



**HAL**  
open science

## Estimation du risque avalancheux dans le système expert MEPRA

Gérald Giraud, Jean-Pierre Navarre, Cécile Coléou

► **To cite this version:**

Gérald Giraud, Jean-Pierre Navarre, Cécile Coléou. Estimation du risque avalancheux dans le système expert MEPRA. 2002. hal-02638748

**HAL Id: hal-02638748**

**<https://hal.science/hal-02638748>**

Preprint submitted on 28 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **<sup>1</sup>ESTIMATION DU RISQUE AVALANCHEUX DANS LE SYSTEME EXPERT MEPRA**



---

<sup>1</sup> G. Giraud, J.-P. Navarre et C. Coleou Météo-France/C.N.R.M./C.E.N. 1441 rue de la piscine 38406 St Martin d'Hères

## SOMMAIRE

I) Historique.....	3
II) Architecture du système MEPRA.....	5
III) Evaluation des propriétés mécaniques.....	6
IV) Risque de départ spontané d'avalanches.....	12
V) Risque de déclenchement accidentel d'avalanches....	16
VI) Résultats et Validations.....	21
VII) Limites de cette approche.....	35

En analyse du risque avalancheux, si beaucoup de connaissances font appel à des théories scientifiques précises (météorologie, thermodynamique, physique de la neige..) et ont pu être modélisées numériquement, certaines sont issues de l'expérience personnelle du prévisionniste. Au cours d'années de travail, la confrontation de sa prévision avec la situation réelle, l'observation directe sur le terrain de nombreuses avalanches lui ont permis de compléter sa formation par des connaissances empiriques, formalisées ou floues. Ce qui caractérise ce type d'informations, c'est leur caractère provisoire. Elles sont appelées à être précisées ou infirmées par l'expérience et remplacées à terme par une connaissance déterministe du problème lorsque les recherches auront abouti. Le système expert, MEPRA, est l'outil informatique qui permet de combiner toutes ces informations de nature différente (déterministes, expertes ou statistiques).

## **1) HISTORIQUE**

A la fin des années 80, le C.E.N. s'est lancé dans la grande aventure des systèmes experts et a construit MEPRA. L'objectif était de réaliser une analyse du risque d'avalanche pour une zone géographique assez étendue (massif ou partie d'un massif) à partir d'informations fragmentaires. Pour ce faire, à partir d'un profil réel ou simulé par CROCUS, le modèle complétait la description nivologique de la zone en rajoutant notamment des informations mécaniques (résistance à l'enfoncement ...) et réalisait une analyse du risque purement experte liée à des épaisseurs de neige récente ou de neige humide en surface du manteau neigeux et à l'état des purges.

Si l'architecture de la base de connaissances était satisfaisante, deux inconvénients majeurs apparaissaient :

- l'analyse de la stabilité mécanique était pratiquement inexistante et ne permettait donc pas une prise en compte optimale de la modélisation détaillée du manteau neigeux.

- l'analyse du risque était liée à l'état des purges or cette information est souvent mal connue du prévisionniste avalanche et plutôt utilisée en validation

De plus, il est très difficile de décrire la grande variabilité spatiale du risque d'avalanches à partir d'un seul sondage/profil du manteau neigeux.

Lors de l'évaluation du projet MEPRA, l'idée de travailler dans un espace altitude, exposition et pente en abandonnant l'approche globale au niveau d'un massif montagneux a été émise. En effet, exceptés les phénomènes locaux (plaques ou accumulations), la prévision du risque d'avalanches est fondée sur la similitude nivologique de couloirs d'avalanches de même altitude, exposition et pente. La couverture spatio-temporelle de la stabilité mécanique du manteau neigeux et du risque d'avalanches au niveau d'un massif montagneux est assurée par des expertises nombreuses en altitude, exposition et pente. Avec le développement de SAFRAN, ce nouveau concept a été précisé. Chaque massif montagneux est découpé en pentes types caractérisées par une altitude (de l'altitude basse à l'altitude haute par pas de 300m), une exposition (Nord, Est, Sud-est, Sud, Sud-ouest, Ouest) et une pente (plat, 20 ou 40 deg.). Ainsi est née la chaîne SAFRAN/CROCUS/MEPRA (figure 1). Cette nouvelle approche a imposé de nombreuses modifications dans la base de connaissances de MEPRA.

Une des conséquences de ce choix stratégique a été de séparer l'analyse de la stabilité mécanique de l'estimation du risque d'avalanches avec comme objectifs prioritaires de mieux utiliser la modélisation détaillée (CROCUS), le raisonnement mécanique sur l'équilibre du

manteau neigeux et l'évolution temporelle du risque. Parallèlement, les analyses des risques de départ naturel ou de déclenchement accidentel d'avalanches ont été dissociées.

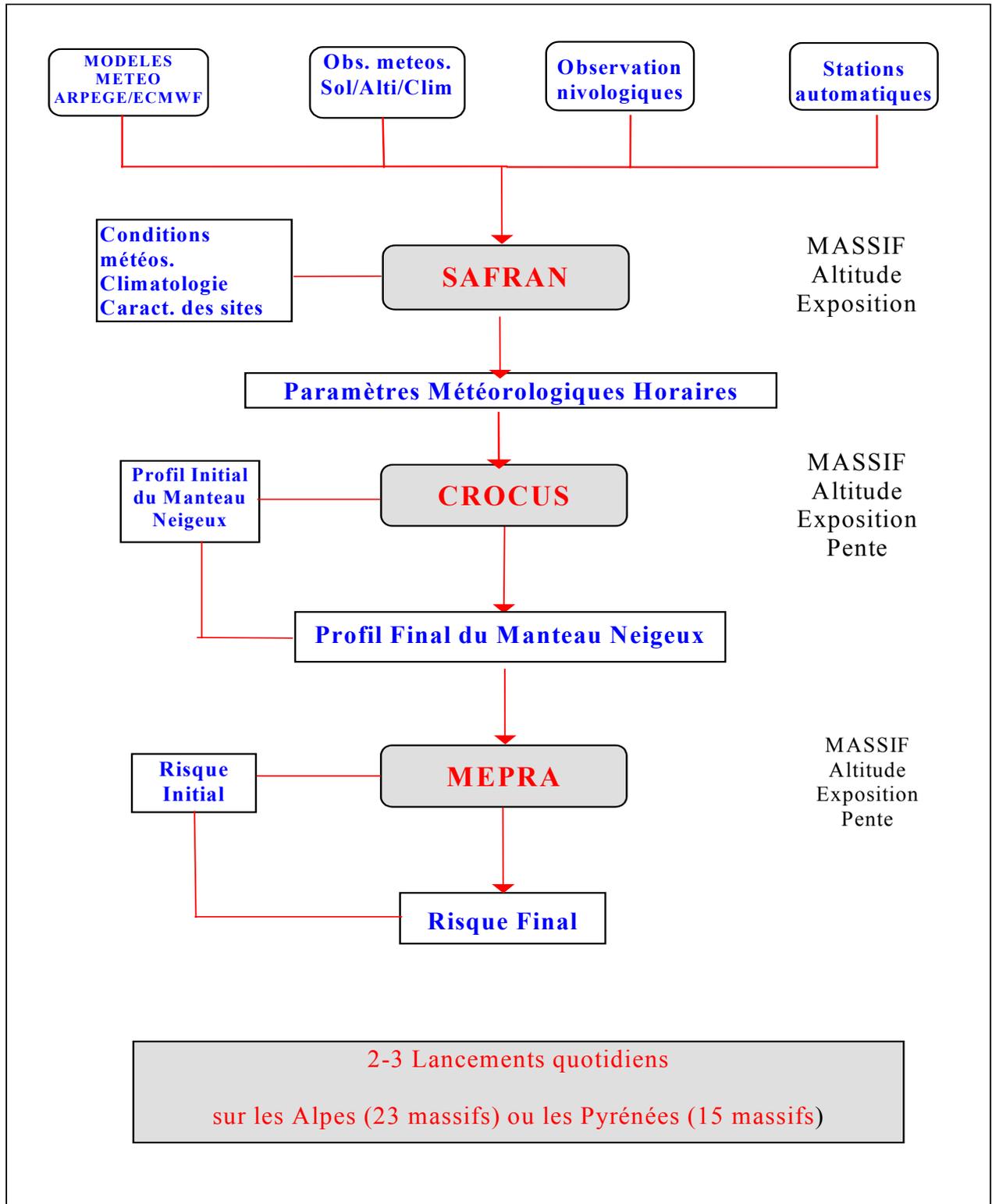


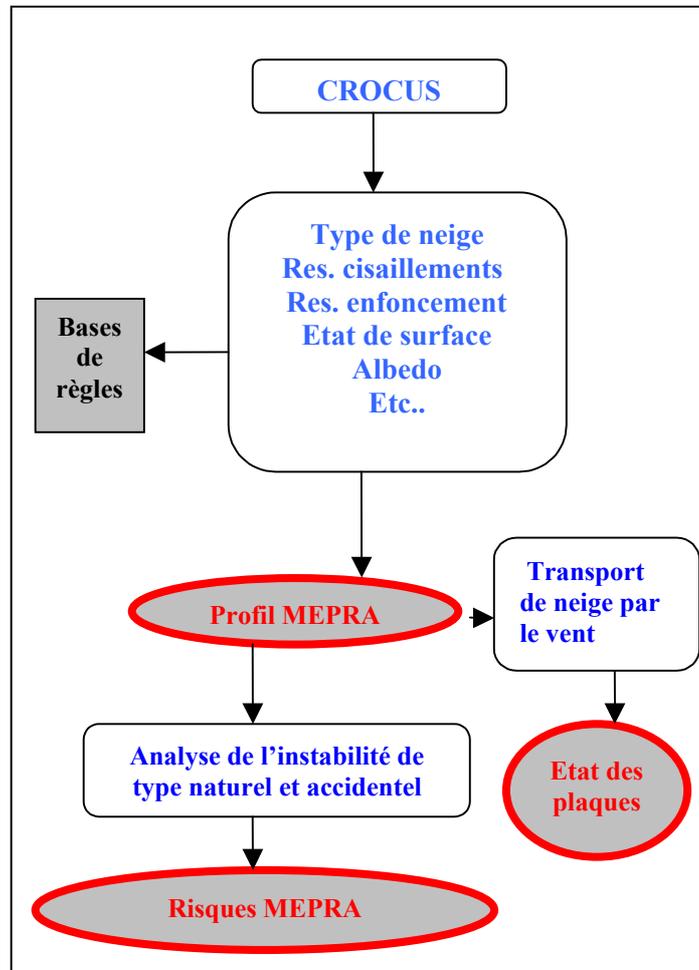
Figure 1 : Architecture de la chaîne Safran/Crocus/Mepra

## II) ARCHITECTURE DU SYSTEME MEPRA

L'architecture du système expert est très proche du raisonnement habituel du prévisionniste.

Trois grandes étapes (figure 2) structurent son raisonnement :

- construction d'un manteau neigeux à partir des données CROCUS en y rajoutant notamment des informations mécaniques
- analyse de ce manteau neigeux en terme de stabilité naturelle ou accidentelle
- évaluation du risque de départ naturel et accidentel d'avalanche



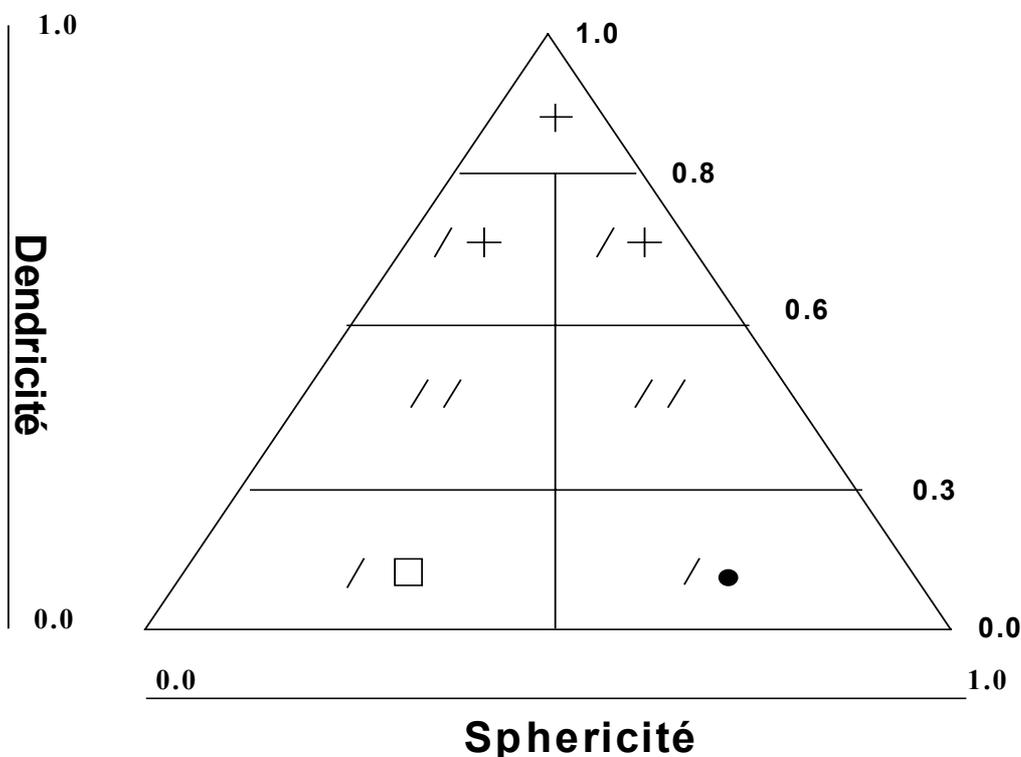
L'analyse Mepra est détaillée dans les paragraphes suivants.

### III) EVALUATION DES PROPRIETES MECANIQUES

Pour réaliser une analyse de la stabilité mécanique d'un manteau neigeux, la connaissance de certains paramètres mécaniques internes au manteau neigeux est indispensable. Or le modèle Crocus ne fournit que les paramètres physiques caractérisant l'état thermique, massique et morphologique du manteau neigeux. Ces paramètres physiques au nombre de cinq sont les suivants : température et teneur en eau liquide, masse volumique, type et taille des grains pour chaque strate consistant le manteau neigeux. En fait, le type de grain de neige est décrit par trois sous paramètres : la dendricité, la sphéricité et l'historique. La dendricité varie de 1 à 0 (elle décroît systématiquement) et correspond à la part de cristaux de neige fraîche présents dans une couche de neige. La sphéricité varie de 0 à 1 et représente le rapport entre grains arrondis et grains anguleux. Les grains de neige sont décrits par leurs sphéricité et dendricité tant qu'il existe de la neige fraîche dans la couche, sinon ils sont décrits par l'historique, la sphéricité et la taille. La variable historique permet à tout moment de connaître l'évolution passée de la strate de neige. Les quatre valeurs de la variable historique sont rappelées ci-dessous :

- 1 : Grain étant ou ayant été anguleux
- 2 : Grain étant ou ayant été en contact avec de l'eau liquide mais n'ayant pas eu de caractère anguleux
- 3 : Grain étant ou ayant été en contact avec de l'eau liquide mais ayant eu auparavant un caractère anguleux
- 0 : Autres cas (n'ayant jamais été anguleux ni en contact avec de l'eau liquide)

La correspondance avec la classification internationale (Colbeck, 1990) est la suivante :



Triangle déterminant le type de grains en fonction de la sphéricité et de la dendricité pour des neiges dendritiques

Hist. Spher.	0		1		2		3	
0.2	□ □	d < 0.5	□ □	∇ d	○ □	○ □		
		0.5 < d < 1.0	□ ^					
		d > 1.0	^ ^					
0.5	● □	d < 0.5	● □	∇ d	○ □	○ □		
		0.5 < d < 1.0	□ ^					
		d > 1.0	^ ^					
0.8	● □	d < 0.5	● □	d < 0.5	● ○	^ ○		
		0.5 < d < 1.0	^ ○	0.5 < d < 1.0	○ ○			
		d > 1.0	^ ○	d > 1.0	○ ○			
0.8	● ●	d < 0.5	● ●	d < 0.5	● ○	^ ○		
		0.5 < d < 1.0	^ ○	0.5 < d < 1.0	○ ○			
		d > 1.0	^ ○	d > 1.0	○ ○			

Tableau de correspondance entre le type de grain et la sphéricité, l'historique et le diamètre des grains pour des neiges non dendritiques

La première étape dans MEPRA consiste donc à estimer, pour toutes les strates du manteau neigeux, la résistance à l'enfoncement ou résistance au battage et la résistance limite aux cisaillements.

### III.1) la résistance à l'enfoncement

La résistance à l'enfoncement ou résistance au battage est un paramètre physique qui est calculé à partir de mesures effectuées par une sonde de battage ou sonde Haéféli dans la neige. Cette sonde se compose de tubes démontables de 1m de hauteur pesant 1 kg. Le premier tube est terminé par une pointe en forme de cône de section 12 cm<sup>2</sup> et dont l'angle au sommet fait 60°. Au fur et à mesure de l'enfoncement, des tubes d'1 mètre sont rajoutés. Le battage proprement dit est réalisé grâce à un poids mobile de 1 kg guidé par une tige insérée au sommet du dernier tube. Le poids est lâché jusqu'à une hauteur maximale de 60 cm et transmet alors une énergie potentielle aux tubes. La sonde de battage s'enfoncera donc d'une certaine épaisseur en fonction de la résistance à l'enfoncement ou au battage de la couche de neige, du nombre de coups et de la hauteur de chute. La résistance à l'enfoncement est calculée selon la formule suivante :

$$R_{enf} \text{ (en kgf)} = \frac{P \cdot h \cdot n}{d} + q \cdot Q + P$$

où

P = poids mobile (1kg)

n = nombre de coups

h = hauteur de chute (en cm)

d = enfoncement pour n coups  
q = nombre de tubes  
Q = poids d'un tube (1 kg)

Cette formule suppose l'uniformité de la résistance R sur toute l'épaisseur (d) de l'enfoncement mesurée pour n coups.

Dans MEPRA, la résistance à l'enfoncement est estimée à partir des caractéristiques physiques des différentes couches de neige fournies par CROCUS à savoir type de grains (dendricité, sphéricité et historique), diamètre des grains, masse volumique et état thermique de chaque couche de neige. Les formules utilisées sont le résultat d'études faites sur les sondages par battage des postes les plus sérieux du réseau nivo météorologique. Pour chaque type de grain de neige, plusieurs centaines de données ont été utilisées. Le tableau ci dessous synthétise les résultats de ces études.

Type de grains	Etat thermique	Formules
neige fraîche ou récente	sec ou humide	$R_{den} = (0.018 * \rho - 1.363)$ $R_{fin} = (0.17 * \rho - 31)$ $R_{enf} = (R_{den} * den + (100. - den) * ((R_{fin} * spher + ang * (R_{fin} * (0.8 - diam) + 2. * diam)) / 100.) / 100. )$
grains fins	sec	$R_{enf} = (0.17 * \rho - 31)$
grains fins anguleux	sec	$R_{enf} = (R_{fin} * spher + ang * (R_{fin} * (0.8 - diam) + 2. * diam)) / 100 .$
faces-planes ou faces_planes/gobelets	sec	$R_{enf} = ((0.17 * \rho - 31) * (0.8 - diam) + 2. * diam)$
gobelets	sec	$R_{enf} = 2.$
grains ronds ou rond-anguleux ou gobelets fondants ou grains fins arrondis	sec	$R_{enf} = (0.103 * \rho - 19.67)$
grains ronds ou rond-anguleux ou gobelets fondants ou grains fins arrondis	mouillé	si $\rho < 250 \text{ kg/m}^3$ $R_{enf} = 1.$ si $250 \leq \rho \leq 350 \text{ kg/m}^3$ $R_{enf} = 2.$ si $\rho > 350 \text{ kg/m}^3$ $R_{enf} = (0.16 * \rho - 54.)$

avec  $\rho$  : masse volumique en  $\text{kg/m}^3$

den : dendricité de la couche de neige (entre 0 et 99)

spher : sphéricité de la couche de neige (entre 0 et 99)

ang : angulosité de la couche de neige = 100 – sphéricité (entre 0 et 99)

diam : diamètre des grains en mm

$R_{enf}$  : résistance à l'enfoncement en kgf

### III.2) la résistance limite aux cisaillements

La résistance limite aux cisaillements d'une strate de neige est le paramètre physique qui caractérise le mieux la cohésion de la neige. Lorsqu'une avalanche de plaque se produit

qu'elle soit spontanée ou déclenchée, une rupture par cisaillement dans une couche fragile, avec un plan de glissement parallèle à la stratification, est à l'origine de ce départ d'avalanche. La connaissance de la résistance limite aux cisaillements des différentes couches constituant le manteau neigeux est donc nécessaire pour réaliser une analyse de la stabilité mécanique du manteau neigeux. Sur le terrain, la mesure est faite, parallèlement à la stratification, soit avec un cadre de cisaillement et un dynamomètre soit avec un scissomètre composé d'une poignée, d'un ressort de torsion, d'un curseur gradué et d'une couronne à ailette. Le couple de torsion nécessaire à la mise en rotation de la couronne à ailette remplie de neige est mesuré. En fonction du type de couronne, un abaque restitue la résistance limite aux cisaillements en kgf/dm<sup>2</sup>. Cette mesure de résistance aux cisaillements correspond à une mise en contrainte rapide et suppose un matériau « rigide - fragile », c'est à dire sans déformation préalable avant rupture. Ceci ne correspond pas exactement aux conditions d'une déstabilisation naturelle avec déformation lente et diminution progressive locale de résistance (cas d'avalanche naturelle de printemps par exemple)

Dans MEPRA, la résistance limite aux cisaillements est estimée à partir des caractéristiques physiques des différentes couches de neige fournies par CROCUS à savoir type de grains (dendricité, sphéricité et historique), diamètre des grains, masse volumique et état thermique de chaque couche de neige. Contrairement à la résistance à l'enfoncement, la résistance limite aux cisaillements est une mesure peu pratiquée notamment dans le réseau nivométéorologique car elle est plus délicate à réaliser. Les formules utilisées sont donc le résultat d'études faites sur des mesures essentiellement réalisées par le centre d'études de la neige in situ au Col de Porte et lors d'enquêtes avalanches. Pour chaque type de grain de neige, plusieurs centaines de données ont été utilisées permettant d'aboutir à la formule continue suivante :

$$R_{cis} = (\rho^2 \cdot 10^{-4} - 0,6) \cdot (c\_den \cdot c\_sph \cdot c\_cmts \cdot c\_cfe \cdot c\_cfre) + 0.12$$

avec R<sub>cis</sub> en Kgf/dm<sup>2</sup> proche du KPa ( 1kgf/dm<sup>2</sup> = 0,981 kPa)

ρ : masse volumique en kg/m<sup>3</sup>

c\_den : coefficient fonction de la dendricité

c\_sphr : coefficient fonction de la sphéricité

c\_cmts : coefficient fonction de la taille des grains

c\_cfe : coefficient fonction de la teneur en eau liquide

c\_cfre : coefficient fonction des cycles gel dégel subit par la couche de neige

Les coefficients ont les valeurs suivantes :

c\_den (coefficient fonction de la dendricité) :

dendricité	<=0.25	>0.25 et <=0.5	>0.5 et <=0.75	>0.75 et <=1.
c_den	1-0.4*dend	0.9-0.4*(dend-0.25)	0.8-0.8*(dend-0.5)	0.6-0.6*(dend-0.75)

c\_sphr (coefficient fonction de la sphéricité) :

sphéricité	$\leq 0.25$	$> 0.25$ et $\leq 0.5$	$> 0.5$ et $\leq 0.75$	$> 0.75$ et $\leq 1.$
c_sphr	$0.45 + 0.7 * \text{spher}$	$0.625 + (\text{spher} - 0.25)$	$0.875 + 0.6 * (\text{spher} - 0.5)$	$1.025 + 0.5 * (\text{spher} - 0.75)$

c\_mts (coefficient fonction de la taille des grains) :

si dendricité  $> 0$  alors c\_mts=1.

si dendricité =0 c\_mts=1-(0.8-0.2\*sphéricité)\*0.53\*(tg-tgm)  
avec tg=taille du grain et tgm=0.4-0.1\*sphéricité

c\_cfe (coefficient fonction de la teneur en eau liquide volumique) :

Si tel=0 c\_cfe=1

Sinon cfe fonction de la Teneur en eau liquide de rétention (telr=0.05\*(1- $\rho/\rho_{\text{glace}}$ )

tel	$\leq 0.1 * \text{telr}$	$> 0.1 * \text{telr}$ et $\leq 0.3 * \text{telr}$	$> 0.3 * \text{telr}$ et $\leq \text{telr}$	$> \text{telr}.$
c_cfe	$1 + \text{tel}/\text{telr}$	$1.335 - 2.35 * \text{tel}/\text{telr}$	$0.75 - 0.4 * \text{tel}/\text{telr}$	$0.45 - 0.1 * \text{tel}/\text{telr}$

c\_cfre (coefficient fonction des cycles gel dégel subit par la couche de neige) :

si neige sèche non regelée ou humide pour la première fois C\_FRE=1

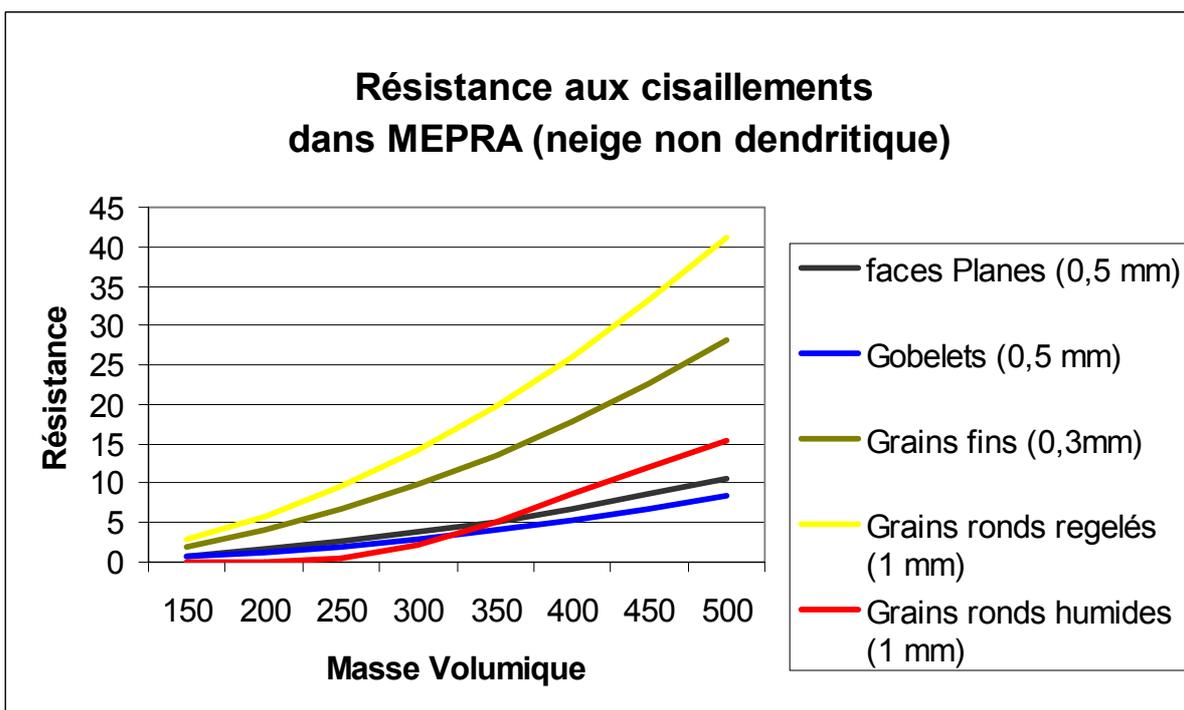
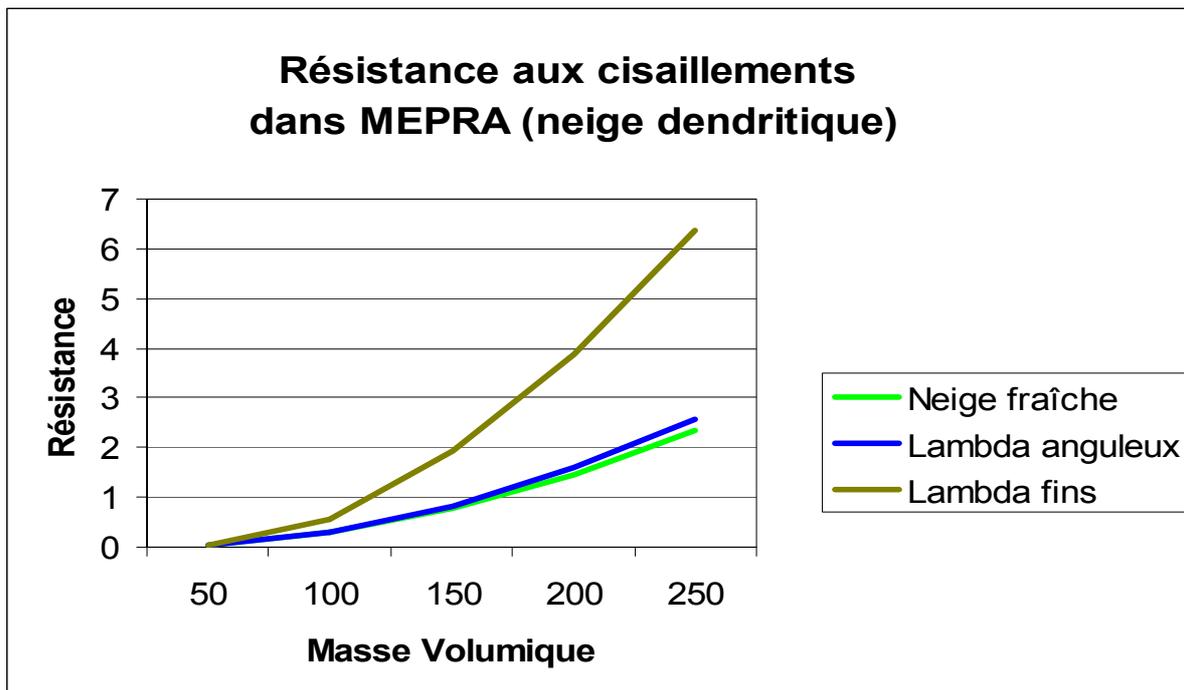
si neige sèche regelée C\_FRE=1.5

si neige humide

tel	$\leq 0.1 * \text{telr}$	$> 0.1 * \text{telr}$ et $\leq 0.5 * \text{telr}$	$> 0.5 * \text{telr}$ et $\leq \text{telr}$
c_cfre	$1.5 - 2 * (\text{tel}/\text{telr})$	$1.375 - 0.75 * (\text{tel}/\text{telr})$	1.

Le tableau ci dessous ainsi que les deux figures donnent des exemples de valeurs de résistance limite aux cisaillements calculées par MEPRA :

Type de grains	etat thermique	Taille des grains (mm)	masse vol. (kg/m3)	res. cis.(kg/dm2)
fraîche	sec		50	0,1
fraîche	sec		100	0,3
fraîche	sec		150	0,8
lambda	sec		200	2,5
grains fins	sec	0,3	300	9,7
faces planes	sec	0,4	250	2,7
gobelets	sec	1,5	250	1,5
grains ronds	sec	1,0	400	26,0
grains ronds	humide	1,0	400	8,9



La résistance limite aux cisaillements est propre à chaque couche définie par Crocus avec une valeur considérée comme identique sur toute l'épaisseur de la couche. De légères discontinuités peuvent apparaître liées à l'agrégation ou l'éclatement des couches faites par Crocus. En outre, aucune valeur de résistance limite aux cisaillements n'est évaluée (et ne

peut l'être actuellement) aux inter-strates même si ces zones peuvent parfois apparaître comme des plans de glissement préférentiels.

Par cette formulation, la résistance limite aux cisaillements d'une couche de neige est essentiellement dépendante de l'état morphologique des cristaux de neige qui la composent et de la densité. En fait, cette résistance limite dépend de la qualité des liaisons inter-grains, qui peuvent aussi être influencées par les pressions de contacts durant les processus de métamorphose. Ces variations possibles de résistance pour une même neige (à densité et cristallographie identiques) ne sont pas prises en compte ici, par manque de connaissances et mesures précises.

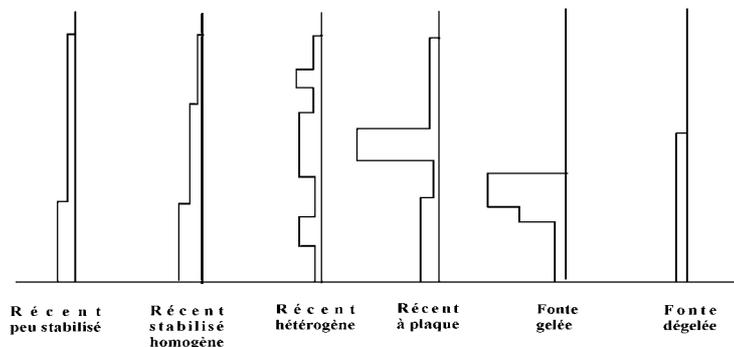
## IV) RISQUE DE DEPART SPONTANE D'AVALANCHES

### IV.1) Classification des sondages par battage

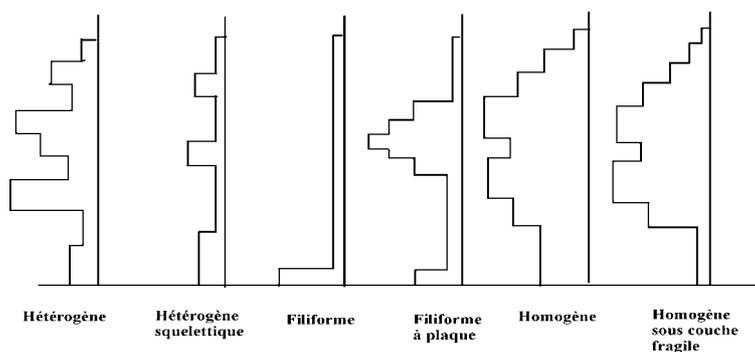
Une typologie des profils de résistance à l'enfoncement est réalisée dans MEPRA. Le profil est décomposé en deux parties, la partie supérieure du manteau neigeux composée essentiellement de neige récente ou de neige ayant subi au moins un cycle dégel regel et la partie inférieure du manteau neigeux composée de neiges évoluées de type grains fins, faces planes, gobelets ou neiges regelées. Afin d'améliorer l'analyse de l'instabilité naturelle du manteau neigeux, le profil supérieur de type neige récente prendra en compte, si elles existent, les couches de grains anguleux qu'il surmonte directement. Les profils supérieur et inférieur sont décomposés chacun en 6 classes :

Classification des profils de résistance à l'enfoncement

Profil supérieur :



Profil inférieur :



Cette typologie était très utilisée dans la première version de Mepra. Actuellement, la classification des profils inférieurs et supérieurs ne sert plus. Seule la séparation profil supérieur/profil inférieur a son utilité dans l'analyse de l'instabilité naturelle du manteau neigeux.

#### **IV.2) Analyse de l'instabilité mécanique naturelle du manteau neigeux**

L'instabilité mécanique du manteau neigeux à l'échelle d'une pente est un phénomène tridimensionnel lié à la composition du manteau neigeux et à sa variabilité spatiale mais aussi à la topographie du site avec notamment des ancrages amonts, avals ou latéraux .... Dans notre cas, le raisonnement se fait sur une pente type à l'échelle d'une zone géographique étendue (massif par exemple) qui correspond donc à un grand nombre de pentes réelles. L'approche utilisée pour analyser la stabilité naturelle se simplifie donc et s'appuie sur la recherche d'un indice de stabilité minimal. Elle est similaire à une approche classique de la mécanique des sols pour l'étude de la stabilité de remblais ou de pentes.

Dans cette approche mécanique des sols (en statique), on pré-suppose différentes lignes de ruptures possibles  $li$  et on calcule pour chacune un indice de sécurité (ou de stabilité)  $Fi$  tel que :

$$Fi = \text{résistance limite le long de la ligne } li / \text{contraintes le long de la ligne } li$$

La stabilité est alors évaluée en s'assurant que pour toutes les lignes  $li$  possibles, les valeurs correspondantes de  $Fi$  restent supérieures à un indice de sécurité limite  $F0$  (souvent proche de 1,5).

Dans le cas de la neige et de MEPRA, nous avons des conditions particulières d'analyse :

- la pente type est supposée constante et uniforme, avec une stratification du manteau neigeux parallèle à cette pente .
- du fait de l'uniformité du manteau parallèlement à la pente, on ne peut définir de zones de compression ou de traction sur des faces verticales ou latérales du manteau neigeux
  - dans le manteau neigeux, les lignes de rupture potentielles sont, sur une partie conséquente, parallèles à la stratigraphie
  - et même s'il est difficile d'estimer la forme de la zone de rupture initiale; on peut raisonnablement supposer que les épaisseurs des différentes strates, ainsi que la profondeur à laquelle passe la ligne de rupture, sont a priori petites par rapport à la longueur (parallèle à la pente) de cette ligne de rupture.

Dans ces conditions, l'approche décrite ci-dessus se simplifie : la valeur de  $Fi$  est alors essentiellement dépendante des caractéristiques mécaniques à la profondeur  $z$  par laquelle passe la ligne de rupture  $li$ , et donc du rapport suivant :

$$S(z) = \text{résistance limite à la profondeur } z / \text{contrainte de cisaillement à la profondeur } z$$

L'analyse de stabilité dans Mepra s'appuie sur ce résultat et consiste donc à rechercher dans la partie supérieure du manteau neigeux des strates mécaniquement instables par un raisonnement statique en calculant un indice stabilité  $S(z)$ . Cet indice calculé au bas de chaque couche est défini en comparant la résistance limite aux cisaillements, fonction de la masse volumique et du type de grains (cf §II.2), à la contrainte tangentielle de gravité :

$$S(z) = \frac{\text{résistance limite aux cisaillements}}{\text{contrainte totale de cisaillement}} = \frac{C(z)}{\tau(z)}$$

A noter que la contrainte tangentielle de gravité ou contrainte totale de cisaillement est calculée de la manière suivante :

$$\tau(z) = \sin(\alpha) * \cos(\alpha) * \left( \sum_{i=1}^z d_i * h_i \right)$$

avec  $\alpha$  = angle de pente,  $d_i$  = densité de la couche  $i$ ,  $h_i$  = épaisseur verticale de la couche  $i$  et  $z$  = couche numéro  $z$  par rapport à la surface du manteau neigeux

Le niveau d'instabilité naturelle de chaque couche du profil supérieur sera fonction de la valeur du rapport  $S(z)$  et estimé par rapport à des valeurs limites d'insécurité:

$S(z)$  inférieur à 2 : strate fortement instable

$S(z)$  entre 2 et 3 : strate modérément instable

$S(z)$  supérieur à 3 : strate stable

### IV.3) Estimation des risques de départ spontané d'avalanche

Le risque va être estimé de façon experte dans une échelle à 6 niveaux allant de très faible à très fort. Cette estimation prendra en compte le ou les niveaux d'instabilité mécanique, l'épaisseur de neige instable et l'évolution temporelle de la situation nivologique. S'il y a plusieurs niveaux d'instabilité fort (ou modéré), c'est le niveau le plus enfoui qui sera conservé. La neige humide a fait l'objet d'un traitement particulier étant donné la complexité du matériau et du processus mécanique (déstabilisation par percolation notamment). La correction experte apportée est liée à la profondeur d'humidification dans le manteau neigeux. Si l'humidification gagne en profondeur dans le manteau neigeux et que des niveaux d'instabilités mécaniques ont été détectés alors il y a à la fois déstabilisation par percolation et par première humidification d'une couche précédemment sèche donc confirmation de l'analyse mécanique statique. Dans le cas contraire, le manteau neigeux n'a pas subi de nouvelle déstabilisation par apport d'eau liquide supplémentaire et nous nous trouvons donc dans une phase de stabilisation (H. Conway and alii, 1993), le risque de départ spontané d'avalanche est en diminution.

**Evolution temporelle du risque :** de manière experte, le système va tenir compte de l'évolution dans le temps de la situation nivologique. Dans les cas d'instabilité forte (ou modérée), toute décroissance temporelle de l'instabilité (épaisseur de neige instable plus faible ou niveaux forts (ou modérés) d'instabilité moins marqués dans les dernières 24h..) s'accompagnera d'une décroissance du risque. Par exemple, un risque potentiel fort avec les critères de décroissance de l'instabilité requis se conclura par un risque modéré descendant. Cette approche permet de prendre partiellement et indirectement en compte l'état des purges. En effet, si l'avalanche ne s'est pas déclenchée naturellement alors que l'instabilité du

manteau neigeux était à son maximum, toute stabilisation même mineure entraîne forcément une baisse du danger.

La signification de chaque niveau de risque est précisée dans le tableau suivant :

RISQUE	ANALYSE MEPRA	SIGNIFICATIONS
TRES FAIBLE	Pas de profil sup ou profil sup. de faible épaisseur(<20cm) sans niveau d'instabilité	Très faible prob. de coulées ou d'avalanches
FAIBLE	Profil Sup. avec instabilité(s) de niveau fort ou modéré mais moins de 20 cm de neige instable ou entre 20 et 40 cm de neige d'instabilité uniquement modéré en phase de stabilisation	Des coulées ou petites avalanches sont possibles
MODERE ASCENDANT	Profil sup avec instabilité(s) de niveau fort et entre 20 et 40 cm de neige de forte instabilité avec une déstabilisation en cours	Des avalanches d'ampleur limitée sont probables
MODERE DESCENDANT	Plus de 40 cm de neige d'instabilité modéré ou forte avec stabilis. en cours ou entre 20 et 40 cm de neige d'instabilité modéré avec déstabilisation en cours	Quelques avalan. encore possibles pouvant être localement assez grosses ou possibilité de quelques avalanches d'ampleur limité
FORT	De 40 a 80 cm de neige avec instabilité de niveau fort et déstabilisation. en cours	Très forte probabilité d'avalanches de taille moyenne à grosse
TRES FORT	Idem risque fort avec épaisseur plus importante de neige instable.(>80cm)	Très forte probabilité de grosses voire très grosses avalanches

Parallèlement le type d'avalanches attendues proche du code nivo est précisé :

- Récente sèche
- Récente humide
- Récente mixte (sèche et humide)
- Plaque de surface (friable)
- Fonte de surface
- Fonte de fond

Cette échelle à 6 niveaux est interne au système expert et déconnectée de l'échelle européenne du risque d'avalanche. Notamment, l'aspect spatial n'est pas pris en compte contrairement à l'échelle européenne.

## **V) RISQUE DE DECLENCHEMENT ACCIDENTEL D'AVALANCHES**

### **V.1) Analyse de l'instabilité mécanique de type accidentel (passage de skieurs)**

La démarche est la même que celle suivie pour l'analyse de l'instabilité mécanique naturelle (cf § IV.2). La première étape consiste à rechercher dans le manteau neigeux des strates mécaniquement instables d'un point de vue accidentel par un raisonnement statique en comparant la résistance limite aux cisaillements, fonction de la masse volumique et du type de grains (cf §II.2), à la contrainte tangentielle totale de cisaillement. Pour chaque profondeur  $z$  des différentes strates, un indice de stabilité  $S'(z)$  est calculé:

$$S'(z) = \frac{\text{résistance limite aux cisaillements}}{\text{contrainte totale de cisaillement}} = \frac{C(z)}{\tau(z)} = \frac{C(z)}{\tau_n(\text{neige}) + \beta * \tau_s(\text{skieur})}$$

Les valeurs de  $C$  et de  $\tau_n$ , à chaque profondeur  $z$ , ont déjà été calculées pour l'analyse de l'instabilité naturelle dans MEPRA.

Pour la détermination de  $\tau_s$  (contrainte additionnelle due au poids du skieur), nous avons dû nécessairement faire quelques hypothèses:

- sur les contraintes additionnelles (liées au poids du skieur), à l'intérieur du manteau neigeux, en supposant pour celles-ci une distribution de type Boussinesq ou de Westergaard (approche dérivée de la mécanique des sols).
- et sur l'estimation de la valeur de la charge que peut exercer un skieur sur le manteau neigeux. Cette valeur est beaucoup plus délicate à approcher, compte tenu des différents paramètres qui peuvent intervenir: majoration de la charge liée à certains mouvements du skieur (virage, prise d'appui), répartition des charges sur les skis, interactions entre les skis et la neige pour la transmission de la charge, portance des strates supérieures du manteau neigeux,...

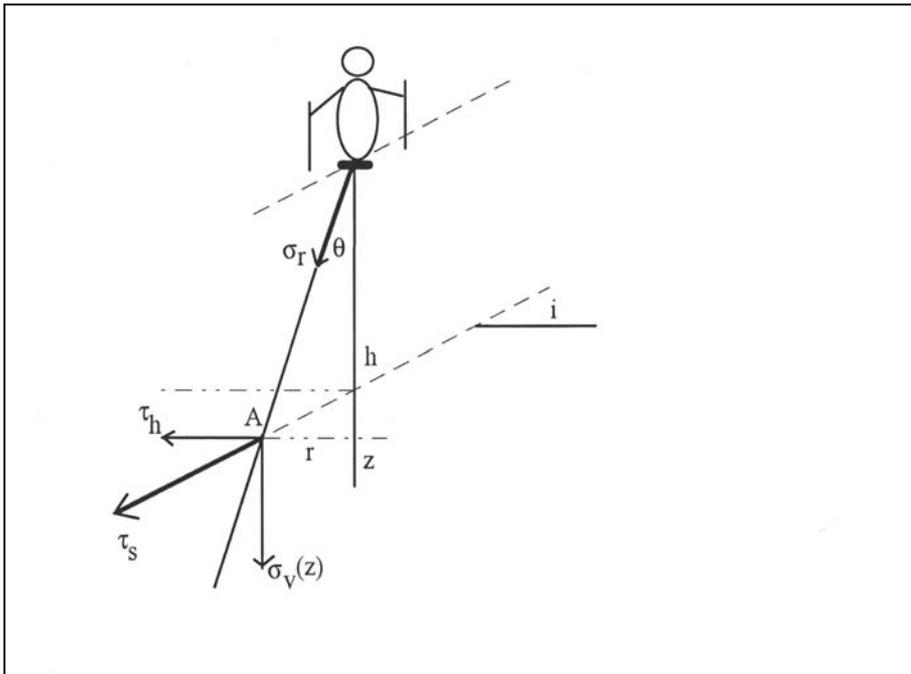
Par la suite, on considère que le skieur est perpendiculaire à l'axe de la pente et que son poids  $P$  n'est pas réparti sur toute la longueur des skis, que l'on assimilera à "une semelle souple rectangulaire" de longueur  $B$  et de largeur  $L$ .

#### **Détermination de la contrainte de cisaillement $\tau_s$**

La contrainte de cisaillement  $\tau_s$  qui s'exerce sur une strate "h", située à la profondeur  $h$  sous le skieur, n'est théoriquement pas constante le long de cette strate: elle dépend de l'angle  $\theta$  (direction de la contrainte radiale  $\sigma_r$  supposée passer par le centre d'action de la charge) et de l'approche retenue pour évaluer cette contrainte.

Considérons dans un premier temps, la charge du skieur en surface comme ponctuelle. Pour un point A (défini par l'angle  $\theta$ ) d'une strate à la profondeur  $z$  et une pente  $i = 40^\circ$ , on peut donc écrire:

$$\tau_s = \sigma_v \sin i + \tau_h \cos i = \sigma_v \sin (i + \theta) / \cos \theta$$



avec  $\theta < 0$  pour un point A situé à l'amont du skieur  
 $\tau_h$  et  $\sigma_v$  étant les contraintes en ce point pour une facette horizontale ( $\sigma_v = \sigma_r \cdot \cos \theta$ )  
 et  $\sigma_r$  étant la contrainte issue du centre d'action de la charge P

La contrainte  $\tau_s$  apparaît dans ce cas directement liée à la fonction de répartition de la contrainte verticale  $\sigma_v(z, \theta)$ .

Dans le cas d'une charge du skieur ponctuelle et d'une répartition de la contrainte  $\sigma_v$  de type Boussinesq:

$$\sigma_v = (3 P / 2 \pi z^2) \cos^n \theta \quad n \in [2 \text{ à } 5] \text{ avec } n=5$$

la contrainte  $\tau_s(\theta)$  le long de la strate pourra alors s'écrire:

$$\tau_s = (3 P / 2 \pi h^2) \cdot \cos^{n-1} \theta \cdot (1 - \operatorname{tg} i \operatorname{tg} \theta)^2 \cdot \sin (i + \theta)$$

Pour une pente  $i = 40^\circ$ , cette contrainte est maximale pour un angle  $\theta_m$  approximativement compris entre  $-3^\circ$  et  $-5^\circ$  (vers l'amont) selon la valeur de n, et pour lequel  $\tau_s \max \approx k (3 P / 2 \pi h^2)$  avec  $k \approx 1,01$  à  $1,02$

Notons que si nous supposons une répartition en  $1/z$  au lieu de  $1/z^2$ , avec  $n=2$  par exemple, on trouve  $\theta_m \approx +6^\circ$  et  $k \approx 1,015$ .

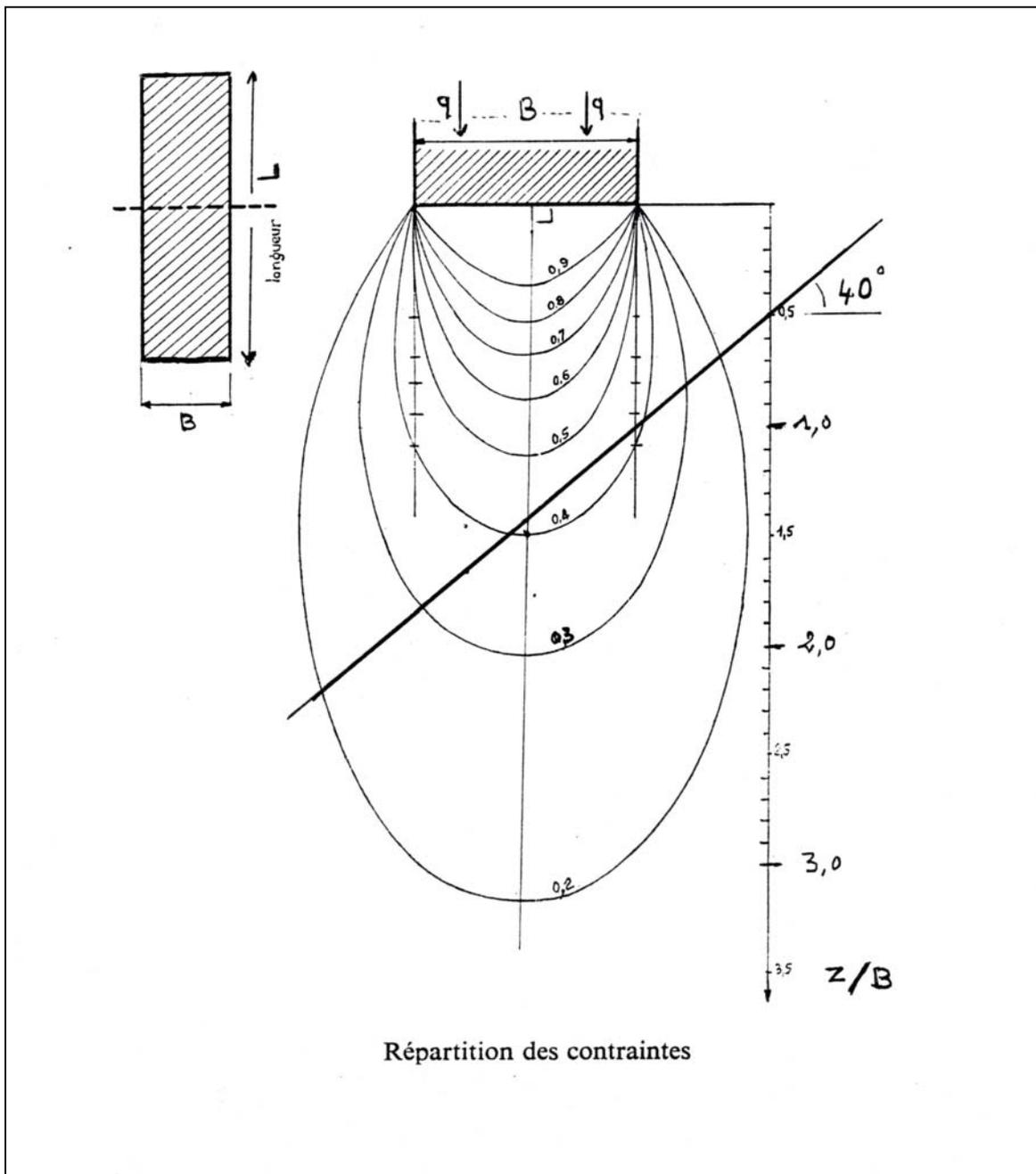
Ces résultats montrent que, pour  $i = 40^\circ$  et pour différentes formulations de répartition de la contrainte  $\sigma_v$ , le maximum de  $\tau_s(h)$  est obtenu pour un angle  $\theta \approx 0$  et assimilable avec une bonne approximation à  $\sigma_v(h) \sin (40^\circ)$

En fait, pour plus de rigueur, la charge du skieur n'est pas considérée comme ponctuelle mais répartie sur une partie de la surface des skis que l'on assimile à une semelle souple

rectangulaire. Dans ce cas, on peut calculer les contraintes verticales  $\sigma_v(z, \theta)$  dans le manteau neigeux, à partir d'abaque ( $\sigma_v/q = f(z/B)$ ) spécifique au rapport  $B/L$  (cf. graphique ci dessous avec  $B \gg L$ ).

La distribution des contraintes  $\sigma_v$  ne diffère sensiblement de celle (en  $1/z^2 \cdot \cos^5\theta$ ), donnée par Boussinesq pour une charge ponctuelle, qu'au voisinage de la surface. Quant à l'approximation précédente, un calcul analytique des  $\tau_s$  (h) maximum., pour différentes valeurs de h, confirme sa validité, même si les angles  $\theta_m$  sont ici un peu plus importants près de la surface et qu'il faille alors plutôt prendre  $k \neq 1,07$ .

L'approximation retenue semble d'autant plus justifiée que le calcul de  $\tau_s$  repose déjà sur de nombreuses hypothèses (milieu élastique, homogène,...).



## Estimation de la charge exercée par le skieur

La charge "q" qu'exerce le skieur est beaucoup plus délicate à appréhender, compte tenu des différents paramètres qui peuvent intervenir:

- surface des skis effectivement portante,
- charge induite par le mouvement du skieur (prise d'appui lors d'un virage)
- caractéristiques particulières de la neige près de la surface, qui peuvent conduire à des interactions skis-neige ou à des transferts de charge différents.

D'après des informations fournies par la Société ROSSIGNOL, on peut supposer en première approximation que le poids P du skieur n'est réparti que sur la moitié de la longueur des skis, et que la charge peut pratiquement être doublée lors de prises d'appui. Mr Föhn.(1992 - Université d'été de Chamonix) et Mr Schweizer Jurg (1995 - Surveys in Geophysics) ont présenté des mesures qui correspondent à des majorations de l'ordre de 30 à 50 % lors de mouvements de flexions - extensions.

En conséquence, nous avons retenu comme première hypothèse de calculs de la charge q:

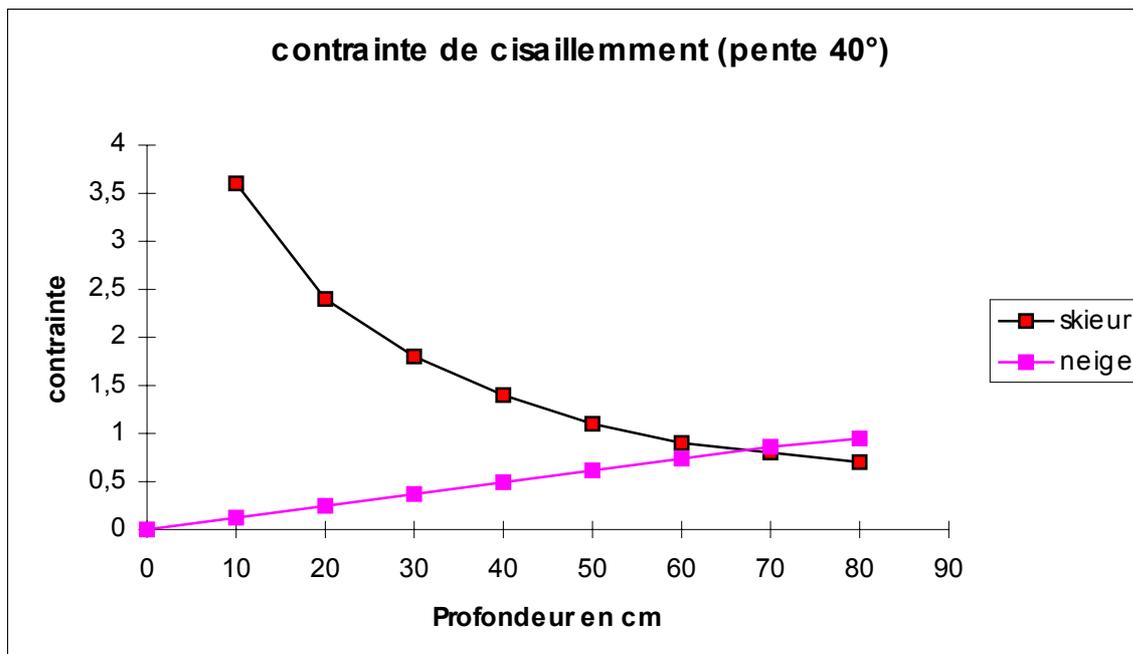
$$q = K P / (B L)$$

avec:

- P = 85 Kgf poids du skieur
- K = 1,5 coefficient de majoration lié à la prise d'appui:
- L = 1 m. longueur "efficace" des skis
- B = 0,2 m. largeur des 2 skis

La charge q est supposée uniforme le long de L, bien que ceci ne soit pas exacte.

Le graphique suivant présente les résultats d'un calcul analytique de  $\tau_s$  réalisé à partir de ces hypothèses et en considérant une couche de neige uniforme de masse volumique de 250 kg/m<sup>3</sup>. Ces résultats sont conformes aux valeurs obtenues par des collègues suisses :



Cette contrainte additionnelle due au poids du skieur est enfin ajustée par un dernier coefficient  $\beta$ , pour tenir compte des caractéristiques de la neige au voisinage de la surface. En effet, on conçoit aisément que la charge transmise et la répartition des contraintes  $\sigma_v(z, \theta)$  ne seront pas identiques selon que les skis reposent sur une neige dure et portante, ou une neige fraîche (enfouissement). Ainsi, en mécanique des sols, on constate qu'il y a accentuation de la contrainte  $\sigma_v$  sur la verticale si le matériau a une plus faible cohésion. Des mesures présentées par Mr Schneebeli(1994- EGS), montrent également qu'à 20 - 30 cm sous un skieur, les contraintes verticales peuvent varier significativement selon l'état de la neige

Ces phénomènes sont en fait plus complexes avec la stratification du manteau neigeux et ils peuvent avoir des effets contradictoires:

- une strate rigide peut conduire à un "étalement" de la charge et donc à une diminution de la charge transmise à la strate sous-jacente;
- cette rigidité peut aussi être source de vibrations et de pics brefs de contraintes plus importantes et non amorties.

Par manque de mesures précises, ce coefficient  $\beta$  a été estimé de manière experte. Il prend les valeurs suivantes :

type de neige	coeff. $\beta$
neige récente sèche	1,2
neige humide	1,1
neige regelée	0,5
neige évoluée	1.0

L'indice de stabilité  $S'(z)$  est calculé pour toutes les couches du mètre supérieur du manteau neigeux. En effet, au delà d'un mètre, la surcharge due au poids du skieur n'a plus d'effet.

- $S'(z)$  inférieur à 1.5 : strate potentiellement d'instabilité forte
- $S'(z)$  entre 1.5 et 2.5 : strate potentiellement d'instabilité modéré
- $S'(z)$  supérieur à 2.5 : strate stable

## V.2) Estimation des risques de départ accidentel d'avalanche

Le risque de déclenchement accidentel d'avalanche n'existe que si une structure de plaques est présente dans les couches superficielles du manteau neigeux. Rappelons qu'une structure de plaque est un assemblage de strates de neige particulier :une strate fragile surmontée d'une couche frittée plus ou moins rigide pouvant avoir un comportement de plaques friables ou dures.

Le système expert, après avoir calculé tous les  $S'(z)$ , va travailler à partir de la surface et rechercher une couche frittée dans le mètre supérieur pouvant avoir un comportement de type plaque. La définition actuelle d'une telle strate est la suivante : neige sèche de type lambda, lambda fin, grain fin ou fin anguleux et ayant une résistance limite aux cisaillements supérieure à 1.3 kg/dm<sup>2</sup> .

Si aucune couche ne répond aux critères, il n'y a pas de structure de plaque donc le risque de déclenchement accidentel est faible. Si une couche répond à ces critères, le système va analyser les  $S'(z)$  et les types de grains des couches sous jacentes situées à moins d'un mètre de la surface. Si une couche est de type grains anguleux ou neige récente et a un  $S'(z) \leq 2.5$

(fortement ou modérément instable), nous sommes en présence d'une structure de plaque instable. S'il existe sous la plaque, plusieurs niveaux d'instabilité, c'est le plus proche de la surface dans sa classe (forte ou modérée) qui est retenu. A noter que le sommet de la couche fragile doit être au minimum à 1 cm sous la surface.

A partir de cette analyse, le système expert positionne un risque de déclenchement accidentel d'avalanches sur 4 niveaux :

- **très faible** : pas de neige
- **faible** : pas de structure de plaque (couche frittée) ou dans le mètre supérieur
- **modéré** : structure de plaque avec niveau d'instabilité mécanique modéré de type accidentel dans le mètre supérieur
- **fort** : structure de plaque avec niveau d'instabilité mécanique fort de type accidentel dans le mètre supérieur

Pour faciliter l'apparition de plaques dans la chaîne SCM, des modifications ont été apportées à la formule estimant la masse volumique d'une neige fraîche se déposant ventée. Dans le même esprit, à partir de mesures effectuées au col du lac blanc, les caractéristiques morphologiques de la neige fraîche (dendricité et sphéricité) varient en fonction du vent pendant la chute.

## **VI) RESULTATS et VALIDATIONS**

### **VI.1) VALIDATIONS PONCTUELLES**

Pour réaliser ces validations ponctuelles, nous avons utilisé le logiciel CrocusMeptraPC qui permet des runs ponctuels avec un fichier trace des analyses Meptra. Grâce à ce logiciel sur PC, il est notamment possible de saisir un sondage/profil réalisé sur le terrain et le faire analyser par Meptra. Les jeux de données utilisés sont de deux catégories :

- Les mesures réalisées au Col de La Botte sur des pentes tests d'orientations différentes depuis 3 hivers. Les données disponibles sont complètes avec des sondages/profils académiques et des tests de stabilité (rutschblock, test de la pelle...) permettant de valider les différents niveaux d'instabilité (profondeur d'enfouissement, valeur des résistances aux cisaillements, présence de couches frittées...) analysés par le système expert. Les mesures réalisées sur ce site sont au nombre de 20 avec des cas d'instabilités marquées du manteau neigeux comme des cas plus rares de stabilité.
- les mesures faites sur le terrain après une avalanche. Les 7 cas d'avalanches sélectionnés correspondent à différents types de structures de manteaux neigeux d'instabilité de type accidentel. De plus, une avalanche s'étant produite, nous analysons uniquement des cas d'instabilité prouvée. Il est possible de comparer la couche fragile détectée par le système expert à celle observée ainsi que le ou les niveaux d'instabilité (modérés ou forts) analysés par Meptra aux conditions du déclenchement de l'avalanche (un skieur isolé ou plusieurs skieurs).

L'objectif n'est pas de faire une validation quantitative qui nécessiterait un échantillon très important de données sous la forme de profils/tests ou une validation temporelle de l'évolution du manteau neigeux et de sa stabilité mais de vérifier qualitativement l'analyse du risque de déclenchement accidentel d'avalanches Meptra (niveaux d'instabilité, structure de plaque avec couches frittées, niveaux de risque...) et ainsi de mentionner les améliorations et les limites du système actuel. Pour le risque de départ naturel, seules des validations massifs (cf § V.2) ont été réalisées.

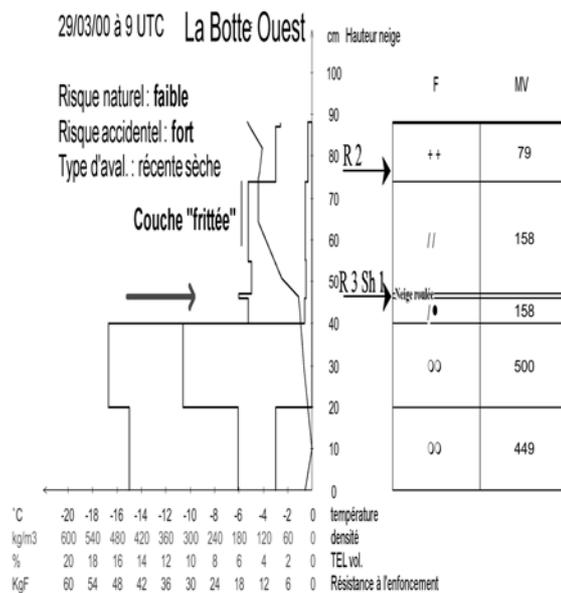
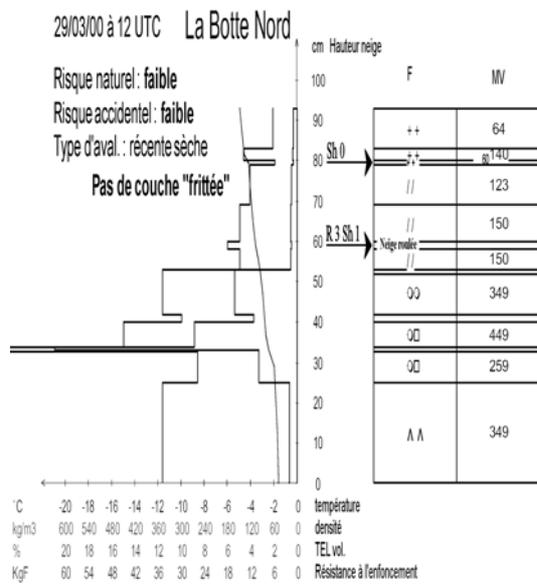
Les graphiques tels qu'ils vont apparaître ci-dessous sont composés de sondages/profils analysés par Mepra avec l'éventuel niveau d'instabilité détecté et la présence ou non d'une couche frittée (plaque). Pour les tests, R signifie Rutshblock, Sh indique un test de la pelle (Shovel) ou un test de compression. Le numéro qui suit précise soit le score du rutshblock de 1 (rupture du bloc lors de la découpe) à 7 (très stable) selon P. Föhn (Föhn, 1987) ou le score du test de la pelle selon Bruce Jamieson (Jamieson, 1999) à savoir : de 0 très fragile (rupture lors de la fabrication de la colonne) à 3 stable.

### **VI.1.1) Mesures du Col de la Botte**

#### **a) Cas du 29/03/2000 :**

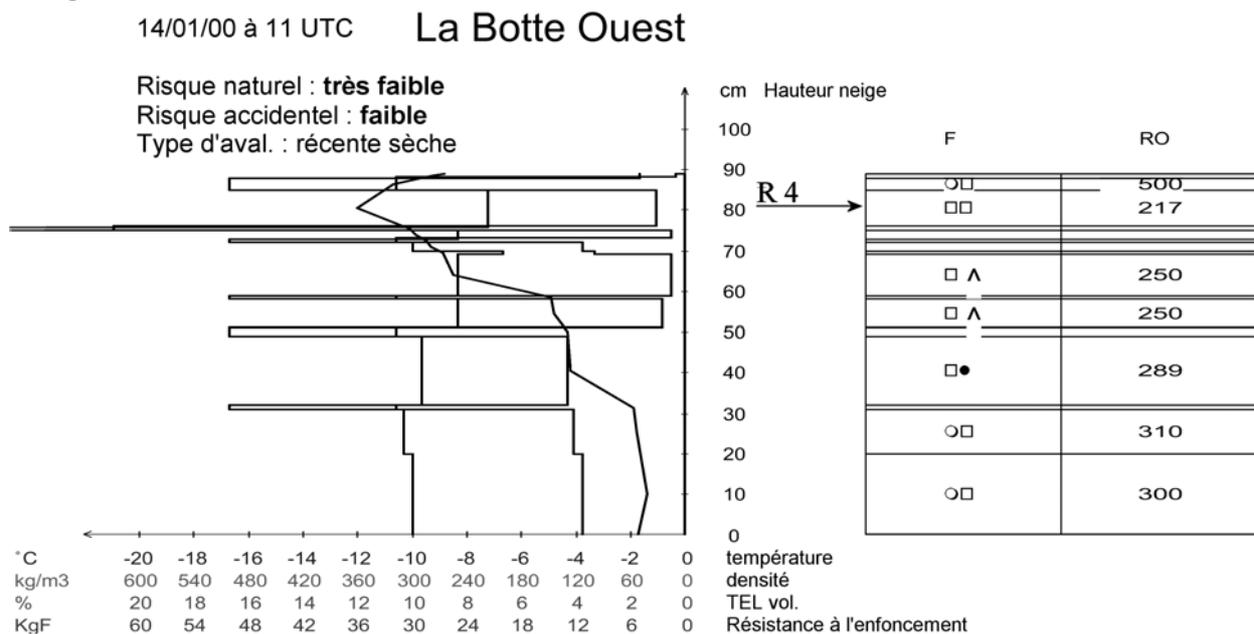
Les deux sondages ci dessous ont été réalisés sur les versants Nord et Ouest du site le même jour après une chute de neige modérée qui s'est déposée peu ventée. Leurs caractéristiques sont similaires et typiques d'un profil de plaque friable dans les couches supérieures du manteau neigeux. Cette neige récente repose sur une couche fragile composée de neige roulée. Le modèle Crocus ne connaissant pas ce type de neige, nous l'avons remplacé par des « gobelets » ou givre de profondeur tout en gardant à la couche concernée les mêmes caractéristiques massiques et thermiques ainsi que la même taille de grains. En effet, les « gobelets » comme les grains de neige roulée sont de gros grains avec peu de points de contact entre les grains. Ce changement de type de grains devrait permettre une estimation correcte de la résistance limite aux cisaillements de ces faux grains de neige roulée.

Concernant la stabilité, les résultats des rutshblocks montrent que les manteaux neigeux sont tous les deux instables. Or l'analyse Mepra donne un risque faible en Nord et fort en Ouest. Une étude plus poussée de l'analyse Mepra grâce au fichier Trace montre que le système expert a détecté des niveaux d'instabilité dans les deux profils et notamment dans la pseudo couche de neige roulée (niveau d'instabilité fort). La condition nécessaire à un risque de déclenchement accidentel était donc présente. Par contre, la neige surmontant la couche fragile a des caractéristiques légèrement différentes : en versant Nord, elle est plus légère et d'après Mepra n'a pas un comportement de plaque (pas de couche suffisamment frittée) alors qu'en versant Ouest, elle est plus dense et peut se comporter comme une plaque (frittage suffisant). Le seuil de résistance limite aux cisaillements pour une neige à comportement de plaque à savoir  $1,3 \text{ kg/dm}^2$  (cf § IV.2) est légèrement dépassé en Ouest et n'est pas atteint en versant Nord. Cette exemple montre certains effets de seuils qui peuvent apparaître dans Mepra mais aussi le manque de connaissances scientifiques dans la capacité d'une plaque friable à propager la fracture. L'utilisation de la ténacité, capacité d'un matériau à propager une fracture, est à étudier.



## b) Cas du 14 janvier 2000

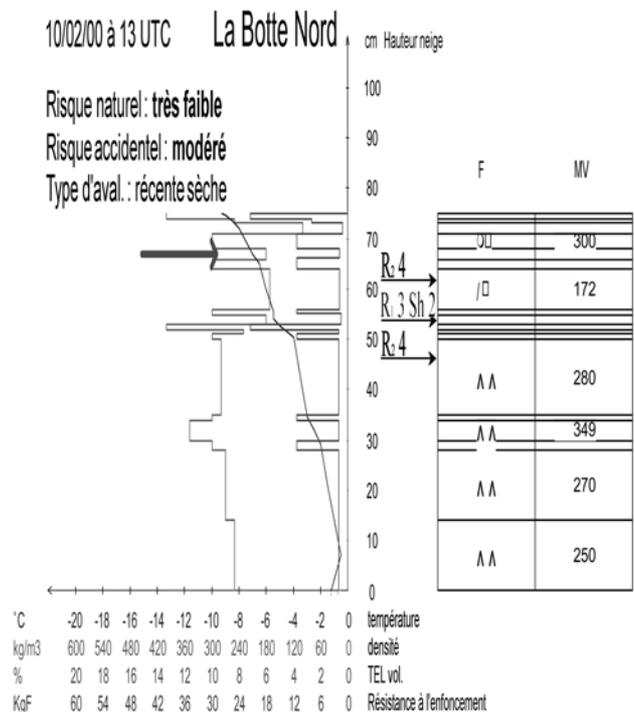
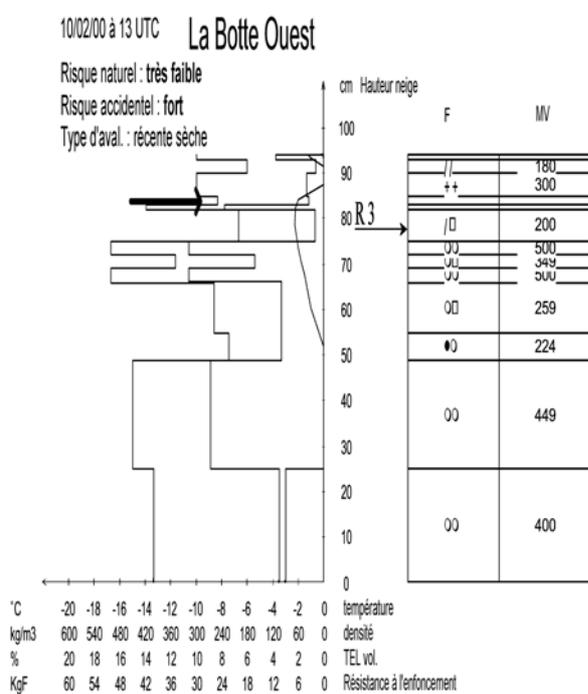
Le rutshblock réalisé ce jour là sur le terrain montre un niveau d'instabilité modéré de rang 4. De son côté, Mepra en analysant le sondage positionne une risque de déclenchement accidentel faible. En effet, le fichier Trace indique que Mepra a détecté plusieurs niveaux d'instabilité forte dans le profil mais ne trouve aucune couche à comportement de plaque. Les couches surmontant les couches fragiles sont toutes composées uniquement de neige regelée qui ne peuvent avoir un comportement de plaque. Pour le rutshblock, la croûte de regel a été découpée ce qui lui permet de glisser et son épaisseur est un peu faible pour amortir toute la charge du skieur.



### c) cas du 10 février 2000

Dans ce cas, plusieurs niveaux d'instabilités coexistent. Les tests de stabilité ont montré plusieurs couches fragiles avec des niveaux de fractures faible à modéré. Le fichier de trace des résultats Mepra montrent que le système expert a aussi détecté plusieurs niveaux d'instabilité forte. La neige en surface ayant un comportement de type plaque (neige récente dense donc couche suffisamment frittée), l'instabilité de type accidentelle est établie. Dans ce cas de couches fragiles multiples, le système expert indique la couche fragile la plus proche de la surface de niveau fort et/ou de niveau modéré. Le test de stabilité aura plutôt tendance à détecter la couche la plus fragile et la plus enfouie.

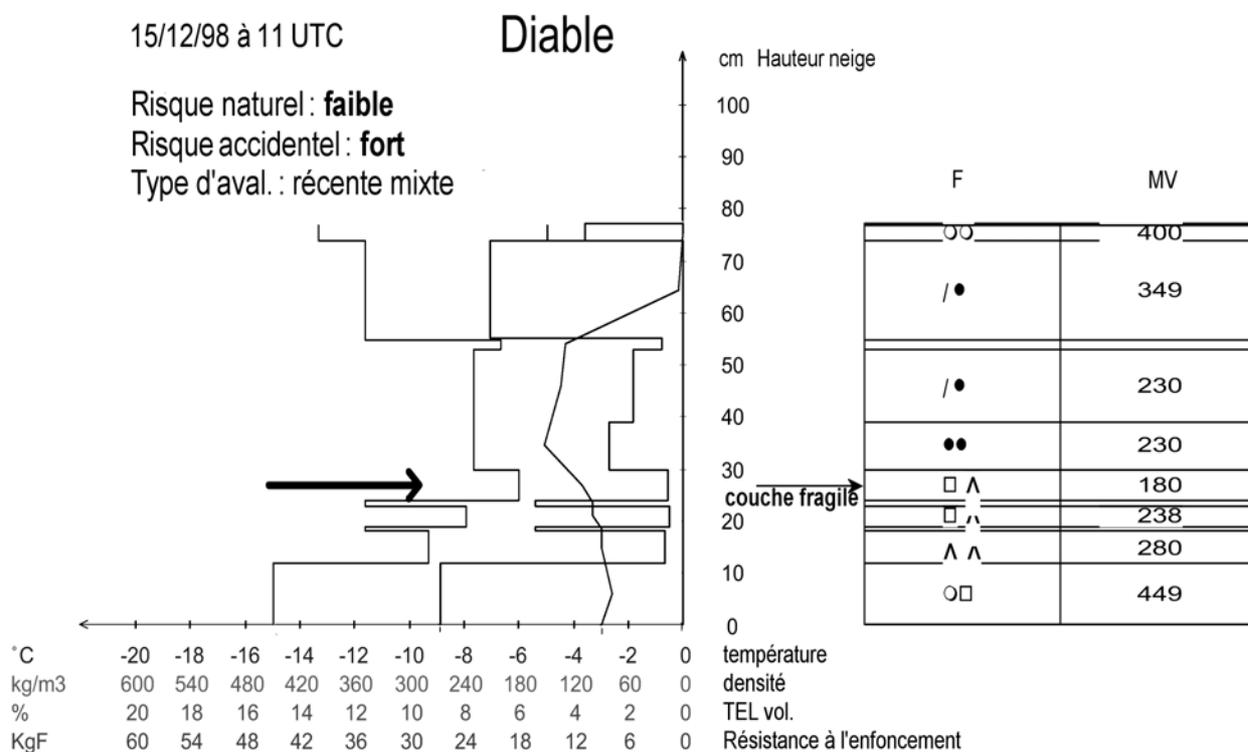
En versant Ouest, Mepra indique un risque accidentel fort conforme à la détection de la structure de plaque avec niveaux d'instabilité forte. Par contre, en versant Nord, il mentionne un risque modéré alors que des niveaux d'instabilité forte sont détectés et que la structure de plaque est avérée. Cette estimation du risque accidentel d'avalanches est due à la présence de plusieurs couches de neige regelée surmontant la couche fragile. Le système considère que plus de 5 cm de neige regelée tend à rendre le manteau neigeux moins instable et donc à diminuer le risque. Par contre, il ne prend pas en compte l'effet accroissement du gradient de contrainte lié à la présence d'une fine croûte de regel.



## VI.1.2) Mesures lors d'avalanches

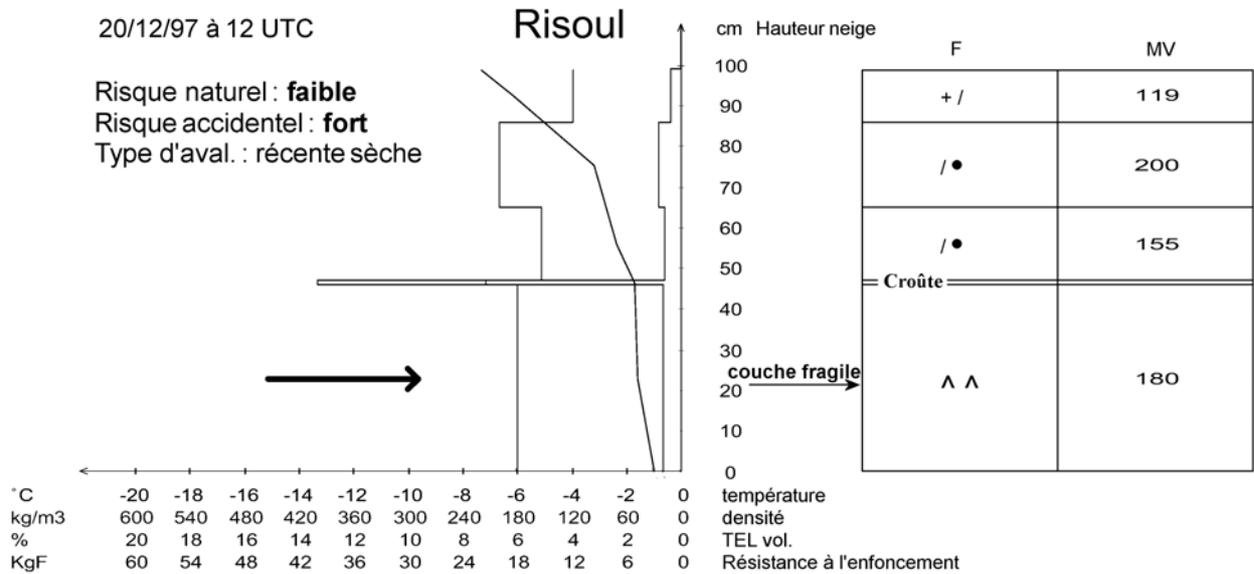
Lorsqu'une avalanche a été déclenchée par un ou plusieurs skieurs, les centres météorologiques chargés de la prévision du risque d'avalanches en collaboration avec le Centre d'Etudes de la Neige vont expertiser le manteau neigeux. Des mesures sont donc réalisées à la cassure ou dans une pente proche ayant des conditions de neige similaires. Quelques unes de ces mesures vont être utilisées ci dessous afin de valider l'expertise Mepra. Cette validation consistera à comparer les niveaux d'instabilité détectés par Mepra à la couche fragile trouvée sur le terrain et le niveau de risque avec le type de déclenchement.

### a) cas du 15 décembre 1998



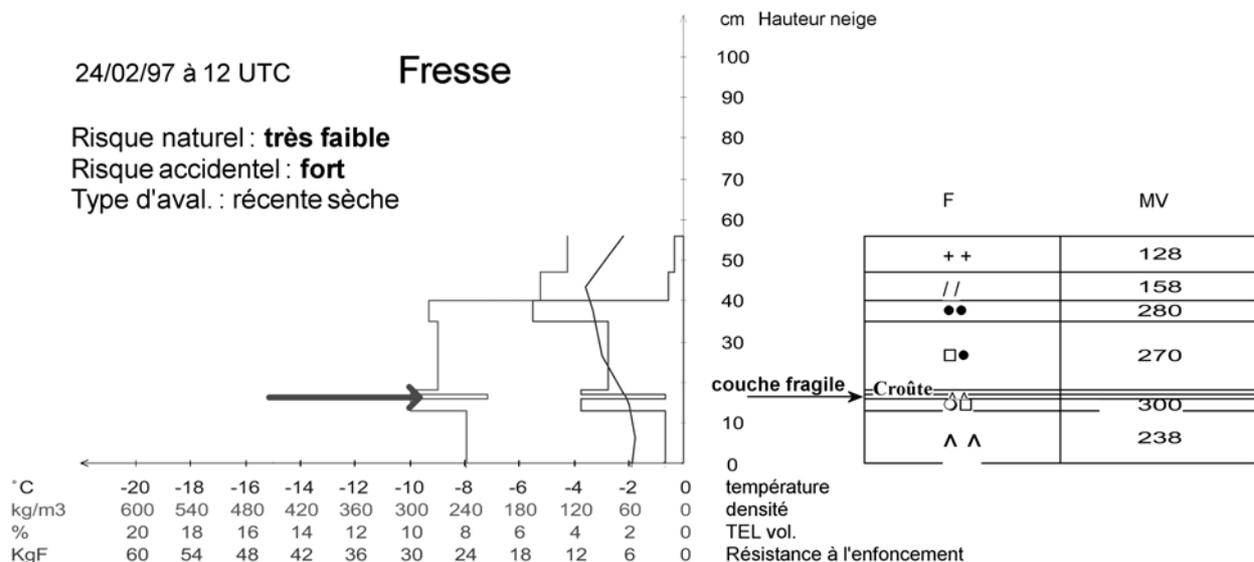
Exemple typique d'une plaque dure (couche très frittée) constituée de grains fins denses probablement accumulés par le vent reposant sur une couche fragile constituée de grains à faces planes et de gobelets. La couche fragile détectée par le système expert correspond exactement à celle trouvée lors des mesures terrain.

**b) cas du 20 décembre 1997**



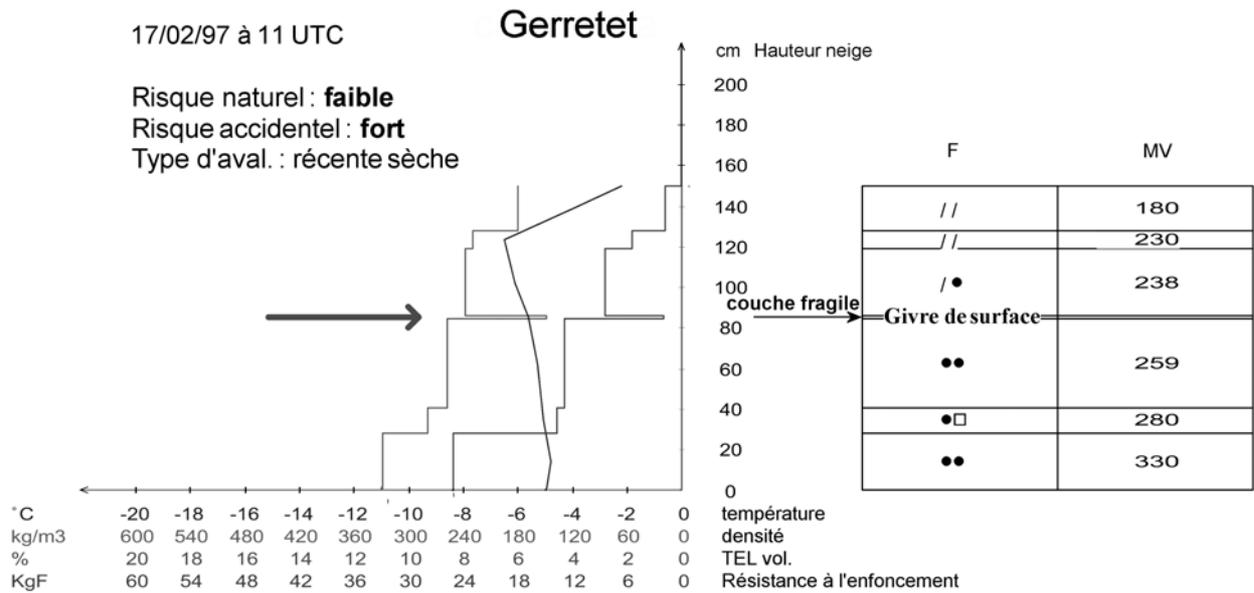
Cas d'une plaque friable déclenchée par un skieur en forêt. La couche fragile est constituée d'une épaisse couche de gobelets ou givre de profondeur. La fine croûte de regel au-dessus de la couche fragile accroît l'instabilité du manteau neigeux. L'analyse Mepra est correcte.

**c) cas du 24 février 1997**



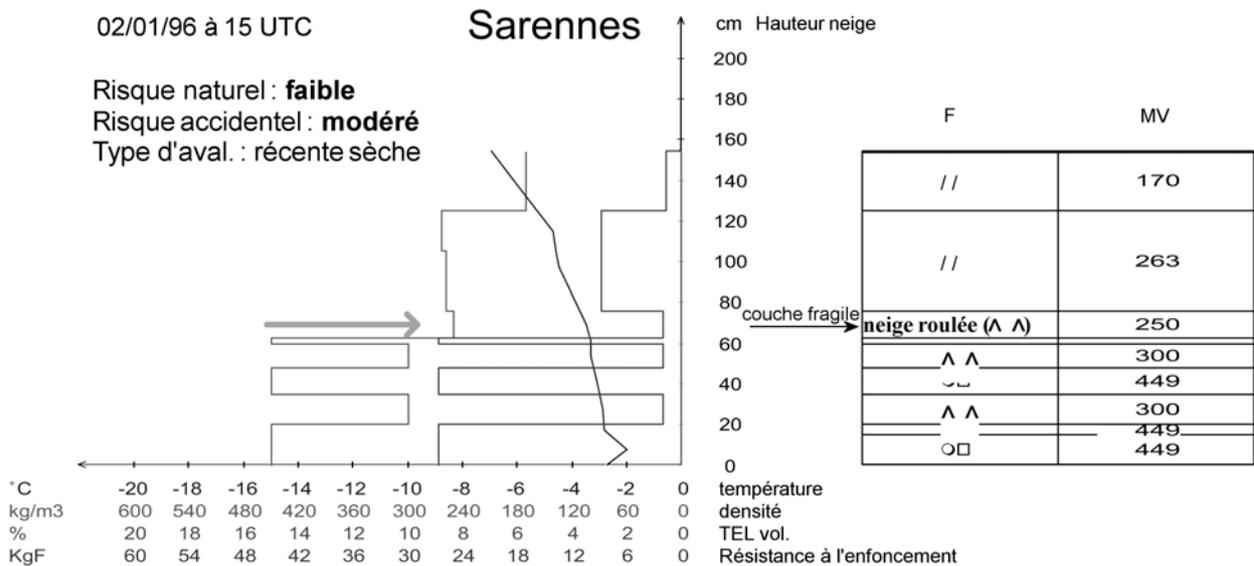
Un nouveau cas de manteau neigeux à structure de plaque. 15 cm de neige fraîche masque la plaque plutôt dure composée de grains fins et de grains fins anguleux de bonne résistance. La couche fragile est par contre très fine, environ 1 cm, composée de gobelets et surmontée d'une fine couche de glace. De très faciles fractures dans cette couche fragile se sont produites lors des tests de pelle sur le terrain. Les niveaux de risque et d'instabilité analysés par Mepra restent corrects.

d) cas du 17 février 1997



Toujours un profil de plaque avec une très fine couche fragile. Par contre, la couche fragile était constituée sur le terrain de givre de surface enfoui. Crocus ne connaissant pas ce type de grains, ils ont été remplacés par du givre de profondeur (cf § V.1.1 a). L'estimation de la résistance limite aux cisaillements dans Mepra est correcte tout comme l'analyse de l'instabilité et du risque.

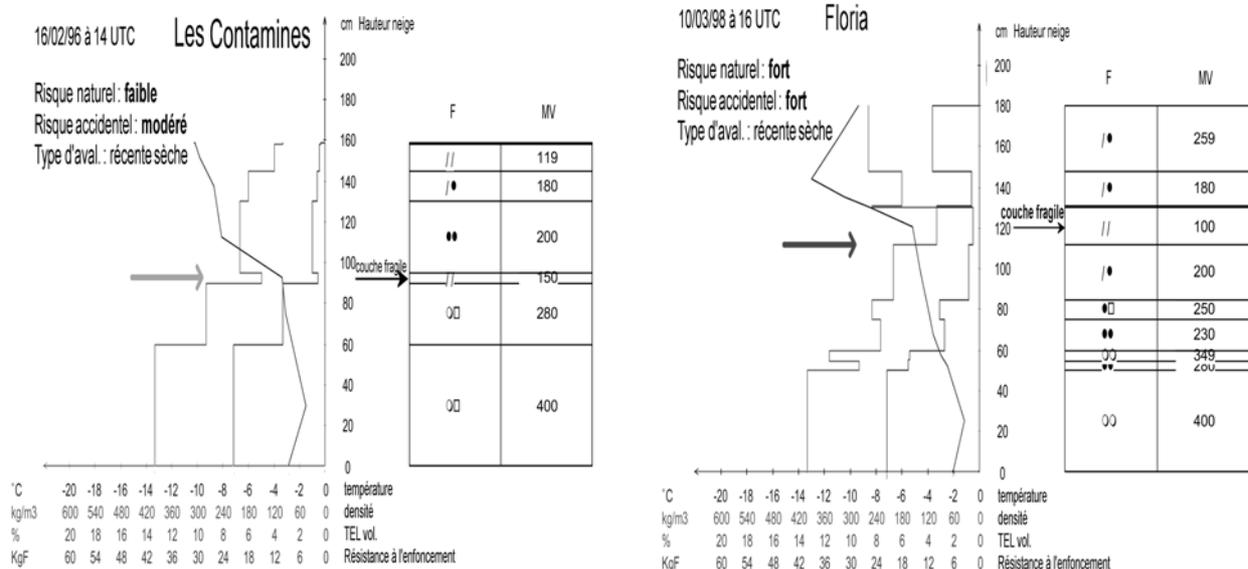
e) cas du 02 janvier 1996



Cette avalanche a été déclenchée alors que plusieurs skieurs avaient déjà traversé la pente. La couche fragile de neige roulée est enfouie sous 80 cm de neige plus ou moins récente. A une telle profondeur, la surcharge additionnelle due au poids du skieur devient faible (cf § IV.1). Un niveau d'instabilité modéré dans la couche fragile de pseudo neige roulée est détecté par le système expert débouchant sur un risque modéré de déclenchement accidentel. Cette

analyse experte indique en fait qu'il faudrait une charge supérieure à un skieur pour déclencher.

**f) cas du 16 février 1996 et du 10 mars 1998**



Ces deux derniers sondages montrent des cas d'instabilité de type accidentel en neige récente. Celui des Contamines est un exemple de plaque friable (couche faiblement frittée) sur une couche fragile composée de neige récente fragile peu consolidée. Floria est un cas particulier de plaque plutôt dure reposant sur une couche fragile constituée de particules reconnaissables de très faible masse volumique. L'analyse Mepra est différente car il existe un niveau fort d'instabilité naturelle dans le profil Floria et donc un risque fort de départ naturel d'avalanches. Dans ce cas, le risque de déclenchement accidentel ne pouvant être inférieur au risque naturel, il ressort à fort sans aucune information sur l'instabilité de type accidentel.

**VI.1.3) Conclusion**

Ces quelques comparaisons ponctuelles et qualitatives montrent que l'analyse Mepra, si elle fournit des résultats satisfaisants, est à améliorer :

- ✓ lorsqu'il existe plusieurs niveaux d'instabilité de type accidentel, Mepra indique le niveau classé fragile le plus proche de la surface mais pourrait aussi signaler le niveau le plus fragile
- ✓ une fine croûte de regel au dessus d'une couche fragile indique une instabilité plus marquée du manteau neigeux (accroissement du gradient de contrainte). Ce phénomène est à prendre en compte
- ✓ le lien risque naturel – risque accidentel prive l'utilisateur d'information intéressante sur l'analyse par Mepra de l'instabilité de type accidentel du manteau neigeux. En effet, le risque accidentel est par définition supérieur ou égal au risque naturel.

## **VI.2) VALIDATIONS MASSIFS**

Une analyse plus quantitative des résultats Mepra est nécessaire afin de porter un jugement plus général et plus objectif sur la qualité de l'analyse Mepra du risque de départ naturel et accidentel d'avalanches. Pour ce faire, nous avons utilisé les résultats Mepra de la chaîne SCM en analyse sur la massif de la Vanoise et sur une période longue de 10 ans (Août 1981 à Juillet 1991). Ce choix rend le jugement que nous allons porter sur les résultats Mepra dépendant à la fois de la qualité de l'analyse météorologique faite par Safran et de la qualité des simulations du manteau neigeux réalisées par le modèle français de neige à savoir Crocus. Il a par contre l'avantage de rendre possible la comparaison entre des indices d'activité avalancheuse de type naturel ou accidentel calculés à partir des données du réseau nivométéorologique et des indices Mepra de risque naturel et accidentel à l'échelle du massif.

### **VI.2.1) Comparaison activité avalancheuse naturelle et indice naturel Mepra**

L'activité avalancheuse naturelle à l'échelle du massif n'est pas une variable mesurée ni mesurable. Il est donc nécessaire de définir un indice à partir des informations sur les avalanches fournies par les postes du réseau nivométéo de Vanoise. De même, Mepra fournit une information par tranche d'altitude, par expo et par pente rendant l'élaboration d'un indice nécessaire.

#### **a) Indice d'activité avalancheuse naturelle**

L'indice d'activité avalancheuse utilisé est calculé à partir des informations avalanches signalées par les postes d'observations du réseau nivo-météorologique. Rappelons que cette information avalanche est codée de 0 (pas d'avalanche) à 9 (plus de 10 avalanches) et donc inutilisable directement. Des valeurs ont donc été affectées aux événements définis par le code. Elles ont été choisies de telle sorte que la journée où X postes signalent une avalanche soit réputée plus avalancheuse que la journée où un poste signale X avalanches. Cette valeur, de 0 pas d'avalanche à plus de 10 avalanches signalées, varie donc approximativement comme une fonction logarithmique du nombre d'avalanches. A partir de ces valeurs, nous utilisons une formule du type :

$$A=(S_n/N_p) \times g(N_0/N_p)$$

où :

- A : Activité avalancheuse
- $S_n$  : Total des valeurs affectées aux différents événements avalancheux observés pour les postes du massif considéré
- $N_p$  : Nombre de postes pris en compte dans le calcul
- $N_0$  : Nombre de postes parmi les  $N_p$  ne signalant aucune avalanche

La fonction  $g(N_0/N_p)$ , fonction croissante, a pour but de pondérer l'activité avalancheuse selon sa répartition géographique. D'un point de vue pratique, il a été décidé de choisir une fonction variant de 1 (1 poste signale un événement) à 2 (tous les postes signalent un événement). Elle est actuellement de la forme  $2N_p/(N_p+N_0+1)$ .

Cette grandeur d'activité avalancheuse s'avère plus cohérente dans ses variations que le simple cumul du nombre d'avalanches.

### **b) Indice de risque MEPRA**

Rappelons que la chaîne SCM fournit des résultats par tranche d'altitude avec une discrétisation verticale de 300m, par exposition (6 expos + le plat) et par pente (20 et 40 deg.). Différents essais ont donc été réalisés pour stabiliser un indice de risque prenant en compte à la fois la répartition spatiale et l'intensité des risques MEPRA. Partant du principe qu'une avalanche intéresse souvent plusieurs secteurs de même exposition, l'indice de risque actuellement utilisé est de la forme :

$$I_R = \frac{\sum_{\text{expo}=1}^{\text{nbexpo}} \max(R(\text{alti}, \text{expo}), \text{alti} = 1, \text{nbalt})}{\text{nbexpo}}$$

où Nbexpo = Nombre d'expositions du massif (6)  
et Nbalt = Nombre d'altitudes pour la tranche 1500-3000 (6 niveaux d'altitude)

$R(i,j)$  = valeur affectée au risque MEPRA de 0 (risque très faible) à 6 (risque très fort) pour la pente d'altitude  $1200+i*300$  et d'exposition correspondant à  $j$

soit la moyenne des risques maximum par exposition

### **c) Comparaison des deux indices**

#### ***Comparaison qualitative :***

Le calcul d'un indice d'activité avalancheuse et de risque MEPRA permet une représentation chronologique de ces 2 grandeurs. Cette méthode a l'avantage de mettre en évidence les épisodes avalancheux d'un hiver, de permettre une analyse à posteriori de certaines situations nivométéorologiques et un contrôle qualitatif des prévisions.

Des comparaisons graphiques ont donc été réalisées pour le massif de la Vanoise sur les 10 derniers hivers (fig 7).

Elles amènent les remarques suivantes :

- Les situations printanières sont bien analysées avec une bonne corrélation spatiale et temporelle activité/risque. Le schéma d'analyse prend correctement en compte la déstabilisation mécanique par humidification et percolation.

- L'analyse des situations hivernales, à fortes précipitations neigeuses, ne donne pas entière satisfaction. Dans ce type de situation, l'observation d'avalanches est difficile voire impossible : manque de visibilité, site inaccessible, dépôts non caractéristiques... ce qui provoque une indétermination importante sur le nombre d'avalanches voire la date et l'heure de ces avalanches. Un exemple précis : un épisode de fortes chutes de neige a eu lieu entre le 5 et le 7 Janvier 1994 dans le massif de l'Oisans. Le poste d'observation nivométéorologique le plus proche n'a signalé aucune avalanche naturelle et seulement quelques déclenchements artificiels positifs. A la même période, le capteur sismique du refuge de La Lavey enregistrait plus de 20 signaux d'avalanches. De plus, le transport de neige par le vent joue souvent un rôle important dans ce type d'épisodes : répartition inégale des précipitations, formation

d'accumulations et de plaques, localisation avec accentuation du risque. Malgré les progrès réalisés, il est encore difficile de traiter efficacement ce problème lors d'une approche globale à l'échelle du massif. Enfin la non prise en compte des purges peut conduire à maintenir, en fin d'épisode avalancheux, un risque naturel Mepra à l'échelle du massif plus important que celui reflété par l'activité terrain.

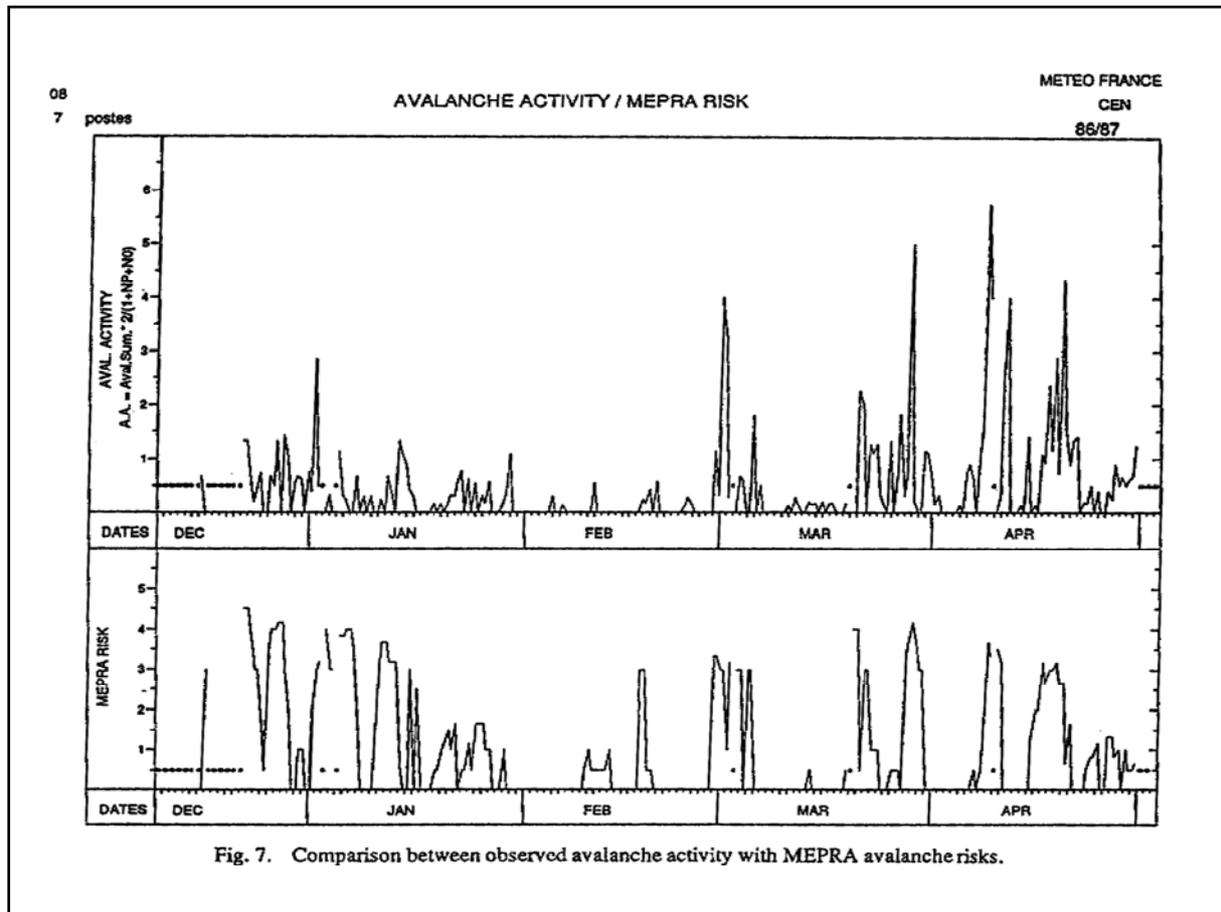


Fig. 7. Comparison between observed avalanche activity with MEPRA avalanche risks.

### Comparaison quantitative :

L'activité avalancheuse et le risque MEPRA tels qu'ils ont été définis précédemment ne sont pas des variables directement comparables. Pour une comparaison quantitative, il est nécessaire de définir des classes d'activités avalancheuses et des classes de risques. Dans un premier temps et par souci de simplification, il a été décidé de travailler sur l'occurrence des deux variables et donc de dresser des tableaux de contingence à 2 modalités hiver par hiver où  $i$  est la classe d'activité et  $j$  est la classe de risque. Un score adapté à notre problème a été utilisé. L'indice composite de succès (Hansen et Kuiper) qui prend en compte la fréquence dans chaque classe :

$$V = \left( \sum_i (a_{ii} / \sum_j a_{ij}) \right) / 2$$

Voici en exemples un hiver à forte activité avalancheuse 1986/87 et un hiver à faible activité 1991/92 :

a) Hiver 1986/87 :

Risques Activité	Nul	Existant
Nulle	113	34
Existante	31	80

Indice composite de succès : 0.75

b) Hiver 1991/92 :

Risques Activité	Nul	Existant
Nulle	181	27
Existante	27	35

Indice composite de succès : 0.72

Les deux tableaux montrent qu'il n'y a pas de biais systématique. Les résultats sont nettement meilleurs l'hiver 86/87 à forte activité (43 % de journée avalancheuse) et moins bon l'hiver 91/92 (20% de journée avalancheuse) à faible activité. Une des explications vient du fait que les situations sont peu tranchées dans le cas d'un hiver à faible activité. De plus, les déclenchements préventifs d'avalanche sont plus faciles à réaliser et plus efficaces, ils perturbent donc plus nettement la comparaison.

### **VI.2.2) Comparaison activité avalancheuse accidentelle et indice accidentel Mepra**

Le risque accidentel MEPRA est lié à une forte instabilité latente du manteau neigeux. Cet état n'est pas observable et difficilement mesurable. Seules ses conséquences peuvent être connues si la fréquentation de la montagne est suffisante. Pour s'affranchir de ce problème de fréquentation, nous avons décidé de travailler sur le hors pistes de domaines skiabiles, conscient des perturbations liées aux déclenchements préventifs d'avalanches.

### a) Indice d'activité avalancheuse

Un indice d'activité avalancheuse de type accidentelle a été calculé à partir des données de deux postes du réseau nivométéorologique : La Plagne et Les Arcs. Ces deux stations ont un service de prévision locale du risque d'avalanches et disposent d'une description précise sur support traitable des événements avalancheux de leur domaine. Les informations date de l'avalanche et type (naturel, accidentel ou artificiel) de déclenchement sont utilisées pour calculer le total journalier des événements de type accidentel. Ce nombre nous servira provisoirement d'indice d'activité avalancheuse de type accidentel.

### b) Indice de risque

Différents essais ont été réalisés pour stabiliser un indice de risque accidentel prenant en compte à la fois la répartition spatiale et l'intensité du risque. Un poids a donc été affecté à chaque niveau de risque : risque nul ou faible = 0 , risque modéré = 0.5 , risque fort =1. La probabilité de déclencher accidentellement une avalanche est d'autant plus forte que le nombre de pentes concernées est élevé. L'indice de risque est donc simplement la moyenne des poids affectés à chaque pente dans la tranche 1500 - 3600 m. soit

$$I_R = \frac{\sum_{expo=1}^{nbexpo} moy(Rac(alti, expo), alti = 1, nbalt)}{nbexpo}$$

où Nbexpo = Nombre d'expositions du massif (nord, est, sud-est, sud, sud-ouest, ouest)

Rac(i,j) = valeur affectée au risque MEPRA pour la pente virtuelle d'altitude  $i \cdot 300 + 600$  mètres et d'exposition j

### c) Comparaison entre indice d'activité et risque

Pour chaque hiver, une représentation activité/risque a été réalisée sous forme graphique ( fig. 8). La représentation chronologique de ces 2 grandeurs permet une analyse à posteriori de certaines situations nivométéorologiques, un contrôle qualitatif des analyses MEPRA et a l'avantage de mettre en évidence les épisodes avalancheux d'un hiver. L'analyse des graphiques amène les remarques suivantes :

- La correspondance premier déclenchement et positionnement d'un risque accidentel est souvent remarquable

- les fins d'épisodes semblent moins bien gérés avec souvent le maintien d'un risque accidentel marqué, quoique à la baisse, mais sans déclenchement d'avalanches. Plusieurs explications sont possibles: l'instabilité du manteau neigeux a tendance à se localiser, de nombreuses pentes, et souvent les plus accessibles, ont été purgées accidentellement ou artificiellement et la médiatisation des accidents limite la pratique du ski hors piste.

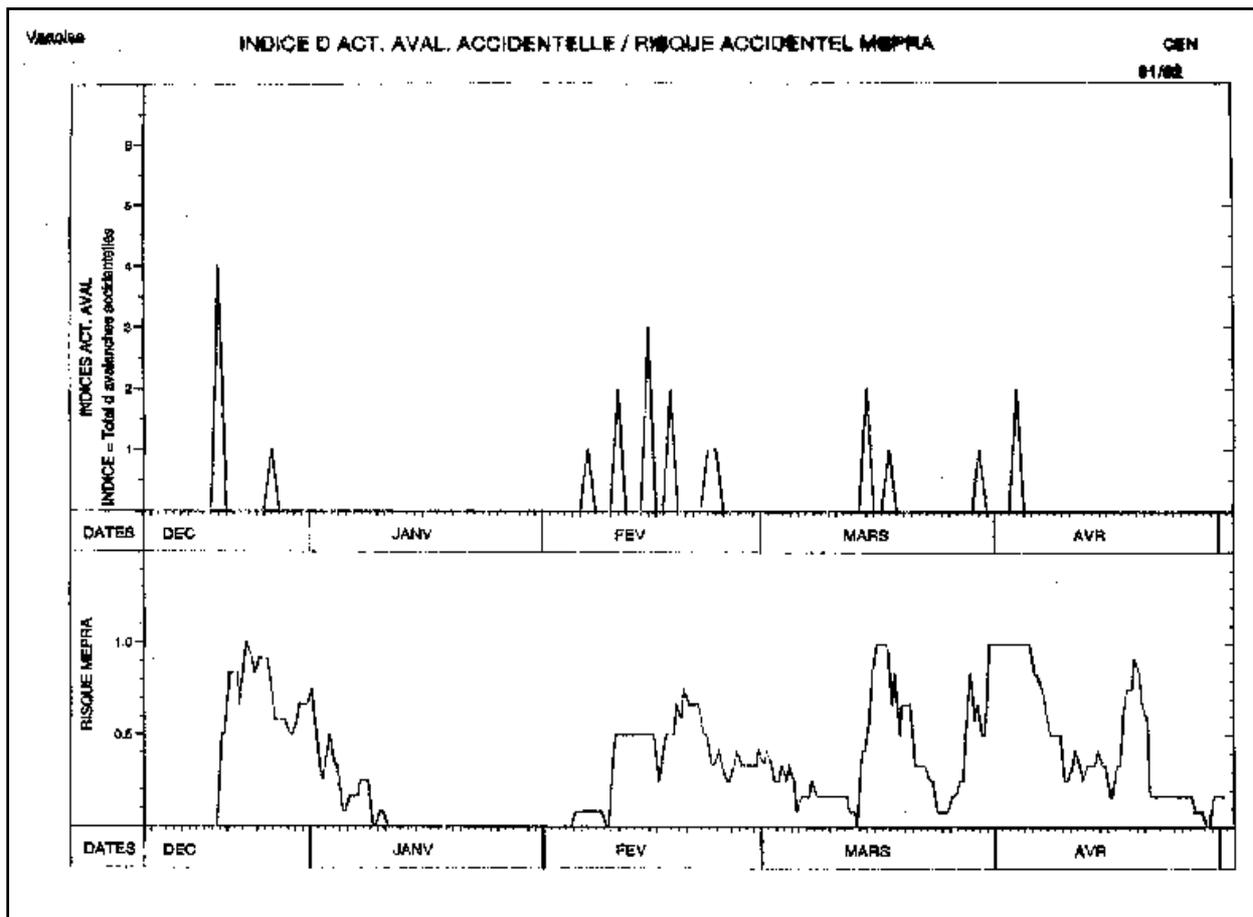


Fig 8 : comparaison activité avalancheuse accidentelle / risue accidentel Mepra hiver 9192

L'activité avalancheuse et le risque MEPRA tels qu'ils ont été définis précédemment ne sont pas des variables directement comparables. Pour une comparaison quantitative, il est nécessaire de définir des classes d'activités avalancheuses et des classes de risques. Dans un premier temps et par souci de simplification, il a été décidé de travailler sur l'occurrence des deux variables et donc de dresser des tableaux de contingence à 2 modalités hiver par hiver où i est la classe d'activité et j est la classe de risque. En ce qui concerne l'occurrence de risque, le seuil a été fixé à 0,2 pour éliminer les journées à risque accidentel MEPRA très localisés Un score adapté à notre problème a été utilisé.

Voici en exemple un hiver à forte activité avalancheuse 1991/92 :

Activité \ Risques	Nul ou faible	Existant
	Nulle	81
Existante	3	9

Ce type de comparaison présente peu d'intérêt pour valider l'analyse du risque accidentel pour plusieurs raisons : le nombre de cas de déclenchements accidentels signalés est très faible, les déclenchements préventifs réalisés par les stations modifient considérablement la réponse du manteau neigeux, la connaissance de l'activité avalancheuse de type accidentel est médiocre.... De plus , un risque accidentel fort indique une instabilité latente du manteau neigeux. La réponse du manteau neigeux va donc dépendre de la fréquentation qui est très liée aux conditions météorologiques.

Pour valider l'analyse Mepra du risque accidentel, l'utilisation de mesures terrain de type sondage/profil ou test de stabilité (cf. § V.1) est plus intéressante.

## **VII) LIMITES DE CETTE APPROCHE**

Le système expert Mepra est un outil d'aide au diagnostic. Dans le cadre de la prévision du risque d'avalanches à l'échelle du massif, il fournit une aide précieuse au prévisionniste avalanche en analysant l'ensemble des profils du manteau neigeux simulés par la chaîne Safran/Crocus. Il permet ainsi une mise en alerte du prévisionniste sur des instabilités naturelles ou accidentelles localisées ou généralisées. Les différentes validations montrent qu'il analyse assez bien la situation nivologique à l'échelle du massif, échelle de travail du prévisionniste départemental.

A l'échelle locale et notamment d'une pente, les limites de son approche le rendent plus critiquable dans ses résultats. En effet, l'approche Mepra reste unidimensionnelle en raisonnant sur la base d'une pente type. La répartition du manteau neigeux est considérée comme uniforme, sans prise en compte des ancrages amonts, avals et latéraux. Le transport de neige par le vent et la variabilité spatiale du secteur ou du couloir ne sont pas pris en compte. Les modifications des champs de contraintes liés à des phénomènes de déformation lente du matériau (glissement, fluage, reptation) ne sont pas simulées par le système. Enfin, il n'y a pas de gestion des purges avalancheuse.

Quelques thèmes de développement pourraient par contre améliorer à court terme l'analyse Mepra que ce soit à l'échelle du massif ou à l'échelle locale :

- prendre en compte le transport de neige par le vent dans la chaîne SCM, par un couplage avec le modèle Sytron, et ainsi améliorer encore la qualité des résultats de Mepra en analyse comme en prévision en permettant de reproduire une certaine variabilité spatiale de l'enneigement.
- améliorer l'évaluation des neiges récentes déposées en période ventée (quantité, caractéristiques morphologiques et massiques...)
- faire évoluer dans le temps par tassement et métamorphose les couches fragiles de type faces planes ou gobelets enfouies dans le manteau neigeux
- gérer la formation du givre de surface et la gestion de la neige roulée dans Crocus
- prendre en compte de la notion de plan de glissement inter strates dans Mepra associée à des mesures de résistance aux cisaillements au niveau de certaines interstrates

A l'échelle du massif, une synthèse de l'information fournie par Mepra aux différents niveaux d'altitude, d'exposition et de pente pourrait aider le prévisionniste avalanche dans son analyse. Pourrait ainsi être créé un indice d'activité avalancheuse naturelle et accidentelle modélisé.

## BIBLIOGRAPHIE

- Brun E.**, Martin E., Simon V., Gendre C., Coléou C. ,1989 - An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting, *J. of Glaciol.*, Vol 35, N°121, p333-342.
- Colbeck, S.C.**, E. Akitaya, R. Armstrong, H. Gubler, J. Lafeuille, K. Lied, D. McClung and E. Morris. 1990. The international classification for seasonal snow on the ground. International Association of Scientific Hydrology, International commission on Snow and Ice, Wallingford, Oxon.
- Coléou C.**, Giraud G. and Lejeune Y., 2002 - "IN-SITU" MEASUREMENTS TO TEST CROCUSMEPRAPC TOOL., International snow science workshop, 30 Sept- 4 Oct 2002, Penticton, British Columbia, Canada
- Costet et Sanglera**, 1969 - *Cours pratique de mécanique des sols*
- Duclos A.,1993** - Neige, vent et avalanches : quelques observations pour un meilleur diagnostic , revue de l'ANENA, Neige et Avalanches, n° 64, décembre 1993
- Durand Y.**, Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E., 1993 - A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, *Annals of Glaciol.*, Vol 18, p 65-71.
- Durand Y., Giraud G., Brun E., Mérindol L., Martin.E.** « A computer based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting », 1999, *journal of glaciology*.(45), 151, 469-484
- Fohn, Paul M.B.** 1987b. The stability index and various triggering mechanisms. *IAHS*,.162, 195-214
- Fohn, P. M. B.** 1987a. The "rutschblock" as a practical tool for slope stability evaluation. In: Avalanche formation, movement, and effects. *IAHS Publ. 162: 223-228.*
- Föhn Paul, 1992** - Stability evaluation for a sloping snowpack, Université d'été sur les risques naturels, session 1992: Neige et Avalanches, Chamonix, 14 au 25/09/92
- Giraud G.**, 1992 - MEPRAPRA : an expert system for avalanche risk forecasting, Proceedings of the International snow science workshop, 4-8 oct 1992, Breckenridge, Colorado, USA, p 97-106.
- Giraud G.**, Brun E, Durand Y., Martin E., 1994 - Validation of objective models to simulate snow cover stratigraphy and avalanche risk for operational avalanche forecasting, Proceedings of the International snow science workshop, 30 oct - 3 nov 1994, Snowbird, Utah, USA
- Giraud, G and J.P. Navarre.** 1995. MEPRAPRA et le risque de déclenchement accidentel d'avalanche. *Actes du colloque de l' Association Nationale pour l'Etude de la Neige et des Avalanches (ANENA) (The contribution of scientific research to safety with snow, ice and avalanche, Chamonix 30/5-03/6 1995)*,.145-150
- Giraud G., Brun E., Durand Y. and Martin E.**, 1998, Safran/Crocus/Mepra models as an helping tool for avalanche forecasters, Proceeding of the International Symposium 25 years of Snow Avalanche Research, Voss, Norway, 12-16 May 1998, p 108-112
- Giraud G., Eric Martin, Eric Brun and Jean-Pierre Navarre 2002.** CrocusMepraPC software: a tool for local simulations of snow cover stratigraphy and avalanche risks ISSW 29 September – 4 October 2002, Penticton, British Columbia, Proceedings (in press)
- Guyomarc'h G, Castelle T., 1992** - A study of wind drift snow phenomena on an alpine site, Proceedings of the International snow science workshop, 4-8 oct 1992, Breckenridge, Colorado, USA, p 57-67.
- Navarre, J-P.** 1975. Modèle unidimensionnel d'évolution de la neige déposée. *La Météorologie*, VI 3 , 109-120.
- Jamieson, J.B. and C.D. Johnston** 1993. Shear frame stability parameters for large-scale avalanche forecasting, *A. Glaciol.*, 18,268-273
- Jamieson, Bruce.** 1999a. The compression test – after 25 years. *The Avalanche Review* 18(1), 10-12.
- Jamieson, Bruce.** 1999b. Skier triggering of slab avalanches: Concepts and research. *The Avalanche Review* 18(2), 8-10.
- Schneebeli Martin, 1994** - Variability of the mechanical properties of the snow pack in the starting zone of avalanches, colloque de l'E.G.S., 25-29 Avril 1994, Grenoble
- Schneider C; Navillod L., Julliot L., 1991**,Prévision locale du risque d'avalanches. Application quotidienne. Expérience de trois grandes stations des Alpes. Symposium ANENA 1991, Chamonix, p.136-144

**Schweizer, J 1993.** The influence of the layered character of snow cover on the triggering of slab avalanche. *A. Glaciol.*, 18, 193-198

**Schweizer, J, Schneebeli, M., Fierz, C. and Föhn, P.M.B.,** 1995 Snow mechanics and avalanche formation : field experiments on the dynamic response of the snow cover. *Surveys in geophysics*, 16, 621-633