

STABILITE D'UN MANTEAU NEIGEUX MULTICOUCHE

Approche statique dans MEPRA

Gérald Giraud (CEN)

- Généralités
- Approche statique de la stabilité d'un MN multicouches
- Principe de déclenchement d'une avalanche
 - Rupture naturelle (spontanée)
 - Rupture accidentelle (provoquée)

Stabilité d'un manteau neigeux multicouche

Généralités

- la neige : matériaux visco-plastique aux propriétés mécaniques très complexes, le plus fragile de la nature (Jérôme Faillettaz)
- le manteau neigeux (mille-feuilles) : strates de neige aux caractéristiques méca très différentes + interstrates soumis à différentes forces ou contraintes internes ou externes tendant à le déformer
- Avalanche = rupture de l'équilibre d'une partie ou de l'ensemble du MN dans une pente

Stabilité d'un manteau neigeux multicouche

Généralités

- Stabilité = état d'équilibre du MN de manière intrinsèque et par rapport à une charge imposée (et la vitesse de déformation)
- Stabilité du MN à l'échelle d'une pente = phénomène 3D très complexe lié :
 - à la topographie du site (ancrages, forme, longueur...) = **facteurs fixes**
 - à la composition du MN = **facteurs variables**
 - à la variabilité spatiale du MN (de l'ordre du mètre) = **facteurs variables**

Stabilité d'un manteau neigeux multicouche

les facteurs variables liés aux conditions nivométrées

Chutes de neige récente, pluie, vent, rayonnement solaire, facteurs thermiques, état du manteau neigeux dans la pente....



Analyse 3D impossible (pour le moment)

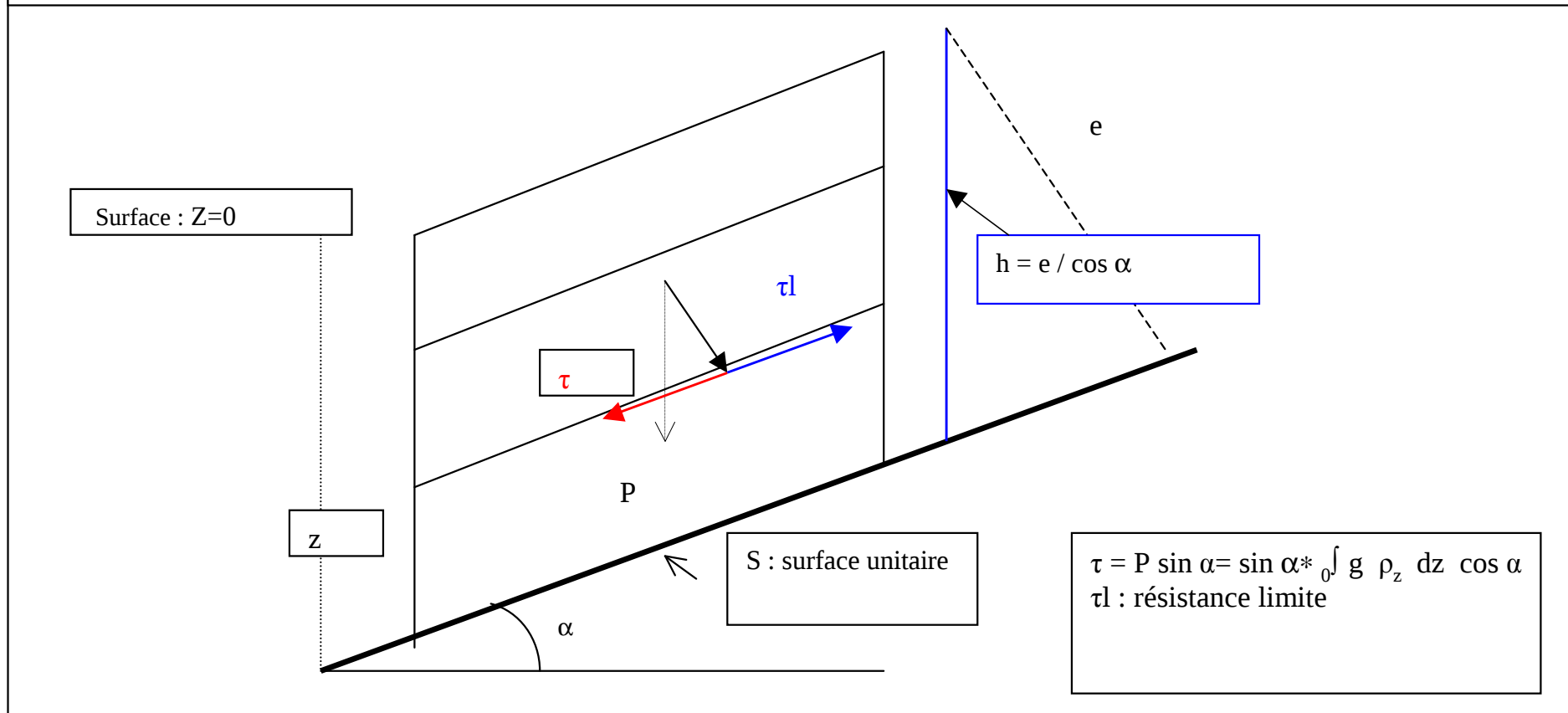


Simplification avec approche statique 1D d'un MN multicouches homogène spatialement et déposé sur une pente uniforme (cf SCM ou S2M)

Approche statique de la stabilité d'un MN multicouches

Équilibre d'un bloc (Paul Fohn, Yurg Schweitzer.....)

Equilibre d'un bloc (portion) de manteau neigeux (sans poussée ou traction latérale)

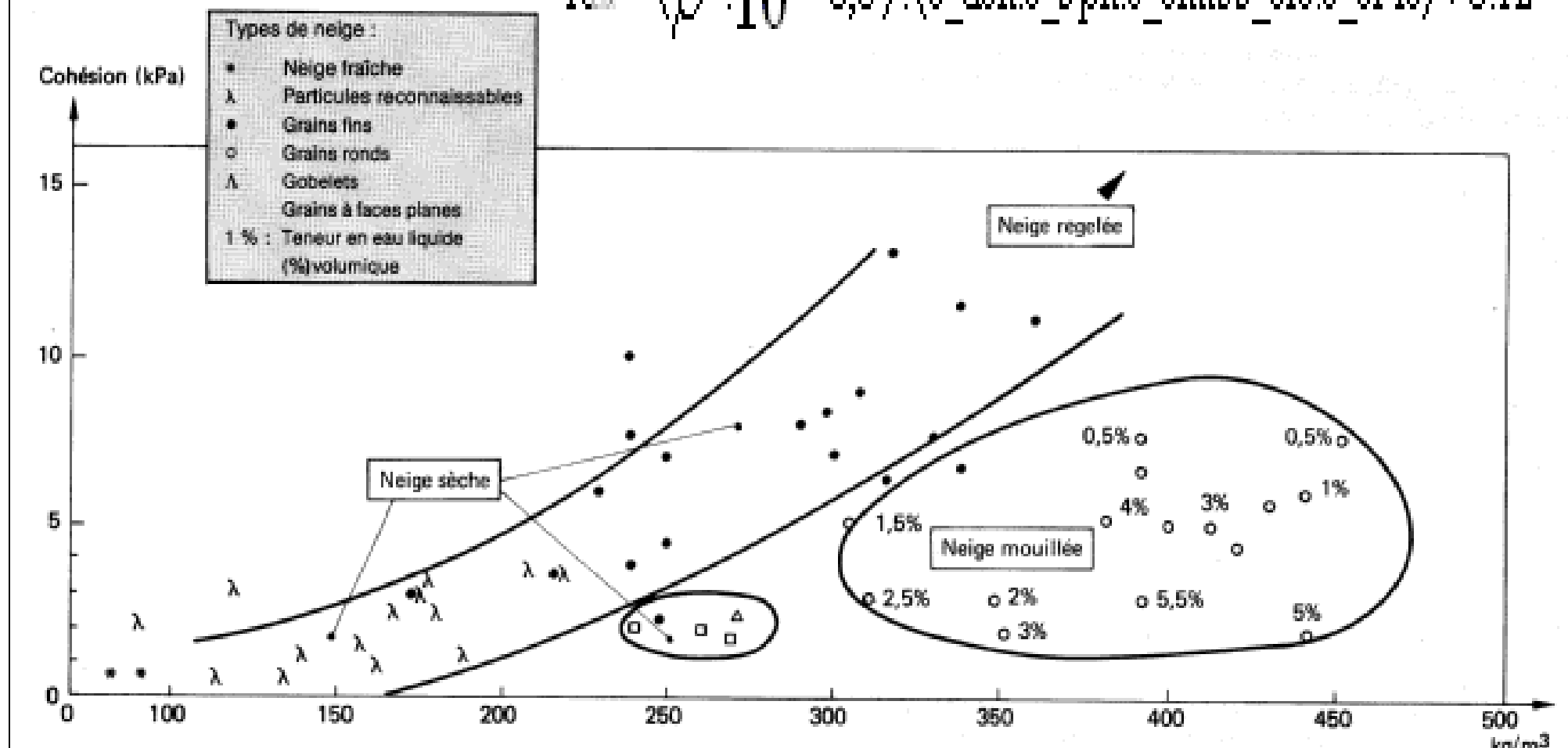


τ = contrainte de gravité ou de cisaillement τ_l = Résistance limite aux résistances

Approche statique de la stabilité d'un MN multicouches

Équilibre d'un bloc

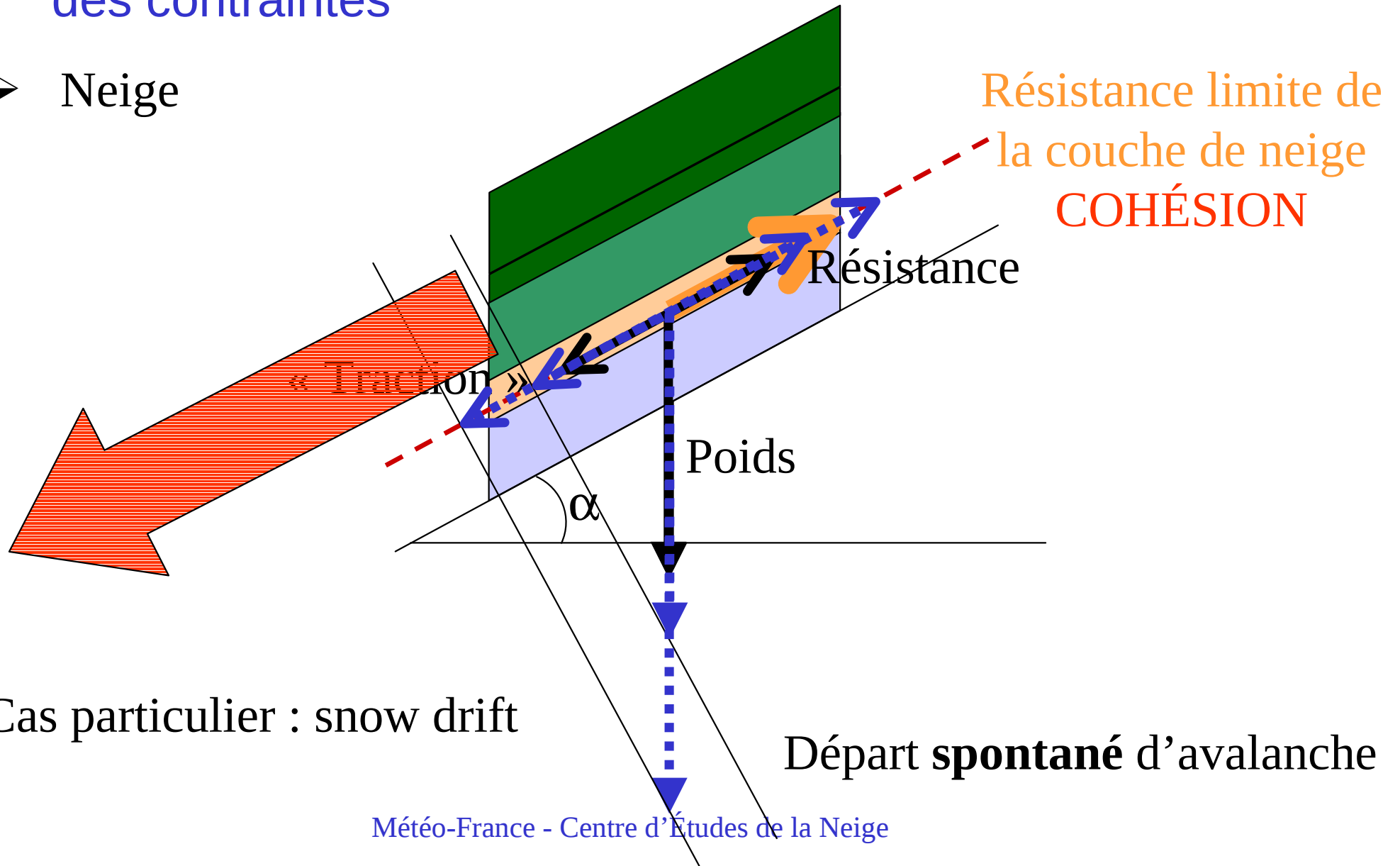
$$R_{\text{eq}} = (\rho^2 \cdot 10^{-4} - 0,6) \cdot (c_{\text{den}} \cdot c_{\text{sph}} \cdot c_{\text{cmtsc}} \cdot c_{\text{fè}} \cdot c_{\text{cfre}}) + 0,12$$



Rupture naturelle de l'équilibre

- Augmentation progressive des contraintes

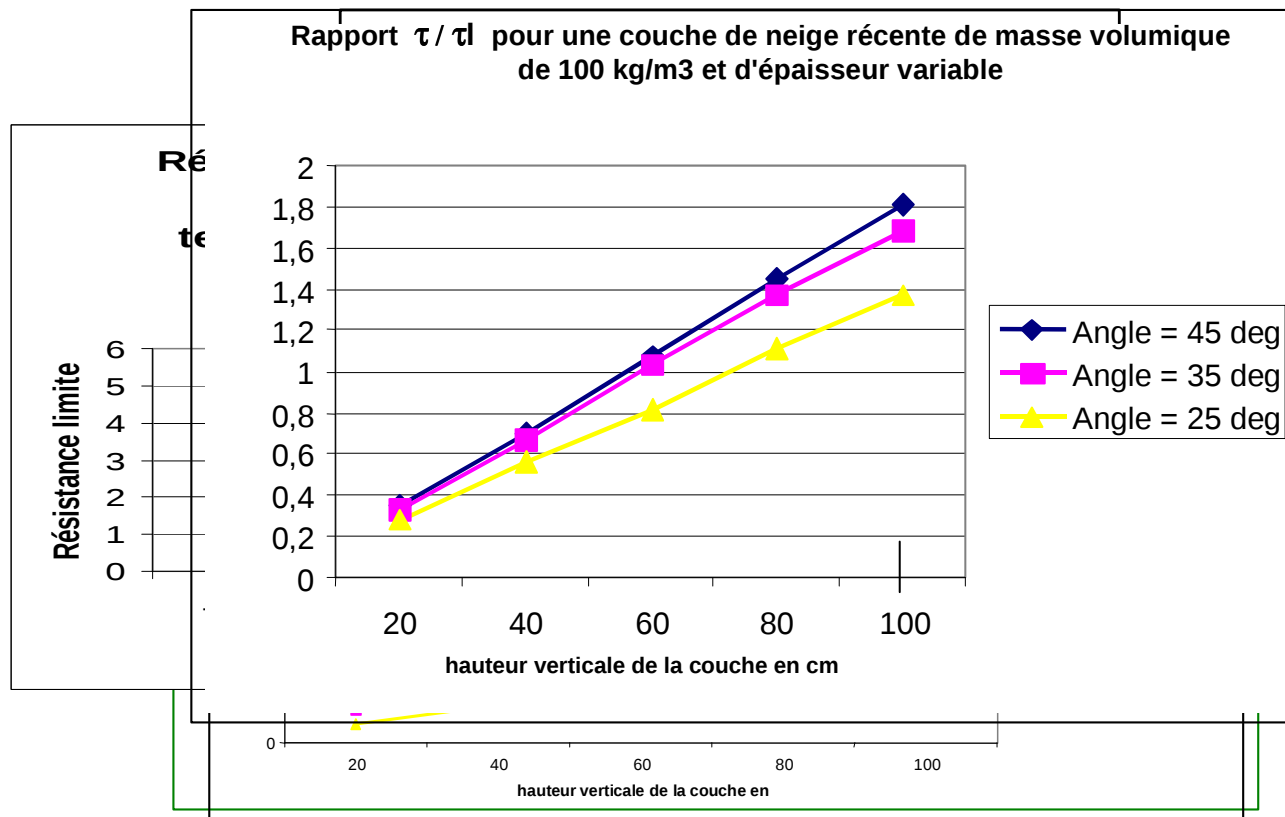
➤ Neige



Rupture naturelle de l'équilibre

- Augmentation progressive des contraintes

➤ Neige

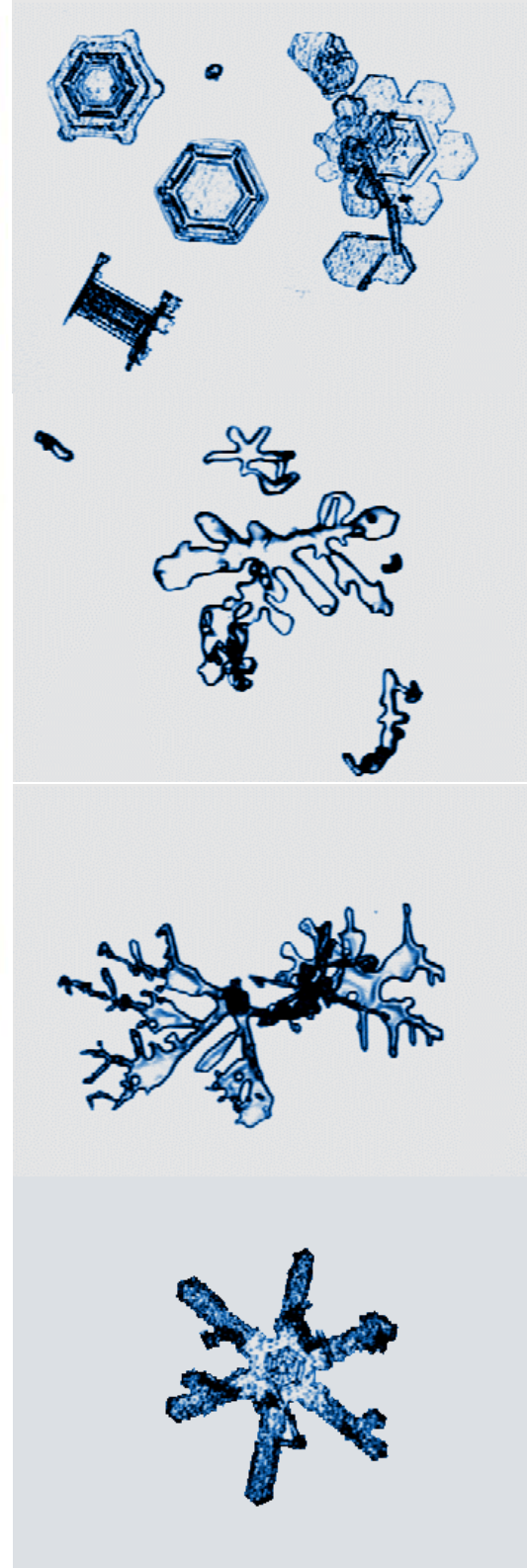




Départ spontané d'avalanche de neige récente

- Quantité et intensité des précipitations (départs surtout pendant les chutes)
- Température
- Vent

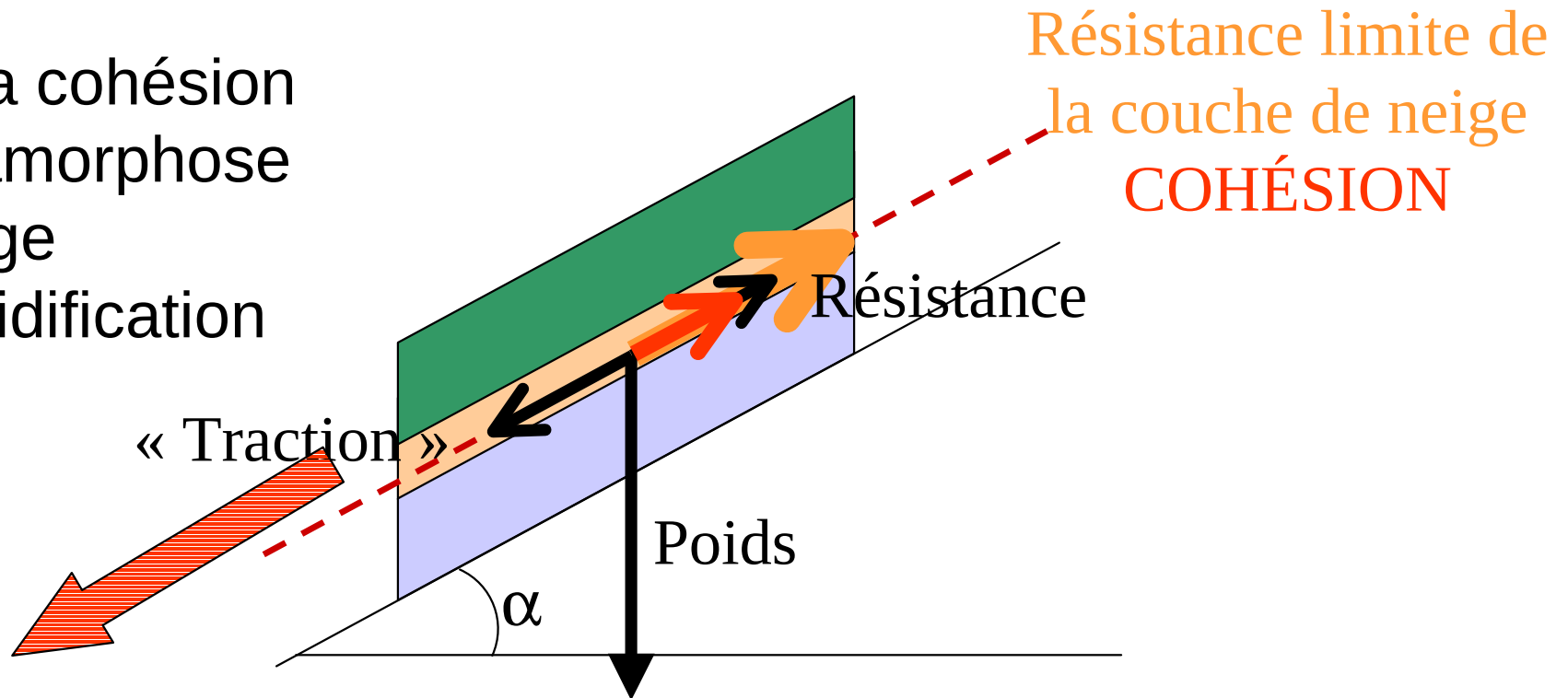
Météo-France - Centre d'Études de la Neige



Rupture naturelle de l'équilibre

- Diminution de la résistance limite d'une couche

- de la cohésion
 - Métamorphose
 - Fluage
 - Humidification



Cas particulier : la pluie

Rupture naturelle de l'équilibre

Approche mécanique 1D (Paul Fohn, Yurg Schweitzer.....)

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

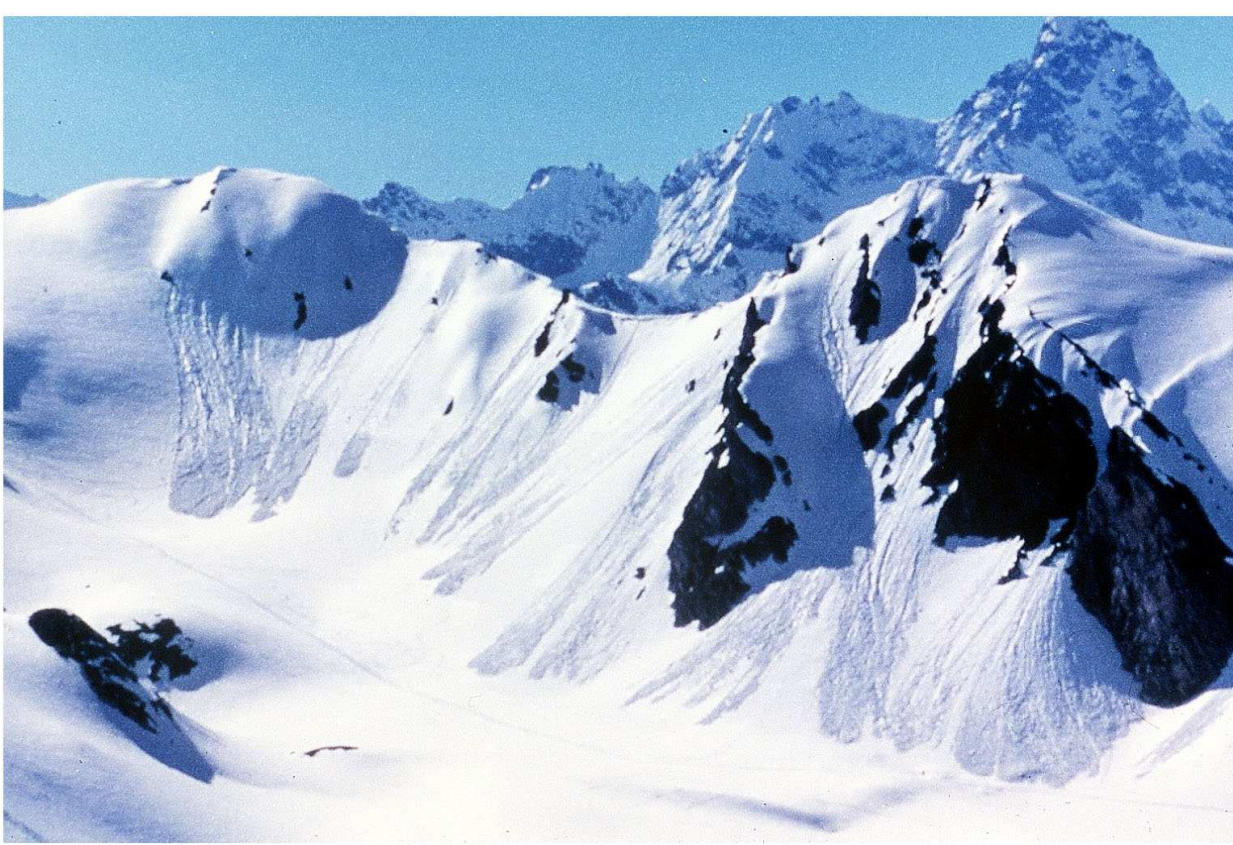
$$\tau(z) = \sin(\alpha) * \cos(\alpha) * \left(\sum_{i=1}^z d_i * h_i \right)$$

S (z) inférieur à 1.5 : strate fortement instable

S (z) entre 2 et 2.5 : strate modérément instable

S (z) supérieur à 2.5 : strate stable

avec cas particulier pour la neige humide et évolution temporelle du risque



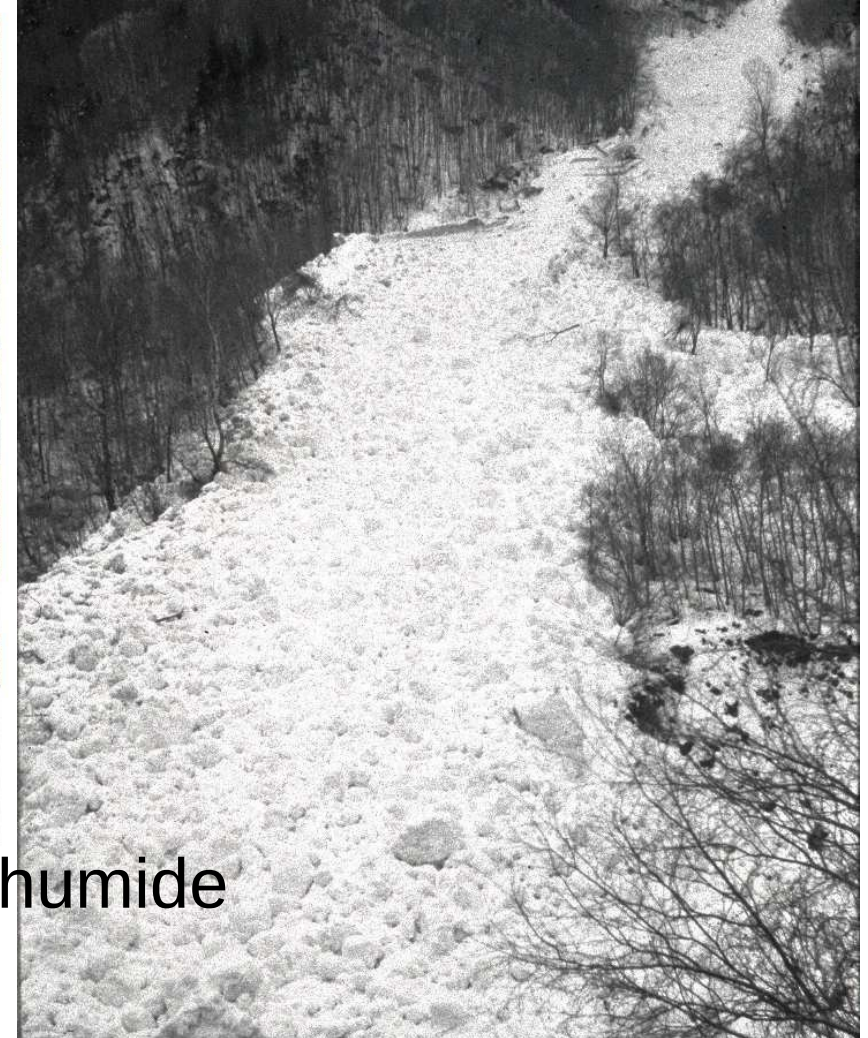
Départ spontané d'avalanche de neige humide

Couche de neige perméable

accumulation d'eau liquide

Neige moins perméable

α

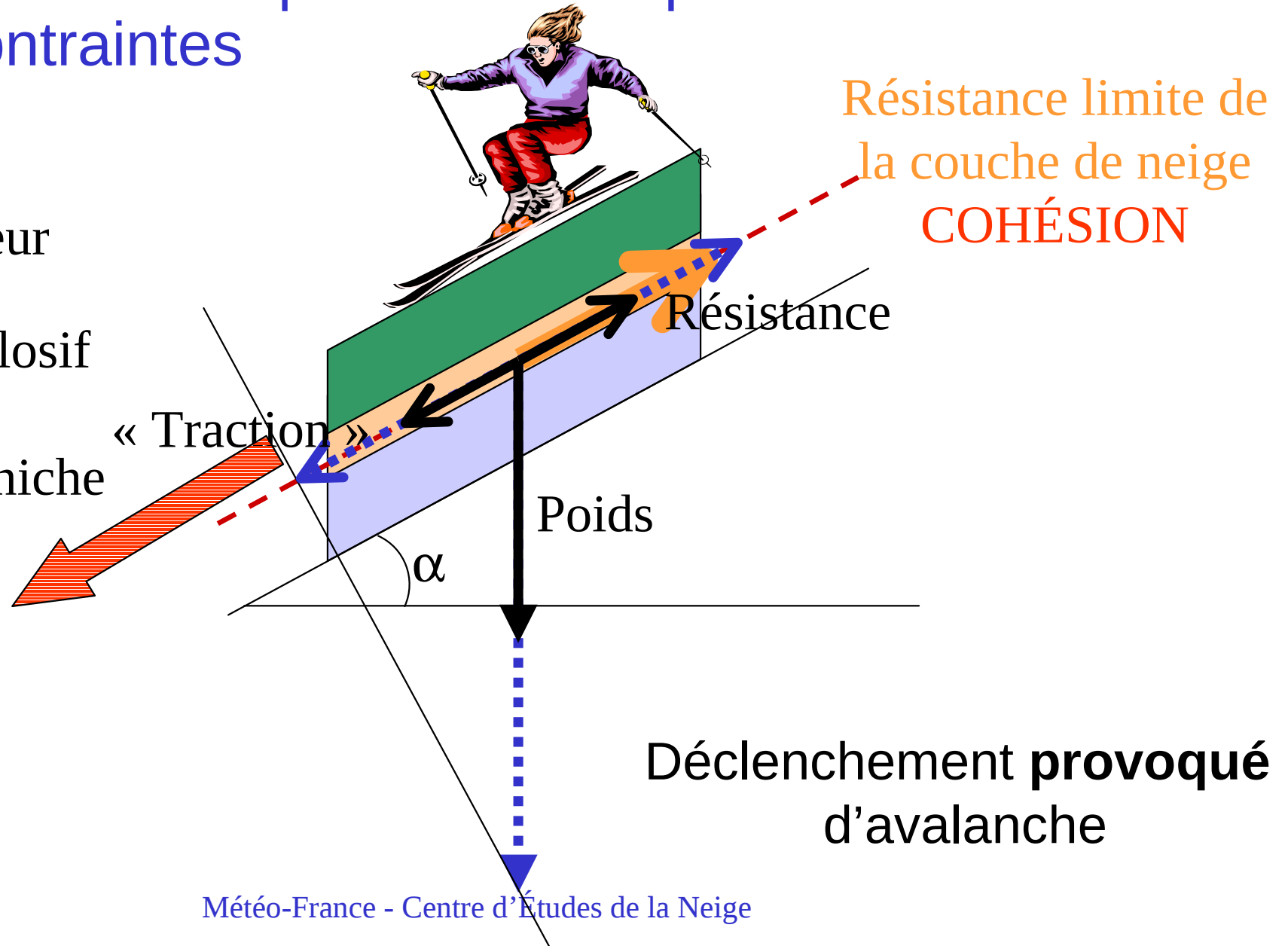


- Fissures
- Première humidification
- Pluie : 2 effets

Rupture accidentelle de l'équilibre

- Augmentation rapide mais temporaire des contraintes

- Skieur
- Explosif
- Corniche



Rupture accidentelle de l'équilibre

- **Augmentation rapide mais temporaire des contraintes**

propagation non uniforme fonction :

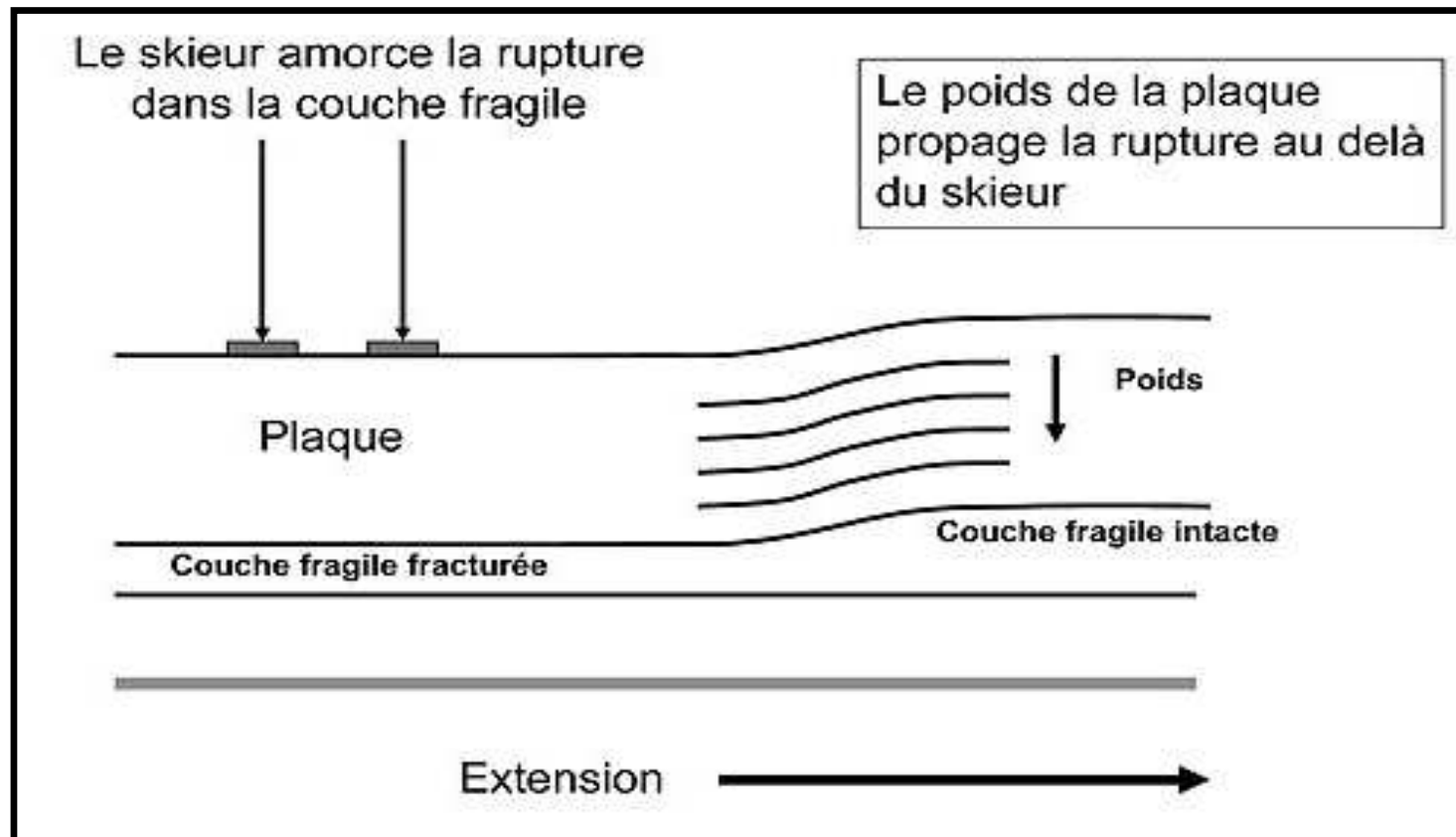
- propriétés mécaniques de chaque strate de neige avec selon la structure granulaire de chaque type de neige comportement fragile (pas de déformation sans rupture mais réarrangement possible) ou ductile (déformation plastique avec réarrangement du matériau et redistribution des contraintes)
- enfoncement éventuel du skieur

Rupture accidentelle de l'équilibre

- Augmentation rapide mais temporaire des contraintes
 - contrainte pas suffisante pour expliquer à elle seule le déclenchement (plusieurs centaines de tonnes de neige dans une pente) mais contrainte locale forte (2 m de neige à 100 kg à 20 cm de profondeur)
 - condition nécessaire : un manteau neigeux à structure de plaque (neige plus ou moins dure sur couche fragile) avec 4 étapes : rupture en cisaillement avec effondrement d'une couche fragile, extension de la rupture dans la couche fragile (mécanique de la rupture critère de Griffith), amorce de la fissure sommitale dans la plaque et extension de la fissure qui conduit au déclenchement

Rupture accidentelle de l'équilibre

- Augmentation rapide mais temporaire des contraintes



Déclenchement à distance sur la plat si couche fragile dans la pente

Rupture accidentelle de l'équilibre

- 1) recherche de strates fragiles de type accidentel dans le mètre supérieur du MN idem instabilité naturelle avec calcul d'un indice S' (raisonnement statique) :

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

$S'(z)$ inférieur à 1.5 : couche très fragile

$S'(z)$ entre 1.5 et 2.5 : couche fragile

$S'(z)$ supérieur à 2.5 : couche

Rupture Accidentel de l'Equilibre

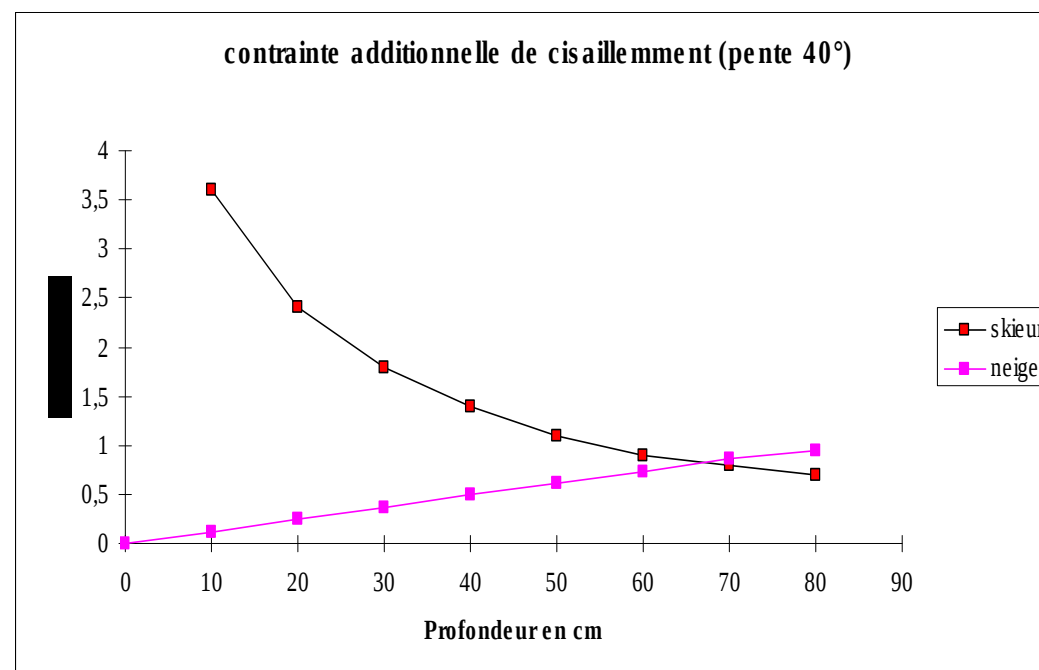
1) recherche de strates fragiles de type accidentel dans le mètre supérieur du MN :

Estimation de τ pour un skieur fonction de :

α) La charge initiale du skieur $q = K P / (B L)$ avec $P = 85$ Kgf (poids du skieur), $K = 1,5$ (prise d'appui), $L = 1$ m. (longueur "efficace" des skis), $B = 0,2$ m. (largeur des 2 skis info Rossignol)

β) La distribution et l'amortissement des contraintes sur la verticale (approche de type Boussinesq pour un milieu élastique et homogène)

Graphique calcul analytique de τ skieur pour une neige à 250 Kg/m³ (idem Suisses)



Rupture accidentelle de l'équilibre

1) recherche de strates fragiles de type accidentel dans le mètre supérieur du MN :

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

β : coef. pour prendre en compte la stratification du manteau neigeux
charge transmise et répartition des contraintes fonction du type de neige
(par ex. différent pour neige dure et portante, ou une neige fraîche).

Effets contradictoires:

- 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.

→ β fct neige

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

Rupture accidentelle de l'équilibre

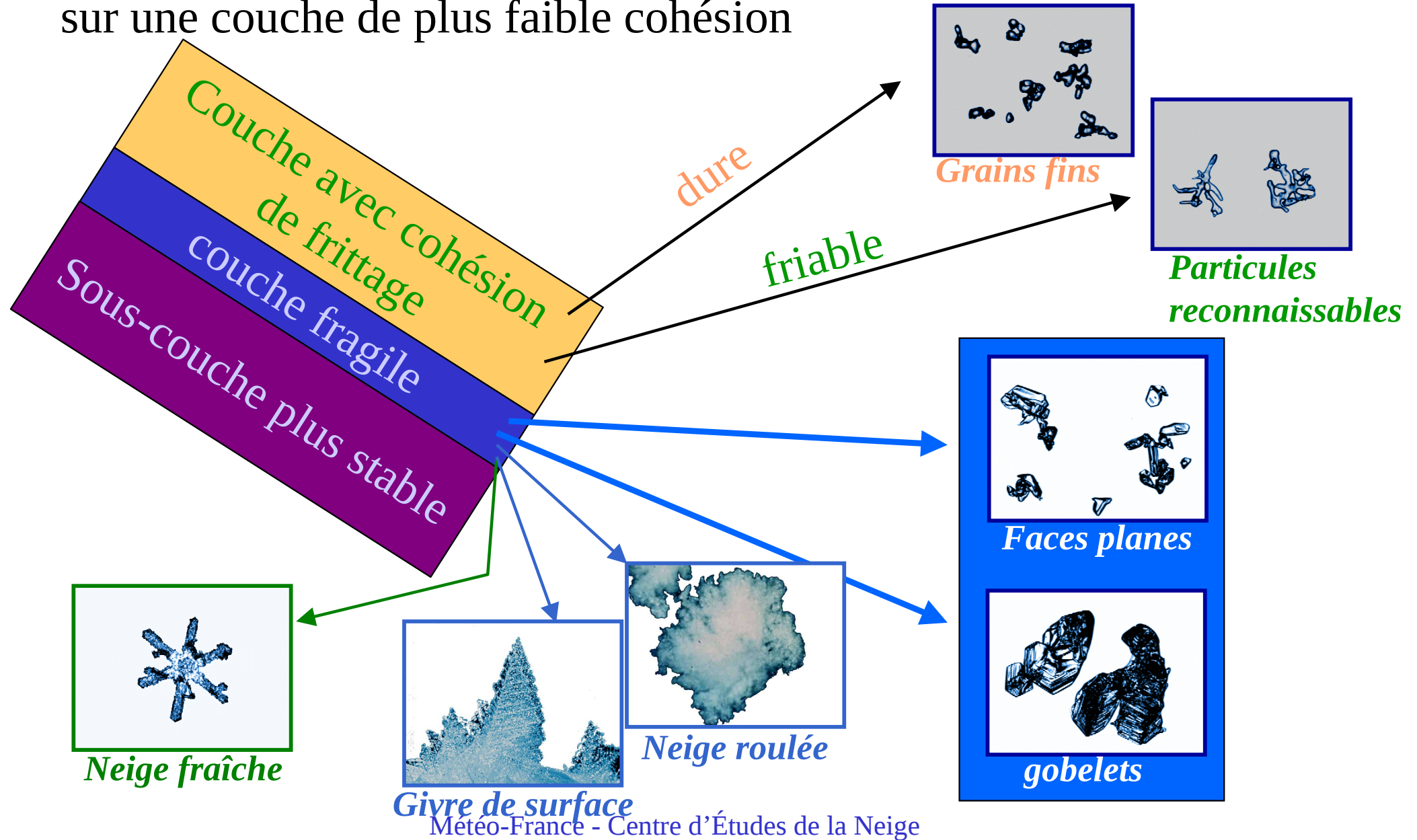
2) recherche d'une neige à comportement de plaque dans les couches surmontant la ou les strates fragiles

Définition d'une strate de neige pouvant avoir un comportement de plaque friable ou dure (approche purement experte) :

- neige sèche de type lambda, lambda fin, grain fin ou fin anguleux
- valeur limite de résistance aux cisaillements de la couche supérieure (1. kg/dm²)

Structure de plaque

Empilement d'une couche comportant une cohésion de frittage sur une couche de plus faible cohésion



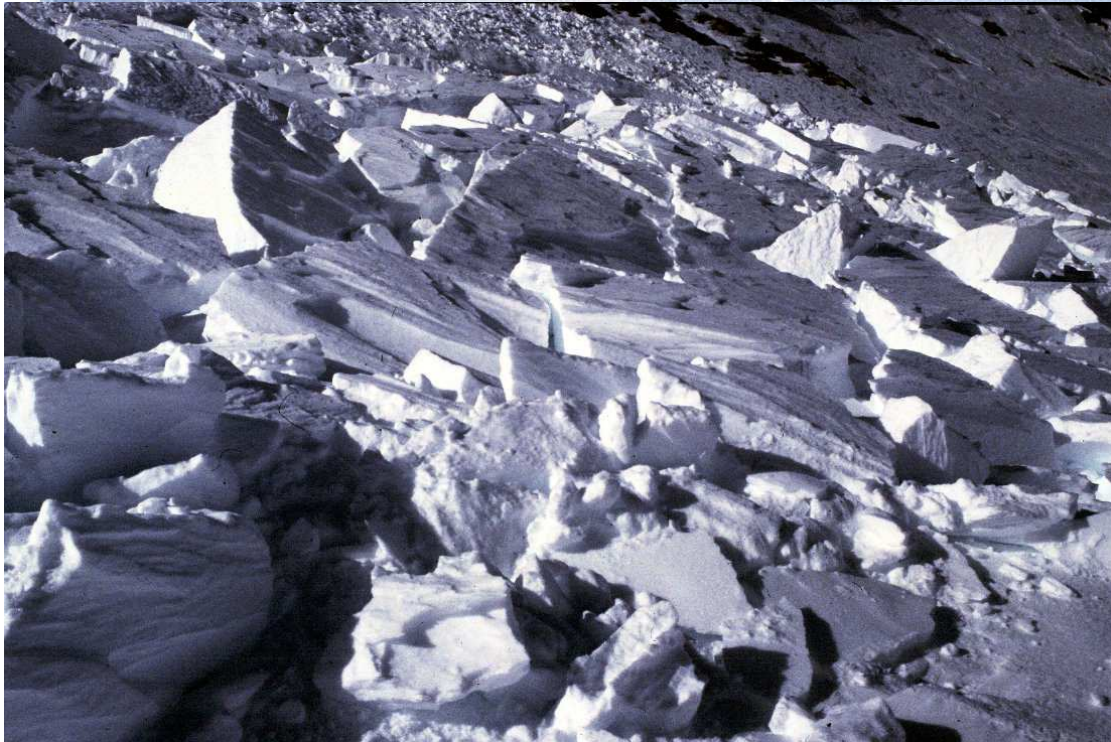
Avalanche de plaque friable

- Neige poudreuse mais casse comme une plaque



Déclenchement provoqué d'avalanche

- Plaque



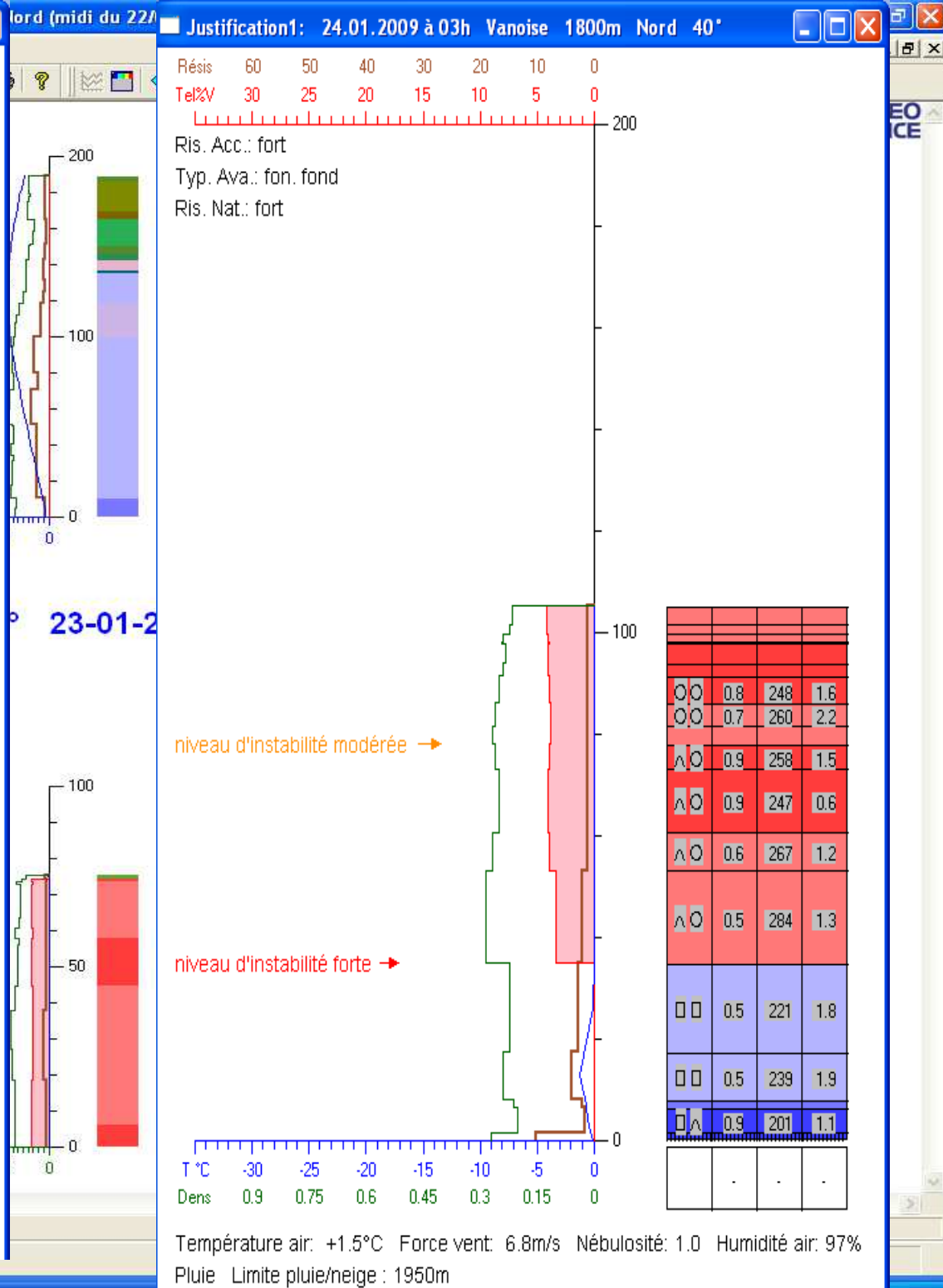
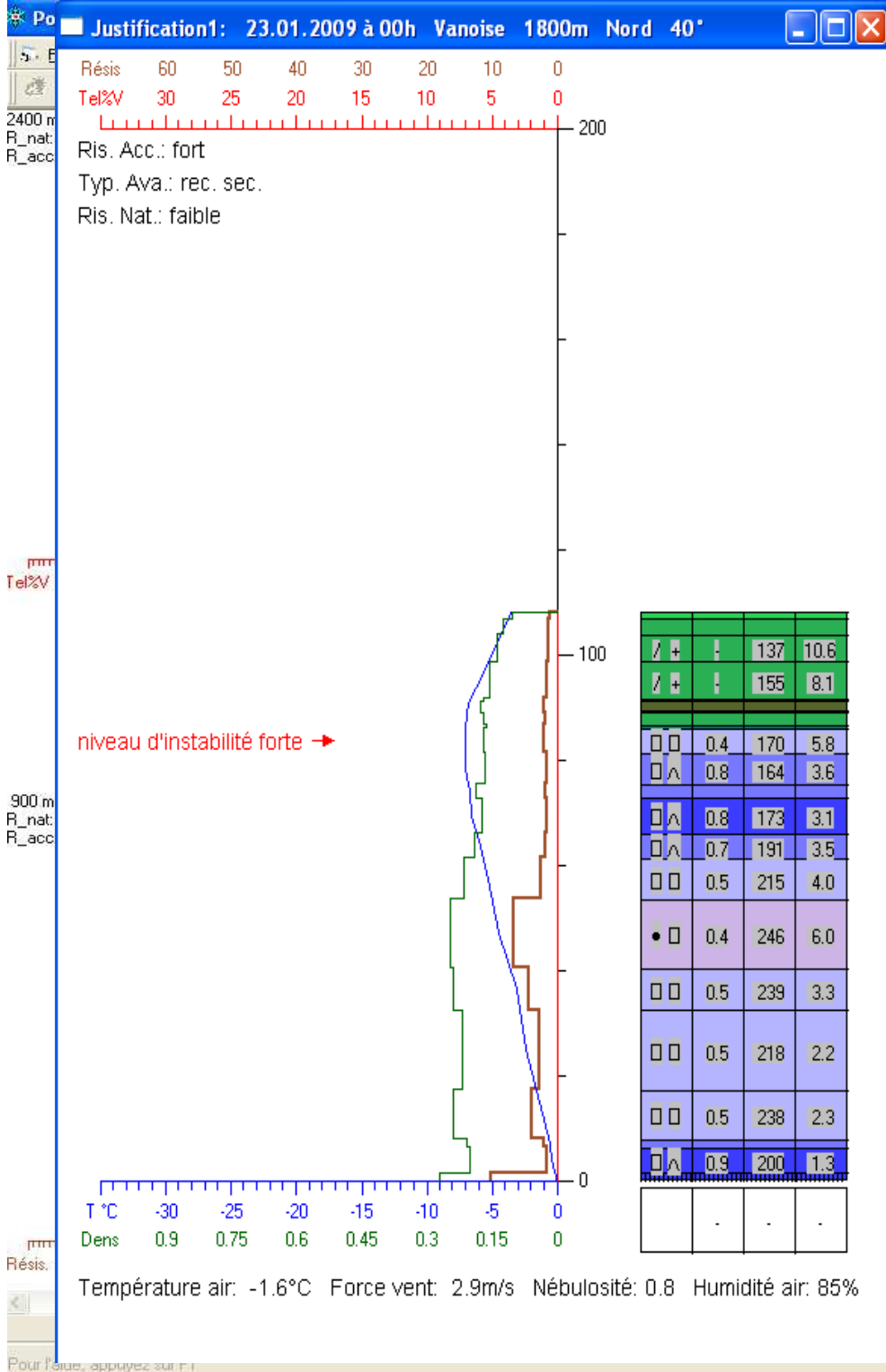
STABILITE D'UN MANTEAU NEIGEUX MULTICOUCHE

Conclusion

- Complexité du matériau, de sa variabilité spatiale sur la verticale comme parallèlement à la pente (anisotropie)
- Approche statique de la stabilité d'un manteau neigeux multicouches

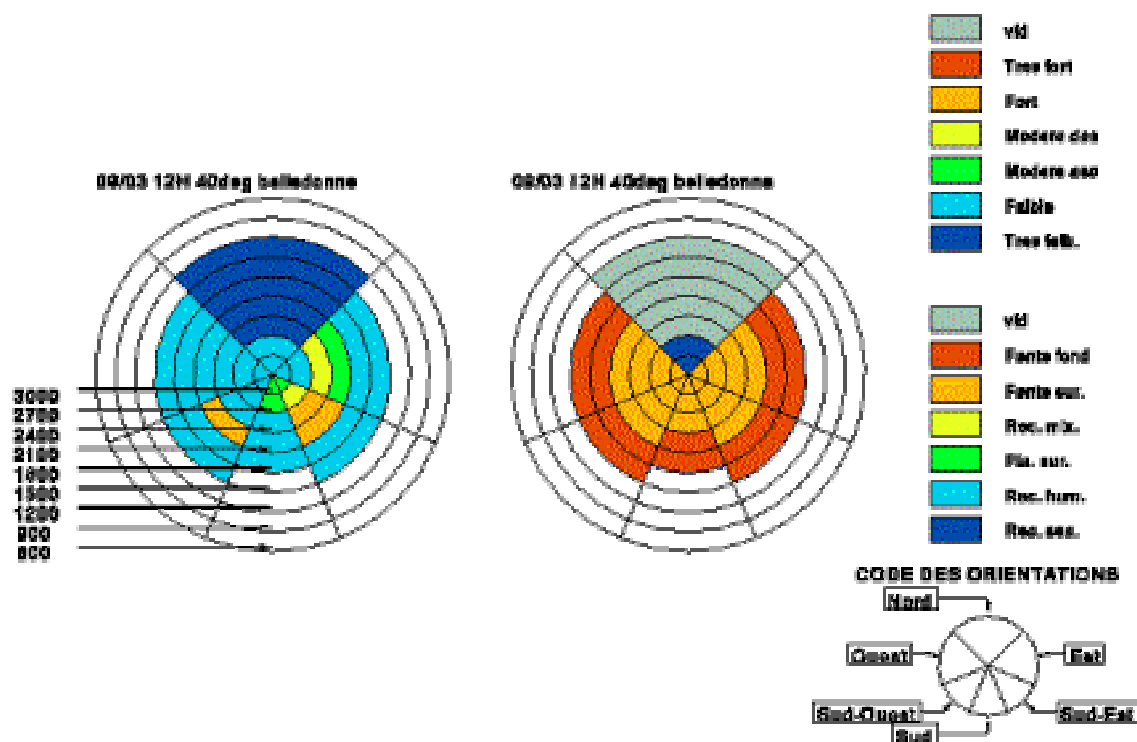


Prise en compte de la variabilité spatiale en simulant à l'échelle d'un massif dans un espace altitude, exposition et pente (cf SCM ou S2M)



Exemple analyse Mepra

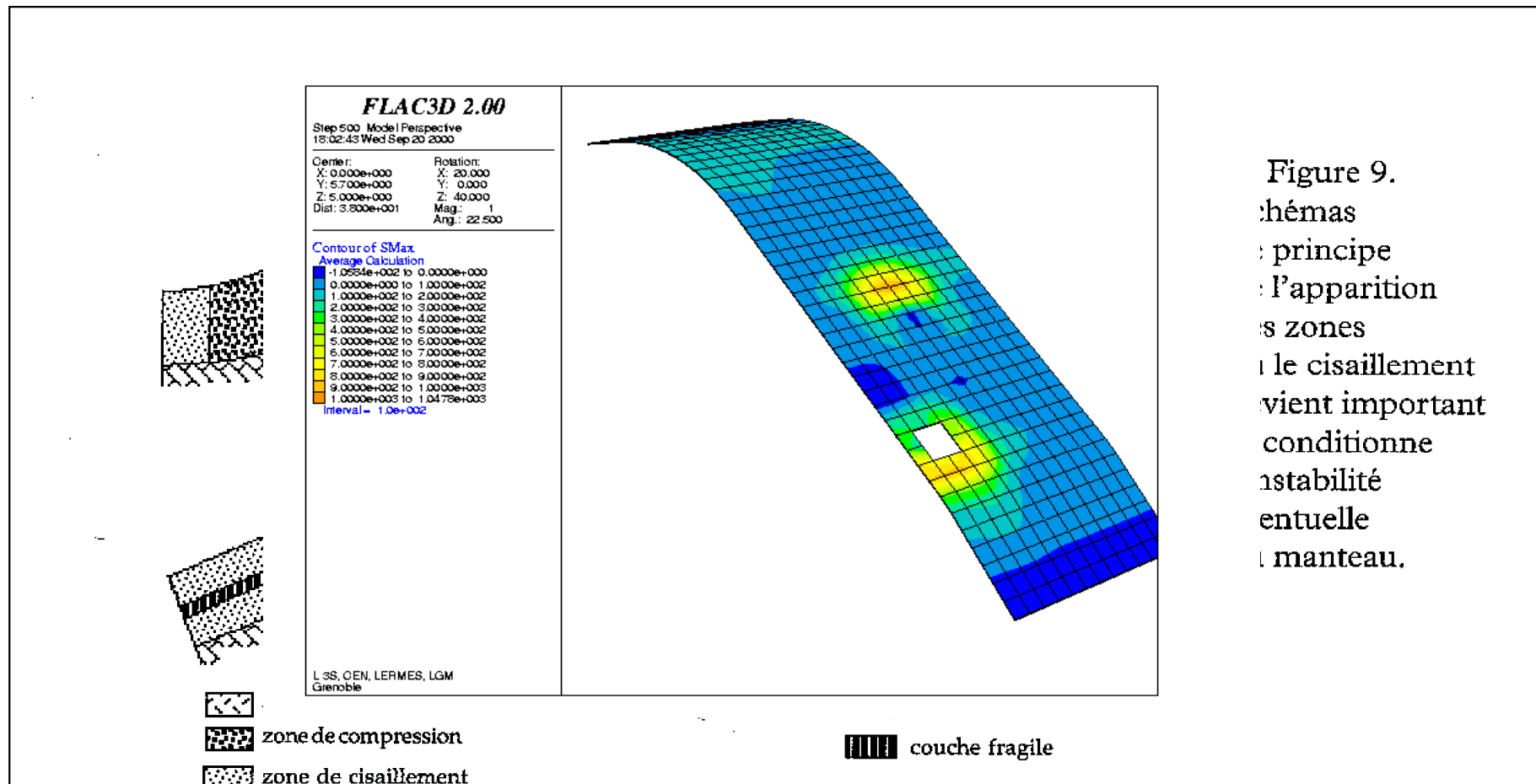
Risque et type d'Avalanche naturelle (de g.-> d.)



Stabilité d'un manteau neigeux multicouche

les facteurs fixes liés au site

1. La topographie : forme du relief (combes, couloirs, thalweg..), changement de pente, les ancrages



Stabilité d'un manteau neigeux multicouche

les facteurs fixes liés au site

1. La topographie : forme du relief (combes, couloirs, thalweg..), changement de pente, les ancrages
2. La végétation : forêt, végétation basse , herbe....
3. Etat du sol : lisse, rugueux.....