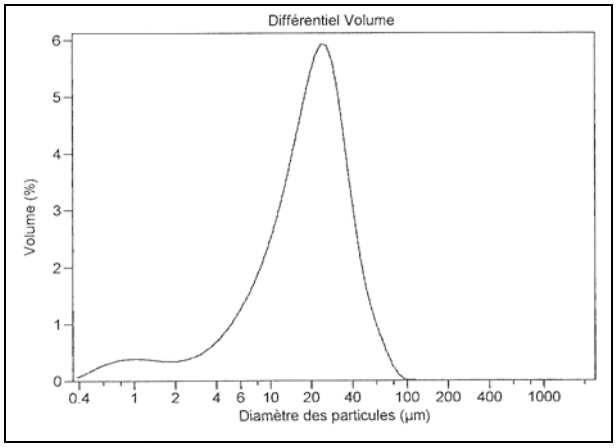
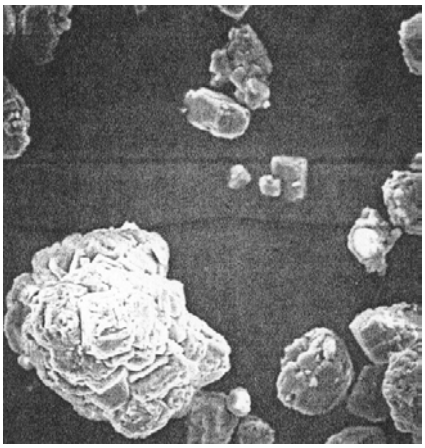


Figure 1 : Distribution granulométrique du $CaC0_3$ au granulomètre laser (d'après N. Fatha).

Les grains composant cette poudre sont de forme irrégulières stratifiées *(voir photo 1 ci-dessous)* et de masse volumique égale à 2700 $Kg.m^{-3}$.



Photographie 1 : Photographie au microscope à balayage électronique du $CaC0_3$ (Image N. Fatha)

2.2 Caractéristiques mécaniques

Le $CaC0_3$ étant une poudre cohésive, sa structure est très lâche dans son état non consolidé. L'indice des vides y est donc initialement assez élevé et lors de la mise sous charge de la structure lâche, on observe un fort réarrangement de la structure correspondant à une diminution de l'indice des vides et un comportement contractant. Ceci se traduit, sur la figure 2, par une augmentation de la fraction solide *(volume de solide sur volume total)* de l'échantillon lorsque la contrainte normale augmente.

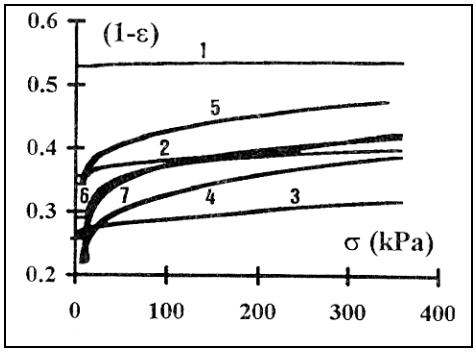


Figure 2 : Variations de la fraction solide en fonction de la contrainte normale de consolidation pour différentes poudres cohésives, la courbe 5 concerne le $CaC0_3$ (N. Fatha 1988).

La première partie de la courbe est relative à une très forte variation de la fraction solide lorsque la charge est appliquée, la seconde partie est relative à un transfert de la charge sur le squelette solide et une variation moins importante de la fraction solide. Ainsi dans son état lâche, la densité étant alors inférieure à 1, le $CaC0_3$ fait état d'un comportement fortement contractant dont nous avons vu qu'il pouvait être associé à un comportement durcissant *(augmentation de la résistance du matériau en cours de charge et de déformation plastique).*

Cependant, comme nous le verrons par la suite, lors de nos expériences, la densité était relativement élevée *(de l'ordre de 1,2 à 1,3 g.cm^{-3})* car le matériau était initialement compacté. Les tests triaxiaux menés au Cemagref de Bordeaux sur le $CaC0_3$ ont été réalisés à des densités compatibles avec la densité du matériau lors de nos tests en laboratoire. Dans ce cas le $CaC0_3$ fait preuve d'un comportement élasto-plastique adoucissant en cours de déformation plastique comme l'illustre la figure 3 ci-dessous.

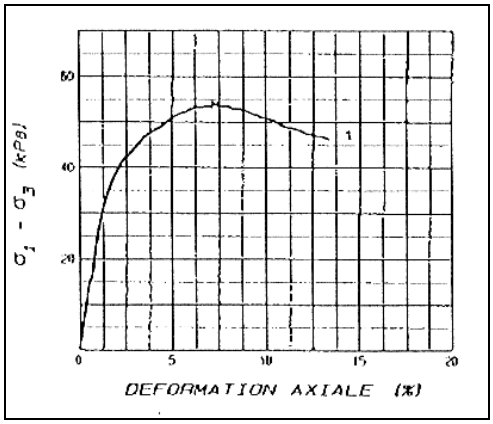


Figure 3 : Test au triaxal sur un échantillon de $CaC0_3$ initialement prés-consolidé à une densité de 1,3 g.cm^{-3}.

D'après ces tests, le module initial tangent a été estimé à 2400 Kpa.

On trouve dans la littérature des essais de cisaillement réalisés sur le $CaC0_3$ *(R.L. Brown et J.C. Richar 1966)* qui rendent compte des courbes intrinsèques caractérisant ce matériau et donnent des valeurs de la résistance en traction du matériau.
La figure 4 rend compte de la variation de la résistance en traction du matériau avec la densité, la figure 6 donne la courbe intrinsèque de ce matériau pour une densité de l'ordre de 1,1 g.cm^{-3}.

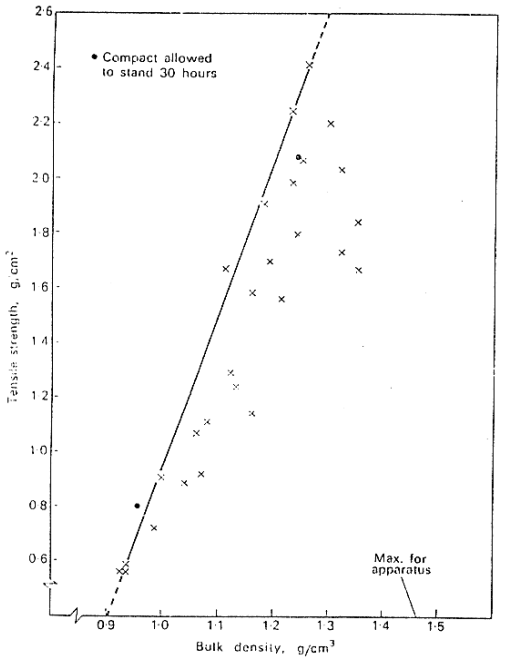


Figure 4 : Variation de la résistance en traction du $CaC0_3$ en fonction de sa densité (d'après R.L. Brown et J.C. Richar 1966) .

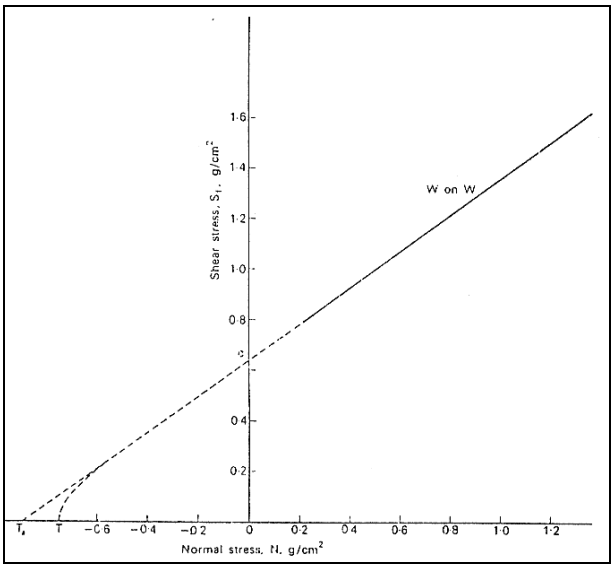


Figure 5 : Courbe intrinsèque du $CaC0_3$ (d'après R.L. Brown et J.C. Richar 1966)

D'après ces résultas, le matériau se caractérise par une cohésion de l'ordre de 60 Pa et un angle de frottement interne de 40 degrés. Ces grandeurs seront utiles dans la phase de modélisation numérique *(chapitre 2),* comme paramètres d'entrée du modèle.
Notons d'autre part que des tests réalisés à l'aide d'une presse bi-axiale sur le $CaC0_3$ *(J. Schwedes et D. Schulze 1990)* mettent en évidence une dépendance du comportement de ce matériau en fonction du chemin de charge lors de la phase de consolidation. En effet pour trois chemins de charge I II et III, menant après consolidation à la même densité apparente, la courbe intrinsèque du matériau est sensiblement différente, comme l'illustre la figure 6 ci-dessous.

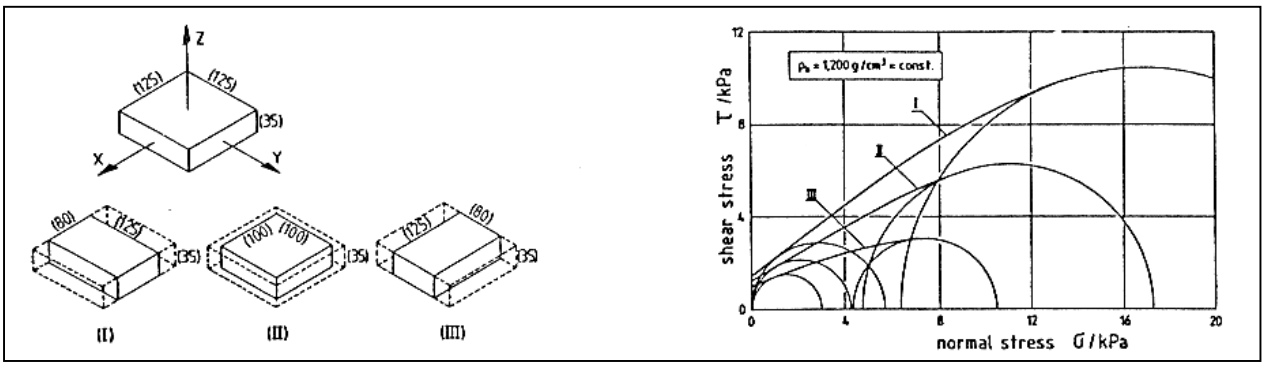


Figure 6 : Dépendance du comportement en fonction du chemin de consolidation (d'après J. Schwedes et D. Schulze 1990).

Dans les procédures de consolidation I et III présentées ci-dessus, la contrainte principale majeure de consolidation est respectivement exercée suivant les directions X et Y de la presse bi-axiale. Dans le cas II la contrainte de consolidation majeure est de révolution *(égale dans les directions X et Y)*, ce qui se rapproche du triaxial classique. La rupture de l'échantillon en cisaillement est obtenue en maintenant la contrainte mineure constante dans la direction Y et en augmentant la contrainte majeure dans la direction X. Il apparaît d'après la figure 6 que lorsque la contrainte de consolidation majeure coïncide avec la contrainte majeure lors du cisaillement de l'échantillon ainsi consolidé, la résistance au cisaillement est plus élevée que dans les cas II et III.
Il apparaît donc que la seule densité apparente ne soit pas un paramètre pertinent pour décrire le comportement de cette poudre et que le mode de compaction de la structure doive être pris en compte. C'est à présent de ce point que nous allons débattre.

3 La densité et le comportement

3.1 La densité

On entend par densité d'un matériau granulaire une mesure macroscopique intégrant l'ensemble des paramètres microscopiques structuraux caractérisant l'état de compacité du matériau : la structure solide et l'indice des vides.
La densité de cet ensemble solide plus vides est appelée densité apparente, notée ρ_b *(de l'anglais bulk density)* et elle varie avec l'indice des vides noté e : ρ_b augmente lorsque e diminue.
Un matériau granulaire compressible, comme c'est le cas de la poudre de CaCo3, aura donc une plage de compacité d'autant plus étendue que l'indice des vides est susceptible de varier sur une plage importante, c'est-à-dire que le matériau est compressible.
A chaque état de compacité considéré, correspond donc une structure donnée et tout changement de la structure aura pour effet de modifier la densité apparente du matériau.
Ainsi, pour un même matériau, la structure granulaire et donc le nombre de contacts entre les grains, ainsi que le frottement interne résultant, varie avec la densité apparente, qui se trouve être le paramètre le plus aisément mesurable pour tenter de quantifier l'ensemble des paramètres microscopiques régissant le comportement. Cependant, il s'agit bien là d'un paramètre lié et donc peu approprié pour décrire le comportement du matériau.

3.1.1 Nombre de coordination *k*

Il rend compte du nombre de contacts entre grains et dépend fortement de la structure du matériau granulaire ainsi que de la forme des grains et de la densité apparente du matériau.
Pour fixer les idées, un arrangement de billes de verre voit son nombre de coordination varier entre 6 à 12 lorsque sa structure passe d'une forme cubique à hexagonale, ce passage s'accompagne d'une augmentation de la fraction solide de 0.52 à 0.74 (*d'après Graton et Fraser 1953).* Cette tendance est générale dans les matériaux granulaires, le nombre de coordination augmentant avec la densité apparente quelle que soit la forme des grains considérés *(Benett et Brown 1940).* Le frottement interne résultant du contact inter-granulaire doit donc suivre la même tendance.

3.1.2 Cohésion

Les matériaux granulaires cohésifs voient leur cohésion augmenter avec la densité apparente. Richards *(1963)* et Morgan *(1965)* ont mis en évidence le phénomène en mesurant la résistance en traction du matériau à différentes densités apparentes *(la résistance en traction étant liée à la cohésion par l'intermédiaire du frottement interne à travers la courbe intrinsèque).* Les expériences menées sur une poudre de calcaire montre une augmentation de la résistance en traction de 0.6 g /cm^2 à 2.4 g /cm^2 pour une densité apparente passant de 0.92 à 1.26. *(voir figure 5 au paragraphe précédent).*

3.1.3 Résistance au cisaillement

Comme nous l'avons vu, la résistance au cisaillement d'un matériau granulaire cohésif τ_c, pour une valeur fixée de la contrainte normale, est une fonction de la cohésion et de l'angle de frottement interne du matériau :

$\tau_c = (N+T)\ \mu$ *(1)*

où μ est le coefficient de friction du matériau et T la résistance en traction.

On écrit aussi :

$\tau_c = \mu N+C$ *(2)*

où $C = \mu T$ est la cohésion du matériau.

Le frottement interne et la cohésion étant deux paramètres indépendants, ils permettent donc via le critère de Mohr-Coulomb ci-dessus, de caractériser simplement le comportement du matériau. Cependant ces deux paramètres ne suffisent pas pour un matériau granulaire compressible, à caractériser totalement le critère. En effet, comme nous l'avons mentionné plus haut, la cohésion ainsi que l'angle de frottement interne dépendent de la compacité du matériau et donc de l'indice des vides. Ce paramètre ne peut donc pas être ignoré lorsque l'on veut déterminer le critère de rupture *(ou de plasticité)* d'un matériau granulaire.

3.1.4 Indice des vides

La rupture d'un matériau granulaire intervient pour une valeur particulière du triplet contrainte normale et tangentielle et indice des vides. Le critère de rupture ne doit donc plus se visualiser dans un espace de contrainte à deux dimensions *(le plan de Mohr)* mais dans un espace à trois dimensions, dont la troisième dimension n'est autre que l'indice des vides.

Lorsqu'on soumet un échantillon d'un matériau granulaire faiblement compacté à une compression pure *(à contrainte de cisaillement nulle)* l'indice des vides diminue d'autant plus que l'échantillon est faiblement compacté. D'après Roscoe et al *(1958),* cette décroissance est logarithmique et de la forme :

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = -\frac{1}{B}\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) \qquad (3)$$

où B, ε_0, N_0 sont des constantes.

Ceci rend bien compte du fait qu'un faible incrément de contrainte normale suffit pour compacter une poudre lâche, alors que pour une poudre fortement pré-consolidée, l'incrément de contrainte pour faire diminuer son indice des vides devra être bien plus élevé.

Ainsi pour une contrainte normale N passant de N_1 à N_2 ($N_1 < N_2$) à contrainte de cisaillement S nulle, l'évolution de l'indice des vides, ε passant de ε_1 à ε_2 ($\varepsilon_1 > \varepsilon_2$) est caractérisée par une branche logarithmique dans le plan (ε,N) c'est-à-dire S=0 *(voir figure 7).*

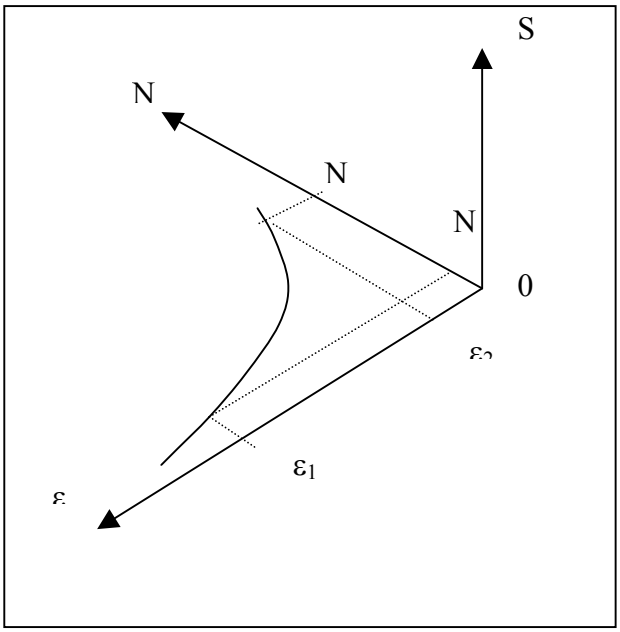
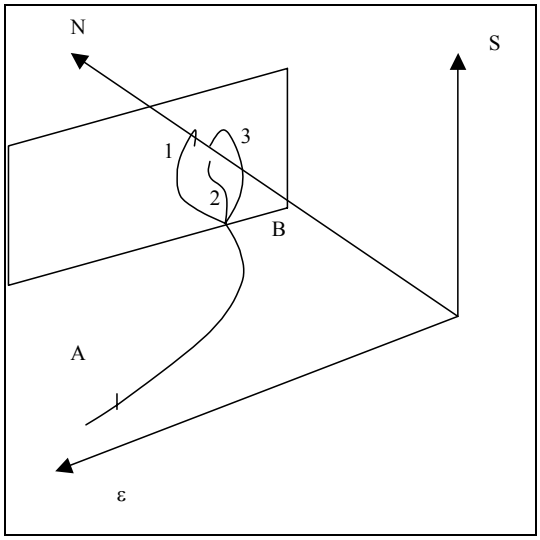


Figure 7 : Décroissance de l'indice des vides sous incrément de consolidation.

Examinons à présent l'effet d'un incrément de contrainte de cisaillement sur l'évolution de l'indice des vides.

Supposons une charge normale emmenant l'échantillon d'un état A à un état B dans le plan (N,ε). Puis en B la contrainte normale Nb est maintenue fixe alors que l'on applique une contrainte de cisaillent S. Le matériau évolue alors dans le plan Nb=cte.



On a alors trois comportements possibles en fonction de l'état de compaction initial en B :

- Dans le cas d'un matériau fortement sur-consolidé on observe un comportement dilatant correspondant à une augmentation de d *(indice des vides le long de la courbe 1).*

- Au contraire, dans d'un matériau lâche, on observe un comportement contractant correspondant à une diminution des contraintes le long de la courbe 3.

Dans le cas d'un matériau moyennement consolidé le comportement est intermédiaire entre les deux précédents.

Des expériences menées par Roscoe (1958) ont permis de mettre en évidence ces trois comportements différents. Il est important de noter que dans les conditions expérimentales seul l'état intermédiaire a conduit l'échantillon à la rupture, la cellule ne pouvant produire de déformations suffisantes pour mener les échantillons lâches et sur-consolidés à la rupture.

La question se pose à présent de définir dans l'espace (N,ε,S) un critère de rupture (équivalant à la courbe intrinsèque dans le plan de Morh (N,S)).
D'après Hvorslev (1937), au point de rupture la contrainte de cisaillement maximum Sf est une fonction de la contrainte normale en ce point et de l'indice des vides en ce même point.
La surface de rupture a pour équation (Roscoe et al 1958) :

$$Sf = \mu_0 Nf + \nu \exp(-B\varepsilon_f) \qquad (4)$$

où ε_f , μ_0 et B sont des constantes caractéristiques du matériau.

Lorsque les déformations imposées à l'échantillon sont suffisantes, les chemins 1,2 et 3 conduisent au même point de rupture. Ce point appartient à la ligne d'indice des vides critique, c'est-à-dire l'ensemble des points pour lesquels à N=Nf et S=Sf l'indice des vides prend sa valeur critique ε_f. *(voir figure 8)*

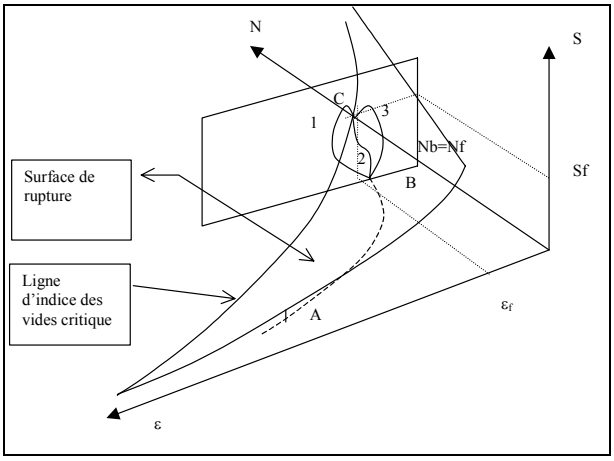
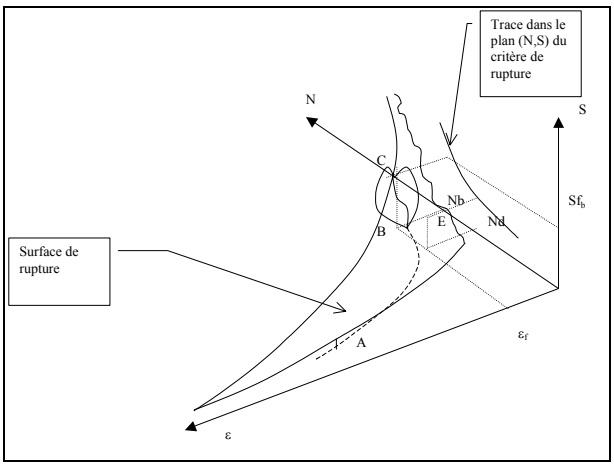
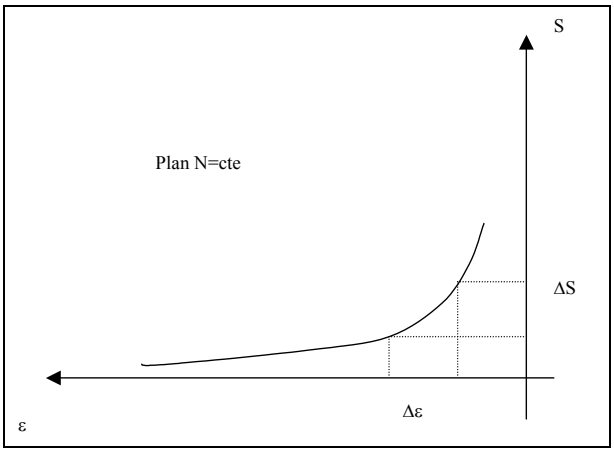


Figure 8 : Indice des vides critique

Examinons, à partir de ce schéma, comment évolue le point représentant l'état du matériau dans l'espace (N,S,ε) pendant un test de cisaillement simple. Lors de ce type de test *(comme par exemple un essai de cisaillement simple à l'aide d'une boite de Casagrande),* il est nécessaire pour la bonne reproductibilité des résultats de pré-consolider l'échantillon avant de lui appliquer un cisaillement.
En effet la phase de pré-consolidation consiste à emmener l'échantillon en B à l'aplomb de la ligne d'indice des vides critique, de sorte qu'à partir de B l'application d'un cisaillement S=Sf à N=Nb=cte emmène l'échantillon à la rupture en C *(en ce B le taux de vides prend sa valeur critique ε_f).*
A partir de B si l'on relâche la contrainte normale à Nd <Nb, la valeur de l'indice des vides reste égale à celle fixée par la phase de pré-consolidation *(effet des déformations plastiques permanentes sur la structure granulaire),* c'est-à-dire $\varepsilon=\varepsilon_f$. A partir du point D si l'on augmente à présent la contrainte de cisaillement, la rupture sera atteinte en E, point appartenant à la surface de rupture de Hvorslev. Comme le montre le schéma ci-dessous, il est alors possible en reproduisant la même opération pour un ensemble de valeurs de la contrainte normale de représenter dans le plan ε=0 la trace du critère de rupture, c'est-à-dire la courbe intrinsèque du matériau.

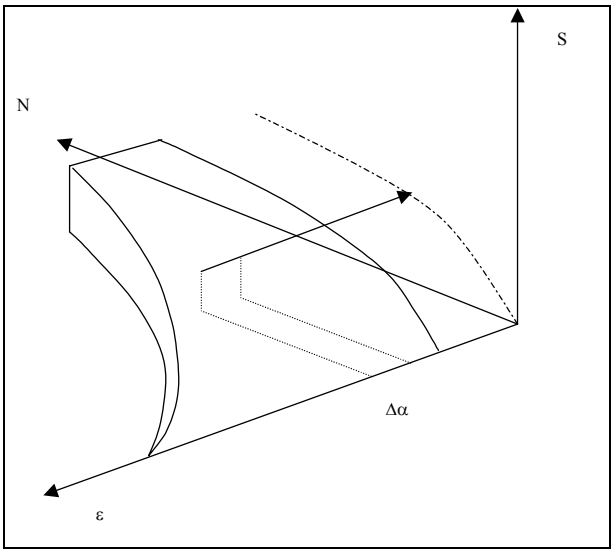


A ce stade on voit apparaître l'importance, pour la détermination du critère d'un matériau granulaire cohésif, de la préparation de l'échantillon. Le même matériau à des états de compacités différents ne répond pas au même critère de plasticité ou de rupture. En effet, d'après ce qui précède, pour une poudre cohésive, la trace du critère de rupture dans un plan N=cte est une branche logarithmique, ce qui rend compte du fait que plus la poudre considérée est lâche, plus sa cohésion diminue. Ainsi pour une valeur fixée de la contrainte normale, la contrainte de cisaillement nécessaire pour obtenir la rupture dépend de l'indice des vides du matériau.



Pour reproduire l' état à la rupture d'un matériau cohésif, il ne suffit pas de se donner un couple (N,S), mais aussi une certaine structure avec un indice des vides correspondant. Ainsi la projection dans le plan (N,S) des point situés sur la surface de rupture, c'est-à-dire la courbe intrinsèque du matériau, dépend de l'indice des vides du matériau.

Lorsque l'on s'intéresse aux matériaux granulaires non cohésifs, le problème est simplifié. En effet les expériences menées par Roscoe et al *(1958)* sur un matériau constitué de billes d'acier de 1mm de diamètre, mettent en évidence la non-dépendance du critère par rapport à l'indice des vides. La trace de la surface de rupture dans un plan n=cte se trouve alors être une droite S=cte. Ainsi différents points appartenant à la surface de rupture et correspondant à des indices des vides différents ont même projection dans le plan (N,S).



D'autre part, une difficulté supplémentaire intervient lors de la préparation de l'échantillon. En effet, on vient de voire que pour assurer une bonne reproductibilité des essais en cisaillement d'une poudre cohésive, il est nécessaire de préparer l'échantillon dans une structure particulière à un indice des vides fixé. Cependant, il existe plusieurs façons d'emmener l'échantillon dans cet état de compacité particulier : par compaction simple, par vibration, etc…
Bien qu'une poudre à la rupture ait un indice des vides caractéristique, il apparaît que cet indice des vides n'est pas une caractéristique du matériau, l'histoire de compaction du matériau ne pouvant être ignorée pour caractériser la structure. Ainsi la densité apparente ne se présente pas comme un paramètre permettant de caractériser correctement la structure du matériau. C'est cependant lui le plus aisément mesurable, et c'est souvent celui qui est retenu dans de nombreuses études liées aux matériaux granulaires cohésifs, comme c'est le cas pour la neige par exemple.

Ainsi lorsque, comme c'est notre cas, on relie la rupture d'un matériau granulaire à sa densité apparente, il convient de garder à l'esprit qu'une erreur est commise quant à l'appréciation du critère de rupture. Nous nous attacherons, tant que faire se peut, à préparer nos échantillons toujours de la même manière de façon à diminuer l'incertitude induite par le manque d'information sur la structure du matériau lors du test.

4 Tests sur poudre en laboratoire

De façon à tester l'influence sur la stabilité de différents paramètres macroscopiques, nous avons réalisé un banc d'essais inclinable en continu, reproduisant une pente de géométrie simplifiée, puisqu'il s'agit d'une simple rupture de pente d'angle variable *(figure 9).* La pente est recouverte d'une rugosité de taille compatible avec la taille de grains composant la couche inférieure. On place sur cette géométrie une couche fragile constituée de poudre non cohésive *(un sable d'Hostun de granulométrie centrée sur 100 microns)* sur laquelle on dépose au tamis, de façon homogène, une couche de poudre cohésive composée de $CaCo_3$. La plaque ainsi vient prendre appui sur un pied de butée aval et est retenue par un ancrage amont au niveau de la rupture de pente. De façon à éviter les effets de bords latéraux au contact entre la plaque supérieure et les bords transparents de canal, les bords latéraux de la couche supérieure reposent directement sur la rugosité. Ainsi seule la partie centrale de la plaque repose sur la couche fragile et est susceptible de se déstabiliser. Lors de la rupture, il apparaît donc une zone de cisaillement entre la poudre en mouvement et celle qui reste en place sur la rugosité. Le contact latéral est ainsi ramené à un cisaillement au sein même de la poudre cohésive ce qui simplifiera la prise en compte de conditions aux limites latérales du problème.
Lorsqu'on augmente l'angle d'inclinaison de la pente, une rupture en cisaillement apparaît dans la couche fragile, la plaque cohésive supérieure est alors soumise à une contrainte en traction au niveau de la rupture de pente ce qui aboutit rapidement à sa rupture en traction *(figure 10).* La rupture en cisaillement aux bords de la plaque intervient rapidement après une phase de déformation plastique sans qu'il soit nécessaire d'augmenter l'angle une fois la rupture en traction apparue.

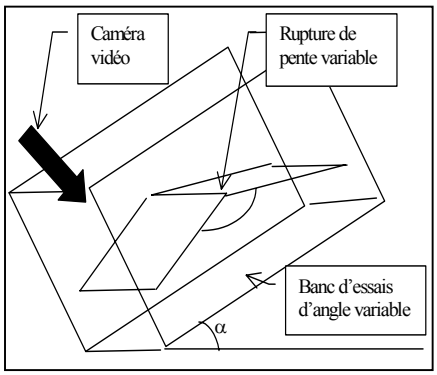


Figure 9 : Dispositif expérimental.

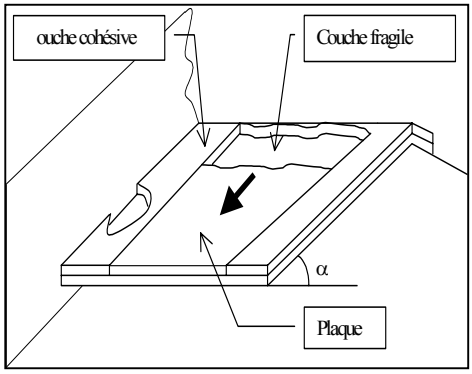
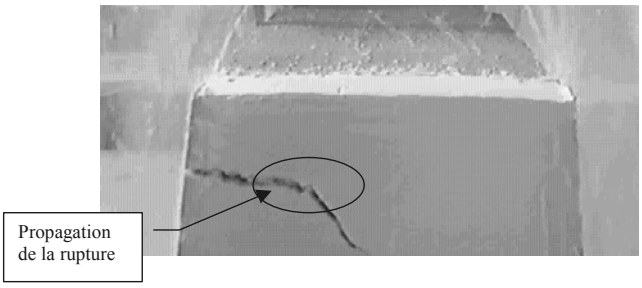


Figure 10 : Disposition des couches.

Ce dispositif expérimental est équipé d'une caméra vidéo filmant dans un plan fixe perpendiculaire à la pente, à raison de 25 images par seconde, et permettant de suivre image par image la chronologie de la rupture de façon à déterminer son point d'initiation ainsi que la façon dont elle se propage en fonction des propriétés mécaniques du matériau utilisé. La photographie 2 ci-dessous illustre la naissance de la fissuration de la couche supérieure cohésive. La localisation spatiale de la rupture devra par la suite être retrouvée par la modélisation numérique de façon à vérifier que les volumes initiaux mis en mouvement sont correctement estimés. En outre l'analyse ces films a permis, comme nous le verrons, de déterminer les configurations pour lesquelles la localisation spatiale de la rupture est fixée par la topographie et les caractéristiques géométriques du matériau plus que par ses propriétés mécaniques.



Photographie 2 : Simulation de rupture en mode couche fragile sur modèle réduit (L. Vidal)

Chaque rupture de plaque est reliée aux paramètres physiques agissant sur la stabilité :
- épaisseur et densité de la couche supérieure.
- épaisseur de la couche fragile.
- angle nécessaire pour obtenir la rupture qui fixe l'angle limite de stabilité de la pente.

De façon à assurer la reproductibilité des expériences, un paramètre important à contrôler est l'humidité relative de l'air. En effet la poudre cohésive composant la couche supérieure étant d'une granulométrie fine, elle est très sensible aux effets de l'humidité. Ceci se traduit généralement par une augmentation de la cohésion due à la capillarité *(qui est d'autant plus sensible que le réseau poreux est fin).* L'ensemble des expériences a donc été réalisé à hydrométrie constante à plus ou moins cinq pour cent.

Nous avons fait varier chacun de ces paramètres en laissant les autres constants de façon à déterminer le rôle joué par chaque paramètre indépendant dans la stabilité. Ainsi la stabilité, qui dans notre expérience se traduit par la valeur de l'angle limite de stabilité de la pente, peut être étudiée en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure, de sa densité et de l'épaisseur de la couche fragile.

Une étude de la localisation spatiale de la rupture a été de même réalisée pour différentes configurations géométriques *(épaisseur des deux couches),* différente densité de couche supérieure et différentes valeurs de la rupture de pente.
De plus une analyse de la chronologie de la rupture a été effectuée de façon à vérifier que le phénomène que nous reproduisons en laboratoire suit bien la même chronologie que celle observée sur le terrain. En outre, l'analyse chronologique nous permettra de tirer certaines conclusions quant au mode de fonctionnement d'un système bi-couches.

5 Résultats

5.1 La stabilité en fonction de l'épaisseur de la plaque supérieure

L'une des premières questions qui se posait, était de savoir si la chronologie de la rupture présentée plus haut *(rupture initiale en cisaillement dans la couche fragile suivie d'une rupture en traction dans la couche supérieure)* était bien observable. En effet il aurait été envisageable de considérer que la rupture initiale se fasse en traction dans la couche supérieure puis que celle-ci glisse sur la couche fragile comme sur un roulement à bille, provoquant son cisaillement. Les expériences que nous avons menées montrent qu'il n'en est rien.
En effet si l'on décompose la rupture en une phase de rupture en cisaillement et une autre de rupture en traction *(sans ordre chronologique pour l'instant):*

Une rupture en cisaillement dans la couche fragile, apparaissant lorsque, pour une valeur de l'angle d'inclinaison de la pente *(qui est augmenté régulièrement),* la contrainte de cisaillement appliquée sur cette couche par la couche supérieure atteint une valeur critique, ce qui se traduit par :

$$\tau(\alpha) = \tau_c = \rho g\, e_p \sin(\alpha_s)$$

où ρ est la densité de la couche supérieure α l'angle d'inclinaison de la pente par rapport à l'horizontale et α_s la valeur de l'angle limite de stabilité de la pente.
Cependant, l'apparition d'une rupture en cisaillement dans la couche fragile n'est pas une condition suffisante pour atteindre la rupture de l'ensemble de la structure. En effet, après cette rupture initiale, une augmentation additionnelle de l'angle de $\Delta\alpha$ est nécessaire pour atteindre la rupture en traction de la plaque supérieure pour un angle correspondant égal à α_p. On peut alors écrire :

$\alpha_p = \alpha_s + \Delta\alpha$ où α_s est l'angle pour lequel apparaît la rupture en cisaillement de la couche fragile et où $\Delta\alpha$ est lié à la résistance en traction de la couche supérieure cohésive.

Si la couche supérieure n'était pas cohésive, la rupture globale de la structure bi-couches interviendrait dès la rupture en cisaillement de la couche fragile, c'est-à-dire lorsque $\tau(\alpha) = \tau_c = \rho g\, e_p \sin(\alpha_p)$ avec $\alpha_s = \alpha_p$ ce qui peut être écrit: $\sin(\alpha_p) = \frac{\tau_c}{\rho g} * \frac{1}{e_p}$.

Si l'on porte sur un graphique $\sin(\alpha_p)$ en fonction de $1/e_p$ on devrait donc observer une droite de pente $\frac{\tau_c}{\rho g}$.
Cependant la nature cohésive de la couche supérieure *(et donc sa résistance en traction)* conduit à prendre en compte un angle additionnel pour atteindre les conditions de rupture *(figure 11),* ce qui conduit à écrire :

$$\sin(\alpha_p) = \frac{\tau_c}{\rho g}\frac{1}{e_p} + cte$$

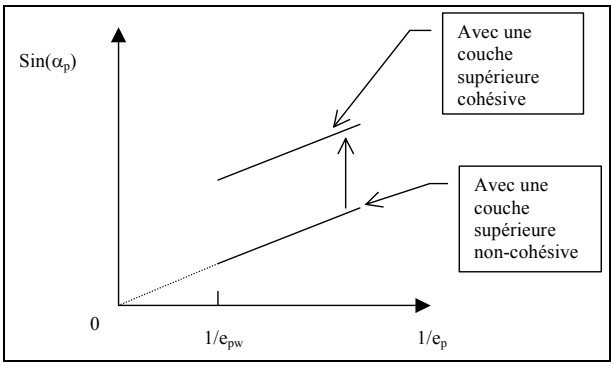


Figure 11 : Effet de la cohésion de la couche supérieure sur la stabilité d'un système bi-couches.

Il est intéressant de noter qu'entre zéro et un certain seuil $1/e_{pw}$ la courbe en pointillé n'a aucun sens physique.

En effet, lorsque l'épaisseur de la couche cohésive dépasse une valeur seuil e_{pw}, la rupture en cisaillement ne se fait plus dans la couche fragile mais directement dans la couche cohésive, le critère de Mohr Coulomb étant vérifié sur un plan appartenant à la couche supérieure. Dans ce cas le mécanisme de rupture n'est plus conforme à celui pris en compte plus haut, ce qui graphiquement se traduit par une partie de la courbe non représentative à partir d'un certain seuil, correspondant à cette épaisseur limite.

Nous avons réalisé, sur notre pente test, un ensemble de mesures, pour des valeurs croissantes de l'épaisseur de la couche cohésive en fixant sa densité ainsi que l'épaisseur de la couche fragile *(qui était fixée à 8 mm).*
Les résultats suivants ont été obtenus :

Ep(mm)	α_p (deg)	α_p (rad)	Densité (g ;cm^{-3})	1/ep	sin(α_p)
5,72	56	0,97738438	1,1	0,17482517	0,82903757
5,71	56	0,97738438	1,06	0,17513135	0,82903757
11	52	0,90757121	1,06	0,09090909	0,78801075
11,37	52	0,90757121	1,06	0,08795075	0,78801075
14,87	48	0,83775804	1,08	0,0672495	0,74314483
15,18	48	0,83775804	1,08	0,06587615	0,74314483
22,88	45	0,78539816	1,05	0,04370629	0,70710678
21,45	46	0,80285146	1,11	0,04662005	0,7193398

La densité moyenne de la couche supérieure était de 1.075 pour un écart type de 0.02. Ceci confirme bien que le paramètre densité était fixé pour l'ensemble de ces expériences.
Nous avons obtenu un bon accord avec la forme linéaire attendue *(figure 12)*

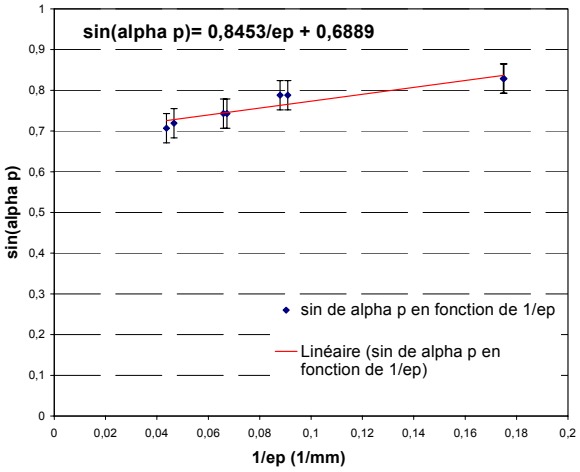


Figure 12 : sin(α_p) en fonction de de 1/e_p

Dans la théorie de Mohr-Coulomb, la rupture en cisaillement dans la couche fragile apparaît lorsque le critère est satisfait, ce qui s'écrit classiquement : $\tau = \tau_c = C + \sigma_{nc} \tan(\Phi_w)$ où C est la cohésion de la couche, σ_n la composant normale de la contrainte appliquée à la couche fragile et Φ_w son angle de frottement interne. Dans notre cas, nous avons fait l'hypothèse d'une cohésion nulle. Lorsque le critère est atteint nous pouvons écrire $\sin(\alpha_s) = \frac{\tau_c}{\rho g} * \frac{1}{e_p}$ c'est-à-dire $\alpha_s = \Phi_w$.

Le graphique ci-dessus montre donc que l'utilisation du critère de Mohr-Coulomb est bien appropriée à la description du comportement de la couche fragile.

Il montre de même que la chronologie de la rupture prise en compte pour notre étude est valide. En effet si la rupture avait lieu en premier dans la couche cohésive *(deuxième type de mécanisme envisageable),* l'angle correspondant à la rupture globale α_p serait indépendant de e_p. En effet, pour des dimensions constantes de la plaque cohésive supérieure, la résistance en traction est indépendante de e_p :
J.C Richards et R.L Brown donnent *(Principles of powder mechanics 1970)* l'expression suivante de la résistance en traction d'une couche cohésive:

$T = \frac{W \sin\theta}{A}$ où W est le poids de la plaque en mouvement , A est la surface de la zone de rupture et θ est l'angle par rapport à l'horizontale lorsque la rupture en traction intervient.

Cette équation peut s'écrire : $T = \frac{\rho.L.A\sin\theta}{A} = \rho.L\sin\theta$ où ρ est la densité de la plaque, L sa longueur et A la section de la zone de rupture, assimilée dans nos expériences à la section de la plaque.

Si durant les expériences les dimensions de la plaque ainsi que sa densité sont maintenues constantes, ce qui était le cas, on voit clairement que la résistance en traction de la plaque est, pour une certaine valeur de l'angle de rupture observé, une caractéristique intrinsèque de la plaque cohésive et ne dépend nullement de son épaisseur.

Dans l'hypothèse où la rupture prendrait initialement naissance dans la couche supérieure, formant ainsi une plaque qui glisserait sur la couche fragile en la cisaillant instantanément, l'angle de rupture globale de la pente α_p serait identique à l'angle θ nécessaire pour obtenir la rupture en traction de la plaque. Celui-ci ne dépendant pas de e_p aucune dépendance de la stabilité en fonction de l'épaisseur ne serait observable. Or le graphique ci-dessus montre clairement une dépendance de la stabilité en fonction de l'épaisseur de la couche cohésive, ce qui indique que la chronologie à prendre en compte est bien une rupture initiale dans la couche fragile suivie par une rupture en traction dans la couche supérieure et non l'inverse.

De plus il est bien conforme à ce que l'on peut attendre du fonctionnement « intuitif » d'une telle structure, à savoir que la pente est d'autant plus instable que l'épaisseur de la couche supérieure est importante.

5.2 La stabilité en fonction de l'épaisseur de la couche fragile

Bien que, comme nous l'avons précisé au début de ce chapitre, la couche fragile lors de ces expériences ne rend pas compte des caractéristiques intrinsèques des couches fragiles des grains facettés telles qu'elles sont observées sur le terrain *(fort indice des vides et comportement rigide fragile indépendant de la contrainte normale),* l'analyse des résultats obtenus avec une simple couche de sable présente un certain intérêt pour la comparaison au cas de la neige.

En effet la couche de sable qui modélise ici la couche fragile ne peut en aucun cas être assimilée à une couche de comportement fragile au sens où nous l'entendons *(liens fragiles entre les grains conférant un comportement cohésif et fragile à la couche).* Au contraire, la couche de sable est ici une couche de matériau très peu cohésif et donc fortement frottant : l'angle de frottement interne participe majoritairement à la résistance au cisaillement.

Ainsi la couche fragile que nous modélisons ici n'a pour but que de faciliter l'apparition d'un plan de glissement permettant le report des contraintes dans la plaque et sa rupture en traction.

Si le comportement frottant de notre couche de sable ne peut prétendre approcher la réalité d'une couche fragile de gobelets ou de faces planes *(point qui sera traité plus loin dans le paragraphe « comportement d'une couche fragile »),* elle est cependant plus représentative des couches fragiles composées de neige roulée dans lesquelles la nature quasi sphérique des grains confère à la couche une cohésion quasi nulle et un comportement essentiellement frottant se rapprochant du comportement d'un sable sec.

Nous verrons que dans ce cas le comportement des couches fragiles est très différent de celui qui est classiquement observé dans les couches fragiles composées de grains facettés. En particulier, nous verrons que, contrairement à ce qui est avancé par B. Salm et H.P. Bader *(1989),* la stabilité décroît lorsque l'épaisseur de la couche fragile augmente. Insistons encore sur le fait que nos résultats ne sont en rien incompatibles avec ceux de B. Salm et H.P. Bader *(1989)* puisqu'ils ne sont pas relatifs au même type de matériaux : frottants et non cohésifs dans notre cas *(modèle de neige roulée ou de grésil) et cohésifs et fragiles dans le leur (couche fragile de grains facettés).*

Durant les expériences précédentes, l'épaisseur de la couche fragile était constante, ce qui nous a permis de tester l'influence de l'épaisseur de la plaque cohésive sur la stabilité. La question qui se pose à présent est de savoir si l'épaisseur de la couche fragile dans l'analyse de la stabilité. Pour répondre à cette question, nous avons réalisé le même protocole expérimental que précédemment mais cette fois en travaillant à épaisseur et densité de couche supérieure constantes.

Les résultats suivants ont été obtenus:

e_p(mm)	Density (g.cm^{-3})	α_p (deg)	e_s (mm)
5,85	1,07	58	6
5,62	1,1	59	6
5,62	1,12	56	6
5,62	1,13	58	6
5,75	1,1	56	8
5,72	1,1	56	8
5,71	1,06	56	8
5,71	1,13	60	3
5,5	1,17	58	3
5,71	1,14	62	3
5,57	1,19	60	3
5,75	1,16	63	5
6,57	1,24	54	5
5,62	1,16	61	5
4,5	1,2	71	1
4,42	1,26	71	1
4,71	1,17	66	1
4,5	1,23	71	1
4	1,27	69	1
4,28	1,2	69	1
5,28	1,2	61	3
5	1,31	61	3
4,55	1,14	61	3

L'épaisseur moyenne de la plaque supérieure était de 5.59 mm avec un écart type de 0.4.
La densité moyenne était de 1.16 pour un écart type de 0.065.

De façon à tracer les variations α_p en fonction de e_s nous avons calculé la valeur moyenne de l'angle de limite de stabilité de la pente pour chaque ensemble de résultats correspondants à un ensemble d'expériences réalisées avec la même épaisseur de couche fragile. Les résultats sont portés sur la figure 13 :

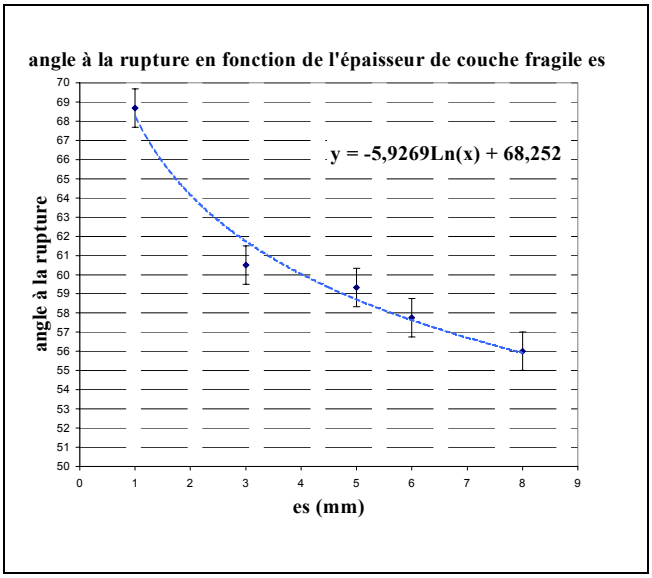


Figure 13 : Stabilité en fonction de l'épaisseur de la couche fragile.

Ce graphique met en évidence une diminution de la stabilité lorsque l'épaisseur de la couche fragile augmente. Pour comprendre ce fonctionnement de la couche fragile, il nous faut analyser son comportement mécanique non plus comme précédemment, d'un point de vue macroscopique via une loi de Mohr-Coulomb, mais à l'échelle de la microstructure de façon à prendre en compte les forces de contacts inter-granulaires.
Examinons tout d'abord, suivant la perpendiculaire à la pente, les conditions aux limites auxquelles est soumise la couche fragile :
Au bas de la couche, la rugosité, dont la taille caractéristique est compatible avec la taille des grains composant la couche fragile, assure un encastrement et donc une condition de non-glissement.
En haut de la couche, à l'interface en les deux couches, les grains composant la couche fragile et ceux beaucoup plus fins de la couche cohésive supérieure s'interpénètrent sur une épaisseur de quelques grains. Ainsi, la limite supérieure de la couche fragile se caractérise par une condition de non-glissement. Ceci a été vérifié en filmant l'expérience en mode macro focalisé sur l'interface entre les deux couches, ce qui a permis de constater l'apparition d'une bande de cisaillement, non pas à l'interface, mais en dessous

de celle-ci dans l'épaisseur de la couche fragile.
Ainsi les limites haute et basse de la couche se caractérisent par une forte résistance au cisaillement inter-granulaire se répercutant dans la structure granulaire voisine, sur une épaisseur de quelques grains, par transmission des forces de contacts par les grains considérés comme rigides *(transmettant bien les contraintes)*. A une certaine distance de cette zone de contacts inter-granulaires non-glissants *(quelques diamètres de grains),* la résistance au cisaillement inter granulaire décroît et les grains, moins contraints, retrouvent un contact glissant.
Lorsque la couche fragile est assez épaisse, il existe entre les deux conditions aux limites une zone de contact glissant qui favorise l'apparition d'une bande de cisaillement conduisant à la rupture de la couche fragile. Ceci se traduit, d'un point de vue macroscopique, par un angle de frottement interne relativement faible dans une bande de matériau au sein de la couche fragile.

Lorsque la couche est de faible épaisseur, les conditions de non-glissement inter granulaire se répercutent sur toute l'épaisseur de la couche, ce qui se traduit par une augmentation de l'angle de frottement interne de la couche.
Le critère est alors différent en fonction de l'épaisseur de la couche fragile considéré *(figure 14)* :

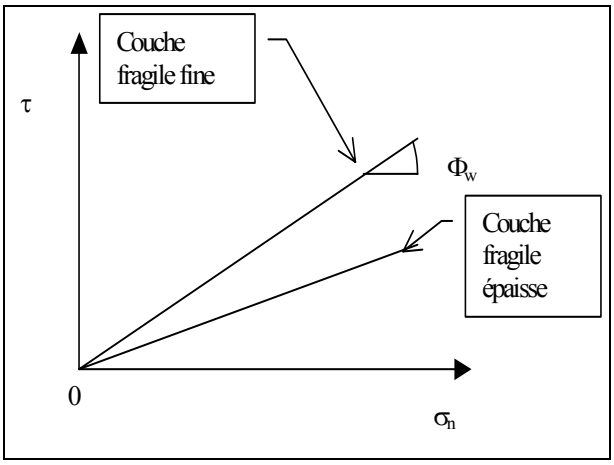


Figure 24 : Critère de rupture en fonction de l'épaisseur de la couche fragile.

Le fait que l'angle de stabilité de la pente dépende de l'épaisseur de la couche fragile, confirme bien que le fonctionnement de cette dernière est de toute première importance dans l'analyse du comportement global de la structure bi-couches.
D'autre part des expériences ont été réalisées, qui montrent qu'au-delà d'une certaine épaisseur de couche fragile *(8 mm pour nos expériences),* la dépendance de la stabilité en fonction de l'épaisseur de la couche fragile n'est plus observée. En effet à partir d'une certaine épaisseur, l'angle de frottement de la bande de matériau de contacts inter-granulaires glissant tend vers l'angle de frottement interne du matériau non contraint *(à surface libre)* qui est la valeur minimum de l'angle de frottement du matériau. Dès lors une augmentation de l'épaisseur de la couche fragile n'aura aucun effet sur l'angle de frottement interne de cette couche et donc aucun effet sur l'initiation de l'instabilité. La courbe présentée ci-dessus est donc bornée par cette limite supérieure.

5.3 Stabilité en fonction de la densité de la plaque supérieure

De façon à déterminer l'influence d'une densité croissante de la couche supérieure sur la stabilité, des tests ont été réalisés en fixant l'épaisseur de la couche fragile à 8 mm et celle de la couche supérieure à 5.8 mm en moyenne sur l'ensemble des tests *(avec un écart type de 0.4).* La densité de la couche supérieure était quant à elle comprise entre 1.06 to 1.4 g/cm^3.

Théoriquement, une augmentation de la densité s'accompagne d'une augmentation du nombre de coordination, traduisant au niveau microscopique une augmentation des contacts inter-granulaires et, au niveau macroscopique une augmentation de l'angle de frottement interne du matériau. D'autre part, cette évolution du matériau s'accompagne d'une augmentation de sa résistance en traction, puisque celle-ci est directement reliée à la densité du matériau *(pour des dimensions de plaques maintenues constantes et un angle d'inclinaison donné)* par : $T = \rho.L\sin\theta$.

Ashton et al *(1965)* donnent une relation suivant une loi puissance reliant la résistance en traction à la densité par : $T = (cte)(\rho_b)^m$.

Ainsi, on s'attend à une augmentation de l'angle de limite de stabilité de la pente, suivant une puissance de la densité lorsque celle-ci augmente. Les résultats obtenus sont les suivants *(figure 15)* :

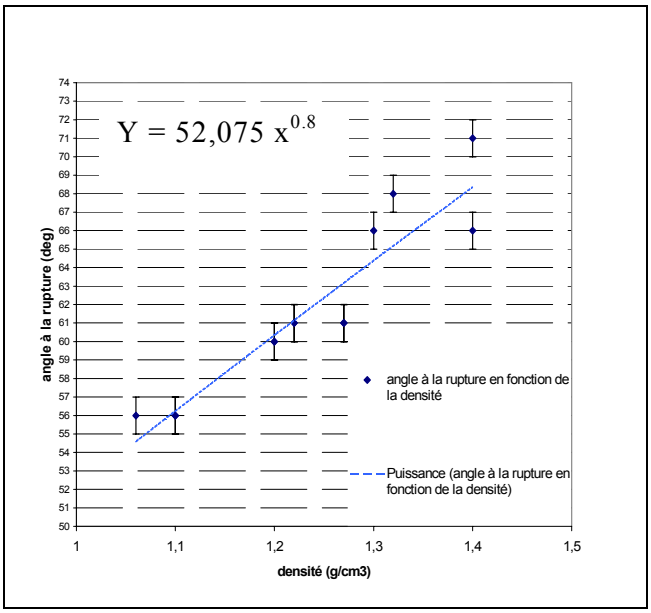


Figure 15 : Angle à la rupture en fonction de la densité de la couche supérieure.

Notons que l'augmentation de la densité de couche supérieure s'accompagne aussi d'une augmentation de sa résistance au cisaillement, la cohésion et l'angle de frottement interne augmentant. Dans l'analyse de la stabilité, on pourrait a priori s'attendre à ce que la résistance en traction du matériau ne soit pas le seul paramètre à agir sur la limite de stabilité de la pente, mais que la résistance au cisaillement aux bords latéraux de la plaque supérieure intervienne aussi. Cependant l'analyse des films en vue de dessus des ruptures, nous ont permis d'étudier la chronologie de la rupture de la couche supérieure. Il apparaît ainsi que la rupture en traction intervient en premier lieu, engendrant alors une concentration de contraintes de cisaillement aux bords latéraux de la plaque *(entre la couche supérieure immobile et la plaque)* et de compression au niveau du pied de butée.

Ceci paraît logique si l'on considère que le matériau est moins résistant en traction qu'en cisaillement et en compression. Cependant il est important de noter, comme nous l'avons déjà mentionné plus haut, que les ruptures en cisaillement et en compression de la plaque interviennent sans qu'il soit nécessaire d'augmenter l'angle de la pente une fois que la rupture en traction est apparue. Ainsi la rupture de la plaque en traction conduisait, dans nos expériences, à sa déstabilisation générale. Ceci était rendu possible par le fait que les ruptures en traction apparaissaient pour des angles d'inclinaison de la pente assez importants pour que le critère de Mohr-Coulomb *(rupture en cisaillement)* soit nécessairement vérifié aux bords latéraux de la plaque, ainsi que sur un plan à environ 45 degrés au niveau du pied de butée. Le critère de rupture de la plaque se confond donc ici avec le critère de rupture en traction de la plaque, ce qui justifie que, dans notre étude, la résistance en traction de la couche supérieure soit le seul paramètre pris en compte dans l'étude de la stabilité en fonction de la densité.

Dans un cas plus général, il serait nécessaire de vérifier qu'aux bords latéraux le critère est atteint pour l'angle d'inclinaison de la pente produisant la rupture en traction de la plaque avant de conclure.

Cette augmentation de la stabilité lorsque la densité augmente est en accord avec ce qui a été dit au chapitre précédent ou l'augmentation de la densité s'accompagnait d'une augmentation conséquente de la viscosité de la plaque et donc d'une augmentation de la taille de défaut critique se traduisant par une augmentation de la stabilité.

5.4 Stabilité en fonction de la morphologie du substratum

Dans les chapitres précédents, les résultats présentés sont relatifs à une topographie plane, c'est-à-dire à une structure dans laquelle les deux couches sont planes et d'épaisseurs constantes. L'avantage de cette géométrie simple est, comme nous l'avons dit, de permettre une simplification de la réalité pour mieux

pouvoir discriminer le rôle de certains paramètres macroscopiques. Cependant, dans la nature, la topographie des zones de départs des avalanches bien que correspondant parfois à une géométrie plane *(cas des avalanches dites de versant)* est le plus souvent caractérisée par une géométrie concave.
Nous nous sommes intéressés à la comparaison entre les indices de stabilité relatifs à ces différentes géométries de zones de départs. Pour ce faire nous avons réalisé les mêmes tests que précédemment mais sur une géométrie concave. Les mêmes matériaux que précédemment ont été utilisés sur le même banc expérimental et dans les mêmes conditions. Notons que dans le cas des topographies concaves présentées ci-après, les épaisseurs des deux couches en présence ne sont généralement pas constantes et que nous nous reportons à une mesure de l'épaisseur moyenne de ces couches.
En effet, comme c'est le cas dans la nature, la topographie concave *(correspondant à la forme d'un couloir ou de talweg)* voit une épaisseur maximum des couches en son centre et le long de son axe principal *(voir figure 16)*

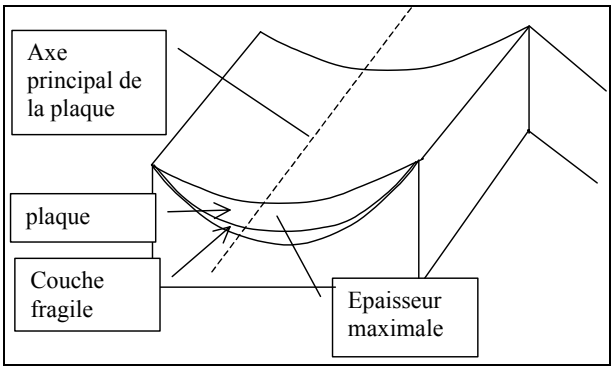


Figure 36 : Géométrie des deux couches pour un plan concave.

Plus la concavité est marquée, plus la différence entre l'épaisseur au centre et aux bords de la structure est grande. La forme du substratum fixe ainsi, la distribution des épaisseurs des couches reposant dessus. Dans la nature, cette distribution des épaisseurs des différentes couches n'est pas uniquement liée à la nature concave ou convexe du substratum sur lequel repose le manteau neigeux, mais aussi au transport de la neige par le vent. En effet, les zones concaves constituent des zones de faibles vitesses où les particules de neige transportées se déposent formant une accumulation. A l'inverse, les zones convexes *(épaules)* sont souvent érodées par le vent et voient une épaisseur minimum de manteau neigeux. Ainsi, sous l'influence de vents transversaux *(perpendiculaires à la ligne de pente),* il est courant d'observer un déneigement des épaules au profit de la formation d'accumulation dans les zones de talweg.
Dans nos expériences en laboratoire, nous avons reproduit cette distribution des épaisseurs des différentes couches sur une topographie type talweg.

Comme nous l'avons vu, l'influence des épaisseurs des deux couches sur la stabilité de la structure bi-couches est de toute première importance. Ainsi, les différentes distributions d'épaisseurs relatives à ces deux types de géométrie de substratum doivent avoir une influence sur la stabilité respective de ces structures. Le rôle des expérimentations suivantes est de tenter de mettre en évidence cet effet et de le quantifier.
Pour ce faire, un module concave adaptable au banc expérimental présenté précédemment a été construit . Le module a été réalisé à l'aide de polystyrène haute densité découpé au fil chaud. La forme de ce module a été calculée de sorte qu'en tout point du profil en travers, la tangente à la pente α soit inférieure à l'angle de frottement interne ϕ du matériau utilisé dans la couche fragile *(voir figure 17).*

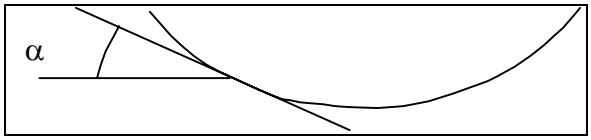


Figure 17 : Profil en large de la structure

De plus, comme précédemment, la surface du substratum a été recouverte d'une rugosité compatible avec la taille des grains composant la couche sous-jacente.
Ainsi nous nous sommes assurés de la bonne tenue de la couche fragile sur le substratum, de sorte qu'aucun défaut ne soit généré dans la couche fragile par un glissement de cette dernière sur le

substratum suivant la ligne de pente du profil en travers, mais uniquement par des cisaillements dans la direction de l'axe principal de la structure, c'est-à-dire suivant la ligne de pente du profil en long, lorsque l'angle entre cette dernière et l'horizontale atteint une valeur critique.

5.5 Stabilité en fonction de la distribution d'épaisseur de la plaque pour une structure concave

Le protocole expérimental suivi pour ces tests est identique à celui décrit aux chapitres précédents à la différence que l'épaisseur des couches en présence n'est pas constante, mais au contraire varie suivant la distance à l'axe principal de la structure. Nous avons mesuré l'angle à la rupture en fonction d'une épaisseur moyenne en gardant à l'esprit le fait que l'épaisseur des couches est plus importante au centre de la plaque que sur les bords latéraux. Comme nous le verrons, cela joue un rôle important dans la stabilité de ce type de structure.
La figure 18 présente l'angle à la rupture en fonction de cette épaisseur moyenne.

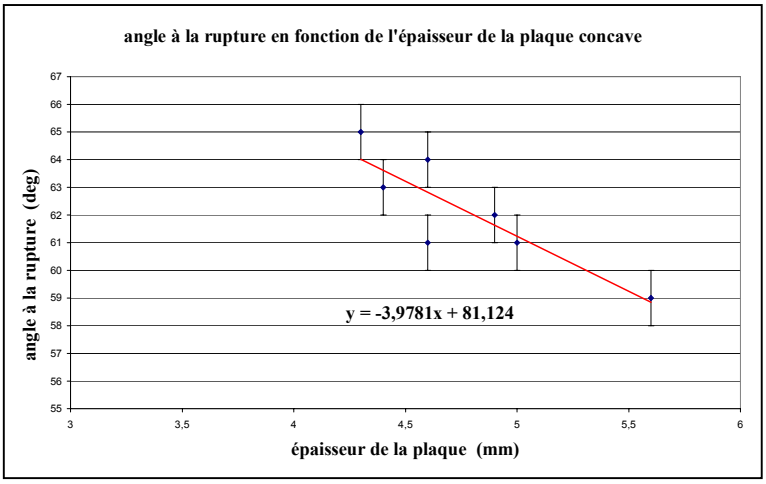


Figure 18 : Angle à la rupture en fonction de l'épaisseur moyenne de la plaque supérieure pour une topographie concave.

Lors de ces expériences, la couche fragile avait une épaisseur moyenne de 2 mm avec un écart type de 0,05. La plaque supérieure était constituée de façon à ce que la différence entre les épaisseurs au centre et aux bords de la plaque soit constante lorsque l'épaisseur moyenne varie. Ceci était une première approche simplifiée pour s'assurer que la distribution relative des épaisseurs de la plaque suivant le profil en travers était la même lors de chaque test. Ainsi cette distribution est une constante ne dépendant que de la concavité du substratum.
On constate, comme c'était le cas avec une topographie plane, une diminution de la stabilité lorsque l'épaisseur moyenne de la plaque supérieure augmente. Comparons ces résultats avec ceux obtenus pour une topographie plane et une couche fragile de 2 mm d'épaisseur *(de façon à pouvoir comparer deux expériences réalisées dans les mêmes conditions).* Les résultats présentés au paragraphe 5 *(stabilité en fonction de l'épaisseur de la couche fragile)* relatifs à une topographie plane donnent un angle à la rupture de l'ordre de 64 degrés pour une épaisseur de couche fragile de 2 mm et une épaisseur moyenne de la plaque de 5,6 mm. D'après les résultats présentés ci-dessus *(figure 20),* dans le cas d'une topographie concave, pour une épaisseur de couche fragile de 2 mm en moyenne et une épaisseur moyenne de plaque 5,6 mm, l'angle à la rupture mesuré est de l'ordre de 59 degrés. La différence entre les angles de rupture des topographies plane et concave est donc, dans ces conditions, de l'ordre de 5 degrés. Une structure concave semble donc nettement plus instable qu'une structure plane. Ainsi, la comparaison entre ces deux types de topographies, ici abordée par le biais de l'influence d'épaisseur moyenne n'est qu'une première approche qui doit nécessairement être complétée par une réflexion sur l'influence de la répartition des épaisseurs des deux couches sur la stabilité.

Cette perte de stabilité semble être reliée à la nature hétérogène de la distribution des épaisseurs de la couche supérieure. En effet, au centre de la structure l'épaisseur de la plaque est maximum et induit logiquement un cisaillement accru dans la couche fragile. Le cisaillement s'initie vraisemblablement dans une zone centrale de la couche fragile induisant un report des contraintes en traction au niveau de l'encrage amont et en cisaillement aux bords latéraux de la plaque. Par rapport au cas d'une topographie plane, deux effets jouent donc dans le sens de la perte de stabilité relative :

- l'augmentation locale de l'épaisseur de la plaque qui induit la nucléation prématurée d'un défaut dans la couche fragile par rapport au cas précédent.
- la diminution de l'épaisseur de la plaque au niveau de ses bords latéraux qui induit une diminution de la résistance en cisaillement aux bords latéraux de la plaque.

La même quantité de poudre repartie de façon homogène ou au contraire hétérogène induit ainsi respectivement un indice de stabilité plus élevé ou au contraire plus faible.
Nous avons vu que pour une épaisseur de couche fragile de 2 mm et une épaisseur de plaque de 5,6 mm cet effet se traduit par une différence d'angle de la pente à la rupture de l'ordre de 5 degrés. Cependant, il est intéressant d'étudier cette différence d'angle à la rupture pour des épaisseurs moyennes de plaque variables de façon à déterminer si cet effet est indépendant de l'épaisseur de la plaque et ne dépend que de la différence relative entre ses épaisseurs aux bords et au centre, c'est-à-dire de la forme de la distribution des épaisseurs, ou si au contraire, pour la même forme de distributions d'épaisseurs, la valeur de l'épaisseur moyenne influe sur la stabilité relative *(par rapport au cas plan).*
Pour ce faire nous avons reporté en figure 19 l'angle à la rupture en fonction de l'épaisseur de la plaque pour une épaisseur de couche fragile de 2 mm.

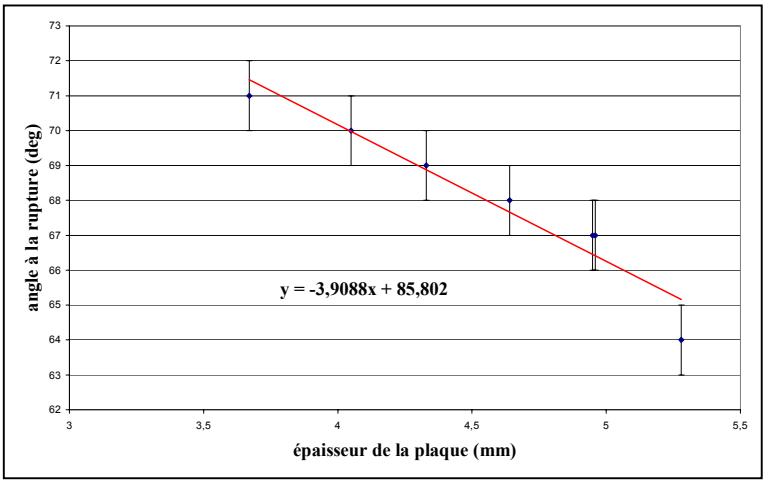


Figure 19 : Angle à la rupture en fonction de l'épaisseur de la plaque pour une topographie plane.

On constate, en comparant les figures 18 et 19 que pour une même épaisseur de couche fragile égale à 2 mm, les coefficients directeurs des courbes de tendance correspondant à la topographie plane et concave sont respectivement égaux à –3,90 et –3,97, les deux courbes ne se différenciant que par leurs ordonnées à l'origine qui diffèrent de 4,68 degrés *(ce qui est en accord avec les 5 degrés trouvés précédemment par comparaison à d'autres résultats).* Ainsi lorsque pour une épaisseur de couche fragile constante l'épaisseur moyenne de la plaque varie, la différence entre les angles à la rupture entre les topographies plane et concave reste quasi constante. Ceci indique que la forme de la répartition des épaisseurs de la plaque influe de la même façon sur la stabilité quelle que soit l'épaisseur moyenne de la plaque. Ainsi, dans le cas d'une topographie concave, favorisant une répartition hétérogène des épaisseurs de la plaque supérieure, c'est la nature de cette distribution qu'il faut prendre en compte dans l'étude de la stabilité bien plus que l'épaisseur moyenne de la plaque. En effet si c'est l'épaisseur moyenne qui fixe en partie la stabilité de la pente, un calcul de stabilité basé sur une topographie plane conduit, comme nous l'avons vu, à une surestimation de la stabilité. Il est donc nécessaire de corriger l'angle de limite de stabilité par l'effet de la topographie qui comme nous l'avons vu est une constante ne dépendant que de la concavité du substratum. Par exemple dans notre cas, un calcul de stabilité plan conduisant à une valeur de l'angle limite de stabilité de 60 degrés devrait être réduit de 5 degrés. Cependant gardons à l'esprit que cette valeur n'est valable que pour notre concavité et pour les matériaux que nous utilisons.
Nous pouvons résumer les résultats ci-dessus en disant que :
- La stabilité diminue lorsque la concavité augmente *(passage d'une concavité nulle à une concavité positive).*
- La valeur de la correction à apporter sur l'angle de limite de stabilité lorsque la concavité augmente ne dépend que de la nature de la distribution des épaisseurs dans la plaque supérieure qui elle-même dépend de la concavité.
Il devrait ainsi être possible d'étudier la stabilité en fonction de la concavité. Ceci n'a pas encore été réalisé, il est cependant prévu de refaire les mêmes expériences dans les mêmes conditions en faisant varier la valeur de la concavité ce qui jusqu'ici n'a été fait que pour deux concavités : l'une nulle, l'autre positive.

5.6 Stabilité en fonction de la morphologie de la plaque, lien avec le transport de neige par le vent

5.6.1 Influence du transport de la neige par le vent sur l'instabilité

Dans la nature, l'un des scénarios les plus fréquemment observé est le départ de plaques dans des zones situées derrière des crêtes. En effet, lorsque la crête est perpendiculaire à la direction des vents dominants, la neige érodée sur le versant au vent est incorporée au flux d'air pour former un écoulement diphasique. Localement derrière la crête, une zone de faible vitesse provoque la sédimentation des particules dans l'écoulement et leur dépôt. Il s'ensuit une suraccumulation de neige derrière la crête induisant une surcharge pondérale importante. Cette dernière est susceptible de provoquer la rupture d'une couche fragile enfouie.
Cependant cette situation n'est pas la seule source d'instabilité liée au vent, les suraccumulations dans la direction transverse de la pente sont à la source d'une proportion considérable des avalanches de plaques. A ce sujet V. Masses (1997) avance qu'une rupture de pente de l'ordre de 10° est suffisante pour induire une accumulation de la neige par un vent de direction perpendiculaire à cette rupture de pente.
Le scénario trop classique de la plaque sous le vent ne doit donc pas être considéré comme le seul potentiellement générateur d'instabilité.
Selon B. Jamieson (1999) :
- 32 % des zones de départ d'avalanches de plaques déclenchées accidentellement sont situées dans une zone sous le vent,
- 42 % de ces zones de départ ont subi un vent transversal à la pente,
- 22 % n'ont pas subi l'influence du vent,
- 4% sont situées au vent.

Il apparaît selon ces résultats que d'une part 78% des zones de départ de plaques ont vu une répartition de la neige modifiée par l'influence du vent, ce qui indique que ce paramètre est un élément essentiel de l'instabilité, et d'autre part que le TNV (Transport de la Neige par le Vent) dans la direction transverse à la pente peut s'avérer tout aussi efficace que le scénario classique de plaques sous le vent.

Dans ce qui suit nous allons examiner les différents mécanismes de transport et leur influence sur la stabilité.
Nous avons mené une réflexion sur la nature de cette instabilité et son occurrence en fonction de la quantité de neige déposée ainsi que de la forme de l'accumulation.
Classiquement l'instabilité liée au transport de neige par le vent est attribuée à la quantité de neige déposée. Nous pensons qu'il est nécessaire de prendre en compte le facteur de forme de cette accumulation. En effet une forme d'accumulation très ramassée ou au contraire très longue correspondent respectivement à des épaisseurs de plaques à vent réparties de façon hétérogène ou au contraire homogène. Nous verrons plus loin quelles sont alors les implications en termes de stabilité.
Ainsi, nous allons nous attacher à donner les argument théoriques qui supportent cette hypothèse avant de décrire, dans le paragraphe suivant, les expérimentations qui la confirme.

Les facteurs de formes des accumulations tout comme la quantité de neige déposée sont, comme nous allons le voir, liés à des paramètres intrinsèques du transport de la neige par le vent et à des paramètres liés à la topographie du terrain.
Lors d'un épisode de transport, la neige est tout d'abord érodée depuis la zone d'érosion puis transportée et enfin elle est redéposée dans la zone de dépôt. Lorsque cette zone de dépôt se trouve être une zone de départ d'avalanche, l'effet de la surcharge pondérale due à la neige re-déposée peut générer une instabilité.
Un épisode de transport est donc décomposé en trois phases :
1) Une phase d'érosion,
2) Une phase de transport à proprement parlé,
3) Une phase de dépôt.
Dans ce qui suit nous allons étudier les mécanismes de chacune de ces phases, nous examinerons par la suite les facteurs agissant sur l'instabilité.

Erosion de la neige :
La première étape d'un transport éolien est la mise en envol des particules par entraînement aérodynamique. Dans ce cas, les particules sont arrachées du sol sous la seule action du fluide.
Il nous faut tout d'abord définir ici la vitesse de frottement dont nous allons voir que la valeur seuil détermine l'occurrence du transport.

La vitesse de frottement u_* est proportionnelle à la racine carrée de la contrainte de cisaillement exercée par le flux d'air sur la surface rugueuse du sol.
La capacité d'érosion est fonction de l'intensité du vent et de la qualité superficielle de la neige : en deçà d'une vitesse de frottement seuil u_{*t}, le vent est incapable de contrebalancer efficacement les forces de gravité et de cohésion exercées sur les grains. C'est donc cette vitesse seuil qui détermine, en fonction de la nature de la couche soumise à l'influence du vent, l'occurrence du transport de neige par le vent. Il semble alors nécessaire de connaître cette vitesse seuil en fonction des caractéristiques des grains composant la couche de surface de façon à, connaissant ces paramètres, prédire à quelle vitesse de vent le transport débutera. Cependant, si pour un matériau non cohésif le calcul est simple et les paramètres impliqués mesurables, le cas de la neige est bien plus complexe.
La vitesse seuil varie, pour un matériau non cohésif idéal *(tel le sable),* en fonction de la taille des particules *(figure 20).*

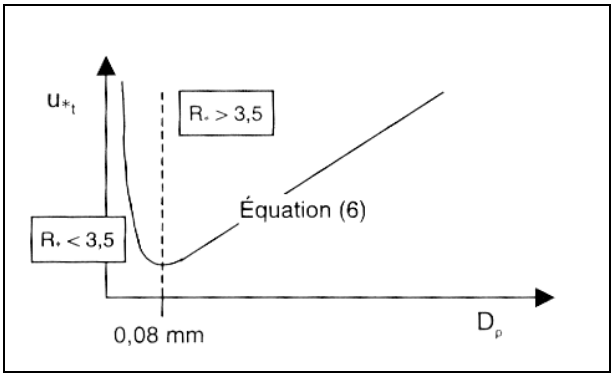


Figure 20 : Vitesse de frottement seuil en fonction du diamètre des particules pour du sable dans l'air (d'après F. Naaim 2000).

On considère généralement que la vitesse seuil minimum est obtenue pour une taille de particules de diamètre 100 microns.
Cependant dans le cas de la neige, matériau généralement cohésif, cette vitesse seuil dépend fortement de la cohésion de la surface de neige dans la zone d'érosion:
neige poudreuse : 5m/s suffisent pour mettre en mouvement les particules.
neige compacte : 30m/s n'ont qu'un faible effet. Des approches théoriques ont été proposées de façon à introduire les spécificités de la neige dans le calcul de la vitesse de frottement seuil. Cependant ces dernières impliquent la connaissance de nombreux paramètres micro-structuraux et donc rendent la théorie difficilement applicable sur le terrain pour déterminer l'occurrence du transport.
A ce stade les approches empiriques prennent tout leur intérêt.
Le CEN (météo France) a déterminé un indice de transport de la neige en place variant en fonction de la sphéricité et de la dendricité des particules de neige ainsi que leur taille et de l'age de la couche qu'elles composent.
Un indice de transport positif rend compte d'un transport éolien d'autant plus important que l'indice est élevé.
Un indice négatif indique l'absence de transport.

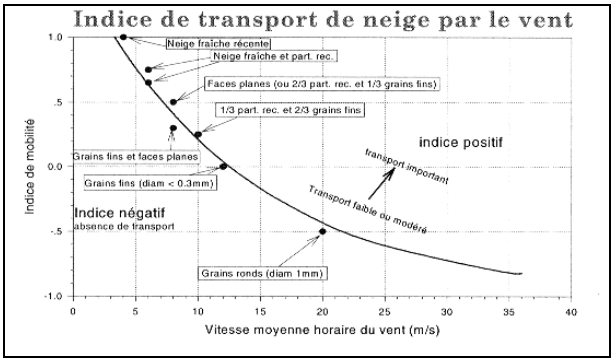


Figure 21 : Variations de la vitesse seuil pour différents types de neige (d'après Guyomarc'h et Merindol 1999).

On constate sur la figure 21 que la vitesse seuil varie de 4 m.s^{-1} à prés de 30 m.s^{-1}. Une couche de grains fins *(dont les grains sont frittés)* nécessite une vitesse de vent de l'ordre de 15 m.s^{-1} pour que le transport puisse avoir lieu alors que seulement 4 m.s^{-1} sont nécessaires pour transporter une neige récente.
Lorsque qu'un flux d'air augmente graduellement, dans un premier temps, les particules ne bougent pas. Puis, lorsque la vitesse seuil est atteinte certaines particules de surface sont érodées et mises en mouvement dans le flux d'air. A ce stade, le transport débute.

Transport éolien de la neige :
L'étude du transport de particules par le vent permet d'identifier trois modes différents de déplacement : la saltation, la reptation *(charriage)* et la diffusion turbulente *(suspension).*

La saltation
A des vitesses importantes, le vent est capable d'éjecter les particules avec une vitesse initiale quasiment verticale pour retomber sous l'action de la gravité avec une vitesse finale approximativement horizontale (entre 10° et 16° suivant la taille des grains *(figure 22).* Une fois le processus en route, il est nécessaire de distinguer le mécanisme de saltation sur une surface de neige fortement cohésive (particules non mobilisables) et sur lit de particules mobilisables.
Dans le premier cas, dès que le grain touche la surface *(gelée ou constituée de rochers),* il rebondit avec une élasticité presque parfaite pour atteindre une hauteur aussi grande que celle observée lors de la saltation précédente.
Dans le deuxième cas, une fois que le grain arrive sur le lit de particules, une partie de l'énergie disponible est utilisée pour éjecter d'autres particules et/ou continuer la saltation. La saltation joue ainsi un rôle fondamental dans la mise en mouvement de particules. En effet, sous l'impact de particules transportées et retombant au sol avec des vitesses importantes, d'autres particules sont éjectées. La fonction « splash » permet de déterminer mathématiquement la densité de probabilité de la vitesse d'éjection et le nombre de particules éjectées pour une distribution donnée de vitesses d'impacts.

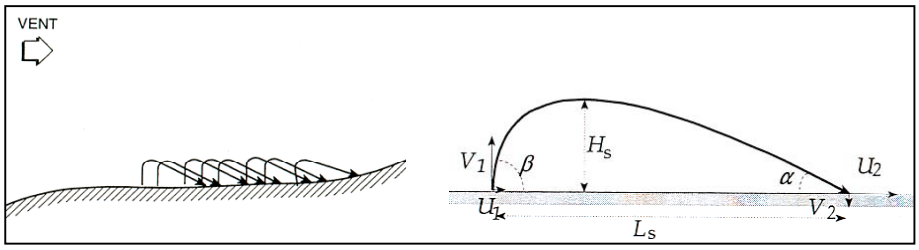


Figure 22 : Mécanisme de saltation.

L'essentiel de ce processus s'effectuant entre 0.1 et 1m de hauteur, le transport par saltation est le principal responsable des accumulations locales de neige et entraîne, de plus, l'établissement des deux autres mécanismes cités. Il apparaît donc nécessaire pour initier l'érosion éolienne.

La reptation
A de faibles vitesses de vent, les grains mis en mouvement, se déplacent le long du sol en glissant et en roulant sur les autres grains *(Figure 23).*
Bagnold décrit précisément ce mécanisme : la majeure partie de l'énergie disponible des grains en saltation est dissipée par frottement entre les grains de surface, ce qui conduit à une reptation lente, les grains étant projetés vers l'avant. Lorsque la vitesse du vent augmente, la distance parcourue s'allonge et de plus en plus de grains se mettent en mouvement : le lit de particules apparaît comme rampant lentement d'où le terme de « reptation ».
Bagnold insiste également sur la différence fondamentale entre les deux modes de transport : les grains en saltation reçoivent leur quantité de mouvement du fluide lorsqu'ils ont émergé dans la couche du fluide alors que les grains en reptation ne reçoivent leur quantité de mouvement que des impacts de saltation. On n'observe pas de saut de particules dans ce cas car celles-ci roulent ou glissent au ras du sol.
La saltation est alors responsable de la reptation.
NB : La reptation permet de mettre en mouvement des grains 200 fois plus gros que ceux intervenant dans le processus de saltation mais se déplaçant à des vitesses moindres que les grains en saltation.
Elle est à l'origine du comblement des petites dépressions et apparaît aussi lors de la formation et la migration des ondulations de surface de neige.
Il est à noter que la reptation reste le phénomène le moins étudié du fait de la faible hauteur à laquelle il s'effectue.

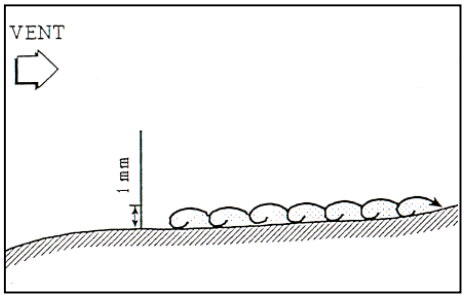


Figure 23 : Reptation de la neige

La diffusion turbulente

La diffusion turbulente est provoquée par des tourbillons qui mettent en suspension les particules de neige préalablement projetées par saltation. Les particules sont incorporées dans le flux d'air turbulent *(flux diphasique)* et sont transportées sans toucher le sol sur de très grandes distances *(figure 24).* Ce phénomène est à l'origine des « sommet qui fument » par grands vents.

Dans tous les cas, les particules légères ne sont déplacées que si elles ont été préalablement projetées dans l'air par rebondissement de grains plus gros, eux-mêmes en saltation ou par une autre cause de perturbation.

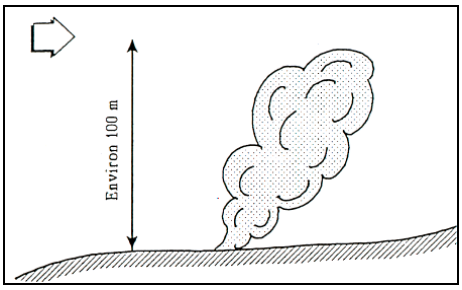


Figure 24 : Diffusion turbulente

Quantité de neige transportée

On trouve dans la littérature, différentes expressions du débit Q de neige transportée par saltation Qs et diffusion turbulente Qd dont voici un exemple :

$$Qs = \frac{0{,}68\rho u_{*t}}{g u_*}(u_*^2 - u_{*t}^2) \quad \text{et} \quad Qd = \frac{U_{10}^{4{,}13}}{674100}$$

où $u_* = 0{,}02264 U_{10}^{1{,}295}$ et U_{10} est la vitesse du vent à dix mètres du sol.

Plus la vitesse des vents augmente, plus la proportion de neige transportée par diffusion turbulente augmente.

Ces expressions de débit sont données à saturation, c'est-à-dire lorsque le profil de concentration en particules est tel que, pour une vitesse de frottement donnée, il y ait équilibre entre le nombre de particules arrachées et le nombre de particules déposées.

Avant l'obtention de la saturation, il est clair que Qs dépend fortement de la quantité de neige disponible dans la zone d'érosion et donc, pour une vitesse de frottement donnée, de la longueur de cette zone d'érosion dans le sens du vent *(encore appelée longueur de reprise).* Cette longueur de reprise, dépendant de la qualité de la neige, est de l'ordre de quelques centaines de mètres. Ainsi, dans le contexte de formation d'accumulation de neige dans une zone de départ d'avalanche, la quantité de neige déposée dans la zone sous le vent sera d'autant plus importante que la zone de reprise au vent sera de grande dimension. Ceci est aussi souligné par A. Duclos qui souligne dans ses cours de formation des guides de haute montagne, le danger potentiel que représente une pente sous le vent avec dans l'axe du vent une zone au vent *(de reprise)* de grande dimension.

Il semble donc que le scénario idéal pour la formation de fortes accumulations dans les zones sous le vent est le suivant :

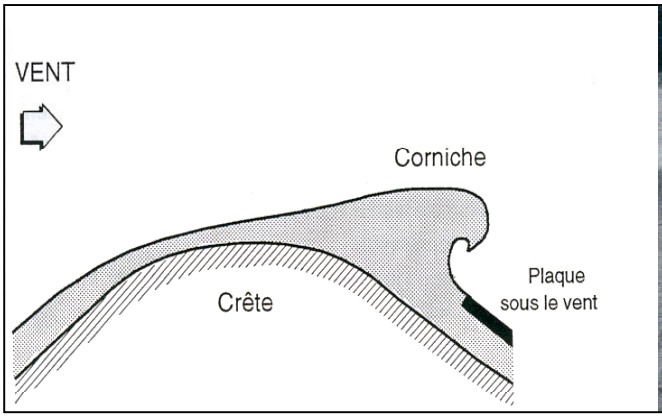
- présence d'une zone de reprise de grande dimension au vent,
- présence d'une zone sous le vent *(rupture de pente de l'ordre de 10° au moins),*
- vitesse de vent intermédiaire permettant un fort transport par saltation et reptation : la vitesse doit

être supérieure à la vitesse seuil d'arrachement mais ne doit pas être trop élevé sans quoi le transport se fait essentiellement par diffusion turbulente : les particules sont alors transportées sur de très grandes distances, ne se redéposent pas et sont sublimées.

Dépôts des particules :

L'étude du transport éolien de la neige fait apparaître dans le contexte montagne deux type de dépôts : la corniche et la plaque à vent.

La corniche
Au niveau d'une crête, le vent comprimé par le relief s'accélère. Mais sous le vent de la crête, dans la zone tourbillonnaire, il est ralenti et dépose une partie des grains transportés. Ces particules de neige s'accumulent en formant une corniche qui va grandir au cours des épisodes venteux *(figure 25 et photographie 3)*. Lors de leur transport, les particules de neige ont acquis une charge électrostatique leur permettant d'assurer le contact inter-particules au niveau de la corniche durant les premières secondes suivant leur dépôt avant que le frittage ne prenne le relais et assure la cohésion nécessaire à la croissance de la corniche.



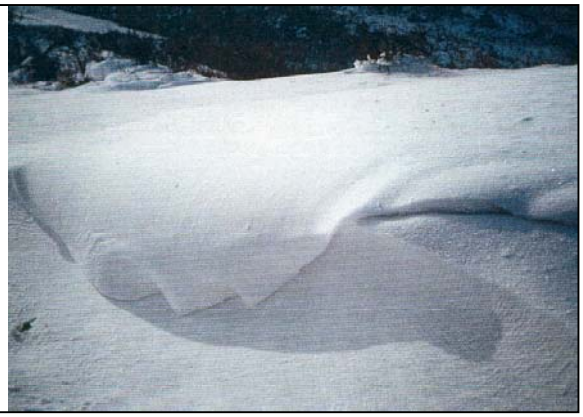


Figure 25 : Formation de corniche

Photographie 3 : Corniche (F. Valla)

La plaque à vent
Lorsque la vitesse d'écoulement d'un fluide se trouve en dessous d'un certain seuil, le dépôt des particules va s'amorcer. La capacité d'un fluide à transporter la neige diminue avec la baisse de l'intensité du vent, de sorte que les particules en surplus vont former un dépôt. En fonction des caractéristiques topographiques de la zone sous le vent, l'accumulation de la neige déposée prendra une forme plus ou moins allongée. Une forte rupture de pente favorisera une sur-accumulation de neige dont la répartition dans la direction du vent sera fortement hétérogène, alors qu'au contraire une faible rupture de pente produira une répartition plus homogène *(figure 26)*.

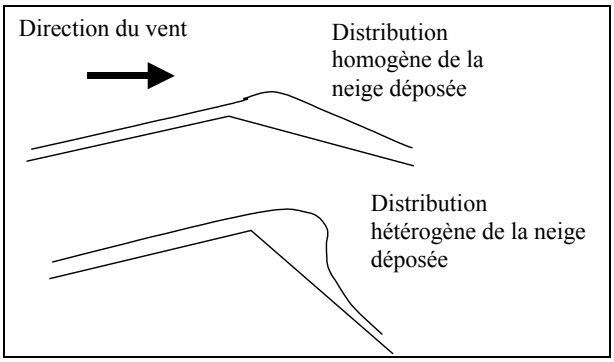


Figure 26 : Influence de la rupture de pente sur la répartition de la neige

Dans le cas d'une distribution homogène de la neige, la contrainte exercée par la plaque sur la couche fragile est répartie de façon homogène. En termes de nucléation de défauts et d'accumulation de contraintes, la surcharge pondérale n'induit pas de concentration de contraintes locales importantes et ne tend pas à induire la nucléation d'un défauts en un point particulier de la couche fragile. Ici on se rapproche

du mécanisme de charge quasi statique à charge homogène, qui comme nous l'avons vu, induit la croissance de défauts déjà existants dans la couche mais ne favorise pas la rupture de la couche fragile par un effet de surcharge locale.
Dans le cas d'une distribution hétérogène de la neige déposée localement, sous la zone du maximum d'accumulation, un défaut est susceptible de nucléer par effet d'accumulation locale de la contrainte de cisaillement exercée par la plaque sur la couche fragile. Ce défaut peut être de taille sous-critique mais croître rapidement jusqu'à sa taille critique et induire la rupture fragile de la couche sous-jacente, ou être d'ores et déjà de taille critique et induire dès sa nucléation la rupture de la couche fragile par sa croissance incontrôlée. On se rapproche ici d'un mécanisme de rupture provoqué par une surcharge locale induisant l'apparition d'un défaut, à la différence que dans ce cas la surcharge dynamique est à exclure, la sédimentation et l'accumulation de la neige étant des phénomènes lents.
Ainsi pour une même quantité de neige déposée, il apparaît que la forme du dépôt agit sur la stabilité de la pente. En effet le second mécanisme tendra à favoriser la nucléation et la croissance de défauts qui dans le premier cas n'aurait pas eu lieu, le facteur de concentration de contraintes n'étant pas suffisamment important dans ce cas, comme l'illustre la figure 27.

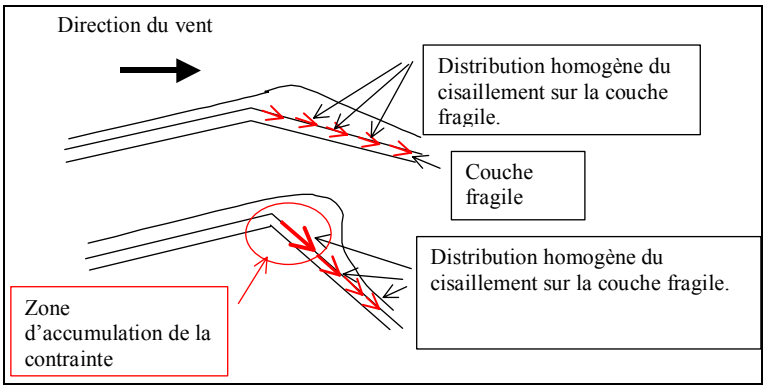


Figure 27 : Influence de la rupture de pente et de la forme du dépôt sur l'accumulation de contrainte dans la couche fragile.

Dans ce cas, bien que la quantité de neige déposée dans les zones sous le vent joue un rôle aggravant dans la stabilité des pentes, la forme d'accumulation est à prendre en compte en premier lieu pour estimer la stabilité d'une pente sujette aux suraccumulations par transport de neige par le vent.
Nous verrons au paragraphe suivant comment nous avons testé en laboratoire l'influence de la forme d'accumulation sur la stabilité et dans quelle mesure les résultats obtenus confirment ce qui est avancé ici.
En conclusion, le transport de la neige par le vent est responsable de l'accumulation de neige en surface du manteau neigeux dans les zones sous le vent. La formation ces accumulations est particulièrement reconnue comme un élément aggravant du risque de déclenchement d'une avalanche. Cependant pour une même quantité de neige transportée, les caractéristiques du flux ainsi que la topographie sont susceptibles de modifier la forme de l'accumulation résultante. Cette dernière peut ainsi être plus ou moins ramassée ou étirée dans le sens de la pente suivant les cas. Ainsi le transport de la neige par le vent influe sur la nature hétérogène de la répartition des épaisseurs de la plaque supérieure et par voie de conséquence sur la stabilité.

5.6.2 Expérimentations de laboratoire

Nous nous sommes intéressés à l'influence de ces formes d'accumulations sur la stabilité et avons tenté, par le biais de tests en laboratoire, de mettre en évidence et de quantifier cet effet. Initialement, il était prévu de générer les dépôts dans la soufflerie diphasique afin que ces derniers est une forme réaliste. Le principal critère de similitude utilisé dans une telle modélisation physique est $\frac{u_*}{u_{*t}}$ où u_* est la vitesse de frottement et u_{*t} est la vitesse de frottement seuil caractéristique de la particule modèle. La courbe granulométrique du $CaCO_3$ est telle *(valeurs comprises entre 0,4 à 100 μm pour les valeurs extrêmes pour une valeur moyenne de 40 μm)* que la valeur seuil d'arrachement des particules par entraînement aérodynamique est élevée *(voir figure 20),* les particules trop petites n'émergeant pas de la sous couche visqueuse. Afin de déclencher l'arrachement des particules pour des vitesses plus faibles, une solution consiste à ensemencer la scoralite *($CaCO_3$)* avec des particules plus grosses (*entre 100 μm et 200 μm)* permettant alors l'arrachement des particules par impacts. Les différents essais menées en soufflerie ont montré que le mélange optimal était constitué d'un mélange de 60% de billes de PVC et de 40 % de

scoralite. Dans ces conditions, la loi de comportement du mélange diffère de la loi de comportement de la scoralite et nous avons jugé préférable de reproduire « manuellement » les formes observés en soufflerie en n'utilisant dans le dispositif expérimental que la seule scoralite.
Ainsi, nous avons déposé sur une topographie plane une couche fragile d'épaisseur constante et contrôlée et ajouté par dessus une certaine masse de $CaCO_3$. Ce dépôt était façonné de manière à ce que pour une même masse de poudre, la forme de l'accumulation soit différente. Pour chaque forme d'accumulation testée l'angle de rupture a été mesuré.
La masse de poudre de référence était celle nécessaire à la formation d'une plaque uniforme et plane de 5 mm d'épaisseur à une densité de l'ordre 1,2 g.cm^3. Ainsi l'épaisseur moyenne de l'accumulation devait pour toutes les expériences être de l'ordre de 5mm quelle que soit la distribution des épaisseurs. Trois types de distribution des épaisseurs ont été testés allant d'une forme d'accumulation fortement à faiblement marquée.
De façon à quantifier le caractère plus ou moins marqué des accumulations testées, nous avons calculé la différence entre l'épaisseur maximale de l'accumulation et son épaisseur moyenne que nous avons notée Δep_{acc} . Plus cette différence est grande plus l'accumulation est marquée *(voir figure 28)*

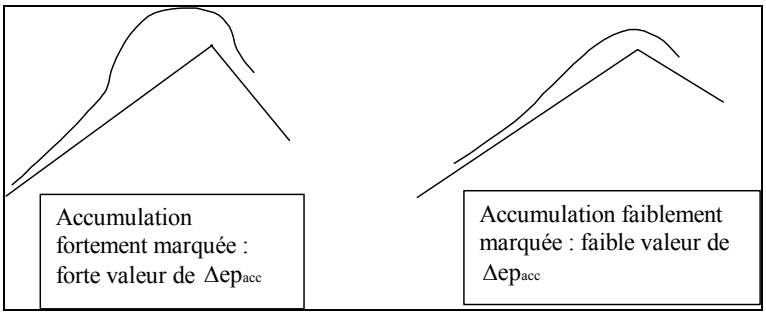


Figure 28 : Différentes formes d'accumulations quantifiées par la valeur de Δep_{acc} *.*

Les tableaux ci-dessous reportent pour ces trois formes d'accumulations types, les épaisseurs mesurées le long de quatre profils en long de la plaque, ainsi que l'épaisseur moyenne et l'angle à la rupture mesuré.

<u>Accumulation marquée :</u>

Essai		**1**			**2**			**3**			**4**			**5**	
	1	1	1	1	1.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1
ep	2	4	2.5	2	3.5	4	1.5	4	2	3	4	2	2	3	3.5
	2.5	4	3	2	5	4	4.5	5	3	3.5	4.5	3	4	5	3
	6	6	7	5	7	7	9	10	6	7	9	7	7	8	7
	11	12	9	10	12	10	14	12	8	9	11	9	7.5	8	8
	10	9	9	8	11	8	8	8	6	9	9	7	7.5	8	8
ep moy		5.55			5.63			5.75			5.55			5.77	
αrup		52°			53°			53°			55°			52°	

e_{pmoy} = 5.65 mm
$\alpha_{rup\ moy}$ = 53°
Δep_{acc} = 2,99

<u>Accumulation moyennement marquée :</u>

essai		**1**			**2**			**3**			**4**	
	2	1	2	2	1	1	1	1.5	2	1.5	1	1
ep	2	4	4	3	4	2	2.5	4	2.5	2	4.5	3
	1	5	4.5	4	6	4	3	5	3	3	5	3
	4.5	8	7	6	8.5	5	6	8	5	6	8	4
	7	9.5	8	8	10	7	8	12	7	10	12	6
	7	7	4	6	7	5	6	8	5.5	7	8	5
ep moy		4.86			4.97			5			5	
αrup		55°			54°			54.5°			54°	

e_{pmoy} = 4.95 mm

$\alpha_{rup\ moy}$ = 54.37°
Δep_{acc} = 1,33
Accumulation faiblement marquée :

essai		1			2			3			4	
	3.5	3	3	3.5	3	3	3.5	3	2.5	2.5	3	3
ep	4	5	5	4.5	5.5	5	4	4.5	4	4	5	5
	4	6	4	4	6	4	4	6	4	5	6	4
	5	7	5	6	7	5	7	7	4	7	7.5	6
	7	8.5	4	7	9	4	7	9	5	8	10	5
	4	7	5	5	7	5	4	6	6	5	6	6
ep moy		5			5.19			5.02			5.44	
αrup		57°			56°			56°			56.5	

e_{pmoy} = 5.16 mm
$\alpha_{rup\ moy}$ = 56.37°
Δep_{acc} = 0,33

Lors de ces expériences, l'épaisseur moyenne de l'accumulation était de 5,28 mm avec un écart type de 0,33. L'épaisseur de la couche fragile était quant à elle de 2 mm.
D'après les résultats du paragraphe 5, pour une épaisseur de plaque régulière de 5 mm reposant sur une couche fragile épaisse de 2 mm, l'angle à la rupture attendu est de 59 degrés.
On constate ainsi, au vu de ces tableaux que par rapport au cas d'une topographie de référence plane, la stabilité décroît à mesure que la forme de l'accumulation est plus marquée. En effet, l'angle à la rupture passe de 59 degrés pour Δep_{acc} = 0 *(accumulation régulière)* à 56,37 pour Δep_{acc} = 0,33 *(accumulation faiblement marquée)* puis à 54,37 pour Δep_{acc} = 1,33 *(accumulation moyennement marquée)* à enfin 53 degrés pour Δep_{acc} = 2,99 *(accumulation fortement marquée).* Ainsi pour une même épaisseur moyenne de la plaque supérieure la structure est d'autant moins stable que la répartition des épaisseurs de la plaque supérieure s'écarte du cas homogène d'une plaque plane et uniforme *(qui rappelons-le est le cas de référence).*

Ces résultats sont résumés par la figure 29 ci dessous :

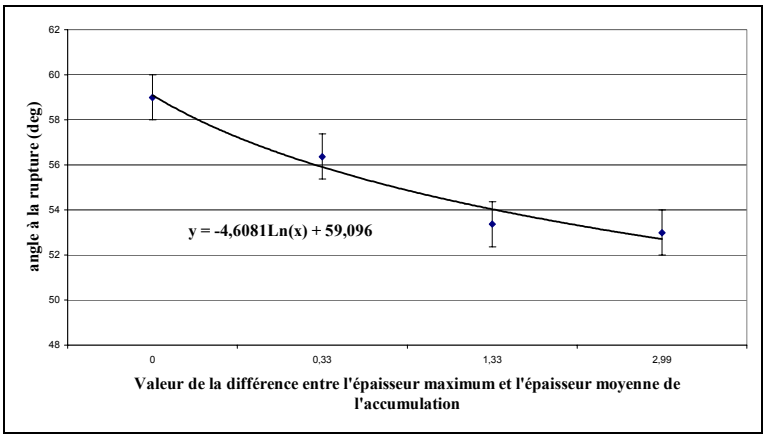


Figure 29 : Angle à la rupture en fonction de la forme de l'accumulation, les faibles valeurs de la différence entre l'épaisseur maximale et l'épaisseur moyenne de l'accumulation correspondent à des accumulations faiblement marquées et les fortes valeurs à des accumulations fortement marquées.

En résumé nous pouvons dire que d'après les résultats de nos tests expérimentaux, une structure bicouches composée d'un matériau granulaire cohésif reposant sur une couche de matériau granulaire non cohésif est d'autant moins stable que la répartition des épaisseurs de la couche supérieure est hétérogène. Deux effets peuvent être mis en avant pour expliquer cet état de fait :

dans les zones de faible épaisseur, la couche supérieure accumule les contraintes, ce qui est susceptible d'induire sa rupture prématurée par rapport au cas de référence d'une couche supérieure d'épaisseur régulière.
Dans les zones de forte épaisseur, la couche supérieure exerce sur la couche sous-jacente une contrainte de cisaillement plus élevée pouvant induire la nucléation prématurée d'un défaut par rapport au cas de référence d'une couche supérieure d'épaisseur régulière.

5.7 Lien avec le terrain

Comme nous l'avons déjà vu, il est communément admis que l'occurrence de départ de plaques augmente de façon sensible lorsque le manteau neigeux est soumis à l'influence du transport de la neige par le vent. Nous avons déjà vu que le risque naturel augmente logiquement lorsque la surcharge pondérale exercée par la couche supérieure sur la couche fragile augmente. Le risque est accru lorsque, du fait du transport de la neige par le vent, l'accumulation de la neige sur une couche fragile enfouie induit une répartition hétérogène des épaisseurs de la couche supérieure.
Nous allons à présent tenter de relier l'occurrence de transport de la neige par le vent avec l'augmentation de départ de plaque provoqué par passage de skieurs.
Les conditions reconnues comme potentiellement les plus dangereuses vis-à-vis du risque de départ de plaques provoqué par passage de skieurs sont :

- suite à une chute de neige ventée.

- après à un épisode de fort transport de neige par le vent induisant une surcharge de couches fragiles enfouies.

La présence dans la pente d'une accumulation marquée de neige en surface est susceptible, comme nous l'avons souligné, d'induire la nucléation d'un défaut dans la couche fragile enfouie. Cependant ce défaut n'est pas nécessairement de taille sur-critique et peut donc, dans un état sous-critique être en phase de croissance lente, voire même en phase de recristallisation, lorsqu'un skieur *(ou un autre événement extérieur du même type)* induit une perturbation supplémentaire dans cette couche fragile déjà « contaminée » par un défaut préexistant.
Comme nous l'avons dit au chapitre précédent, la couche fragile susceptible d'induire le déclenchement d'une plaque est certainement à considérer comme contenant une certaine distribution aléatoire de défauts. Dans le cas où le transport de la neige par le vent a modifié la répartition des épaisseurs de la couche surmontant cette couche fragile, il semble logique de relier la présence d'un défaut dans la couche fragile à une accumulation au-dessus de ce défaut due à l'occurrence de transport de neige par le vent. De plus, si pour un épisode de transport idéal *(de direction et d'intensité de vent constante) sur* une topographie idéale *(une simple rupture de pente)* l'accumulation de neige et la nucléation du défaut dans la couche fragile se font en amont de la pente *(derrière la rupture de pente),* la situation pour un épisode de transport plus complexe sur une topographie réelle est bien différente. Dans ce cas, les vents dominants peuvent tourner au cours de l'épisode de transport et des vents transverses sont susceptibles d'induire des surcharges dans les talwegs et ceci loin de la rupture de pente amont. Ainsi un certain nombre de défauts sont susceptibles d'apparaître dans la couche fragile suite a un épisode de transport de neige par le vent complexe *(voir figure 30).*

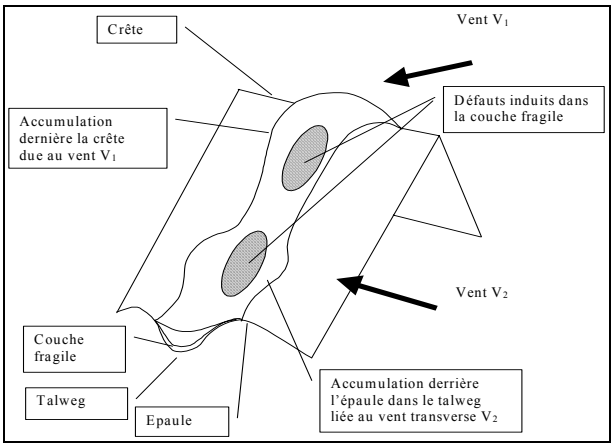


Figure 30 : Nucléation de défauts dans la couche fragile suite à un épisode de transport

Notons à ce sujet que les situations les plus redoutées sont justement celles où l'épisode de vent a été suffisamment long pour que les vents dominants tournent et chargent les pentes en de multiples zones.

Un skieur passant alors sur cette zone et induisant un nouveau défaut dans la couche fragile peut provoquer la coalescence des défauts, suivant l'un des deux modes décrits ci après.

- le skieur peut induire la nucléation d'un défaut dont il force ensuite la croissance au fur et à mesure qu'il progresse dans la pente, jusqu'à atteindre résistance en traction dans la couche supérieure en tête de défaut, ce qui mène à la rupture. Cela implique que la couche supérieure soit déformable et que le bulbe de contrainte pénètre profondément dans la couche supérieure pour atteindre la couche fragile. La couche supérieure sur laquelle évolue le skieur sera dans ce cas composée de neige faiblement transformée ou tout au moins peu frittée. C'est ce type de neige qui sera rencontré lorsque l'accumulation de neige en surface s'est faite par le biais d'une chute de neige ventée.

- au contraire, le skieur peut induire la nucléation d'un défaut qui par coalescence avec d'autres défauts déjà présents atteint sa taille critique et croît de façon incontrôlée induisant la rupture en traction de la plaque en un point souvent éloigné du point d'initiation du défaut. Dans ce cas, il est important de noter qu'il s'agit d'un déclenchement à distance pour lequel la nature de la couche supérieure au point d'initiation est souvent différente de celle du point de rupture en traction. En effet il est fréquent d'observer la rupture en traction de la plaque en amont de la pente dans une zone où cette dernière est frittée alors que l'initiation du défaut en aval de la pente s'est fait dans une couche fragile surmontée d'une couche de neige friable peu transformée. Ainsi une accumulation de neige fortement frittée ne permettra que rarement la nucléation directe d'un défaut *(puisque dans ce cas le bulbe des contraintes est peu profond et plus large, la contrainte étant répartie par la rigidité de la plaque)* mais pourra être mobilisée par une rupture en traction intervenant en tête d'un défaut généré plus bas dans la pente en un point où la couche supérieure transmet suffisamment les contraintes pour permettre de déstructurer localement la couche fragile et induire la croissance sur-critique d'un défaut. Dans ce cas, plus particulièrement, le transport de la neige par le vent aura joué un rôle aggravant en affaiblissant la couche fragile et en la rendant plus sensible aux perturbations extérieures.

6 Localisation de la rupture en traction en fonction de la topographie

Les films en vue de dessus de différentes expériences, réalisées en affectant des valeurs différentes à la rupture de pente amont, nous ont permis d'étudier la localisation spatiale de la rupture en traction de la plaque supérieure en fonction de la topographie *(rupture de pente).*
Pour les faibles valeurs de la rupture de pente *(inférieure à 10 degrés),* la localisation spatiale de l'initiation de la rupture en traction se faisait de façon aléatoire, sans qu'il soit possible de la reproduire d'une expérience à l'autre. Au contraire pour de fortes valeurs de la rupture de pente, la localisation spatiale de la rupture en traction était fortement déterministe, puisque cette dernière apparaissait systématiquement à la rupture de pente.
Nous allons voir que deux effets antagonistes sont ici en compétition.

Nous avons réalisé la même expérience dans les mêmes conditions en ne faisant varier que l'angle de rupture de pente entre 0 et 35 degrés tous les cinq degrés, tous les autres paramètres macroscopiques contrôlables ont été maintenus constants.15 expériences ont étés réalisées pour chaque valeur de l'angle de rupture de pente et la localisation de la rupture en traction par rapport à la ligne de rupture de pente est moyennée sur ces 15 expériences. Nous avons donc relevé la valeur de la distance séparant la ligne de rupture en traction de la ligne de rupture de pente *(valeur allant de 0 pour une rupture en traction intervenant à la rupture de pente à quelques centimètres pour une rupture en traction localisée quelques centimètres sous la ligne de rupture de pente)*, et reporté cette mesure en fonction de l'angle de rupture de pente *(figure 32).* Lorsque la ligne de rupture en traction était une ligne brisée, donc les différents segments se situaient à différentes distances de la ligne de rupture de pente, nous avons pris comme distance à la ligne de rupture de pente, la distance moyenne séparant les différents points formant la ligne de fissure en traction de la ligne de rupture de pente *(figure 31).*

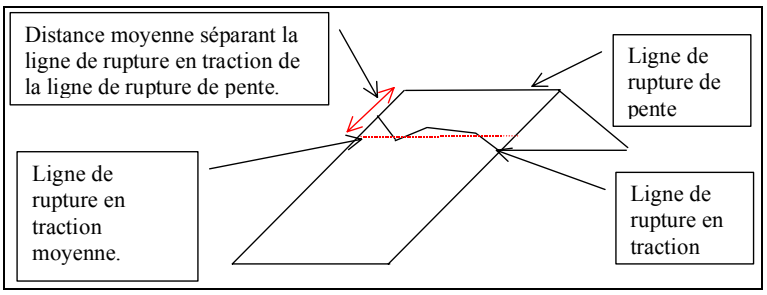


Figure 31 : Mesure de la distance entre la ligne de rupture de pente et la ligne de rupture en traction.

D'autre part nous avons étudié la probabilité d'occurrence d'une rupture en traction se localisant exactement à la ligne de rupture de pente en fonction de la valeur de l'angle de rupture de pente *(figure 33).*

6.1 Résultats

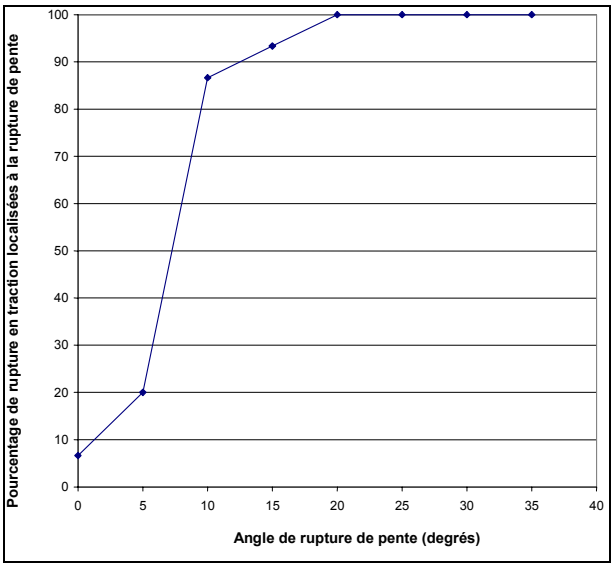


Figure 32 : Pourcentages de ruptures en traction précisément localisées à la rupture de pente en fonction de l'angle de rupture de pente.

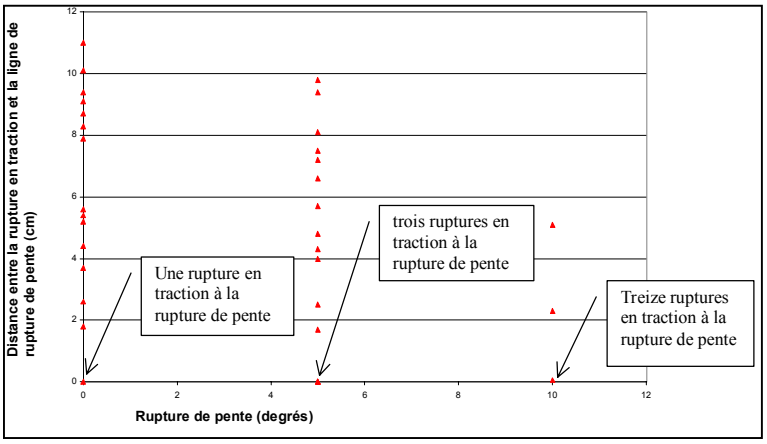


Figure 33 : Distance séparant la ligne de rupture en traction de la ligne de rupture de pente.

6.2 Discussion

Si l'on prend en considération les résultats présentés en figure 26, il apparaît que pour des valeurs de ruptures de pente supérieures ou égales à 10 degrés, la localisation spatiale de la rupture en traction est, dans nos expériences, fortement déterministe. En effet, 86 % des ruptures en traction apparaissent à la rupture de pente lorsque cette dernière a un angle supérieur ou égal à 10 degrés. Ce pourcentage s'élève à 93 % puis à 100% lorsque la valeur de l'angle de rupture de pente passe respectivement à 15 puis 20 degrés.
Au contraire, si l'on se reporte à la figure 33, pour des valeurs d'angle de rupture de pente inférieures à 10 degrés, la localisation spatiale de la rupture en traction est distribuée de façon aléatoire, sans qu'il soit possible de reproduire deux fois la même localisation d'une expérience à l'autre. En effet, pour des valeurs d'angle de rupture de pente de 0 et 5 degrés, la figure 33 montre que respectivement 6.6 % et 20 % des ruptures en traction étaient situées à la rupture de pente. La figure 32 montre alors que dans ces cas, la distance séparant la ligne de rupture en traction de la ligne de rupture de pente varie fortement entre les valeurs extrêmes : de 0 à 11 cm.

Comme nous l'avons mentionné, la préparation des échantillons constituant la couche supérieure influence fortement la structure de cette couche et localement il est classique d'observer dans des matériaux granulaires cohésifs des inclusions de plus forte ou faible densité dues à un compactage inhomogène de la couche *(R.L. Brown et J.C. Richard (1966)).* Ces inclusions sont des accumulateurs locaux lors du transfert de contrainte de la bande de cisaillement sous-jacente vers la zone de mise en traction du matériau dans la couche supérieure. Comme nous l'avons dit au chapitre précédent, ces inclusions empêchent la prédiction de la localisation de la rupture en traction, dans le cas général, par la théorie de Griffith *(présentée par F. Louchet 2000),* la limite de résistance en traction pouvant être atteinte prématurément au niveau de l'un de ces accumulateurs avant que la condition d'ouverture en mode I de la plaque à l'aplomb de la tête de fissure en cisaillement, et relative à un matériau homogène, ne soit atteinte.
Cependant, la zone de rupture de pente constitue, pour de forts angles de rupture de pente, un accumulateur de la contrainte en traction bien plus efficace que les inclusions locales de densité.
Ainsi deux types d'accumulateurs de la contrainte sont en concurrence pour la localisation de l'ouverture de la fissure en traction de la plaque : les inclusions de densité d'une part et la zone de rupture de pente de l'autre.
Lorsque l'angle de rupture de pente est faible, les inclusions de densité sont des accumulateurs de contrainte plus efficaces que la zone de rupture de pente, dans ce cas l'un de ces accumulateurs peut induire la rupture en traction de la plaque sans qu'il soit possible de le déterminer à l'avance *(la répartition de ces inclusions de densité étant aléatoire).* Au contraire, lorsque l'angle de rupture de pente est fort, l'accumulation des contraintes en traction se fait majoritairement au niveau de la ligne de rupture de pente. Ainsi la limite de résistance en traction est atteinte en premier à la ligne de rupture de pente, ce qui provoque une rupture linéaire en ce point. Dans ce cas la localisation est fortement déterministe.
L'intérêt majeur est alors que l'implémentation d'une loi de comportement simple *(type Mohr-Coulomb)* nous permet, lorsque la topographie est assez marquée pour imposer la localisation de la rupture, de déterminer assez précisément le volume initial mis en jeu dans la zone de départ. Quelles que soient, dans ce cas précis, les conditions menant le matériau à la rupture, si celle-ci se produit, elle se traduira nécessairement par une rupture en traction au niveau de la rupture de pente. Ainsi il est possible d'ignorer la rhéologie du matériau pour ne prédire que la localisation de la rupture en traction et ainsi estimer le volume de neige mis en mouvement dans la zone de départ. Les conditions d'occurrence de la rupture seront inconnues, mais dans la mesure où seule l'estimation du volume initial nous intéresse et non la prédiction du moment de la rupture, cela n'est nullement un problème.
Dans le cas d'une topographie moins marquée, la rhéologie du matériau reprend ses droits et il semble que l'usage d'une loi de comportement homogène ne soit pas adapté à la description du comportement d'une plaque. Dès lors, une possibilité serait d'inclure dans la description homogène du matériau une distribution aléatoire de ses propriétés mécaniques de façon à approcher le caractère hétérogène d'une plaque.

7 Chronologie de la rupture

De manière à étudier la chronologie de la rupture lors de nos expériences, nous avons utilisé deux caméras : l'une filmant comme précédemment en vue de dessus en plan fixe et l'autre en vue latérale en mode macro sur l'interface couche fragile-couche supérieure. Ceci nous a permis de détecter l'occurrence de la rupture en cisaillement dans la couche fragile (*se traduisant par l'apparition d'une bande de cisaillement)* et de mesurer l'intervalle de temps séparant l'occurrence de cette bande de cisaillement de l'ouverture de la rupture en traction dans la couche supérieure. Les ruptures en cisaillement latéral *(mode II)* par déviation de la fissure de traction *(mode I)* ainsi que la rupture en compression au niveau du pied de

buté ont été observées par la caméra en vue de dessus.

Nous avons réalisé une analyse d'images sur 30 expériences effectuées dans les mêmes conditions de façon à quantifier la chronologie de la rupture. Les résultats obtenus sont présentés ci-après :

la caméra latérale permettait de détecter, dans un premier temps, l'apparition d'une bande de cisaillement au sein de la couche fragile. A la vitesse où nous filmions, le phénomène de croissance de défaut conduisant à la localisation d'une bande de cisaillement était invisible. Nous verrons dans le paragraphe concernant le mécanisme de la couche fragile que lorsque nous utilisons un matériau plus adapté à en décrire le comportement, la croissance du défaut est alors visible et quantifiable.

L'ouverture de la fissure en traction suivait après un délai variant de 0.04 à 0.08 secondes avec la précision de notre caméra. Par la suite la fissure sommitale en traction se propageait sur toute la largueur de la plaque. La vitesse de cette propagation a fait l'objet de mesures qui sont présentées en figure 34.

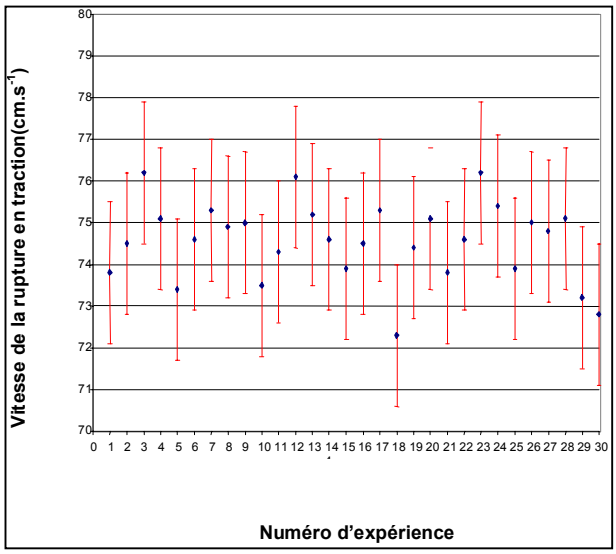


Figure 34 : Vitesse de propagation de la fissure en traction dans la plaque.

Selon les résultats présentés ci-dessus, la vitesse de propagation de la fissure en traction le long de la plaque était de 74.5 $cm.s^{-1}$ avec un écart type de 0.94.

A la précision de notre prise d'images, il apparaissait que les ruptures en cisaillement latéral aux bords latéraux de la plaque se faisaient de concert avec l'ouverture de la fissure en traction.

Après un délai de 0.46 secondes *(avec un écart type de 0.049)* suivant la fin de l'ouverture en traction de la fissure sommitale, une rupture en compression, sur un plan à 45° par rapport au fond de la couche fragile, apparaissait au niveau du pied de butée de la plaque. Les mesures de ce délai sont présentées en figure 35.

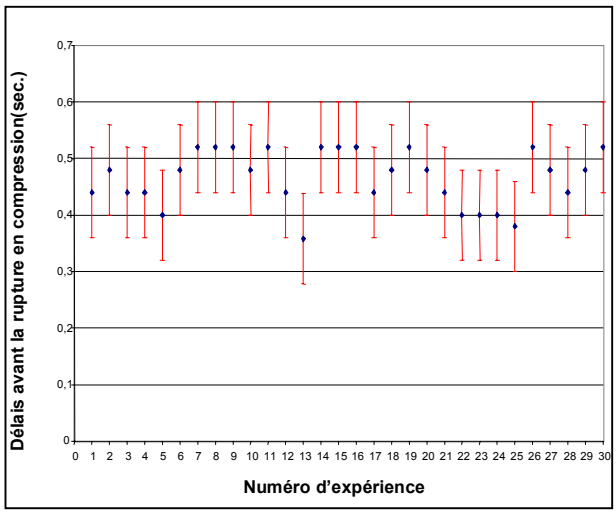
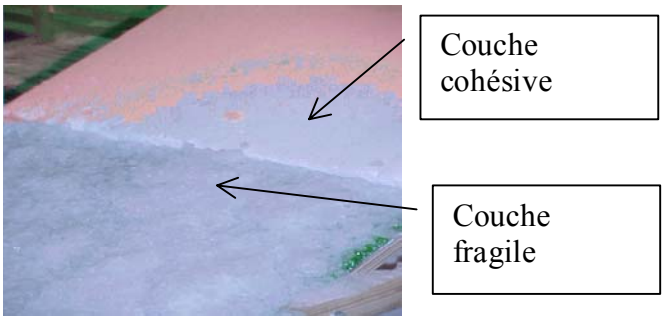


Figure 35 : Délais entre la fin d'ouverture de la fissure en traction et la rupture en compression au niveau du pied de buté.

Cette chronologie est conforme à celle qui est classiquement observée sur le terrain ainsi que celle qui est prévue par le modèle de rupture de F. Louchet.

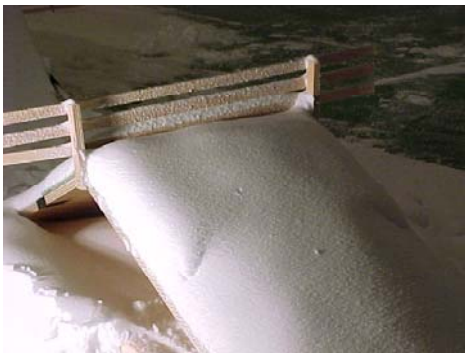
8 Tests sur neige artificielle

Le même protocole expérimental qu'en laboratoire a été utilisé à une échelle supérieure dans la soufflerie climatique du CSTB de Nantes. La couche supérieure était alors composée de neige artificielle générée par des canons à neige, la couche fragile sous-jacente était quant à elle composée de glace pilée lui conférant un comportement non cohésif et frottant, proche de certain type de couche fragile *(comme les couches de neige roulée) et* compatible avec les couches fragiles utilisées lors de nos tests en laboratoire *(voir photographie 4).* L'ensemble des tests ont été réalisés à une température ambiante de –15° C. De façon à s'assurer que le frittage ne puisse pas conférer à la couche sous-jacente une cohésion trop importante, les tests étaient réalisés dans le quart d'heure qui suivait la mise en place de la structure bi-couches.

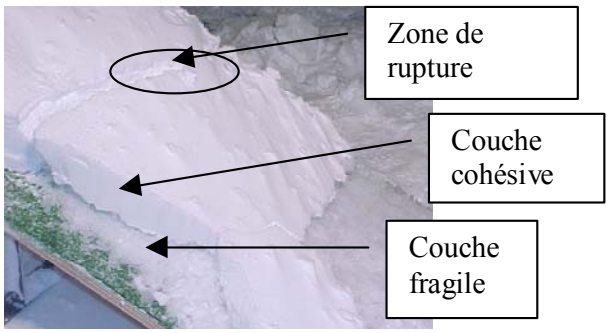


Photographie 4 : Structure bicouches du manteau neigeux modèle.

Une fois la couche fragile mise en place, elle était recouverte par une couche de neige artificielle *(voir photographie 5).* Cette dernière était obtenue en provoquant du transport de la neige par le vent d'une zone d'érosion dans la soufflerie vers la zone de dépôt constituée par notre pente test. Une corniche était ainsi formée derrière la rupture de pente amont du canal expérimental. La pente était ensuite graduellement augmentée jusqu'à atteindre la rupture *(voir photographie 4).*



Photographie 5 : Phase de mise en charge



Photographie 6 : Rupture d'une plaque sur une couche fragile.

8.1 Comparaison avec les tests en laboratoire

Il est intéressant de noter la similitude entre les résultats obtenus en soufflerie sur neige artificielle et ceux obtenus en laboratoire sur matériaux granulaires.
Les graphiques suivants présentent la comparaison des résultats de stabilité entre les tests réalisés sur poudre en laboratoire et ceux réalisés sur la neige artificielle au CSTB.

Notons que l'ensemble des tests en soufflerie ont été effectués à densité constante ce que ne nous a pas permis de tester l'influence de ce paramètre sur la stabilité d'une plaque de neige artificielle.

Les figures 36 et 37 ci-dessous illustre la similarité entre la neige artificielle et la poudre de $CaCO_3$ relativement à l'influence de l'épaisseur de la plaque supérieure sur la stabilité.

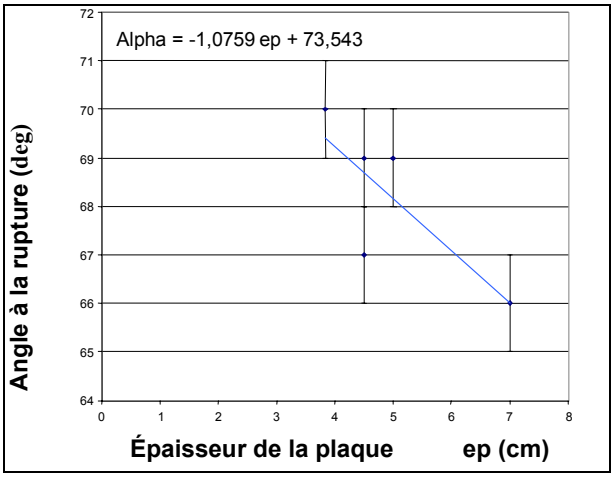


Figure 36 : Stabilité en fonction de ep pour la neige

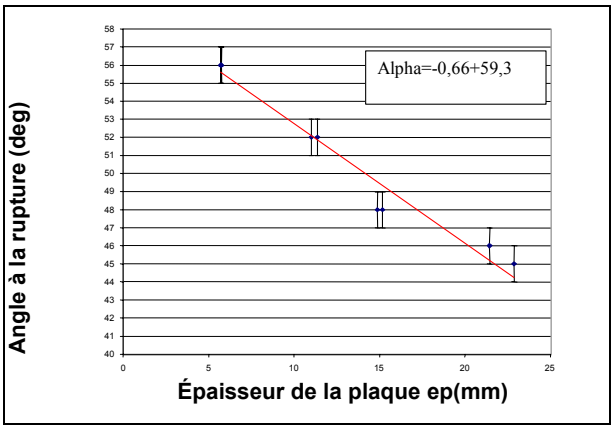


Figure 37 : Stabilité en fonction de ep pour la poudre

On note en effet, d'après les deux résultats présentés ci-dessus, que l'angle à la rupture *(tenant lieu dans ces expérimentations d'indice de stabilité)* varie de façon linéaire avec l'épaisseur de la plaque de neige ou de poudre. Le caractère linéaire de cette variation est à notre sens, dans les deux cas présentés, la traduction macroscopique d'un comportement complexe impliquant les deux couches en présence:

- le mécanisme de cisaillement de la couche sous-jacente, qui bien que simplifié par rapport à la réalité in situ n'en reste pas moins complexe *(puisque relevant de mécanisme d'apparition d'une bande de cisaillement au sein d'un matériau granulaire non cohésif).*

- les mécanismes de déformation élastoplastique et de rupture de la couche supérieure.

Le fait que dans les deux cas la même tendance linéaire soit observée indique que, d'un point de vue macroscopique, le $CaCO_3$ est représentatif du comportement de la neige artificielle.
Notons cependant que bien que la tendance générale de la variation de l'indice de stabilité soit respectée, les valeurs précises de l'angle à la rupture observées dans la neige ne peuvent être reproduites par les essais sur poudre en laboratoire. En effet les valeurs de la cohésion des deux matériaux sont différentes ainsi que les valeurs des différents paramètres mécaniques impliqués dans la déformation et la rupture de la plaque supérieure respectivement formée par ces deux matériaux lors des deux types d'expériences.

Ainsi la similarité entre les deux courbes de variation de la stabilité en fonction de l'épaisseur traduit une similarité macroscopique entre la stabilité d'une structure bi-couches composée de neige artificielle et une structure bi-couches composée de matériaux granulaires secs. Les décalages entre ces deux courbes sont logiquement expliqués par les différences entre les paramètres mécaniques intrinsèques relatifs à ces deux types de matériaux.

Les deux figures 38 et 39 ci-dessous illustrent les mêmes observations relatives à la variation de la stabilité en fonction de l'épaisseur de la couche sous-jacente.

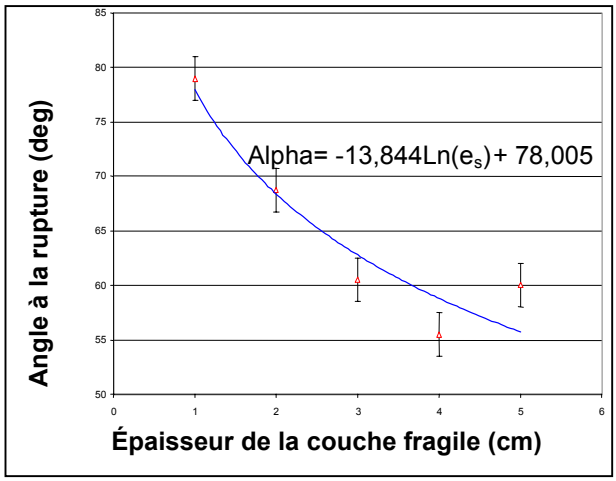


Figure 38 : Stabilité en fonction de e_s pour la neige

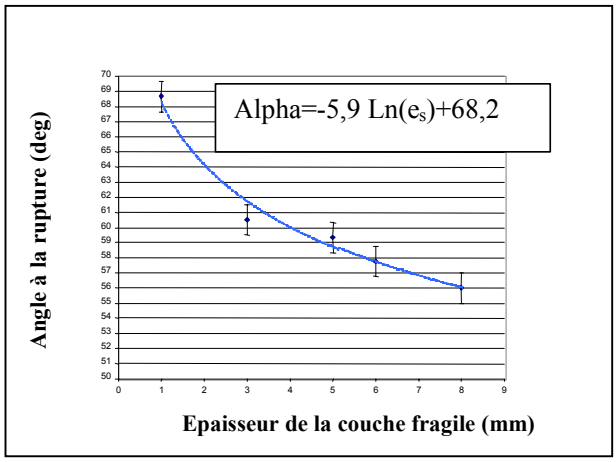


Figure 39 : Stabilité en fonction de e_s pour la poudre

Notons qu'en ce qui concerne le comportement de la couche fragile, l'hypothèse simplificatrice que nous avons adoptée dans ce chapitre : assimilation de la couche fragile à un simple plan de glissement, a été respectée dans les tests en soufflerie sur neige artificielle. En effet la glace pilée utilisée pour reproduire la couche sans cohésion sous-jacente a un comportement comparable à celle d'un sable *(tests d'angle de talus et de coulabilité compatibles avec ceux réalisés sur un sable).*

La similarité entre les deux courbes indique là encore un bon accord entre les deux types de matériaux utilisés, tout au moins du point de vue macroscopique.

8.2 Remarque sur la poudre de $CaCO_3$

Les similarités macroscopiques observées entre les tests sur neige artificielle et ceux sur poudre semblent indiquer que les tests sur matériaux granulaires en laboratoire reproduisent assez fidèlement à échelle réduite, la réalité de plus grande échelle que constituent les tests en soufflerie climatique.
Ceci vient nous conforter dans le choix du $CaCO_3$ comme matériau « analogique » pour reproduire le comportement de la neige. Les essais triaxiaux ayant déjà donné des résultats satisfaisants quant au caractère élasto-plastique *(avec adoucissement en phase de déformation plastique)* de la poudre de $CaCO_3$.

Cependant, bien qu'à ces différents égards, le comportement macroscopique observable du $CaCO_3$ soit compatible avec celui de la neige *(tout au moins avec celui de la neige artificielle),* il est important de garder à l'esprit qu'au niveau structural le comportement de ces matériaux est très différent. Cela a son importance pour définir le cadre de validité de ces expériences :
si les matériaux utilisés ici en laboratoire semblent être adaptés pour l'étude macroscopique de la stabilité de structure bi-couches de neige composée d'une plaque de neige cohésive reposant sur une couche sous-jacente de faible cohésion, l'usage de ces matériaux pour étudier les processus de déformation de la

structure au niveau microscopique *(à l'échelle du grain),* n'est certainement pas adapté. En effet il est important de noter que la nature des contacts inter granulaires est fondamentalement différente entre ces deux types de matériaux. Ainsi le frittage responsable de la cohésion de la neige est remplacé par des interactions électrostatiques *(interaction de van der Walls de type London)* et une interpénétration des grains dans le cas du $CaC0_3$.
Au niveau micro-structural le comportement d'un contact inter-granulaire est nécessairement différent. Cependant au niveau macroscopique le comportement est comparable, dès lors que l'on considère une assemblée des grains d'un nombre suffisamment élevé et que l'on s'intéresse à l'expression de son comportement à une échelle supérieure ou égale à celle de l'unité représentative.

Ainsi l'usage de ce matériau « analogique » doit être restreint à l'étude macroscopique du comportement d'une plaque cohésive, ce qui rappelons-le est l'objet de ce chapitre.

Enfin, il convient de noter que la similarité observée dans les tests de stabilité, bien que de bonne augure, ne concerne que la neige artificielle. La comparaison avec la neige réelle est comme nous l'avons vu difficilement envisageable du fait de la forte variation des propriétés du matériau in situ *(ce qui a motivé ces tests).* Cependant, la neige artificielle ne différant de la neige frittée réelle que par la morphologie des grains qui la composent et non par la nature de leurs contacts *(les grains sont sphériques mais frittés entre eux),* il est raisonnable d'extrapoler les résultats précédents au cas de la neige réelle.

En résumé, la stabilité d'une couche de matériau granulaire cohésive reposant sur une couche non-cohésive au comportement frottant décroît lorsque :

- **l'épaisseur de la plaque augmente.**
- **l'épaisseur de la couche sous-jacente augmente jusqu'à une certaine valeur au delà de laquelle l'angle d'instabilité reste constant.**
- **la densité de la plaque diminue.**
- **la répartition des épaisseurs de la couche supérieure est irrégulière.**

La localisation de la rupture en traction qui suit l'apparition d'un plan de cisaillement dans la couche fragile se fait :

- **à la rupture de pente lorsque celle-ci est marquée.**
- **de façon aléatoire dans la plaque dans le cas contraire.**

Cependant le comportement de la couche fragile n'est ici qu'approché. Il est donc nécessaire d'imaginer d'autres types d'expériences sur d'autres matériaux pour en comprendre le fonctionnement.

Chapitre 2 ***: Simulations numériques des expériences physiques de rupture réalisées au Cemagref***

J.P NAVARRE (CEN)

1. Introduction

L'étude, présentée dans ce chapitre, est basée sur la simulation numérique (à l'aide du logiciel Flac3D) d' une expérience de rupture, réalisée la saison passée par le CEMAGREF sur un modèle physique et présentée dans le chapitre 1. Cette étude a pour objet d'évaluer des modalités d'application de ce logiciel pour des problèmes spécifiques d'instabilité et de rupture de plaques de neige reposant sur une couche fragile, en s'appuyant sur la reproduction d'une expérience réelle similaire.

Cette maquette physique avait pour but d'analyser le comportement d'un dépôt constitué de deux strates : une strate fragile surmontée d'une strate à forte cohésion, constituées respectivement de sable et de chaux..
La maquette est constituée de deux pentes uniformes, avec une rupture de pente (angle de rupture fixe). Les matériaux sont retenus latéralement et à la partie avale. Cette maquette physique présente une géométrie particulière, illustrée par la figure 1, afin d'imposer des zones préférentielles de rupture. Les parties plates (à l'exception de la partie supérieure amont) sur lesquelles reposent les matériaux sont recouvertes de papier abrasif, pour créer une forte adhérence par rugosité.

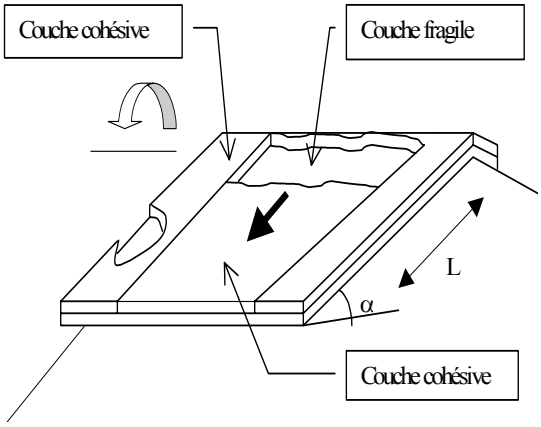


Figure 1: Schéma de la maquette physique et disposition des couches

Pour reproduire ce processus expérimental, nous avons donc considéré ou simulé différentes inclinaisons successives de la maquette (par rotation autour de l'axe de rupture de pente) selon des pas de 5° et en calculant chaque fois, avec le logiciel Flac3D, les états de contraintes / déformations.
La première inclinaison simulée (inclinaison de 30° de la grande pente) correspond à l'état initial de chargement de la maquette physique.

Dans le premier paragraphe, nous présentons la série de simulations que nous avons d'abord faite en nous appuyant sur les caractéristiques fournies par le CEMAGREF. Ceci nous permettra de décrire la simulation numérique, les types de résultats obtenus et l'analyse que l'on peut faire en terme de rupture. En fait, les caractéristiques mécaniques n'ont été fournies qu'approximativement et de façon incomplète (manque de mesures en laboratoire). Nous n'avons donc pas pu connaître et utiliser dans nos simulations, les caractéristiques mécaniques précises des matériaux réellement mis en jeu ; et ceci nous a partiellement limité pour faire des comparaisons précises entre nos résultats et ceux des essais physiques.

En conséquence, nous avons élargi notre étude en réalisant plusieurs séries de simulations numériques, associées à des variations de certaines caractéristiques mécaniques de la couche cohésive, de la géométrie de la maquette ou de l'évolution des résistances lors des déformations plastiques, afin d'étudier l'influence relative de ces différents paramètres sur les résultats (paragraphes 2 de ce rapport).

2. Simulation sur la base des caractéristiques fournies

2.1 Principe de la simulation

Pour des raisons pratiques, nous avons considéré la maquette telle que :
- l'axe y correspond à la grande pente (pente L le long de laquelle doit se faire le glissement),
- l'origine des axes est positionné au centre de la partie inférieure avale,
- l'axe z est perpendiculaire à la surface de cette grande pente (<0 vers le bas) ; la direction du vecteur gravité fait donc un angle de 30° avec l'axe -z pour la première simulation.

Cette présentation restera la même quand on simulera les différentes inclinaisons de la maquette ; en fait on changera dans les calculs la direction du vecteur gravité par rapport aux axes.

Enfin, compte tenu de la symétrie de la maquette, seule une moitié est simulée et représentée ; ce plan de symétrie correspond à une zone où les déformations selon l'axe x sont nulles.
Pour les conditions limites (parois verticales, surfaces recouvertes de papier de verre), nous avons considéré que les déformations étaient nulles.

Les dépôts des deux matériaux sur chacune des deux pentes sont définis distinctement et en deux étapes (génération de 4 « groups » solidaires) : compte tenu de la conception de Flac, il est plus facile de générer initialement des maillages horizontaux, que l'on « déforme » par la suite, avec une fonction dz = f (x, y, z) appliquée aux nœuds des mailles, pour reproduire les pentes et la géométrie réelle des dépôts de matériaux (figure 2-a).
Une attention toute particulière a été apportée à la définition des conditions limites et à la géométrie de la zone de rupture de pente, en considérant que les épaisseurs de matériaux étaient les mêmes sur les 2 pentes : dans les matériaux, la zone de rupture de pente est définie par un plan faisant un angle de 30°/2 par rapport au plan XZ (figure 2-b).

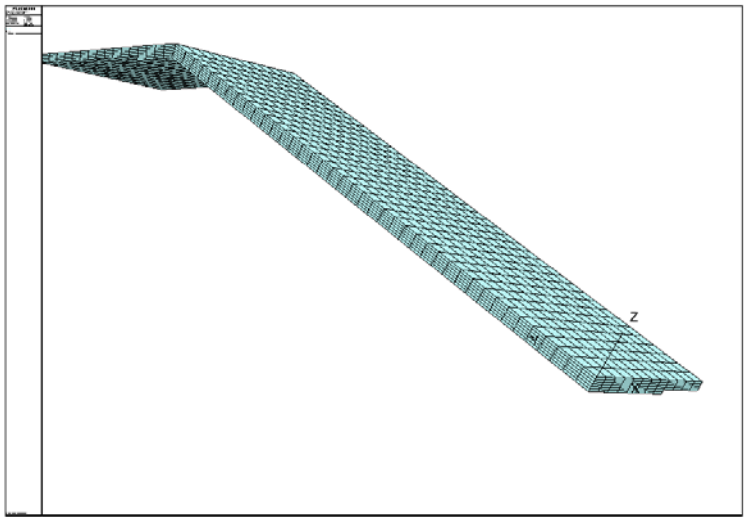


Figure 2-a : maillage du modèle

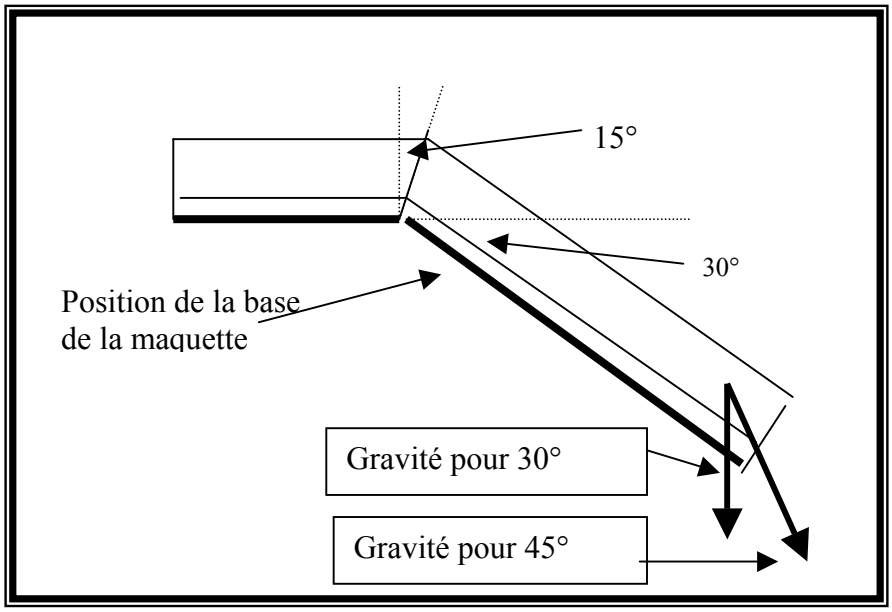


Figure 2 – b : Vue en plan (perpendiculairement à l'axe x)

Caractéristiques géométriques
longueur de la pente L : 40 cm. longueur de l'autre pente : 20 cm
largeur du dépôt du matériau inférieur (pour ½ maquette) : 10 cm
largeur du dépôt du matériau supérieur (1/2 maquette) : 15 cm
épaisseur de la couche ou matériau inférieure (couche1): 4 mm
épaisseur de la couche supérieure ou couche2: 8 mm (mesurée perpendiculairement à la base)

Maillage
Les maillages sont uniformes, mais différents pour les 2 couches et les 2 pentes ; ils ont été choisis pour tenir compte de certaines contraintes numériques et d'un temps raisonnable de calcul.

Caractéristiques mécaniques des matériaux et lois de comportement
Les essais du Cémagref correspondent à des ruptures fragiles, qui peuvent être décrites par un modèle de type élasto-plastique .
Pour cette première simulation, nous avons retenus les caractéristiques mécaniques suivantes, compte tenu des informations fournies par le Cémagref :

matériau fragile de la couche inférieure		matériau cohésif, couche supérieure
Masse volumique :	1300 Kg/m3	1050
Module d'élasticité :	3 e6	3,2 e6
Coef. de Poisson	0,2	0,2
Cohésion	10 Pa	125
Angle de frottement :	31°	43
Résistance traction :	0,1 Pa	135

Simulation de l'essai
Une pré-simulation, pour l'inclinaison de 30°, est d'abord réalisée avec un modèle élastique pour l'initialisation des contraintes, afin que la modélisation avec le modèle élasto-plastique converge correctement et plus rapidement vers la solution.
La première simulation est donc faite pour une inclinaison de la grande pente L de 30° (par rapport à l'horizontal), cas à priori sans rupture ; les simulations successives suivantes d'une même série correspondent à des incréments d'inclinaison de + 5°. Le résultat de simulation pour l'inclinaison d'angle 30° (ou 35°,...) sert d'état initial pour le pas suivant d'inclinaison 35° (ou 40°,...).

Pour chaque inclinaison, est défini par Flac3D l'état des contraintes - déformation en chaque élément volumique du maillage. Chaque simulation correspond à une analyse statique et à la recherche d'une

solution, par un processus itératif convergent; le paramètre temps n'est pas pris en compte. dans une telle approche.
Flac3D permet de visualiser, pour chaque inclinaison, l'état dans lequel se trouve chacun des éléments (domaine élastique ou plastique) et, éventuellement les zones de contraintes limites ou les zones de rupture. On peut ainsi définir, l'inclinaison pour laquelle pourra se produire la rupture générale et/ou une rupture locale d'un élément.

En fait, ces aspects - évolution de la zone de rupture et définition de l'inclinaison propre à la rupture globale - sont plus délicats à analyser, car ils dépendent des modalités de perte de résistance que l'on prend en compte quand le matériau atteint ses critères de plasticité ou limite d'élasticité.

Afin de pouvoir mieux suivre ces phénomènes de rupture, nous avons utilisé comme modèle élasto-plastique, le modèle « ss » (ou Strain hardening/Softening Mohr-Coulomb Model) implanté dans Flac3D. Ce dernier permet de suivre les déformations plastiques et de modifier plus aisément les caractéristiques mécaniques de chaque élément en fonction de leur état de plasticité.

L'état des contraintes limites dans le plan de Mohr (σ, τ) est délimité par la droite de coulomb (défini par la cohésion et l'angle de frottement interne) et la résistance limite en traction. Dans le cas présent, une contrainte (σ ou τ) ne peut pas dépasser sa valeur limite. A noter que σ est positif pour une traction et que $\sigma 1$ est la contrainte majeure (généralement une traction).

Si, lors des itérations successives, un élément atteint cette valeur, il est considéré pour ce pas en état de déformation plastique, sachant que cet état plastique peut n'être que temporaire (propre à ce pas de calcul): l'important étant l'état final, obtenu après convergence de la solution . La convergence est définie par la valeur proche de 0 de la force F « d'équilibre instable » intervenant dans le calcul itératif..
On peut donc obtenir, pour une pente donnée, un résultat convergent et stable (F # 0.), avec quelques éléments à l'état plastique, mais avec des déformations plastiques faibles : un tel résultat pouvant être jugé comme ne correspondant pas, à priori, à une rupture générale de la couche cohésive.
Par contre, une rupture du matériau sera plutôt marquée par une non-convergence de F, souvent lié à une augmentation progressive du nombre d'éléments en plasticité et/ou des déformations plastiques importantes au cours du calcul itératif.

Dans les simulations des paragraphes1, 2-a et 2-b , on a fait les calculs en supposant des propriétés constantes (pas de perte des propriétés en atteignant la limite de plasticité), et en considérant la solution atteinte pour un « ratio » de 0.0001.
Le cas d'une rupture progressive associée à des pertes de résistance de ces éléments en grande déformation plastique, sera étudié dans un autre paragraphe (2-c).

2.2 Résultats de cette série de simulations (série G)

De nombreux graphiques et champs de résultats sont obtenus à chaque incrément d'inclinaison jusqu'à la rupture. A titre d'illustration, nous en avons repris quelques uns que nous présentons ci-après.

La figure 3 représente l'évolution de la Force Max d'équilibre F au cours des différentes étapes de simulation ; ce graphique montre que la convergence vers une solution stable (F# 0) est assez rapide, pour des inclinaisons de 30° ou 35°, un peu plus longue pour une inclinaison de 40° ou 45°, mais que pour une inclinaison de 50° il n'y a pas de convergence vers une solution stable des calculs : le nombre d'éléments de la couche2 en état de déformation plastique est important et augmente avec les pas d'itération.

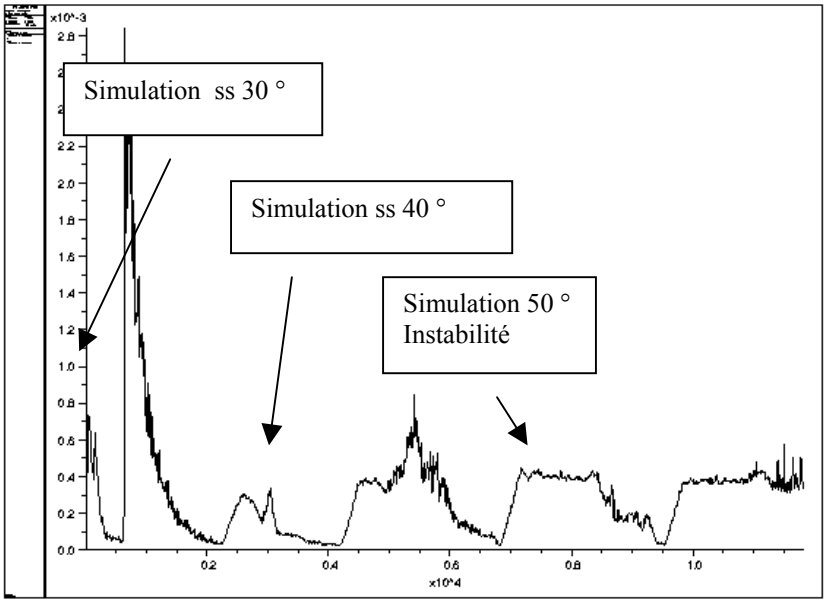


Figure 3 : Evolution de la Force Max d'équilibre au cours des différentes étapes de la simulation

Les 4 figures suivantes correspondent à l'état des couches à la fin des calculs pour l'inclinaison de 45° :

La figure 4 illustre l'état des contraintes SYY parallèles à l'axe Y (>0 si traction) ; elle montre, notamment pour la couche cohésive du haut, une zone en traction près de la zone de rupture de pente avec des valeurs de l'ordre de 130 Pa (valeur proche de la résistance limite retenue) et le phénomène de compression sur l'appui aval, suite à la déformation élastique de cette couche, à des déformations plastiques localisées et à la rupture dans la couche inférieure.

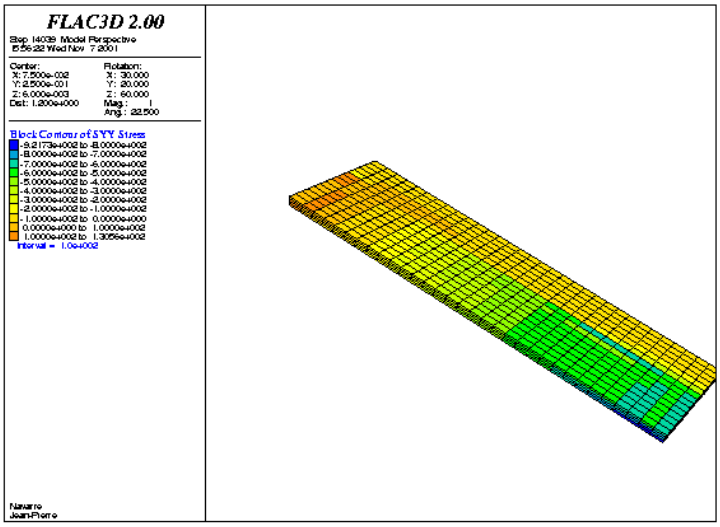


Figure 4 : Etat des contraintes SYY (compression si >0)

La figure 5 représente l'état des contraintes de cisaillement SXY ; dans la couche cohésive, celles-ci sont particulièrement importantes dans la partie inférieure le long de la zone de discontinuité de la géométrie.

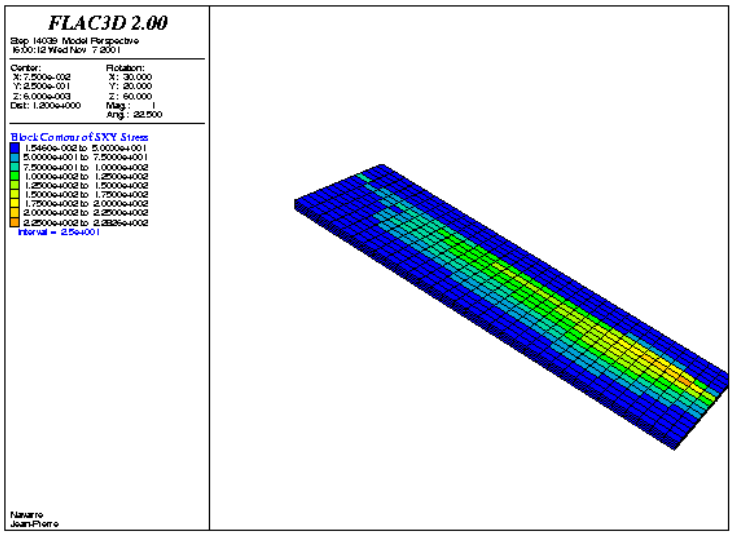


Figure 5 : Etat des contraintes SXY ou de cisaillement parallèlement à l'axe Y

La figure 6 permet d'évaluer les déformations plastiques auxquelles ont pu être soumis certains éléments du fait de leur passage à l'état limite en cisaillement au cours des itérations ; sachant que, selon les caractéristiques d'un matériau, on peut avoir de faibles déformations sans que celui-ci perde sa résistance et parte en rupture faibles); dans la couche inférieure fragile es-plastique est en effet de l'ordre de 0.02. Les zones de déformations plastiques qui apparaissent ici reflètent les zones qui sont en rupture, ou qui ont pu l'être momentanément au cours du calcul. Ces zones préfigurent la forme de la rupture générale, comme la figure 7 suivante.

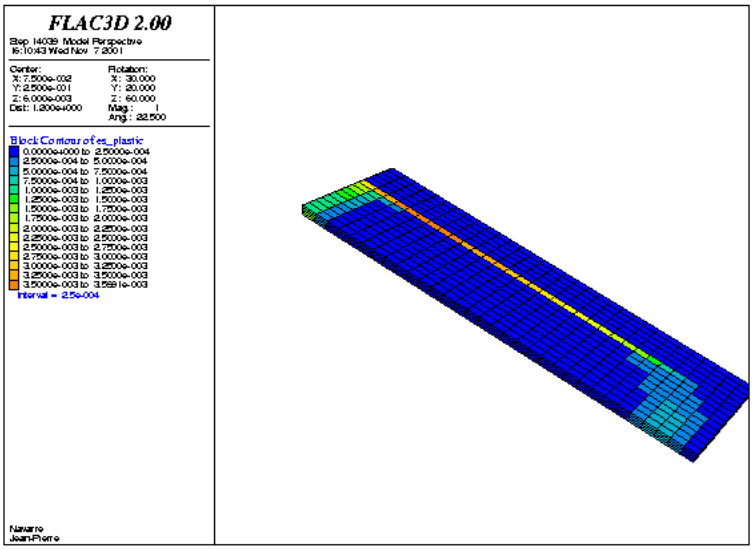


Figure 6 : Etat du paramètre « es_plastique » ou déformation plastique en cisaillement

La figure 7 illustre l'état (élastique ou plastique) dans lequel se trouvent les différents éléments à la fin des calculs, notamment pour la couche cohésive (couche2)
A la fin des calculs relatifs à la pente 45°, seuls quelques éléments sont maintenant dans un état plastique, les autres étant restés en état élastique. On peut noter que certains éléments sont passés

antérieurement (« **p**reviously »), durant la « recherche de la solution » par des états de rupture plastique.
Ces 2 figures 6 et 7 montrent le rôle que peut jouer sur les résultats le comportement du matériau quand il atteint sa limite de plasticité : selon que l'on prend en compte (ou pas) une perte immédiate ou progressive des propriétés mécaniques, on peut en effet envisager une rupture (ou pas) pour cette inclinaison de 45°. Dans le cas présent, on a fait les calculs en supposant que les propriétés mécaniques restaient constantes.

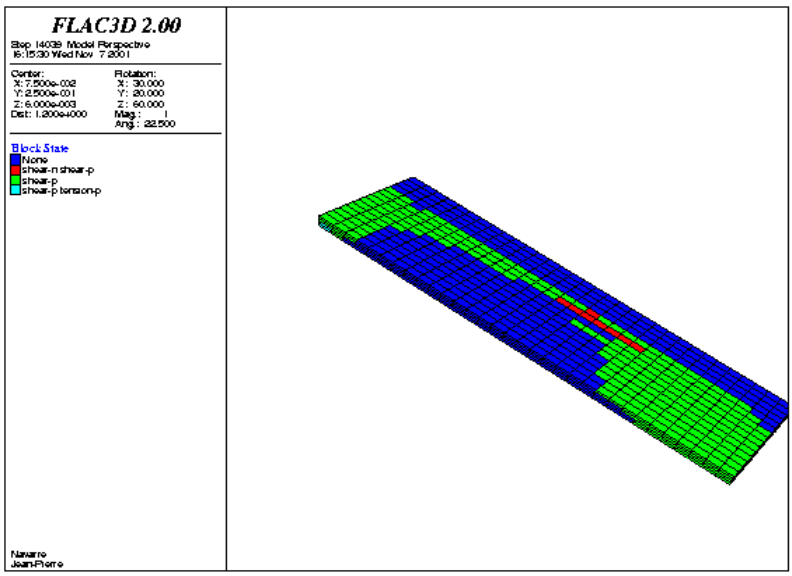


Figure 7 : Etat (élastique ou plastique) des éléments à la fin de la simulation à 45°

Pour l'inclinaison à 50°, comme on peut le constater sur la figure suivante (figure 8), de nombreux éléments sont maintenant (« **n**ow ») en rupture plastique et définissent la zone de rupture :
- à l'amont , au niveau de la rupture de pente,
- sur le bord latéral, au niveau de la discontinuité de la géométrie,
- et à l'aval, suite au glissement de la couche.

On peut également noter que le contour de cette zone de rupture correspond bien à ce qui a pu être observé lors des essais physiques, compte tenu des conditions limites imposées sur la maquette.

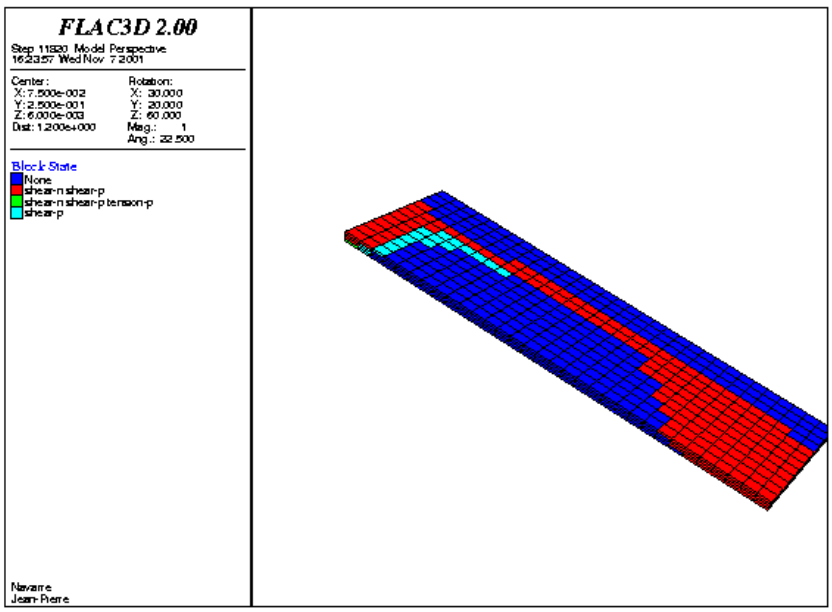


Figure 8: Etat (état élastique ou plastique) des éléments pour la simulation 50°

En fait la rupture généralisée (et non convergence des calculs),.pour 50°, correspond à la rupture par cisaillement d'éléments en nombre de plus en plus important dans la partie inférieure.
Les premiers éléments en rupture plastique apparaissent sur le bord latéral de discontinuité dès l'inclinaison 40° ; ces déformations plastiques, de plus en plus marquées avec l'augmentation de l'inclinaison conduisent à une mise en contrainte des éléments à l'aval jusqu'à la rupture en butée : ceci est assez bien illustré par l'évolution des valeurs extrêmes de SYY (dans la couche2) :

Ceci nous montre que l'inclinaison spécifique à la rupture est ici fortement dépendante des conditions de calcul (valeurs des résistances limites et maintien des caractéristiques mécaniques en plasticité) et de l'existence d'une butée fixe à l'aval. La modification de l'une de ces conditions (ou des deux) conduirait évidemment à des résultats différents .

Cette série de simulation a été réalisée en prenant des caractéristiques mécaniques bien précises et semble cohérente avec les résultats physiques. En fait ces caractéristiques ne sont pas « garanties » avec une précision absolue : les propriétés du matériau cohésif peuvent varier dans des proportions significatives (environ + ou -25%) en fonaction de sa préparation ou des contraintes, ce qui peut avoir des conséquences sur les résultats de la simulation. Nous avons ainsi fait d'autres simulations en changeant certains paramètres (cohésion, résistance à la traction, angle de frottement, …) et nous avons alors pu obtenir des ruptures pour des inclinaisons sensiblement différentes.

3. Simulations avec modifications de certaines propriétés mécaniques ou de la géométrie de la maquette

3.1 Modification de la butée à l' aval

Compte tenu du rôle important que joue cette condition limite sur les résultats, nous avons fait une autre série de simulation en modifiant celle-ci : nous avons remplacé la butée fixe par une butée « souple », en supposant que les 2 matériaux s'appuyaient maintenant sur une butée élastique (simulée par un matériau élastique Eb en appuie aval sur une butée fixe) et en gardant toujours une longueur L de 40 cm pour le dépôt des 2 matériaux.
Cette hypothèse nous a semblé plus réaliste, par rapport aux conditions que l'on peut rencontrer dans la nature avec un manteau neigeux.
Pour cette nouvelle série de simulation, présentée ci-après, nous avons repris les paramètres de la simulation précédente et en supposant Eb>> (E2 et E1).

Le faible déplacement de la partie aval de la couche fragile entraîne naturellement des contraintes de cisaillement et de traction plus fortes dans cette couche cohésive dés l'inclinaison de 40° (figure 9). Avec cette nouvelle condition limite aval, on obtient la rupture (non convergence) à 45° (rappel :50° précédemment) et des déformation plastiques significatives dès 40°. Ce phénomène sera évidemment d'autant plus sensible que l'on prendra une butée plus souple (Eb plus faible).

Remarque : ceci illustre ce qui peut éventuellement se produire dans un manteau neigeux, si l'ancrage aval d'une plaque peut se déformer (redoux, rupture, reptation,…).

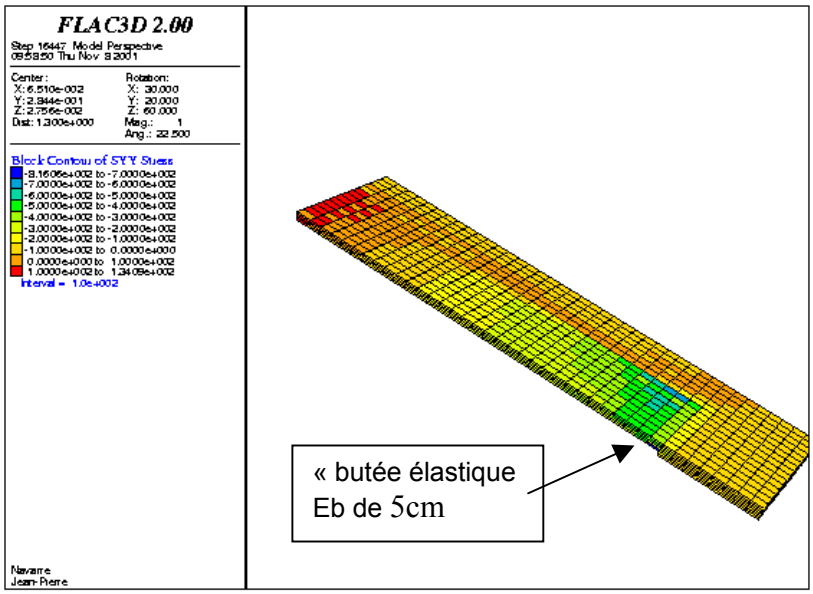


Figure 9 : Etat des contraintes SYY dans la couche cohésive avec une butée « souple élastique »

3.2 Influences relatives de certains paramètres

Avant de faire la série de simulation décrite précédemment, nous avions réalisé plusieurs séries de simulations numériques, mais en prenant - par erreur et/ou manque d'information – des conditions sensiblement différentes.
Bien que ces simulations numériques ne correspondent pas finalement aux conditions réelles de l'expérience physique, nous présentons dans ce paragraphe quelques résultats alors obtenus, qui illustrent l'influence de certains paramètres.

Ainsi, une première série de simulation (série J) avait été faite en prenant :
- une longueur de pente L =50 cm,
- des résistances plus fortes pour le matériau cohésif : C2 = 350 Pa – tens2 = 390 Pa
- et une densité de ce dernier plus forte : 1.4

Dans ces conditions, la rupture était apparue pour l'inclinaison de 50°.

Majoration de la cohésion pour le matériau cohésif :

En partant de cette simulation J, nous avons majoré la cohésion C2 ; ce qui nous conduit alors à avoir naturellement une inclinaison de rupture plus importante mais aussi, avant la rupture, des déformations « et_plastique » plus importantes à la zone de rupture de pente. Ceci illustre que la prédominance d'une rupture par traction à l'amont ou d'une rupture par cisaillement latéralement dépend dans le cas présent des valeurs relatives définies pour ces deux résistances, et donc de la nécessité de les connaître avec précision si on veut simuler exactement l'expérience.

Modification du module d'élasticité du matériau cohésif :

Toujours en partant des conditions de la série J, nous avons modifié le module d'élasticité E2 d'un facteur 10 (série K) ou d'un facteur 1/10 (série L).

Les variations de E2 ne changent pas significativement l'inclinaison pour la rupture, bien que la convergence vers la solution semble plus longue pour la série L (à 45°).
Ces variations de E2 influent sur les déformations des éléments de la couche cohésive, et donc sur les répartitions des contraintes compte tenu de la géométrie de la maquette (blocage aval et latéralement). Si on compare certains résultats obtenus pour 40°, on peut regarder le déplacement

maximum des éléments de la couche2 selon y, maximum qui se situe vers le milieu de la grande pente et qui a les valeurs suivantes :
Série J : -2,2 10-5 m
Série K : -3,0 10-6
Série L : -2,5 10-4

Ces déformations influent naturellement sur les contraintes de cisaillement le long de la zone latérale de discontinuité, et sur les déformations plastiques à ce niveau, comme le montrent les valeurs maximales de « es-plastique » dans la couche2:
Série J : 4,2 10-4
Série K : 7,1 10-5
Série L : 5,2 10-3 (cas où E2 est le plus faible)

Si on envisage que cette déformation plastique plus importante puisse être génératrice d'une perte de résistance du matériau, on peut alors supposer que cette diminution de E2 puisse faciliter une rupture anticipée par cisaillement le long de cette zone de discontinuité (pour cette géométrie).

Remarque : ce résultat est peut être à prendre en compte dans l'analyse de certaines ruptures de plaques de neige, soumises à des baisses sensibles de dureté au cours de la journée, par réchauffement (?).

Modifications de l'épaisseur de la couche2 :

Toujours sur la base de la série J, nous avons fait deux autres simulations, mais en changeant l'épaisseur ep2 de la couche2 :
Série H : ep2 = 0.006 m
Série I : ep2 = 0.010 m
L'analyse des résultats ne montre pas des différences très significatives entre ces 3 cas ; tout au plus peut on constater que les contraintes de cisaillement (ainsi que es-plastique) sont légèrement plus faibles pour la série I (ep2 plus fort.

Cette non variation significative en fonction de l'épaisseur peut être due :
- d'une part, au critère de rupture retenu : à savoir une droite de Mohr avec un angle de frottement interne significatif et une rupture plastique sans perte de résistance ; ainsi la contrainte de cisaillement dans la couche1, même à la rupture, restera d'autant plus forte que la contrainte normale sur cette couche (et donc ep2) sera grande ;
- et d'autre part, à la géométrie du problème des dépôts et des conditions limites : les contraintes de cisaillement , le long de la zone latérale de discontinuité sont d'autant plus faibles que l'épaisseur ep2 est plus important.

Modification de la longueur de la grande pente L (série N) :

Nous avons repris les conditions de la simulation J, mais en réduisant la longueur de la pente qui passe de 50 cm à 45 cm.
Comme, on pouvait le prévoire, la réduction de la longueur (et donc du volume de matériau) entraîne une réduction des contraintes de cisaillement latéralement et des déformations plastiques (- 15% environ dans notre cas pour l'inclinaison de 45°) ; ce qui conduit à un angle d'inclinaison de 55° pour la rupture.

3.3 Simulations en supposant une perte de résistance du matériau cohésif en fonction de ses déformations plastiques

Suite aux résultats obtenus précédemment, nous avons refait différentes séries de simulations en reprenant les caractéristiques de la série J, mais en considérant une perte de résistance du matériau cohésif en fonction du taux de déformation plastique. Ceci est ici facilement programmable par des « tables » en utilisant le modèle « ss ».
Jusqu'à présent, nous avons en effet supposé que le matériau cohésif avait un comportement élastique – plastique parfait : quand les contraintes atteignent les résistances limites (en cisaillement

ou traction), les contraintes restent constantes avec la déformation plastique (droite Pl.C sur la figure 10). En fait, si on veut être plus proche de ce qui doit se passer en réalité, il faut tenir compte d'une perte de résistance avec la déformation et supposer que la résistance du matériau diminue avec la déformation plastique (courbe Pl.V sur la figure 10). N'ayant pas d'informations précises sur cette variation pour ce matériau cohésif, nous avons essayé de reproduire ce phénomène en faisant plusieurs simulations avec des courbes de variations de résistances différentes

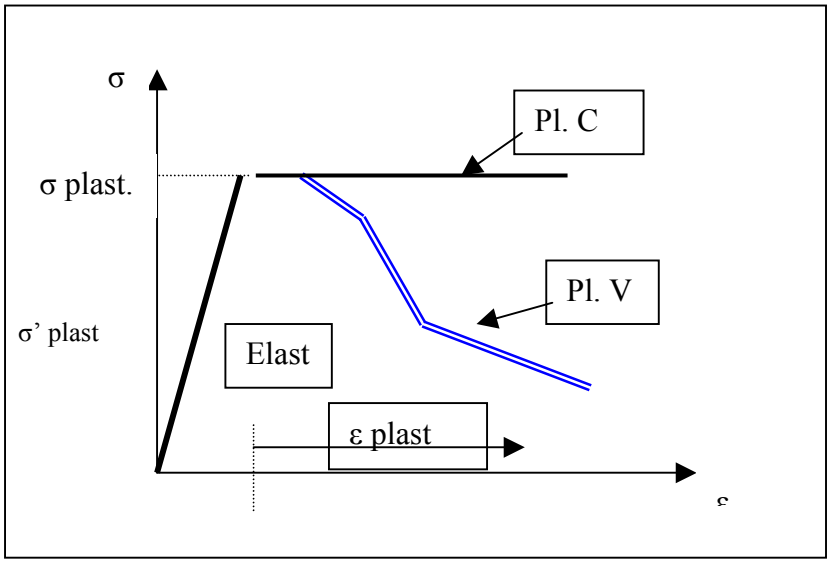


Figure 10 : Graphique d'évolution des contraintes en fonction des déformations

En partant des paramètres de la simulation J, nous avons donc réalisé 3 séries de simulation avec différentes courbes de décroissance des résistances.
Pour ces 3 séries (1,2,3 ou SSS, S, SS), les variations des cohésions et des résistances à la traction sont représentées figures 11-a et 11-b .

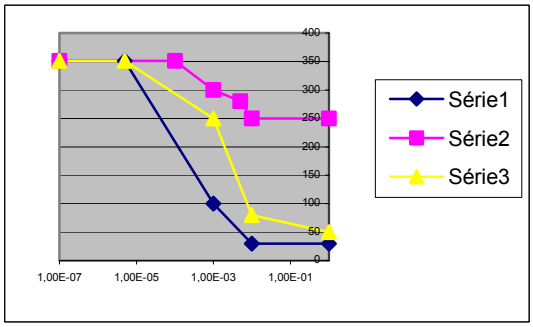


Figure 11-a :Evolution de la cohésion en fonction de es_plastique

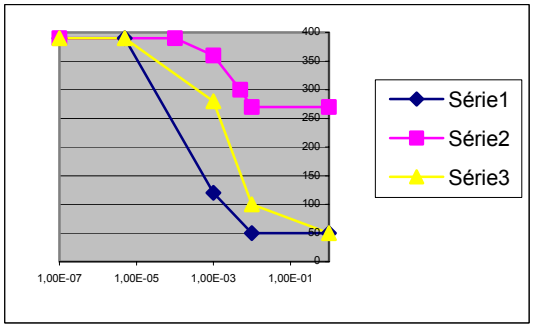


Figure 11-b : Evolution de la résistance à la traction en fonction de et_plastique

Pour les séries S et SS (2 et 3) la ruptures se retrouve pour l'inclinaison de 50° ; par contre la rupture (non convergence) apparaît dès 45° pour la série SSS (ou 1).
Pour l'inclinaison de 45° et pour la simulation SS, la convergence est beaucoup plus longue à atteindre et les déformations plastiques sont assez importantes (le maximum de et_plastique est ainsi 10 fois plus grand que pour la simulation S). Ceci est particulièrement visible au niveau des déformations dans la partie amont de la couche cohésive, comme le montre la figure 12.
La prise en compte d'une loi de perte de résistance, notamment en traction, est certainement plus réaliste, et peut permettre de mieux appréhender des simulations de rupture fragile.

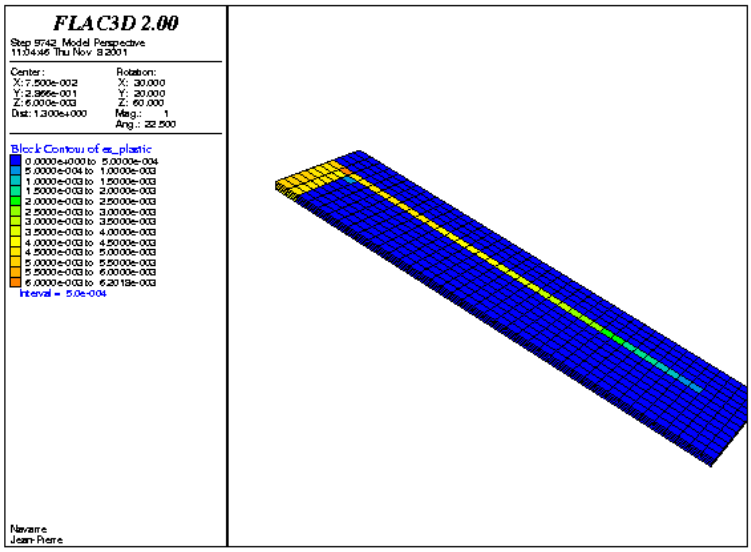


Figure 12 : Etat des déformations plastiques pour la simulation SS et l'inclinaison de 45°

.

4. Conclusions

Si nos simulations semblent cohérentes avec les résultats des expériences, on a cependant pu noter quelques différences (de l'ordre de 5° environ pour la rupture) entre nos simulations et les résultats des expériences. Ceci est la conséquence directe d'une précision insuffisante dans la connaissance des propriétés mécaniques des matériaux utilisés et de la grande variabilité des résistances du matériau cohésif (en fonction de sa mise en place et des contraintes auxquelles il est soumis) . A ceci s'est ajouté le fait que l'on a cherché à reproduire une expérience où les épaisseurs de matériaux sont extrêmement faibles et les phénomènes d'hétérogénéités non exclus .

Cette étude nous a surtout permis d'appréhender et d'évaluer quantitativement un certain nombre de problèmes pratiques de simulation avec Flac3D, par référence à une expérience réelle et pour des conditions similaires à ce que l'on peut rencontrer avec certains manteaux neigeux.

Elle nous a également montré la grande sensibilité des résultats à certaines propriétés mécaniques ; ce qui doit nous inciter à mieux étudier les propriétés mécaniques de la neige y compris à l'échelle microscopique.

Les développements et études comparatives, faits avec ces simulations, nous permettrons surtout de poursuivre notre approche pour une analyse en 3D du manteau neigeux à l'échelle macroscopique et cela dans l'optique de la Prévision du Risque d'Avalanche (PRA).

Chapitre 3 : ***Mécanique de la rupture pour la neige, mesure in situ de la ténacité et modélisation numérique***

D. DAUDON (3S), J. FAILLETAZ (3S), F. LOUCHET (LTPCM)

Résumé

Une avalanche de plaque résulte d'une rupture dans le manteau neigeux à l'interface entre une couche dure (couche supérieure) et une couche fragile. Or, les modélisations faites jusqu'à présent ne prennent pas en compte l'existence de fissures à l'interface entre ces deux couches. Pour palier à ce manque, nous introduisons ici la mécanique de la rupture, utilisé jusqu'à maintenant pour étudier la propagation des fissures dans les métaux. La grandeur physique caractérisant l'aptitude qu'a une fissure à se propager brutalement dans un matériau s'appelle la ténacité. Les contraintes se concentrent au fond de fissure, lorsqu'elles sont supérieures à la ténacité du matériau, la fissure se propage brutalement. Ainsi, avant toutes modélisations numériques globales de la rupture du manteau neigeux, nous avons dû nous faire une idée de la valeur de cette grandeur dans la neige. L'année dernière, Michot et Kirchner mesurèrent pour la première fois la ténacité en mode I (traction) de la neige dans les Vosges.

Nous reprîmes donc leur protocole expérimental afin de pouvoir comparer leurs résultats aux nôtres. Nous avons également tenté de mesurer la ténacité en mode II (cisaillement) en modifiant légèrement le matériel expérimental initial. Notre campagne de mesure se déroula à l'Alpe d'Huez pendant le mois d'avril 2001. La simplicité de l'appareillage nécessaire et la facilité de mesure furent l'atout majeur de cette expérience, surtout en montagne où les conditions sont difficiles. La reproductibilité des mesures dans une même couche du manteau neigeux fut très satisfaisante . Une comparaison avec les résultats de Kirchner et Michot montre que l'ordre de grandeur est respecté, malgré l'existence d'un facteur 2 entre nos deux séries de mesures.

Parallèlement à ces manipulations expérimentales, nous avons effectué des modélisations numériques de l'expérience à l'aide de deux types de codes de calcul :

Un code éléments finis qui utilise la mécanique de la rupture (abaqus) et

un code éléments distincts pour traduire le fait que la neige est un milieu hétérogène composé de grains collés entre eux.

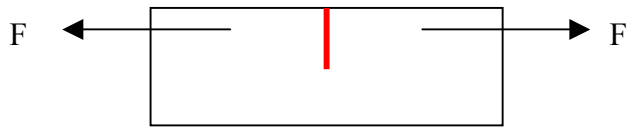
Ces modélisations sont complémentaires : le code EF permet une visualisation des contraintes dans l'échantillon et valide ainsi les hypothèses émises lors de la construction de l'expérience (traction au niveau du fond de fissure). Le code ED, lui, donne qualitativement le chemin de propagation de la rupture.

Ce travail tant numérique que pratique mérite d'être approfondi car il n'est que le premier pas vers une modélisation plus fine du déclenchement des avalanches de plaques.

1 Introduction

La rupture du manteau neigeux stratifié n'est pas encore maitrisée. On admet que lors du déclenchement, une fissure apparaît à l'interface de ces deux couches et se propage créant ainsi une rupture brutale du manteau. L'étude de cette propagation instable de la fissure basale n'a fait l'objet d'étude que très récemment.
Pour traiter ce problème, les scientifiques ont eu, depuis peu, l'idée d'appliquer une théorie bien connue des métallurgistes : la *mécanique de la rupture*. En effet, les métallurgistes étudient depuis longtemps la stabilité d'une fissure dans un métal, notamment pour dimensionner correctement les pièces. En quelques mots, on peut dire que la mécanique de la rupture permet de calculer le facteur d'accumulation des contraintes en tête de fissure. On est ensuite capable de déterminer si cette fissure est stable ou non grâce à une propriété physique intrinsèque du manteau appelée *ténacité*. La ténacité est, en fait, la valeur limite du facteur d'accumulation de contrainte à partir de laquelle la fissure commence à se propager de manière instable. En d'autres termes, la ténacité caractérise la faculté qu'a un matériau à se rompre à partir d'une fissure préexistante.
Trois ténacités peuvent être définies : une ténacité en traction appelée ténacité en mode I (la fissure est perpendiculaire aux contraintes de traction dans le matériau), une ténacité en cisaillement appelée ténacité en mode II (la fissure est parallèle aux contraintes de cisaillement) et une ténacité en cisaillement anti-plan appelée ténacité en mode III.

Le principe de mesure de la ténacité, pour les métaux, est relativement simple :
Dans un premier temps, on crée un échantillon pré fissuré de forme parallélépipédique du matériau à étudier.
On applique ensuite un effort de manière à ce que l'échantillon se rompt totalement. On note F l'effort à appliquer pour propager la fissure.



Mode I
La ténacité en mode I (respectivement en mode II ?), notée K_{1c} (respectivement K_{IIc} ?) s'obtient ensuite par la formule :

$$K_{1c}=\sigma\sqrt{\pi a} \quad K_{IIc}=\tau\sqrt{\pi a}$$

où σ, τ sont les contraintes dues au chargement
a est la longueur de la fissure à partir de laquelle l'instabilité se propage
Notons que le rayon de courbure de fond de fissure à une influence sur la mesure de la ténacité. En effet, plus le fond de fissure est arrondi, moins les contraintes vont se concentrer en tête de fissure. Il sera donc plus difficile de propager une fissure arrondie qu'acérée.
Mode II : même principe ????
Il y aura donc rupture brutale si la concentration de contrainte, sous un chargement donné, dépasse Kc, la ténacité du matériau.

Cette indication pourra notamment être introduite dans les modèles éléments finis utilisés pour la modélisation numérique.

2. Campagne de mesure expérimentale

Une campagne expérimentale a été menée lors de la saison d'hiver 2000/2001 au col du lac Blanc à l'Alpe d'Huez. Elle avait pour but de mesurer la ténacité de la neige en mode I (KI, traction) ainsi qu'en mode II (KII, cisaillement). Les mesures en mode I étaient motivées par une campagne similaire menée dans les Vosges par Michot et Kirchner en 1999. Elle ne portait cependant que sur la mesure de la ténacité en mode I sur des neiges récentes et légères (<200 kg/m3) et des neiges humides et transformées très denses (>400 kg/m3). Ces neiges sont donc très différentes structurellement de la neige typique qui intervient dans les avalanches de plaque. L'objectif initial de notre expérience était donc de valider les mesures et le protocole de Michot et Kirchner et également, sur le même principe, de procéder à des essais en mode II en utilisant différemment le même dispositif.
Nous souhaitions donc, dans un premier temps, reproduire exactement l'expérience déjà menée par Michot et Kirchner afin de pouvoir comparer nos mesures.

Les mesures en mode II par contre avait pour but de vérifier les prédictions d'un modèle proposé par l'un de nous (Louchet 2001), selon lequel la ténacité en mode II devraient être influencée par le recollage possible des grains, et avoir des valeurs sensiblement supérieures à ce que l'on pourrait déduire des valeurs de KI.

2.1 Dispositif

Une boîte profilée en forme de U servant de moule a été construite de façon à ce que les échantillons de neige prélevés fassent 20cm*10cm*50cm (voir Figure . 1). Pour des soucis de poids, la boîte fut construite en matière plastique de 4mm d'épaisseur. Le dispositif expérimental complet, d'un poids d'environ 10kg, était donc facilement transportable dans un sac à dos de montagne.

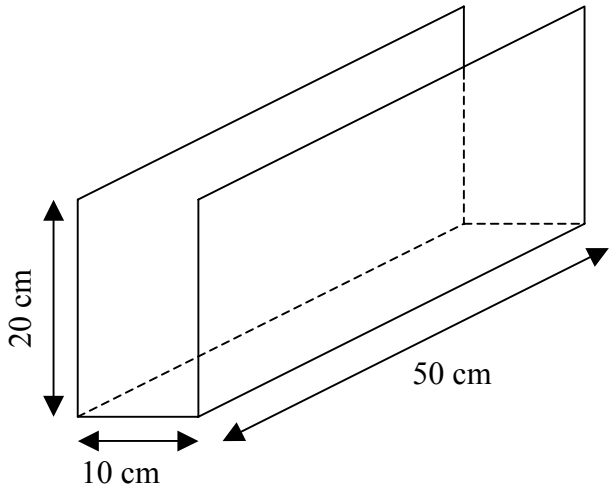


Figure 1 : Dispositif expérimental théorique

2.2 Protocole expérimental

Sur le terrain, cette boîte est ensuite délicatement rentrée dans le manteau neigeux parallèlement aux strates. Elle est alors soigneusement dégagée et transportée sur un plan de travail horizontal. La poutre de neige ainsi isolée était mise en porte-à-faux par glissement dans son moule puis lentement découpée verticalement au bord de la boîte à l'aide d'une scie. Voir photo scannées du mode opératoire en annexe 1.

Remarque : Cette vitesse, bien que lente, reste néanmoins supérieure à une vitesse de déformation de 10^{-4} s^{-1}, vitesse de transition ductile/fragile (pour assurer une rupture fragile).

On notait alors la longueur de la fissure critique qui entraîne la chute du bloc (donc la longueur à partir de laquelle la rupture se propage de manière fragile). Cette longueur critique peut ensuite être reliée à la ténacité par la formule donnée par Kirchner :

$$K_{Ic}=3\pi^{1/2}.F(a_{cr}/b).\left[WDa_{cr}^{1/2}\right]/b^{2} \qquad (1)$$

où $F(a_{cr}/b)$ est approximativement égal à 1 (par calcul éléments finis),

W est le poids de la neige en porte-à-faux,

D est la longueur du porte-à-faux,

a_{cr} est la longueur critique de fissure,

b est la hauteur de la poutre (ici 20cm).

2.3 Problèmes et améliorations

Plusieurs problèmes nous sont apparus lors de la mise en place expérimentale en plus des classiques conditions nivo-météorologiques difficiles :

Lors de la mise en place de la boîte dans des neiges relativement dures (1 doigt), notre profilé plastique ne put supporter les efforts qui lui étaient imposés. Nous avons donc du rigidifié la boîte en ajoutant une entretoise biseautée (voir Figure 2). Ce rigidificateur permis en outre de guider le profilé dans la neige ce qui évita le flambement des bords (ils avaient le plus souvent tendance à partir vers l'intérieur) (voir Figure 3).

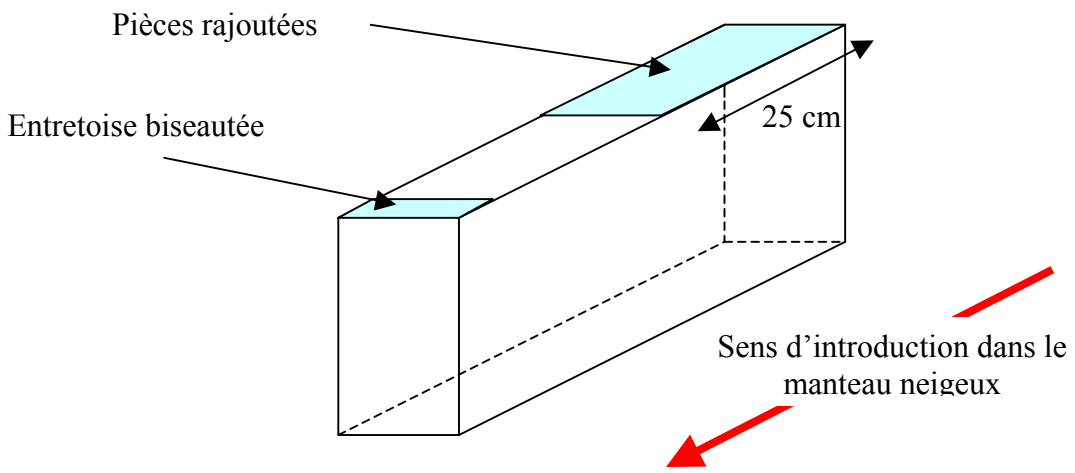


Figure 2 : Dispositif utilisé (matière plastique de 4mm d'épaisseur)

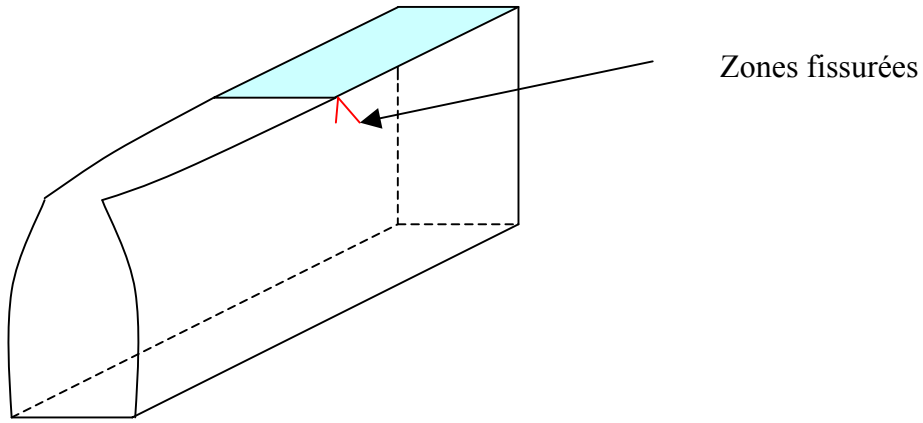


Figure 3 : Problème de flambement des bords

Pour des neiges fraîches, l'appareillage s'averra inutilisable : le bloc de neige se rompt avant d'atteindre un porte-à-faux suffisant pour démarrer l'expérience.

Il est donc nécessaire de trouver de la neige frittée déposée par le vent ayant une résistance suffisante pour que le bloc en porte-à-faux ne se rompe pas de lui-même avant d'atteindre sa place. De plus, il fallait trouver des zones relativement homogènes où les strates étaient assez épaisses (supérieures à 20 cm, la hauteur de la boîte). Après plusieurs tentatives infructueuses, nous trouvâmes une pente peu inclinée située à environ 2800 m, orientée SO à l'abri du vent dominant. Comme le vent souffle toujours énormément la-haut, dès qu'une chute de neige se produit, le transport de neige par le vent est très important, ce qui fait que l'accumulation sur cette pente était considérable. Le manteau neigeux était donc composé d'importantes couches de grains fins. De plus, cette pente est située hors des pistes de ski. Elle reste donc vierge toute l'année et n'est donc pas tassée.
Une petite plaque a aussi été utilisée pour pousser de façon homogène le bloc de neige dans sa gouttière, le glissement de l'échantillon dans la boîte étant une étape importante à mener précautionneusement (voir Figure 4).

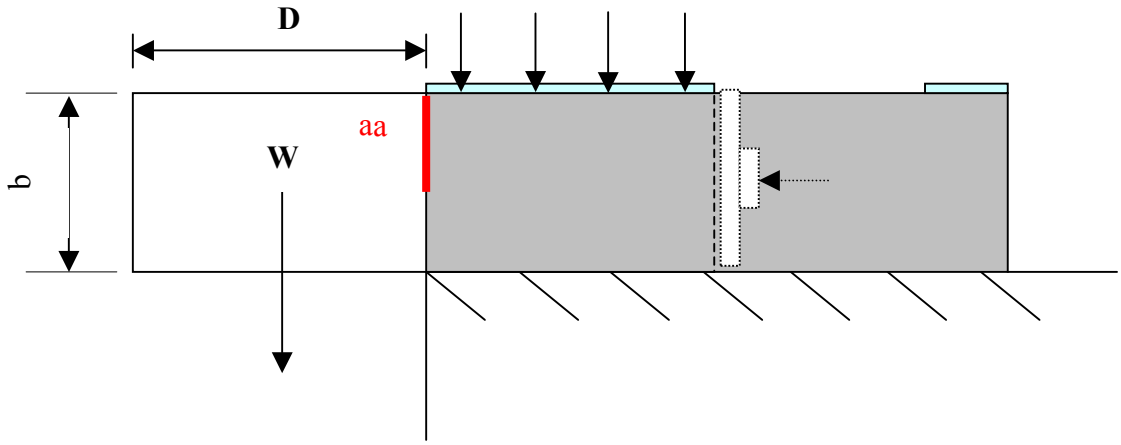


Figure 4 :Dispositif final

2.4 Dispositif expérimental de la mesure de la ténacité en mode II :

Cette seconde expérience s'inspire de la première, dans le sens où nous avons utilisé la même boite comme point de départ.
Pour l'utiliser en cisaillement et non en traction, nous avons eu l'idée de la redresser et de pratiquer la fissure en son milieu en partant du sommet (voir Figures 5 et 6).

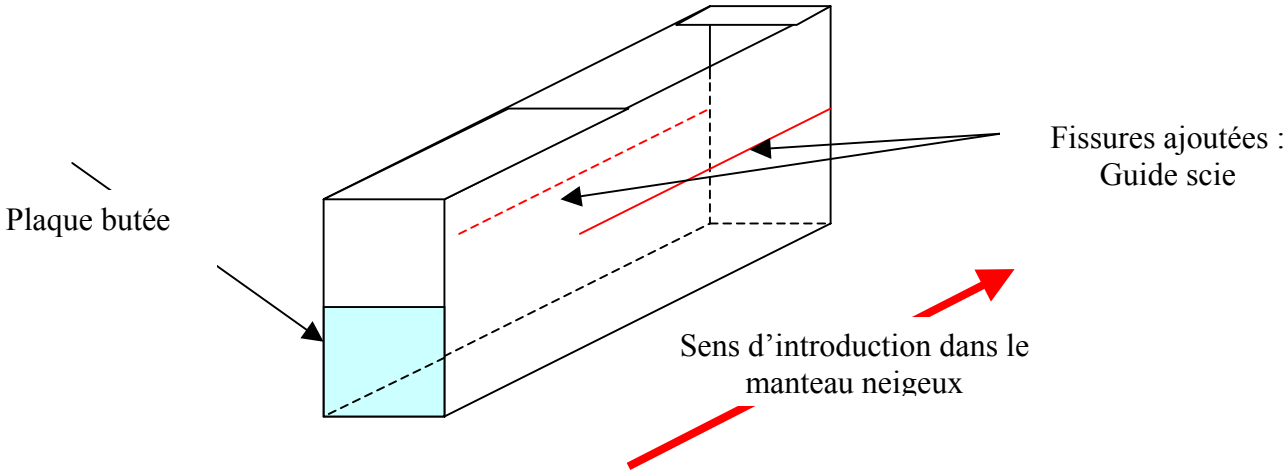


Figure 5 : Boite expérimentale pour mesurer la ténacité en mode II

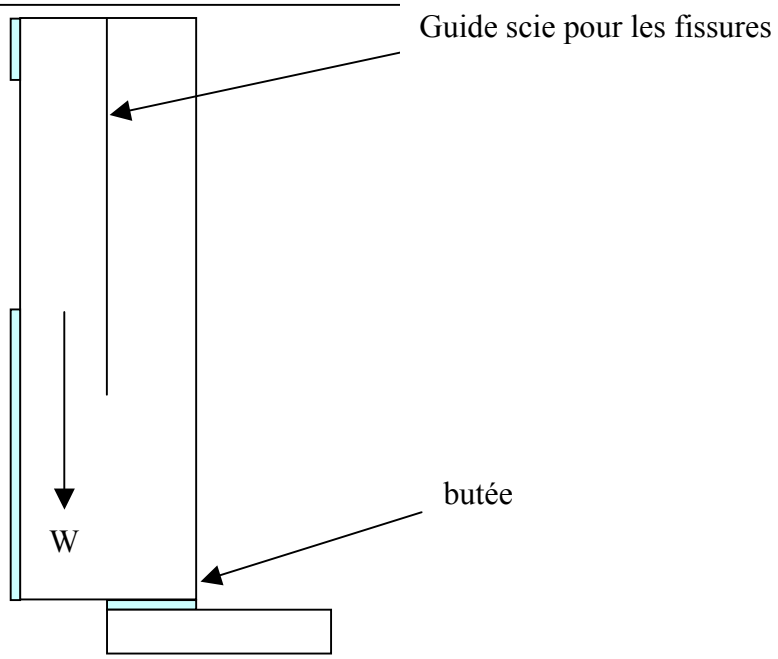


Figure 6 : Mise en place expérimentale

3. Modélisation par calculs Eléments Finis des dispositifs

Les appareillages développés sont donc destinés à mesurer les ténacités de la neige en mode I (traction pure) et II (cisaillement pur).
La sollicitation appliquée (la gravité) ne permet pas de garantir les modes purs. Elle entraîne forcément l'apparition d'un mode mixte à la proximité de la fissure. Sur le terrain, même en sollicitation pure, l'apparition d'un mode mixte serait inévitable de part la variabilité spatiale du matériau, et notamment sa structure « layered ». Nous ne considérerons pas cette dernière cause de mixité, faisant appel à des théories plus pointues sur les « bi-matériaux ».
Il convient donc de vérifier pour chacun des appareillages , si a proximité du fond de la fissure, le mode souhaité est bien majoritaire.
Dans un premier temps, la modélisation est destinée à vérifier la direction des contraintes principales à proximité du fond de fissure
Dans un deuxième temps, on a modélisé les expériences réelles et extrait à l'aide des intégrales de contour (cf annexe jointe) les facteur d'intensité de contraintes correspondants a chaque essai.
On re-verifie ainsi la validité de l'appareil quant au mode de fissuration obtenu en comparent les facteurs en mode I et II entre eux.
Le calcul est cependant très simplifié par l'hypothèse de comportement élastique linéaire du matériau neige. En effet, même si des calculs sont possibles en plasticité voire en viscoelasticite, dans un premier temps pour nous familiariser avec le code, nous avons réduit le comportement à l'élasticité linéaire.

3 1 Vérification des dispositifs

Différents calculs ont été fait sur les géométries des essais, en contraintes planes. Les propriétés physiques choisies sont les suivantes :
masse volumique 200 k/m3, module d'Young = 17Mpa, coefficient de poisson : 0.1.
Pour chacun des calculs, on extrait le résultat concernant les contraintes principales, et notamment leur directions principales au voisinage du fond de fissure .

On vérifie notamment pour le mode I que :
- la contrainte majeure est en traction
- la direction de cette contrainte est orthogonale à celle de la fissure
- la contrainte mineure est en norme inférieure à la contrainte majeure
- la contrainte de cisaillement maximum $(\sigma_{maj}-\sigma_{min})/2$ est inférieure à la contrainte majeure

La Figure représente les contraintes principales pour l'essai avec porte a faux de 25 cm et fissure critique de 9 cm ; La Figure concerne l'essai avec porte a faux de 10 cm et fissure critique de 14 cm.

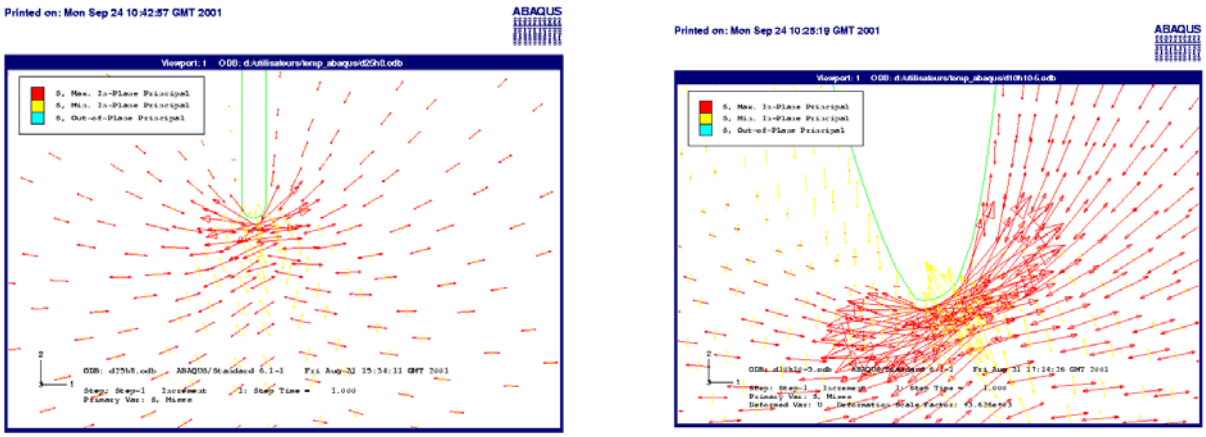


Figure 7 direction des contraintes principales
Image de gauche : porte à faux 25 cm, image de droite : porte à faux de 10 cm

Pour le mode II, on vérifie que la direction de la contrainte de cisaillement maximum est bien parallèle à la direction de la fissure. Cette direction est théoriquement la médiatrice des directions de contraintes majeures et mineures.

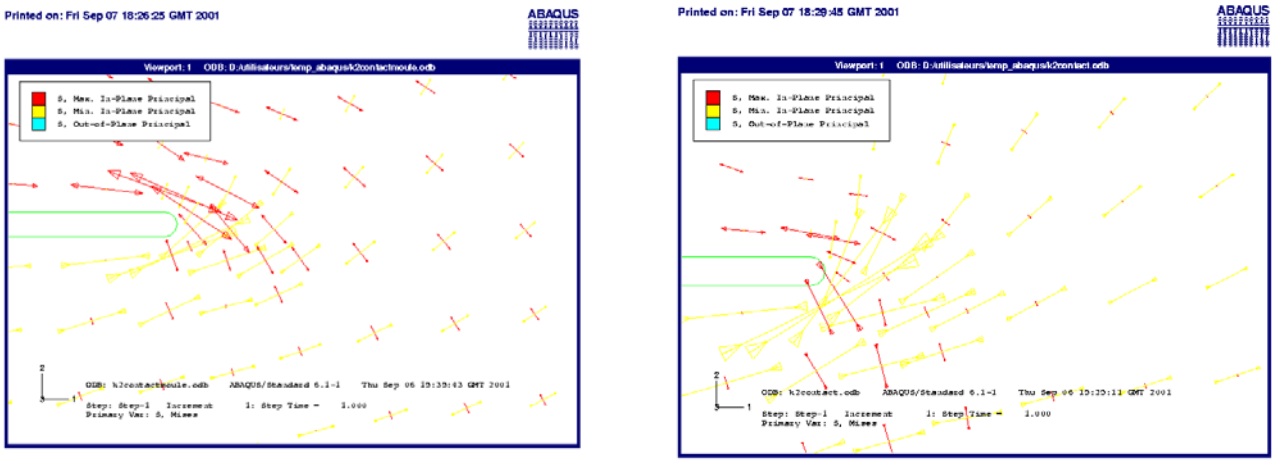


Figure 8 : Contraintes principales sur éprouvette K2 (la gravité est horizontale)
a) sans guidage du moule *b) avec guidage du moule*

Enfin la figure 8 concerne l'essai en mode II, en prenant en compte la présente du moule. La gravité dans ce calcul est appliquée horizontalement.
On trouvera en annexe 2 les contraintes principales concernant les différents bras de levier expérimentaux testes.

3.2. Extraction des coefficients de concentrations de contraintes

La présence d'une fissure entraîne la concentration des contraintes au voisinage du fond de la fissure. Cette concentration est caractérisée par des facteurs de concentrations de contraintes dans chacun des modes de fissurations possible , soit en 2D : K1 et K2.
Ces coefficients ne dépendent que du type de chargement, de la géométrie de l'éprouvette, et de la singularité. Théoriquement, lorsque la ténacité critique K1c ou K2c du matériau est inférieure à K1 ou resp. K2, la fissure se propage, et conduit à la ruine de la structure.
L'extraction des coefficients de concentration de contrainte se fait à l'aide des intégrales de contour. La théorie est donnée en annexe 3.

Le tableau ci dessous fournit les différents résultats obtenus :

D porte à faux en cm	a_c longueur de fissure critique en cm	K1 en	K2 en	K1 expérimental pour mémoire	Angle de propagation en ° par rapport a la direction initiale
25	8	4566	-507	9220	12
25	10	6056	-384	9780	7
25	15	17280	-1055	10040	-6.6
20	9.5	3550	-480	6360	15
15	10.5	2288	-440	3800 à 4060	20
10	15	2720	-299	3800	12
10	10	976	-350	1900	33
Eprouvette pour K2 avec guidage	30	-71	-1615		70
Sans guidage	30	-2510	-2910		70

La comparaison des colonnes K1 et K2 montre clairement que ce sont les essais avec les plus grand porte-à-faux qui fournissent les meilleures éprouvettes pour mesurer K1c. Le rapport entre les 2 coefficients est au minimum de 10, ce qui semble suffisant.
Par contre,on remarque que les essais effectués avec un porte a faux de 15 cm ou moins se rapproche plus d'un mode mixte et il devient plus aléatoire d'être certain du mode de rupture de l'éprouvette.

Pour l'éprouvette de mesure de K2c, les 2 calculs effectués montre que c'est l'éprouvette guidée qui fournit le meilleur rapport K2/K1. Elle correspond effectivement à ce qui a été réalise sans succès sur le terrain. Il convient de trouver un autre mode opératoire ou un autre type d'essais puisque malgré des perspectives de calcul favorable, on a pu avoir de résultats.
Sans guidage par le moule plastique, le calcul n'est pas favorable et, sur le terrain l'éprouvette se rompt avant d'effectuer le test, rien que pendant les manipulations.

4. Résultats de nos mesures :

Expo pente : SO
Altitude : 2800 m
Jeudi 12 av

W=mv*g*D*b

Neige : grain fin

D (cm)	a_{cr} (cm)	T (°C)	mv (kg.m^{-3})	K_{Ic} (Pa.m$^{1/2}$)
25.00	8.00	-4.00	200.00	922.11
25.00	9.00	-4.00	200.00	978.05
25.00	9.50	-4.00	200.00	1004.85
20.00	9.50	-3.00	200.00	643.10
20.00	9.30	-3.00	200.00	636.30
20.00	9.30	-3.00	200.00	636.30
20.00	9.30	-3.00	200.00	636.30
20.00	9.00	-2.50	200.00	625.95
15.00	10.50	-3.00	200.00	380.31
15.00	12.00	-4.00	200.00	406.57
15.00	10.50	-4.00	200.00	380.31
15.00	10.50	-3.50	200.00	380.31
15.00	11.00	-3.50	200.00	389.26
10.00	14.00	-3.00	200.00	195.17
10.00	15.30	-4.00	200.00	204.03
10.00	12.50	-3.50	200.00	184.42
10.00	15.00	-3.50	200.00	202.02
		-3.44		517.96

Vendredi 13 av

Neige : grain fin b boite apres 2eme essai

D (cm)	a_{cr} (cm)	T (°C)	mv (kg.m^{-3})	K_{Ic} (Pa.m$^{1/2}$)
20.00	10.50	-4.50	200.00	676.10
20.00	11.00	-4.50	200.00	692.01
20.00	8.00	-3.70	200.00	590.15
20.00	11.00	-2.00	200.00	692.01

Mercredi 18 av

Neige : grain fin W pas mesuré ypothese : W=250

D (cm)	a_{cr} (cm)	T (°C)	mv (kg.m^{-3})	K_{Ic} (Pa.m$^{1/2}$)
26.00	10.00	-3.50	250.00	1393.85
25.00	10.70	-3.50	250.00	1333.03
25.00	10.50	-3.50	250.00	1320.52
25.00	10.70	-3.50	250.00	1333.03
20.00	12.50	-3.50	250.00	922.11
20.00	12.50	-3.50	250.00	922.11
15.00	15.50	-3.50	250.00	577.59
10.00	13.70	-3.50	250.00	241.34
				1005.45

- Incertitude sur les mesures :

On a la formule :

$$K_{Ic}=3\pi^{1/2}.F(a_{cr}/b).\left[WDa_{cr}^{1/2}\right]/b^{2} \qquad (1)$$

avec $W=mgDb$ (2)

Donc, en combinant (1) et (2), il vient :

$$K_{Ic}=3\pi^{1/2}.F(a_{cr}/b).\left[mgD^{2}a_{cr}^{1/2}\right]/b$$

Soit, en passant au logarithme :

$$\ln(K_{Ic})=\frac{1}{2}\ln(\pi)+\ln\left(F(a_{cr}/b)\right)+\ln(m)+\ln(g)+2\ln(D)+\frac{1}{2}\ln(a_{cr})-\ln(b)$$

En différentiant, on obtient finalement :

$$\frac{\Delta K_{Ic}}{K_{Ic}}=\frac{\Delta F}{F}+\frac{\Delta m}{m}+2\frac{\Delta D}{D}+\frac{1}{2}.\frac{\Delta a_{cr}}{a_{cr}}+\frac{\Delta b}{b} \qquad (3)$$

On avait une imprécision maximale sur le porte-à-faux de 1cm et, sur un même type de neige, la longueur critique variait d'environ 1cm.

$\frac{\Delta D}{D}\approx\frac{1}{25}\approx 0{,}04$ et $\frac{\Delta a_{cr}}{a_{cr}}\approx\frac{1}{10}\approx 0{,}1$

Quant à la masse, l'imprécision due à la balance était de 5g soit :

$$\frac{\Delta m}{m}\approx\frac{5}{80}\approx 0{,}0625$$

Finalement, on a :

$$\frac{\Delta K_{Ic}}{K_{Ic}}=0{,}0625+2*0{,}04+0{,}5*0{,}1\approx 0{,}20$$

L'erreur sur la mesure de la ténacité sera donc d'environ 20%

5. Analyse et comparaison avec les résultats de Michot/Kirchner :

5.1 Ténacité en mode I

Il est dommage de ne pas pouvoir mener les expériences sur divers type de neige. En effet, il nous a été très difficile de changer de type de neige étudiée :

- La boite ne rentre pas dans des neiges trop dures à moins de forcer (au risque de casser l'appareillage) et donc de tasser l'échantillon prélevé.
- Une neige fraîche s'effrite et ne tient pas lors de la mise en place de l'échantillon en porte-à-faux.

Nous avons donc cherché des neiges frittées avec une bonne tenue mécanique. Lorsque la poutre de neige se rompait avant d'atteindre les 25 cm de porte-à-faux, nous refaisions l'expérience en prenant, cette fois ci, un porte-à-faux moins grand. De cette façon, nous pouvions tester des neiges aux propriétés mécaniques plus étendues puisque la formule de la ténacité donnée par Kirchner tient compte du porte-à-faux.
Il est à noter que les mesures de ténacité n'utilisant que 10 cm de porte-à-faux semblent être nettement moins élevées. Dans ce cas, il semble que les forces s'appliquant au niveau de la fissure ne sont plus des efforts de traction. Il doit y avoir aussi un peu de cisaillement, ce qui fausse la formule utilisée.

Il est très encourageant de remarquer que, sur un même type de neige, les expériences furent assez bien reproductibles. La longueur de fissure critique ne variait que de 5mm autour de la valeur moyenne, ce qui, à la vue de la variabilité locale des propriétés physiques du manteau neigeux, n'était pas évident à priori.
Une comparaison avec les résultats de Kirchner et Michot montre que l'ordre de grandeur est quand même respecté, mais il existe un facteur 2 entre les deux séries de mesures, nos ténacité étant plus fortes que celles mesurées par ces auteurs.
Deux explications pourraient justifier cet écart important :
Tout d'abord, cela pourrait venir de la structure même de la neige que nous avons testée : ce n'était que des strates de bonne cohésion composées de grains fins. Or, Kirchner et Michot ont étudié d'autres types de neige sur une plage de densité beaucoup plus importante que la notre.
On pourrait se demander si cet écart important entre ces 2 series de mesures ne pourrait pas provenir de la température de la neige, qui était de -3^0 pour nos expériences, alors qu'elle était de -1^0 dans celle de Michot et Kirchner. Mais malheureusement, cette explication ne va pas dans le bon sens: toutes choses égales par ailleurs, la ténacité doit être d'autant plus faible que la neige est froide (du moins en mode I).
Une autre explication possible, plus vraisemblable, est que la neige testée, uniquement constituée de strates composées de grains fins, est sensiblement différente de celle de Michot et Kirchner. La neige étant un milieu très mal défini, et dont la densité seule ne suffit pas à définir les propriétés, on ne peut comparer que des mesures faites sur la même neige. C'est l'explication que nous retenons pour l'instant.

5.2 Ténacité en mode II

La transposition en mode II de ces mesures de ténacité n'a pas donné de résultats: le bloc, même scié, ne tombait pas, même si la fissure se prolongeait apparemment jusqu'en bas. L'inversion du sens de la préfissure(à partir du bas) n'a pas donné davantage de résultats.
Une explication possible est que la ténacité soit effectivement nettement plus élevée en mode II qu'en mode I. Nous avons montré en effet (ref CRST et Nice ci dessous) que ce mode pouvait permettre un recollage dynamique des grains, ce qui est exclu en mode I, et ce qui permet de prévoir une ténacité en mode II (KII) supérieure que celle qui pourrait être déduite d'un calcul élastique à partir de KI. De plus, KII devrait théoriquement passer par un maximum à des températures légèrement inférieures à 0^0. C'est d'ailleurs cette prédiction théorique qui avait motivé notre campagne de mesures en mode II. Il semble aussi que le bloc ait tendance à coller à la boîte. Bien que ce même phénomène ait été aussi observé dans les mesures en mode I, il faut rester prudent dans nos conclusions, et revoir notre dispositif expérimental.

Nous avons effectué nos essais dans une couche homogène du manteau neigeux. Or, nous savons que, la plupart du temps, les zones où se propagent les fissures sont situées au niveau d'une

interface entre deux couches ayant des propriétés mécaniques différentes. Notre expérience ne mesurerait donc pas la ténacité « réelle » mais la ténacité du matériau homogène (non stratifié).

6. Modélisation numérique par la méthode des Eléments Discrets

La neige est un matériau complexe qui ne cesse d'évoluer dans l'espace et dans le temps. Plusieurs approches peuvent être envisagées pour sa modélisation : On peut considérer la neige comme un milieu continu équivalent et ainsi faire des calculs par la méthode des éléments finis. On peut aussi supposer que la neige est une « mousse » de glace et donc utiliser la mécanique des milieux cellulaires (méthode prônée par Kirchner) ou utiliser le fait que la structure de la neige soit granulaire cohésive (grains fins) dans la plaque mue par l'avalanche.
Du fait de cette dernière propriété, des essais numériques ont été menés à l'aide d'un code éléments discrets spécialement adapté à des milieux granulaires cohésifs. Ce code, appelé grain, est actuellement développé au Laboratoire 3S. Son principe est relativement simple :
Dans un premier temps, il considère un ensemble de particules circulaires de diamètres différents, chacun de ces éléments (disque) étant indéformable. Ces particules sont empilées et on applique à l'ensemble hétérogène ainsi formé une déformation.
Il gère ensuite tous les contacts entre les grains d'un point de vue cinématique. Il prend donc en compte les lois de contacts (chocs, frottements) entre les divers éléments.
Ce code arrive donc bien à prendre en compte le caractère désordonné de la neige (voir figure 8) :

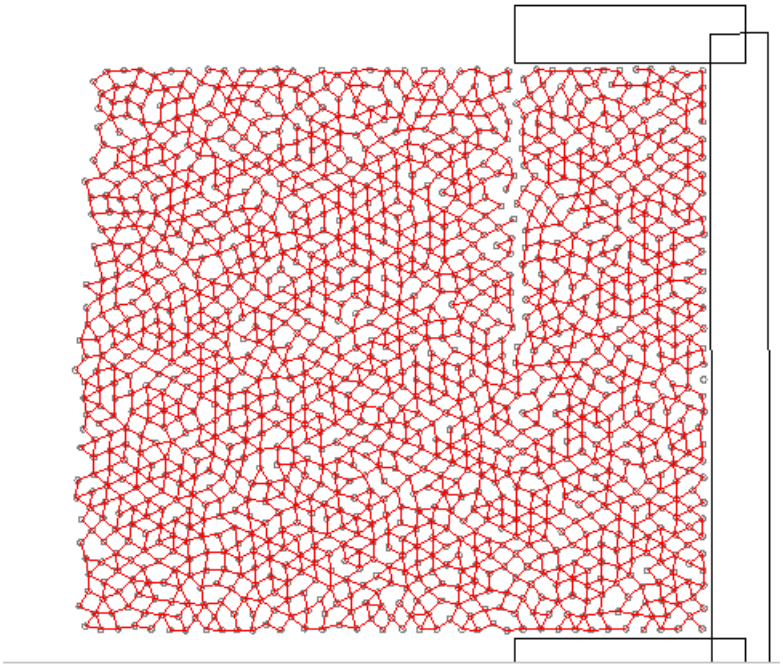


Figure 8 : Modélisation d'un échantillon de neige à l'aide du code grain (trait rouge = liaison)

Ces modélisations numériques MED avaient pour but de reproduire les expériences menées sur le terrain et de vérifier l'allure des lignes de fracture de nos échantillons.
Les résultats sont satisfaisants. Voir photo scan
Les deux essais (mode I et II) ont été reproduit.

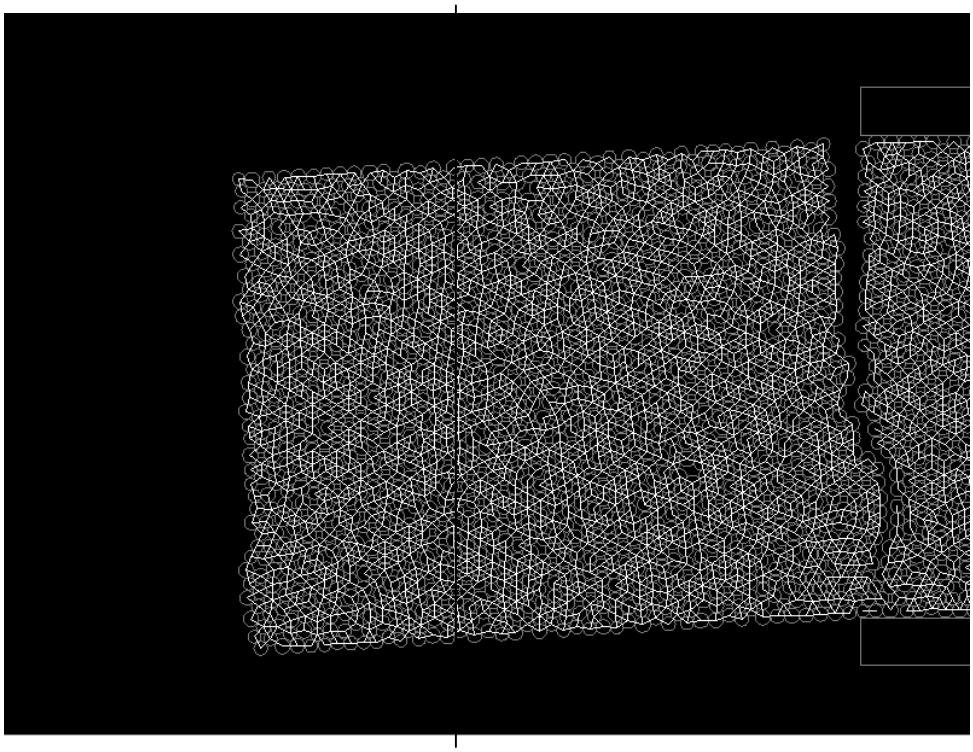


Figure 9 : Résultats des calculs de rupture d'un échantillon

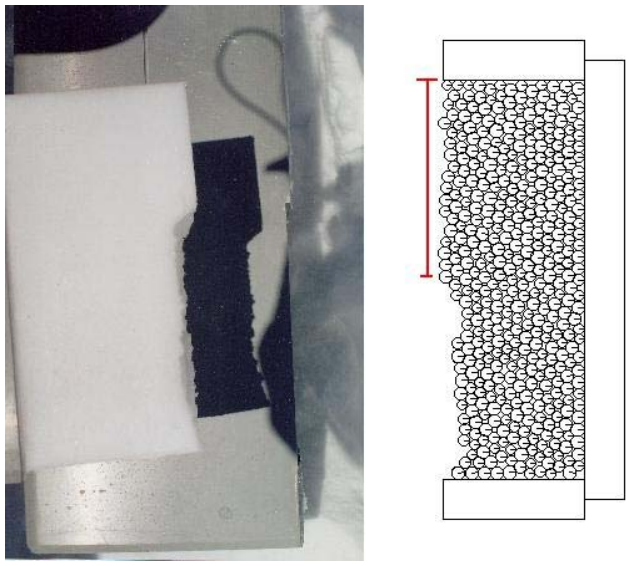


Figure 10 : Comparaison des résultat expérimentaux et calculs Eléments Discrets

L'expérience de la mesure de la ténacité en mode II a été reproduite. Il s'avère que, lorsqu'on applique une force de cisaillement a un échantillon, le milieu semble être dilatant, ce qui laisse penser que le fait de propager une fissure aurait tendance à « plaquer » l'échantillon sur une face de la boîte d'essai. Ce caractère dilatant augmenterait donc le « collage » de l'échantillon à la boîte…(voir Figure . 11)

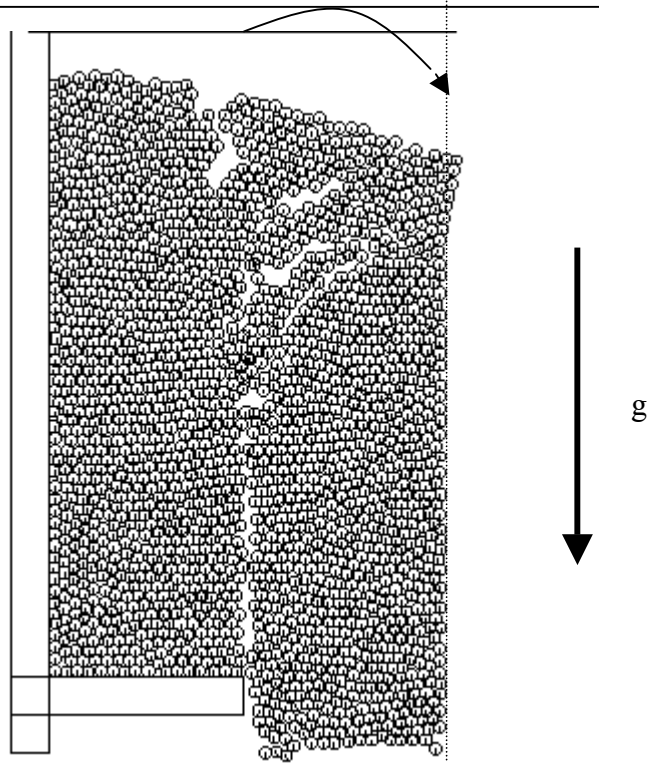


Figure 11 : Plaquage de l'échantillon contre les parois de la boite

7. Conclusion et perspectives

Les résultats des mesures de ténacités obtenus sont très encourageants. L'accent doit être mis sur l'excellente reproductibilité de nos mesures ce qui ne paraissait pas évident à première vue.
Du point de vue expérimental, cette méthode de mesure semble être bien adaptée à des neiges de type grain fin. En effet, la densité est relativement faible (environ 200 kg/m3) ce qui permet à la boîte de facilement pénétrer dans le manteau neigeux. De plus, la cohésion de ce type de neige étant importante, il n'y a pas de problème de mise en porte-à-faux de la poutre.
Par contre, cette expérience semble très difficilement faisable sur d'autres types de neige qu'ils soient plus denses (impossibilité de pénétrer l'appareillage dans la neige) ou moins denses (rupture de l'échantillon avant le test).
Il est regrettable que notre expérience sur la mesure de la ténacité en mode II n'ait pas abouti. Nous allons donc poursuivre notre réflexion sur cet épineux problème : la mesure du mode II seule paraissant difficile, nous nous orientons plutôt sur une mesure couplée des deux ténacités critiques.
Les premiers calculs en mécanique de la rupture , effectués à l'aide des éléments finis on permis de vérifier le bien fonde des essais ;
Le code Abaqus permet de simuler la propagation de la fissure au sein d'un matériau homogène et élastique, c'est ce que nous nous attacherons a faire par la suite ; Il fallait néanmoins obtenir quelque données sur les paramètres réels du matériau neige a introduire dans les modélisations numériques.
Les simulations à l'aide du code éléments discrets sont particulièrement encourageantes du point de vue de la phénoménologie, car elle ont reproduit assez fidèlement les schémas de ruptures observes sur le terrains ; Il reste néanmoins toute une réflexion théorique a effectues pour le passage « mécanique des milieux granulaires-mécanique de la rupture ». En effet, il est nécessaire de connaître les propriétés de la neige au niveau du grain (rupture des ponts) alors que les ténacités critiques mesurées sont a l'échelle macroscopique. La calage de l'un vers l'autre reste à développer

Références et Valorisation scientifique

F. Louchet 2001 Creep instability of the weak layer and natural slab avalanche triggerings. Cold Regions Science and Technology, in press (2001)

F. Louchet and D. Dendievel 2001 Evolution of snow creep stability close to the melting point XXVI General Assembly of the European Geophysical Society, Nice (F), 25-30 mars 2001

Kirchner, Michot, Suzuki 2000 Fracture thoughness of snow in tension Philisophical Magazine A, vol 80,N°5, p1265-1272.

Louchet 2000,A transition in dry snow slab avalanche triggering modes, Annales de glaciologie, vol 32,Symphosium on Snow, Avalanches and Impact of the Frest Cover, Innsbruck,Austria,22-26 may 2000, p2285-289

A paraître

Posters pour le colloque des 30 ans de l'ANENA
- Mécanique de la rupture fragile du MN,
- Un modèle simple d'écoulement de la neige et de déclenchement spontané d'avalanche,
-

Fête de la science 2001 :
-poster « mesurer la neige ? » et démonstration des appareillages

second international Biot Conference aout 2002 Grenoble
Brittle fracture mechanics of snow: in situ testing and numerical modeling
J Faillettaz, D. Bonjean, D. Daudon, F. Louchet

The International Conference on Structural Integrity and Fracture 25th - 28th September 2002 Perth WA, Australia
Snow toughtness : discret elements modeling and in situ measurements
J Faillettaz, D. Bonjean, D. Daudon,F. Louchet

Alert 2001 Aussois octobre 2001
Rupture fragile de la neige , mesures in situ et modelisation elements discrets
J Faillettaz, D. Bonjean, D. Daudon,F. Louchet

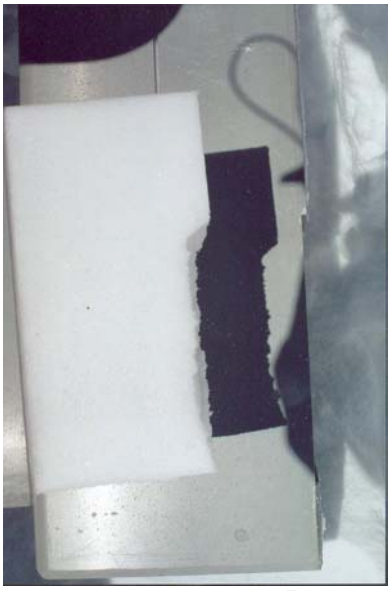
Annexe 1 : protocole expérimental

Insertion de la boîte dans le manteau neigeux

Dégagement de l'échantillon de neige

Mise en porte-à-faux de l'échantillon de neige

Différentes lignes de ruptures :

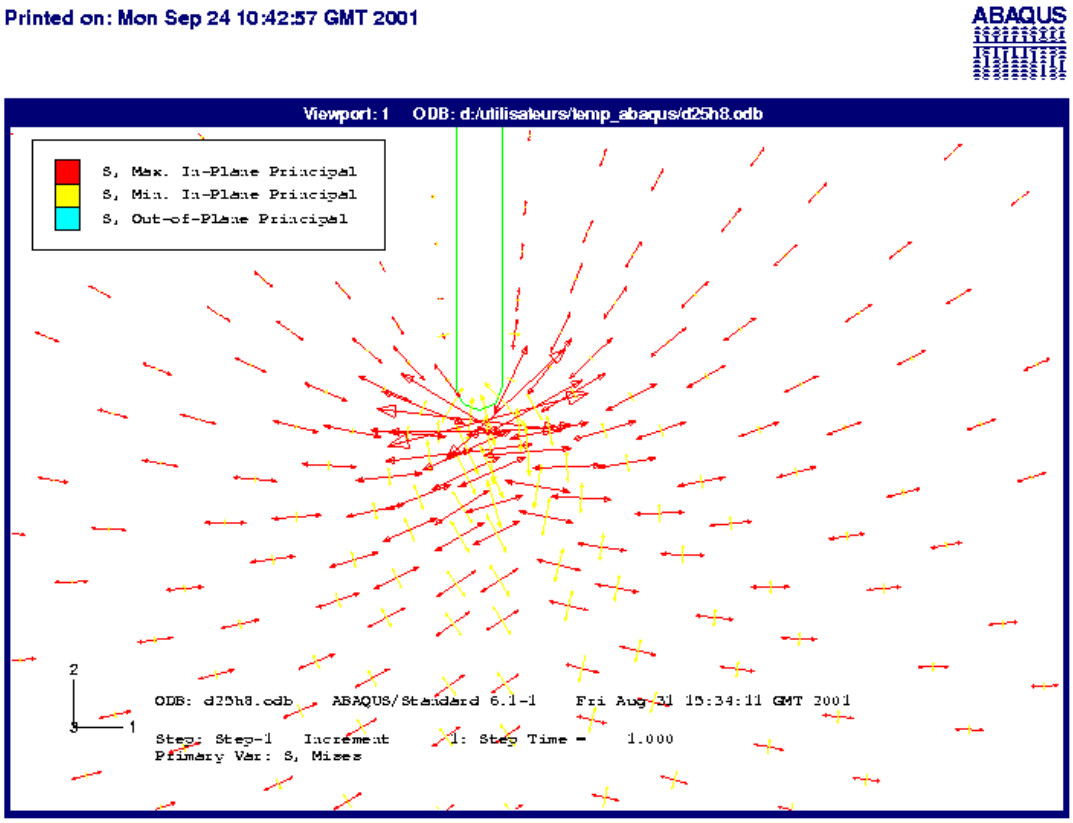


Rupture pour une fissure au bord de la boîte

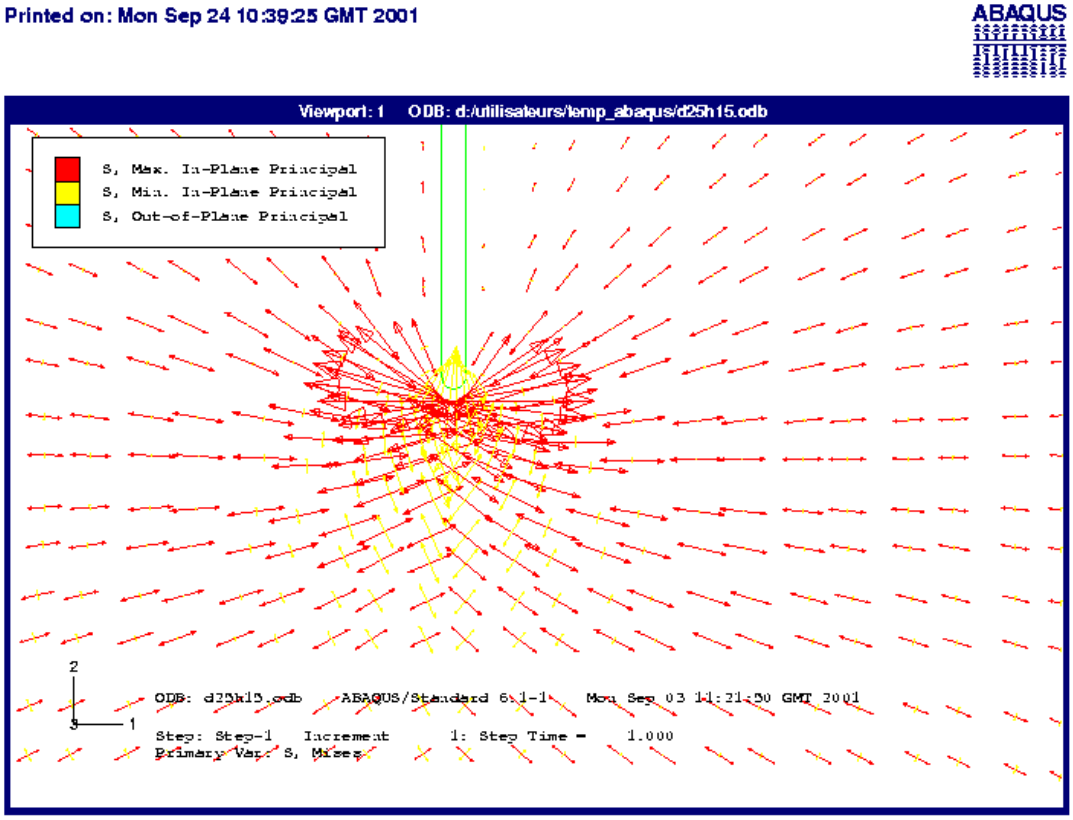
Rupture pour une fissure éloignée du bord de la boîte

Annexe 2 : Directions des contraintes principales (image inférieure) au voisinage du fond de fissure

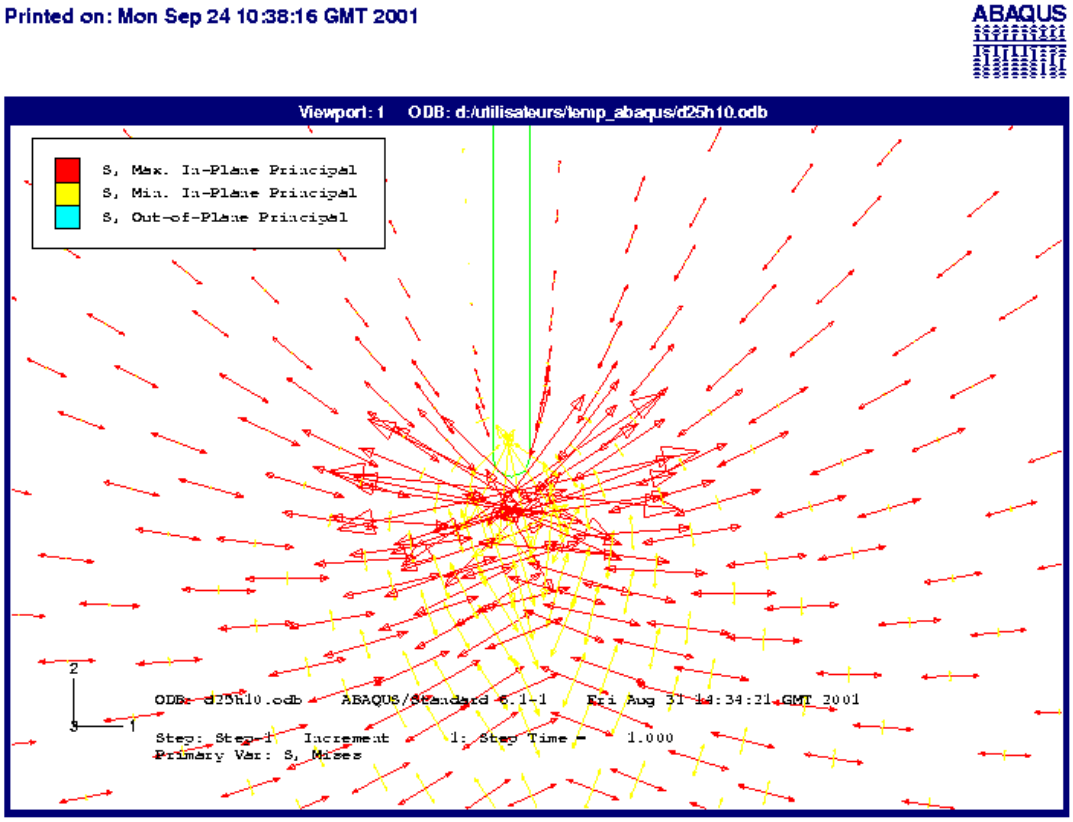
Porte à faux 25 cm, fissure 15 cm



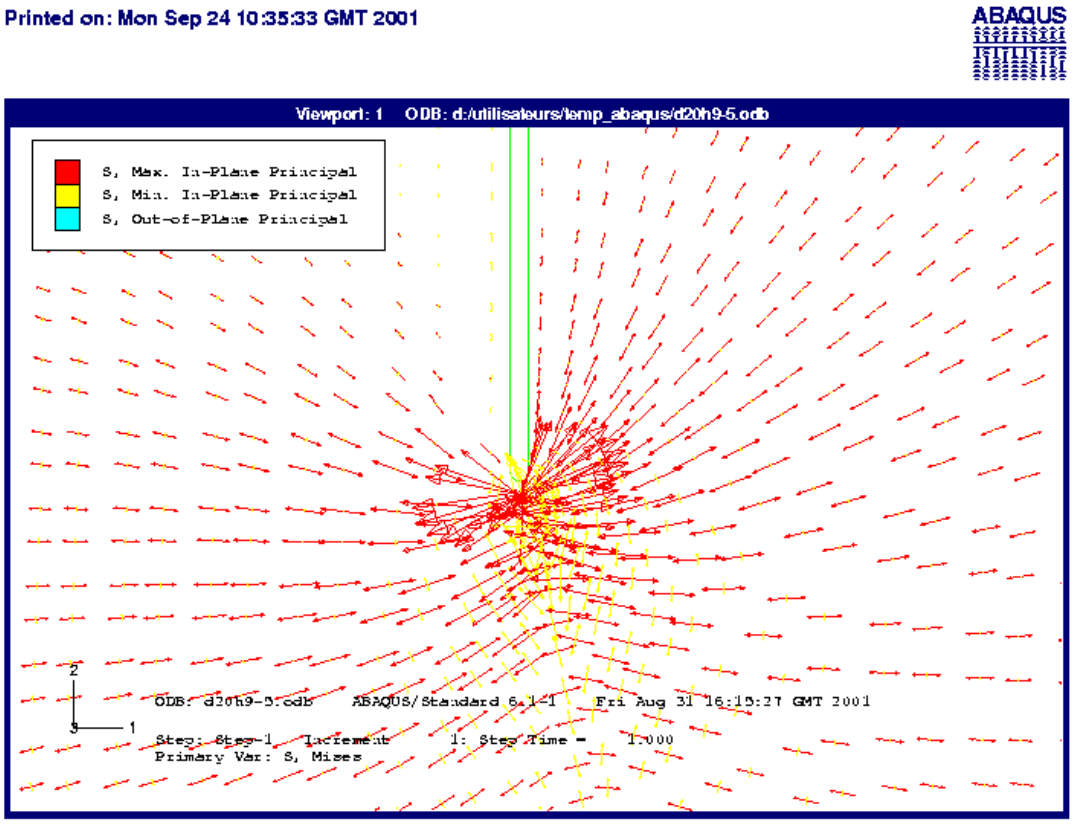
Porte à faux 25 cm, fissure 15 cm



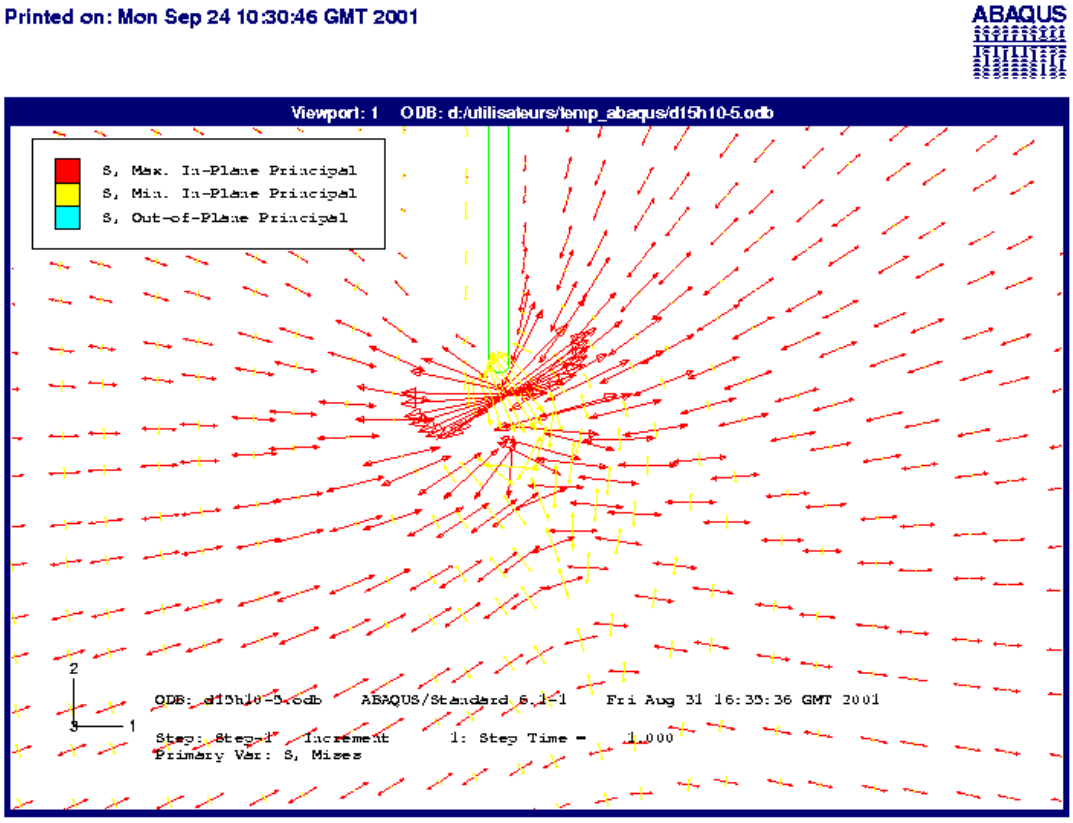
Porte à faux 25 cm, fissure 15 cm



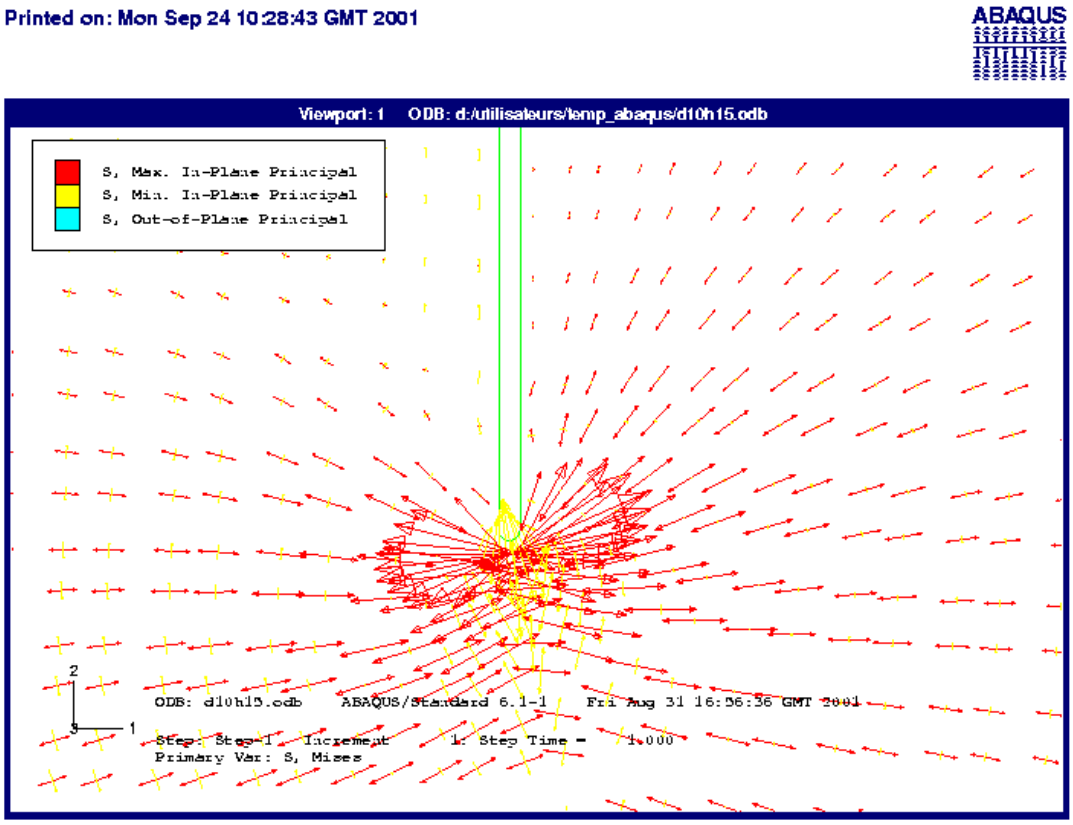
Porte à faux 20 cm, fissure 9.5 cm



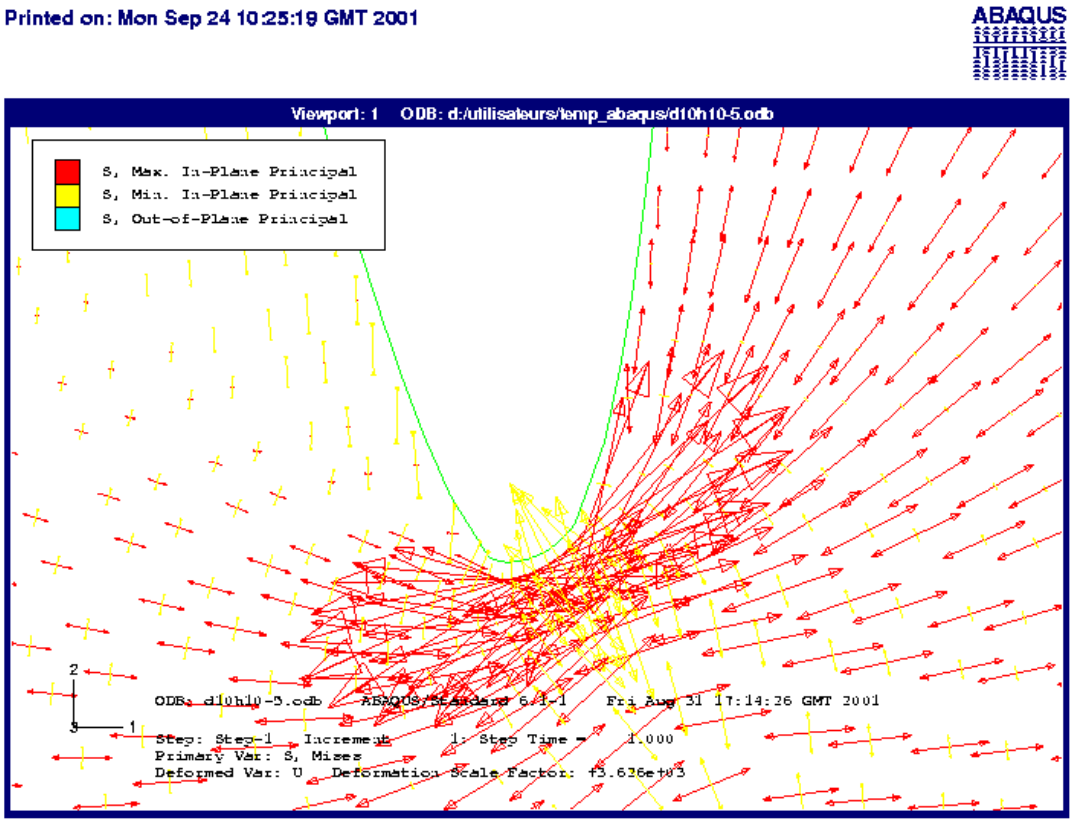
Porte à faux 15 cm, fissure 10.5 cm



Porte à faux 10 cm, fissure 15 cm



Porte à faux 10 cm, fissure 10.5 cm



Annexe 3 : Théorie de calcul des concentrations de contraintes par la méthode des intégrales de contours (utilisée par Abaqus)