Physique et Alpinisme

I. Les loi de la mécanique en escalade et alpinisme

a) Mouvement, équilibre, friction et adhérence
b) Coinceurs, « friends » et autres dispositifs
c) Les cordes, les nœuds, assurage, rappel, la corde et les chutes
d) Systèmes de secours, techniques de mouflage

II. La neige

a) Formation et transformation des cristaux de neige
b) Quelques phénomènes optiques dans l'atmosphère
c) Physique d'avalanches
d) Dipôles électromagnétiques et émission et réception d'un ARVA

III. L'atmosphère et l'altitude

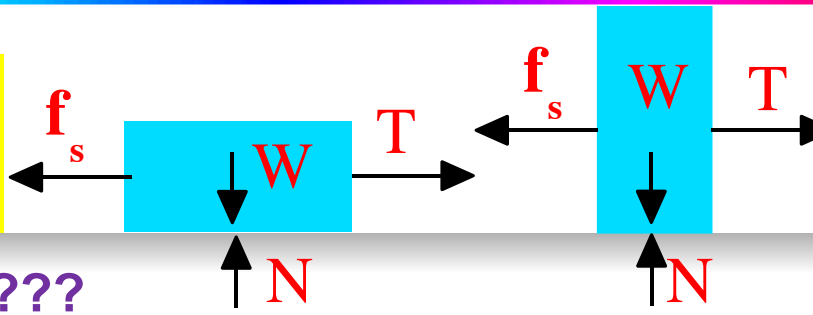
a) L'atmosphère : composition pression et altitude, alti
b) L'acclimatation du corps humain, les oxymètres

IV. Orientation

a) Equation de temps, orientation par le
b) Champ magnétique terrestre, bou vigation
c) GPS, fonctionnement

Ce cours n'est
- **Ni une formation en alpinisme**
- **Ni une formation en sécurité de montagne**

f_s^{max} est indépendante (!!) de l'aire de contact!



Contre-intuitif ???

Exemples : les freins du vélo de course ont des très petits plaques

Question : Pourquoi les voitures de sports ont des pneus plus large pour une meilleure traction et tenue sur la route ?

Réponse : Afin d'augmenter $f_s^{max}=\mu_s N$, il faut augmenter μ_s pour le même N. On utilise les caoutchoucs mous, qui ont un coefficient plus important. Mais ce matériau va rendre les pneus mécaniquement moins stable sur la route, donc il faut augmenter leur largeur afin de stabiliser le pneu. Aussi le caoutchouc mou a une usure plus importante que le caoutchouc dur, donc il faut plus de surface pour augmenter la durée de vie du pneu.

La neige

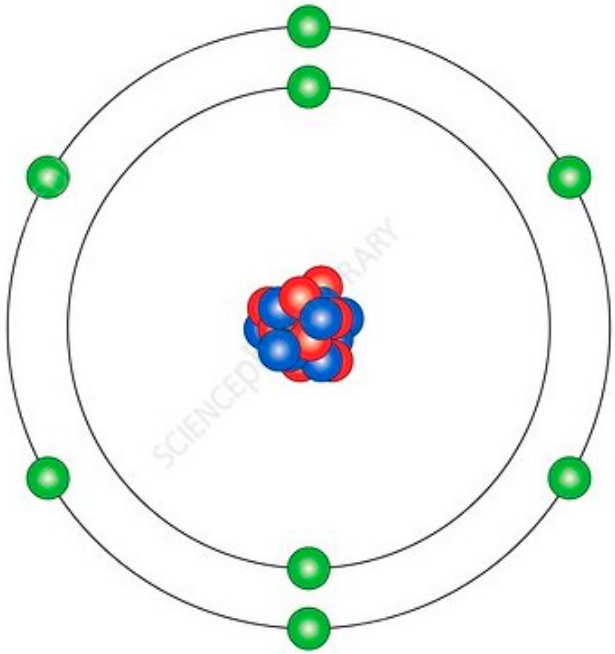
Symétries !

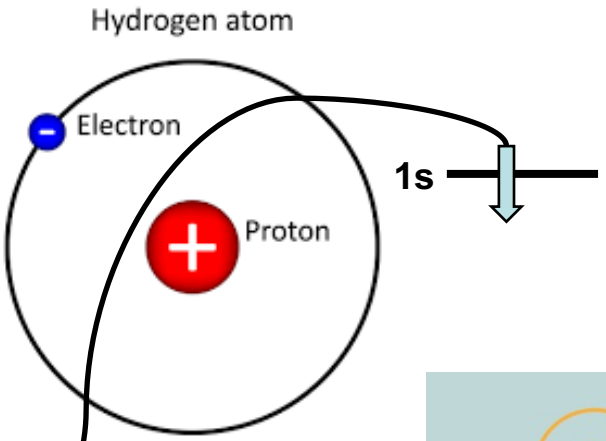
Symétrie hexagonale

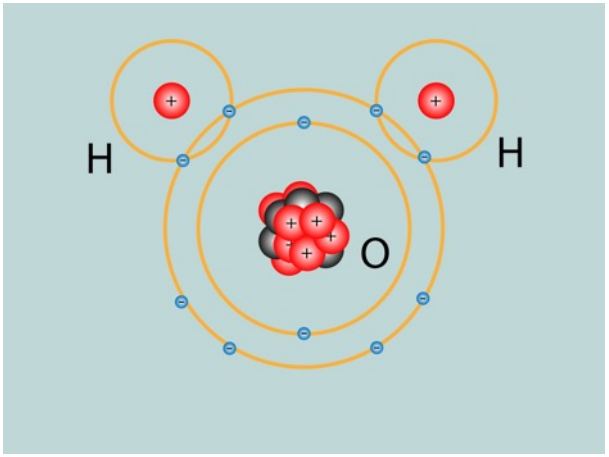
Configuration la plus stable

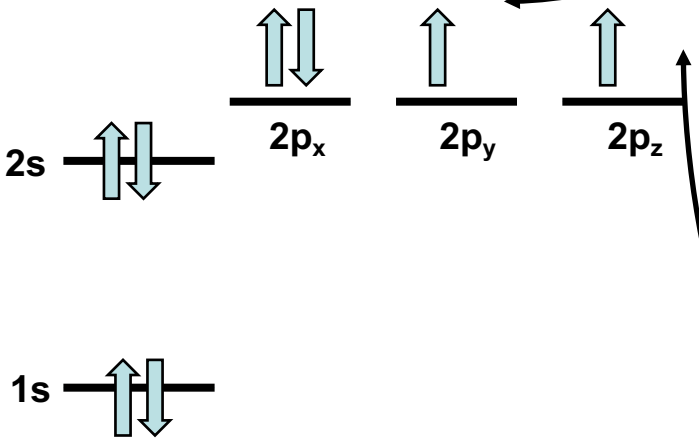
Plus que 80 différentes formes catalogées

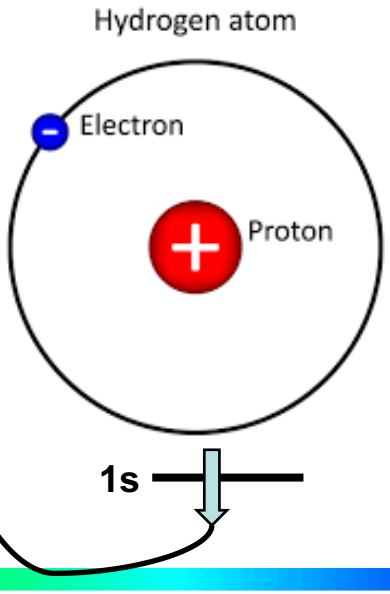
L'Oxygène et Hydrogène



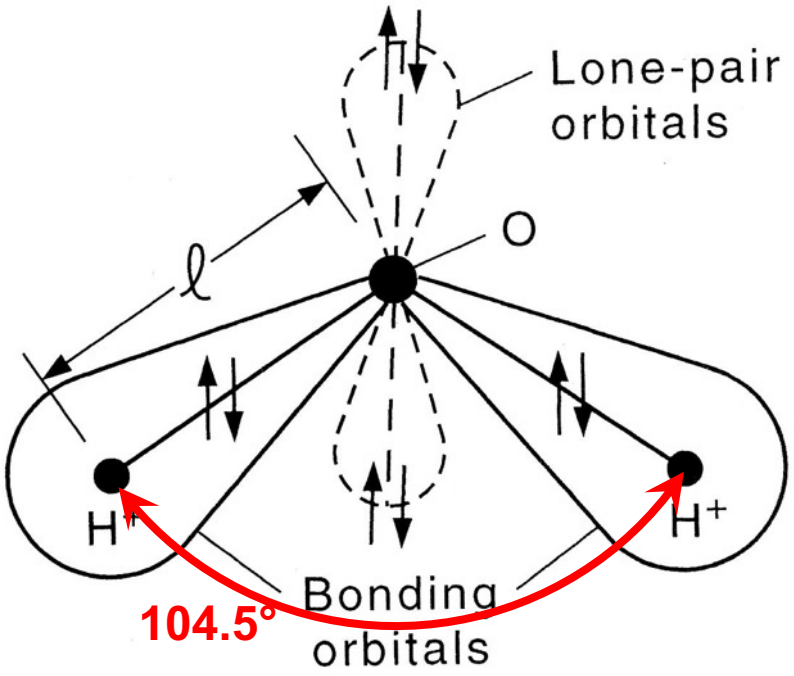


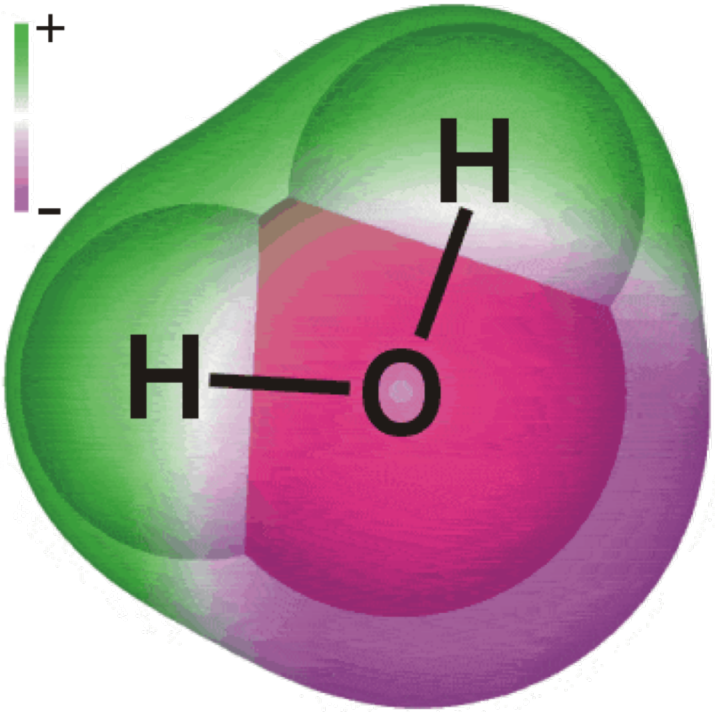




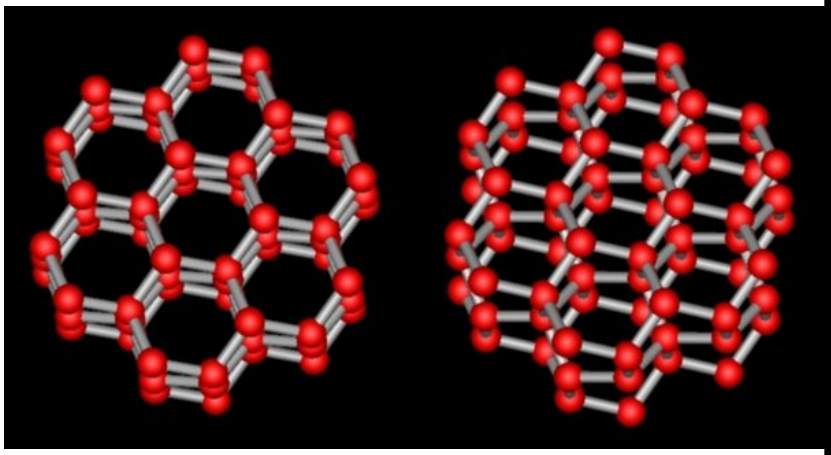


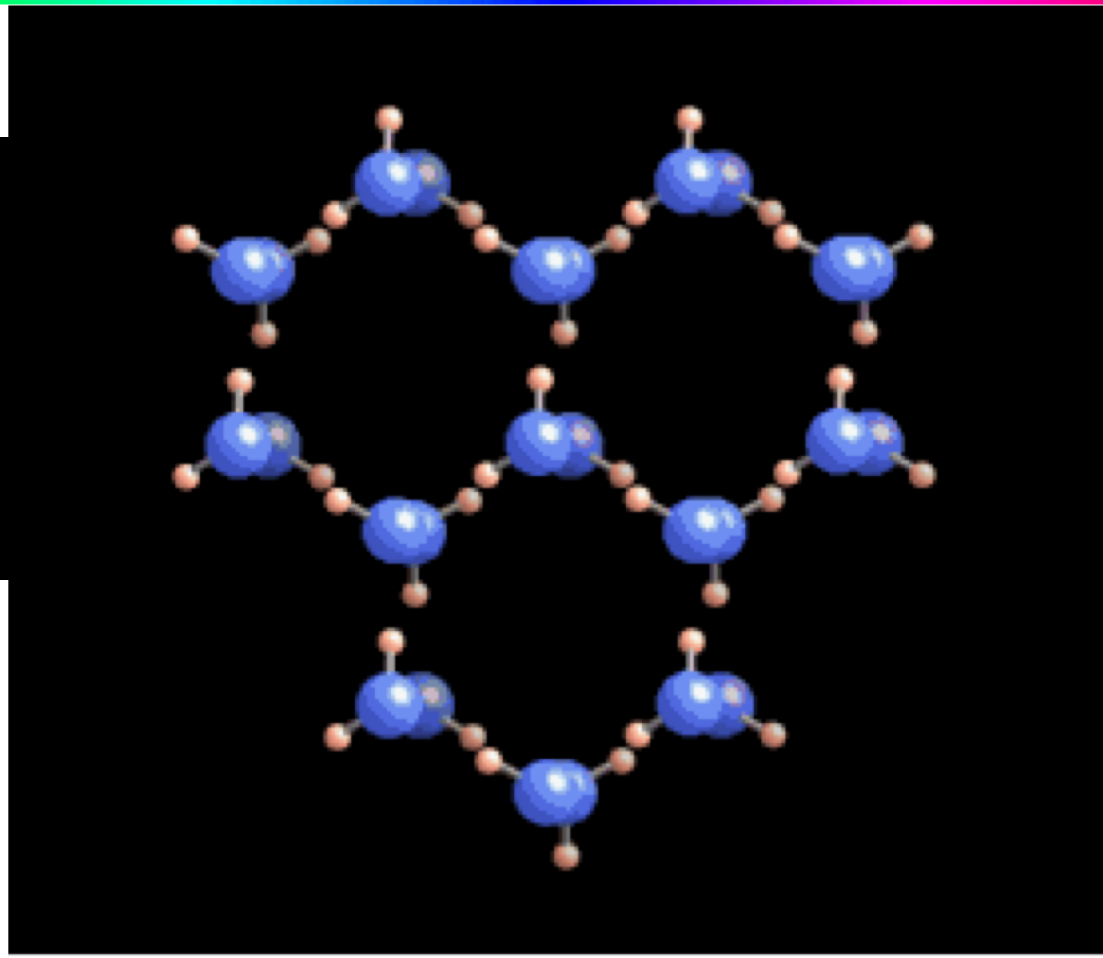
Le molécule





La neige





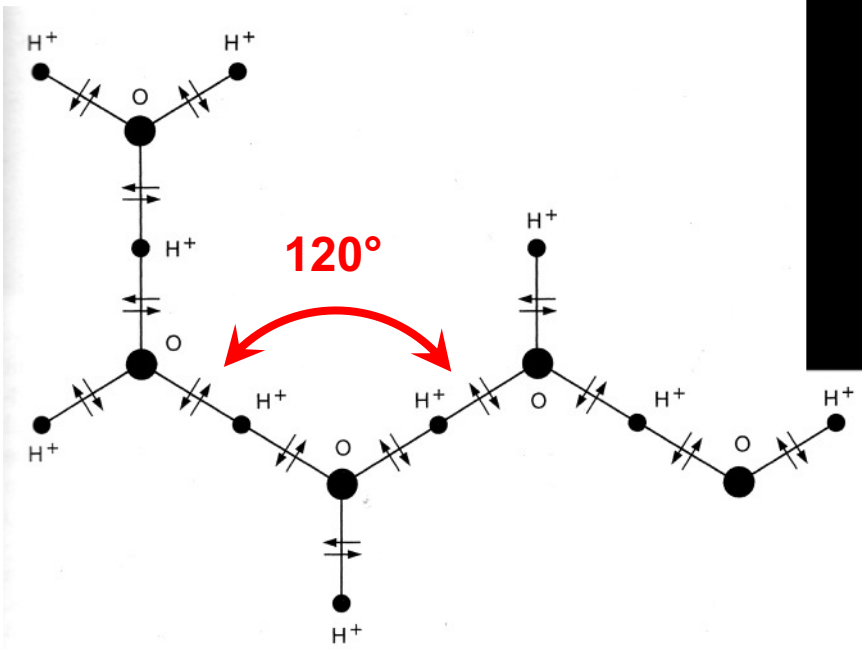
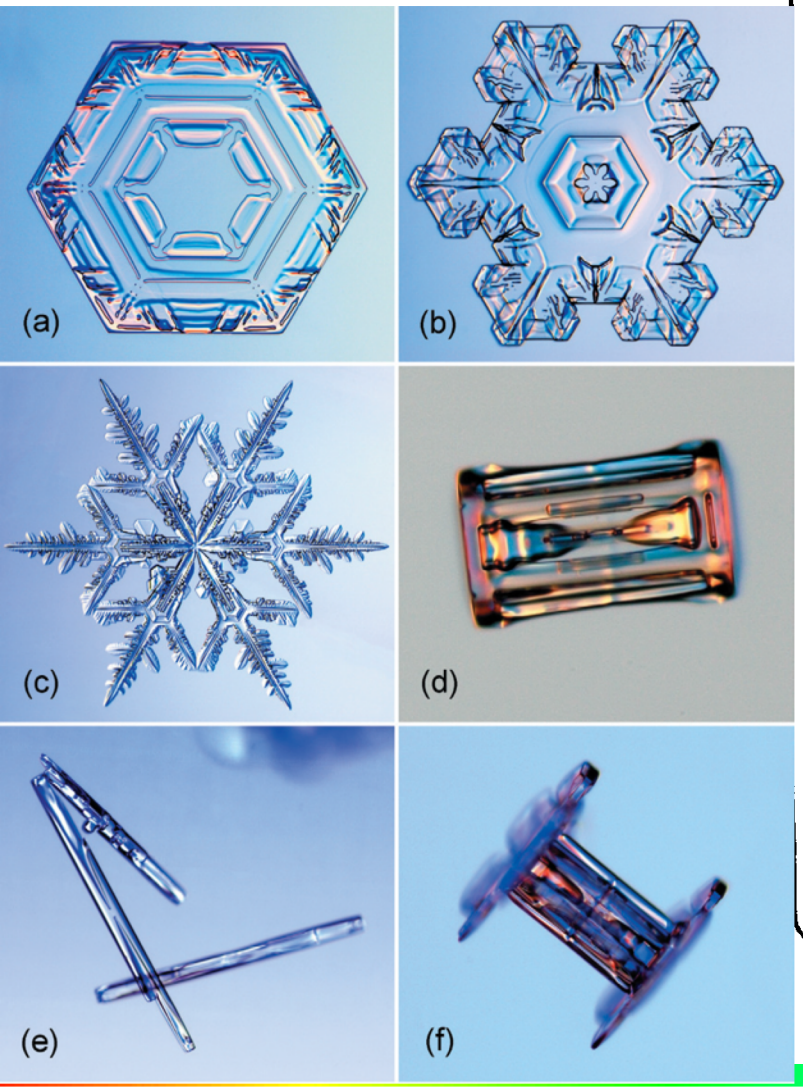


FIGURE 2.14. Chain of polymerized water.

Classification des cristaux



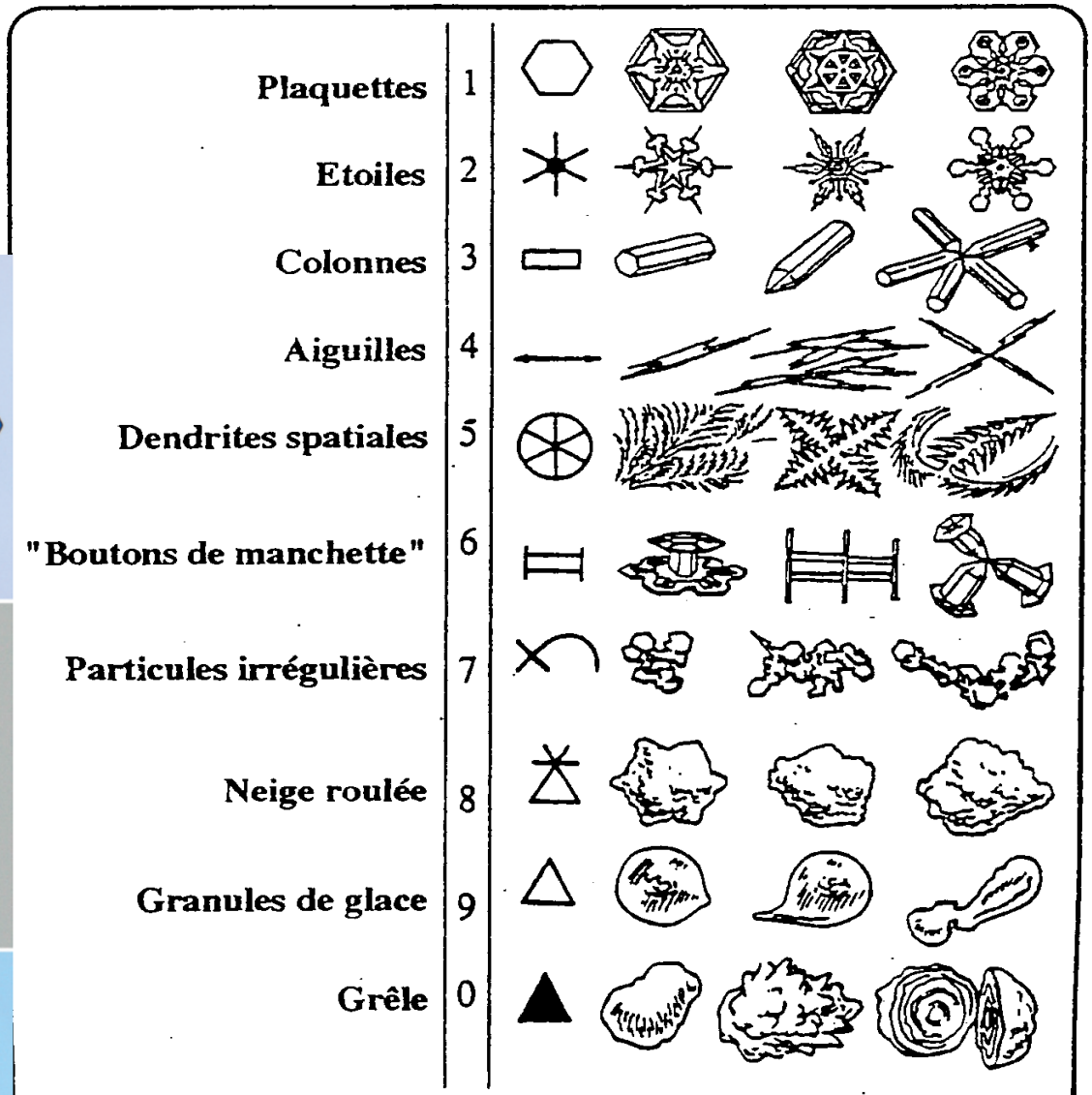
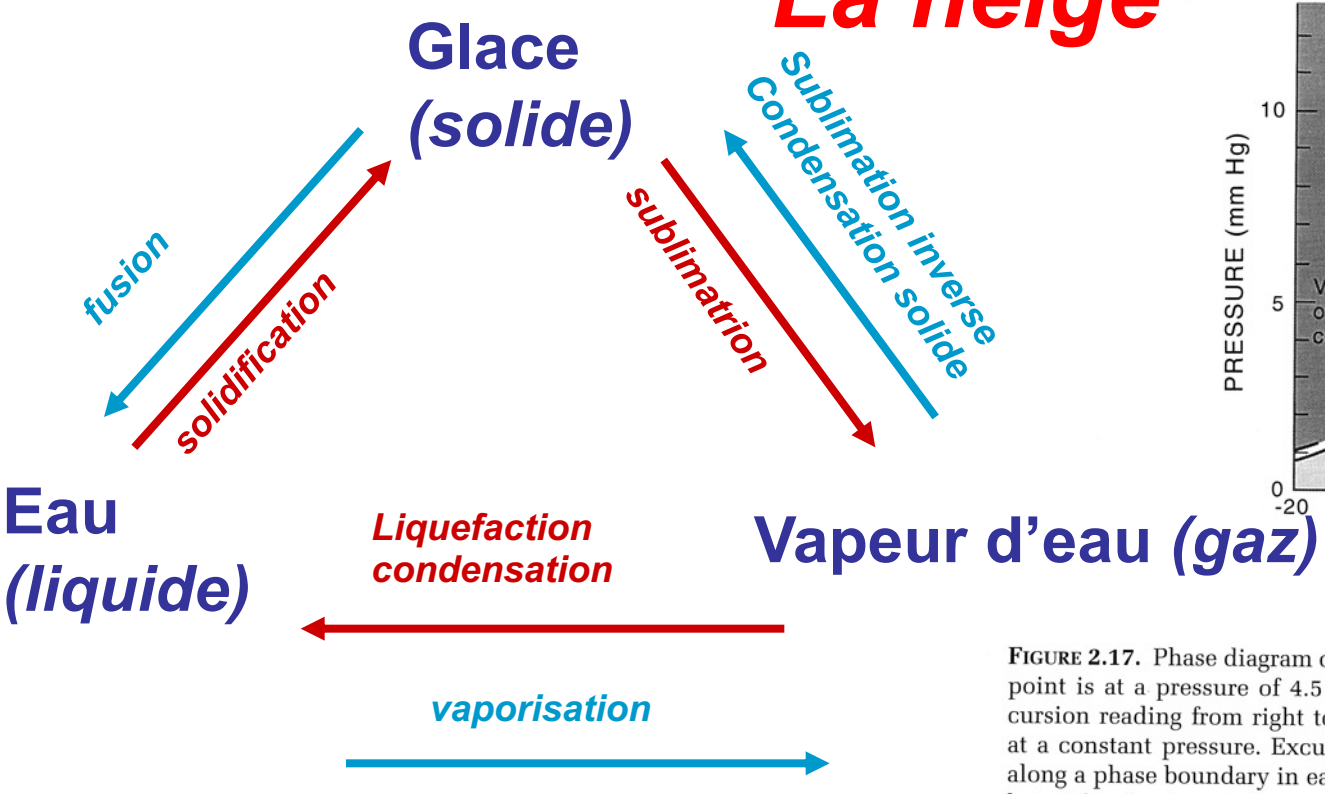


Fig. n° 3 : Tableau de classification des cristaux de neige fraîche selon l' Organisation Mondiale de la Météorologie (O.M.M.)

La neige



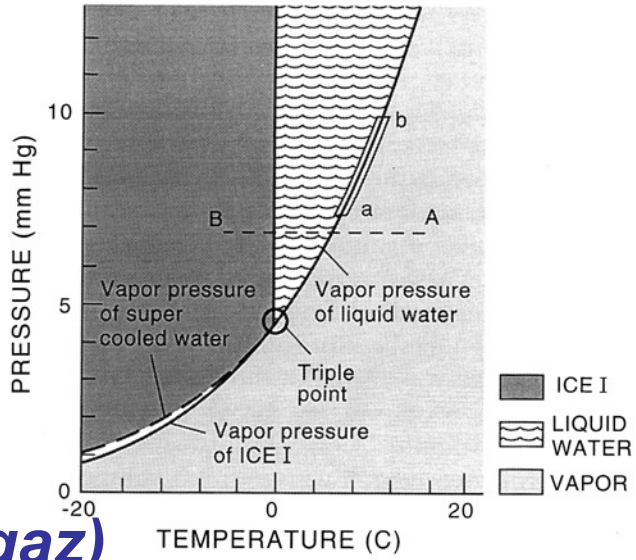


FIGURE 2.17. Phase diagram of water in the region of the triple point. The triple point is at a pressure of 4.5 mm Hg and a temperature of 0.0075°C. The excursion reading from right to left along the line *A* to *B* occurs under cooling at a constant pressure. Excursions along the curved line *ab* in any direction along a phase boundary in each phase determine the pressure–temperature relation for that boundary.

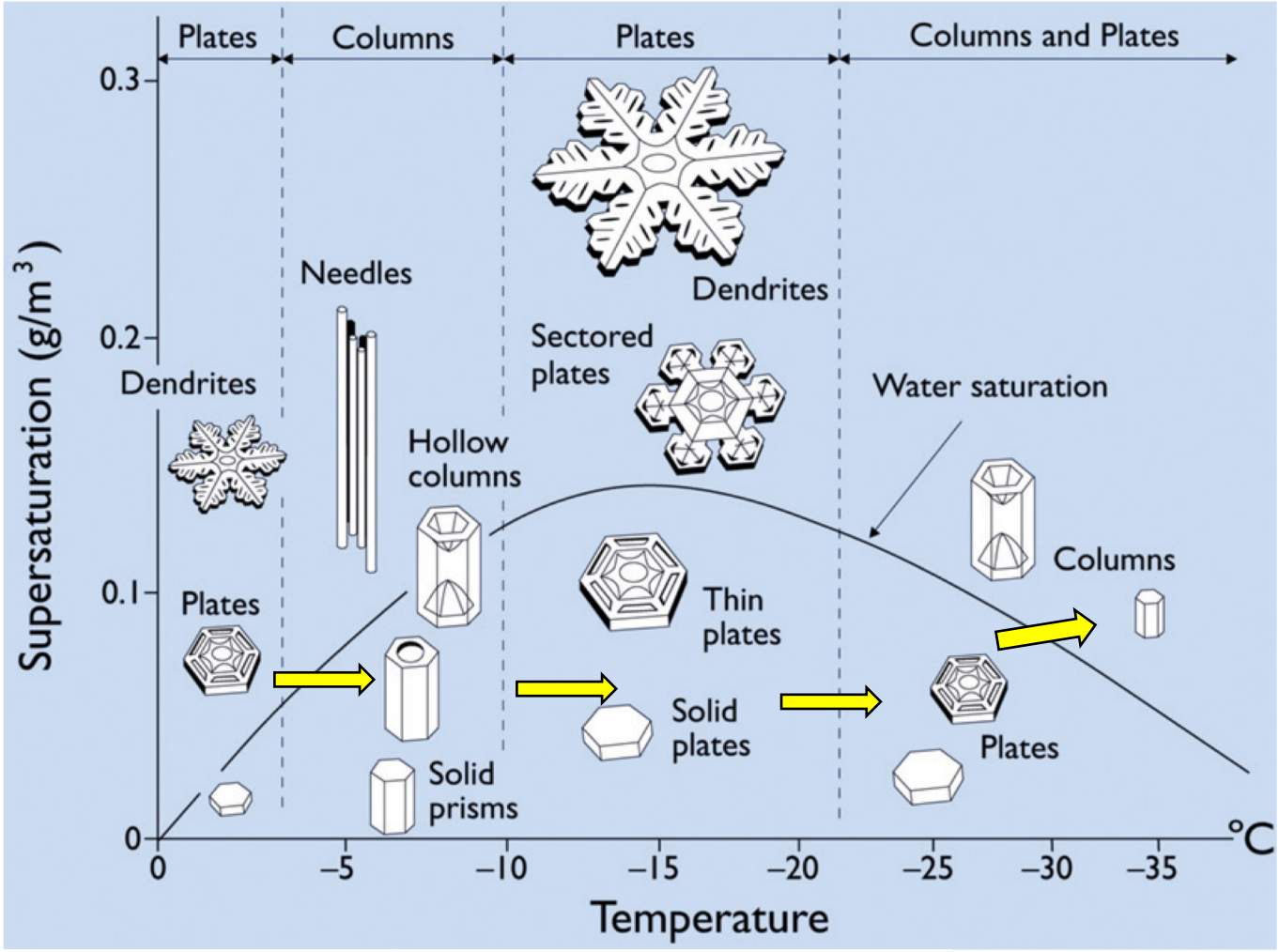
Valeur maximales de vapeur d'eau [g] par m³
Au-dessus d'une surface plane d'eau ou de glace

T°C	+20	+10	0	-5	-10	-20
Eau	17,2	9.4	4.8	3.4	2.4	1.1
Glace		-	4.8	3.3	2.2	0.9

Noyaux de condensation
Particules d'un diamètre de 0.2-10 µm
(sels, poussières,...)

Noyaux de congélation
Particules d'un diamètre de 0.1-10 µm
(structure cristalline...permet la cristallisat
Absence des noyaux : "surfusion"

Super-Saturation = Saturation au-dessus du valeur maximales de vapeur d'eau ➔ Plus d'humidité



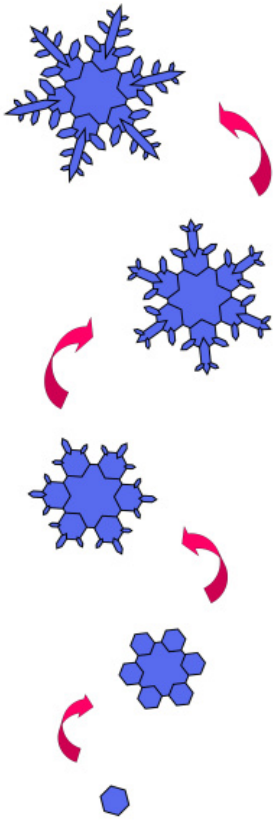
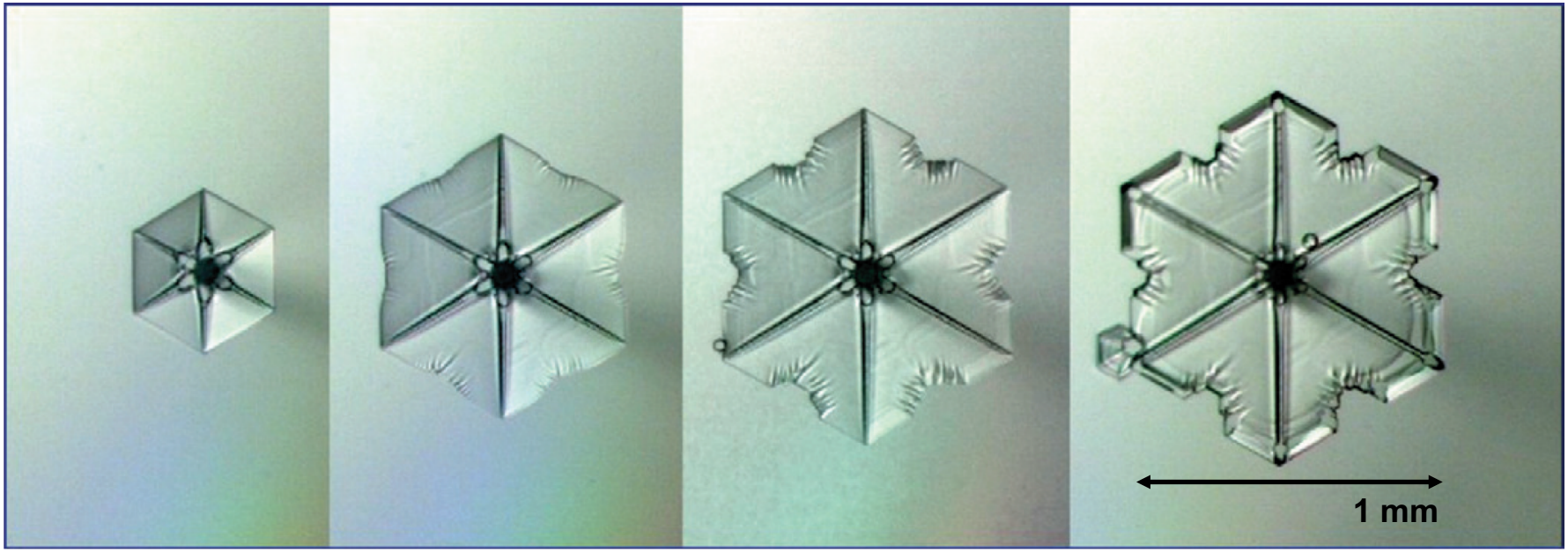


Figure 2. The snow crystal morphology diagram, showing different types of snow crystals that grow in air at atmospheric pressure, as a function of temperature and water vapour supersaturation relative to ice. The water saturation line gives the supersaturation of supercooled water, as might be found within a dense cloud. Note the morphology switches from plates ($T \approx -2^{\circ}$C) to columns ($T \approx -5^{\circ}$C) to plates ($T \approx -15^{\circ}$C) to predominantly columns ($T < -30^{\circ}$C) as temperature is decreased. Temperature mainly determines whether snow crystals will grow into plates or columns, while higher supersaturations produce more complex structures. This figure was adapted from a diagram by Furakawa.

Kenneth G Libbrecht: The physics of snow crystals
Rep. Prog. Phys. 68 (2005) 855–895

Plaquettes → étoiles

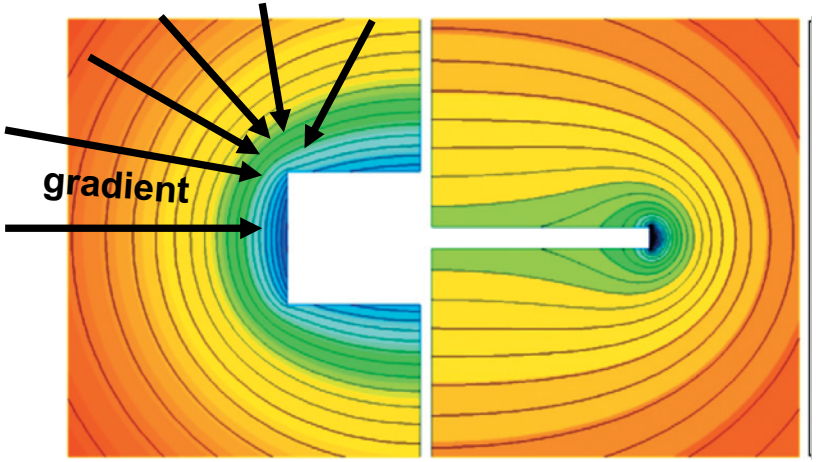


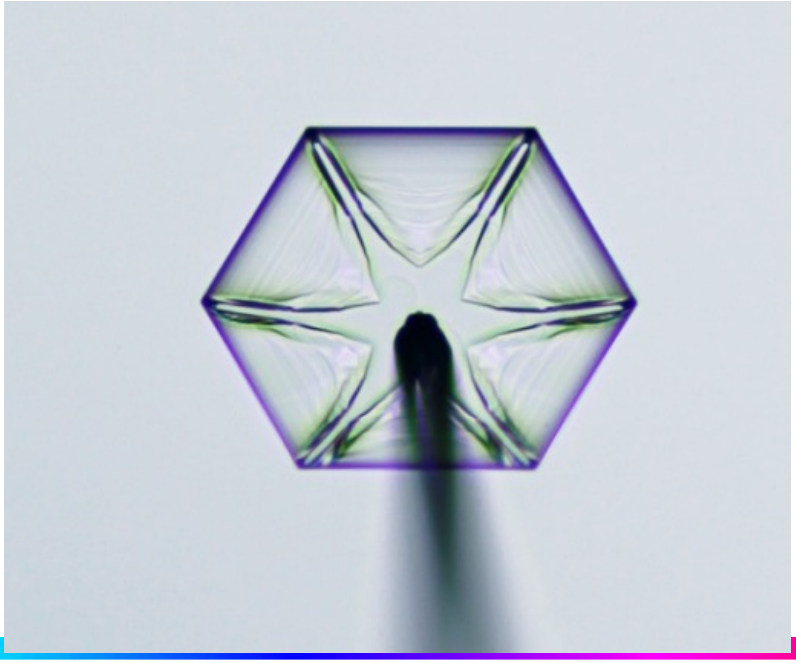
- **Figure 9. A series of photographs of a growing snow crystal, showing the transition from faceted to branched growth. The initially flat prism facets become hollowed as particle diffusion limits the growth at the facet centres. This plate-like crystal was grown on the end of an electric needle, in air at a pressure of 1 atm. The final crystal size is approximately 1 mm.**

Kenneth G Libbrecht: The physics of snow crystals
Rep. Prog. Phys. 68 (2005) 855–895

Formation des plaquettes et dentrites

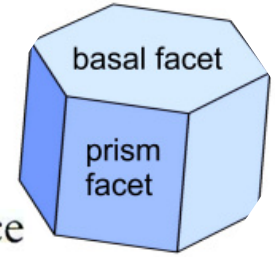
- La condensation sur le cristal enlève les molécules d'eau de l'environnement
- La diffusion des des molécules de gaz suivent le gradient de la super-saturation
- Plus d'accumulation sur le structure pointues
- Dépend aussi de la température

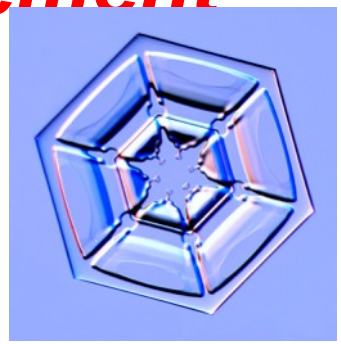




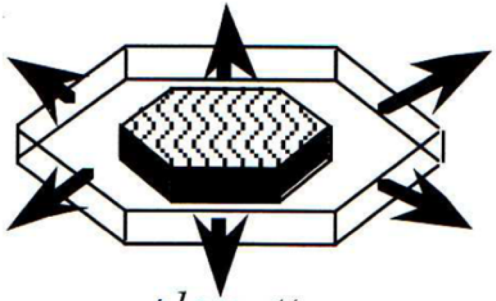
La neige, formation et grossissement

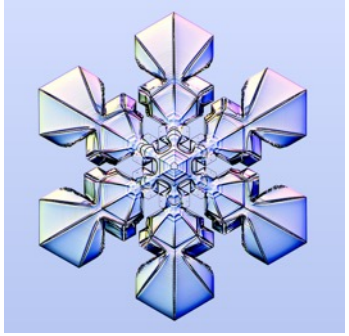
Croissance lentement





de -6° à -10°C
Croissance des grandes face

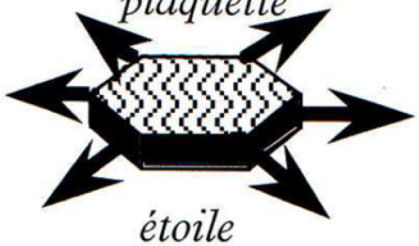




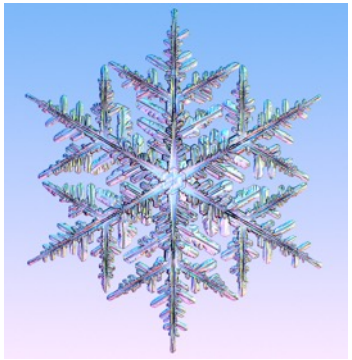
de -10° à -12°C
Croissance des petites faces

La forme exact dépend de plusieurs facteurs!

Un multitude des cristaux de neige!

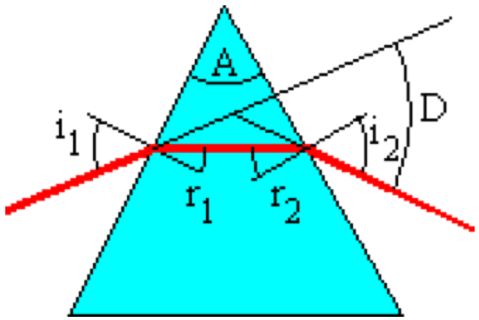


de -12°C à -20°C
Croissance des arêtes

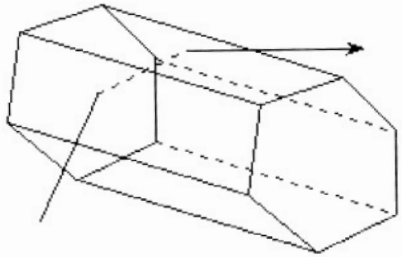


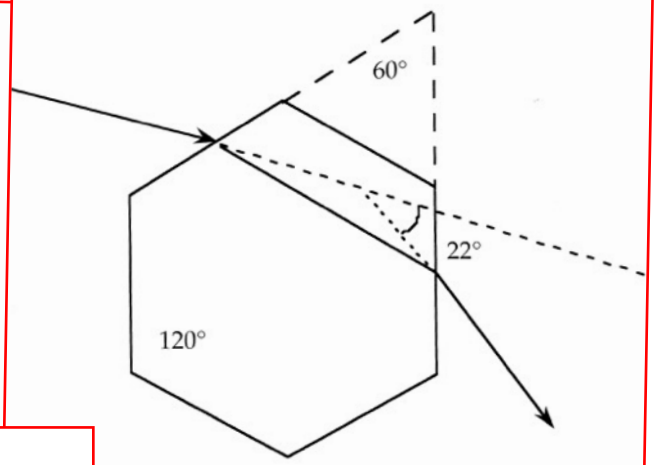
Croissance rapide

http://www.snowcrystals.com/videos/j0323r5-720h.mp4



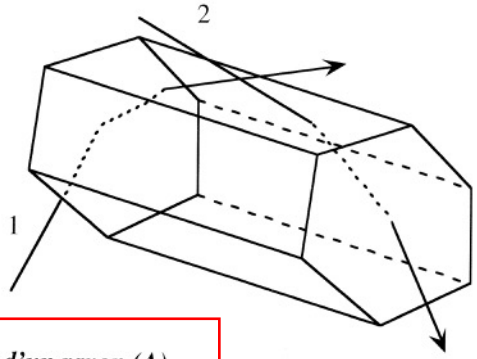
Trajectoire des rayons qui forment le halo à 22°.
Le rayon entre par une face latérale et ressort deux faces plus loin.



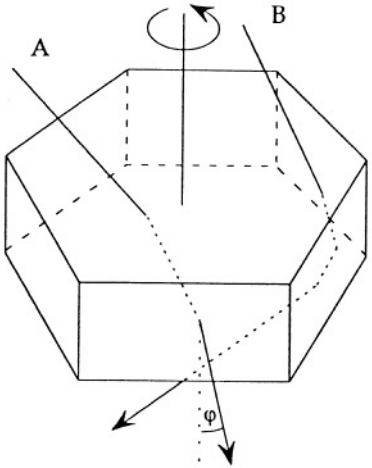


Trajectoires de rayons donnant le halo à 46°.
La baguette se comporte comme un prisme d'angle de 90° avec un minimum de déviation à 46°.

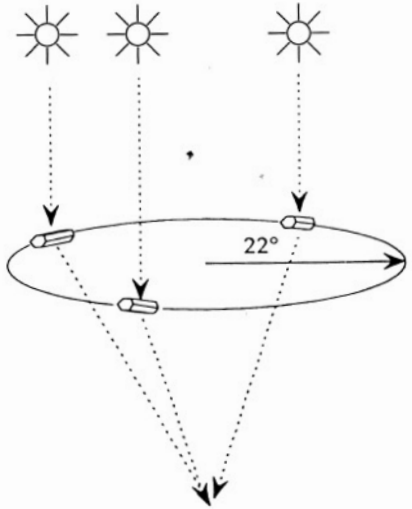
Le rayon 1 pénètre par la base arrière et sort par une face latérale. Le rayon 2 pénètre par une face et sort par une base.



En coupe, un cristal de glace se comporte comme un prisme d'angle de 60°. Au minimum de déviation, la déviation vaut 22°. Le prisme à 120° ne donne pas de minimum de déviation.



Trajectoire d'un rayon (A) donnant l'arc circumzénithal.
Quand les cristaux tournent, l'angle d'émergence avec la verticale varie peu. Le rayon B est trop incliné et ressort par dessous. Il contribue au cercle parhélique.



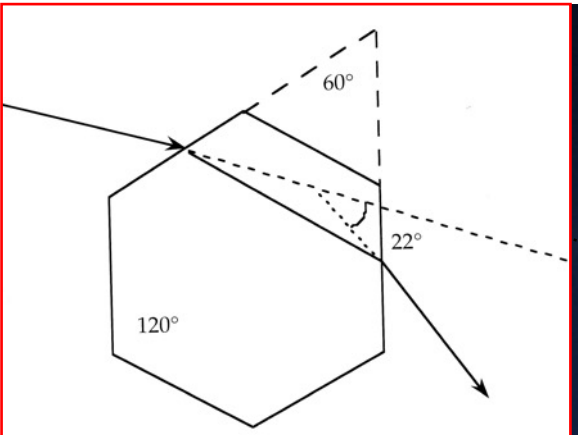
Si les conditions météorologiques sont calmes et les baguettes de glace assez nombreuses, ce sont celles qui sont situées à 22° du soleil qui envoient le plus de lumière : elles forment le petit halo.

Nuages de cristaux de glace

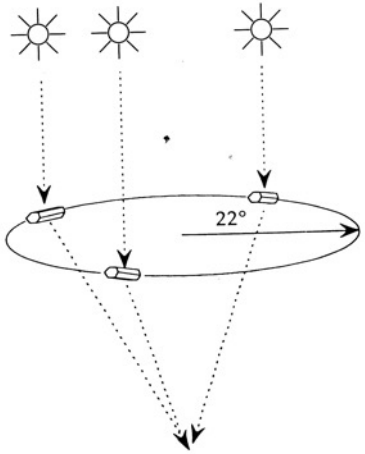
"Sun dogs"

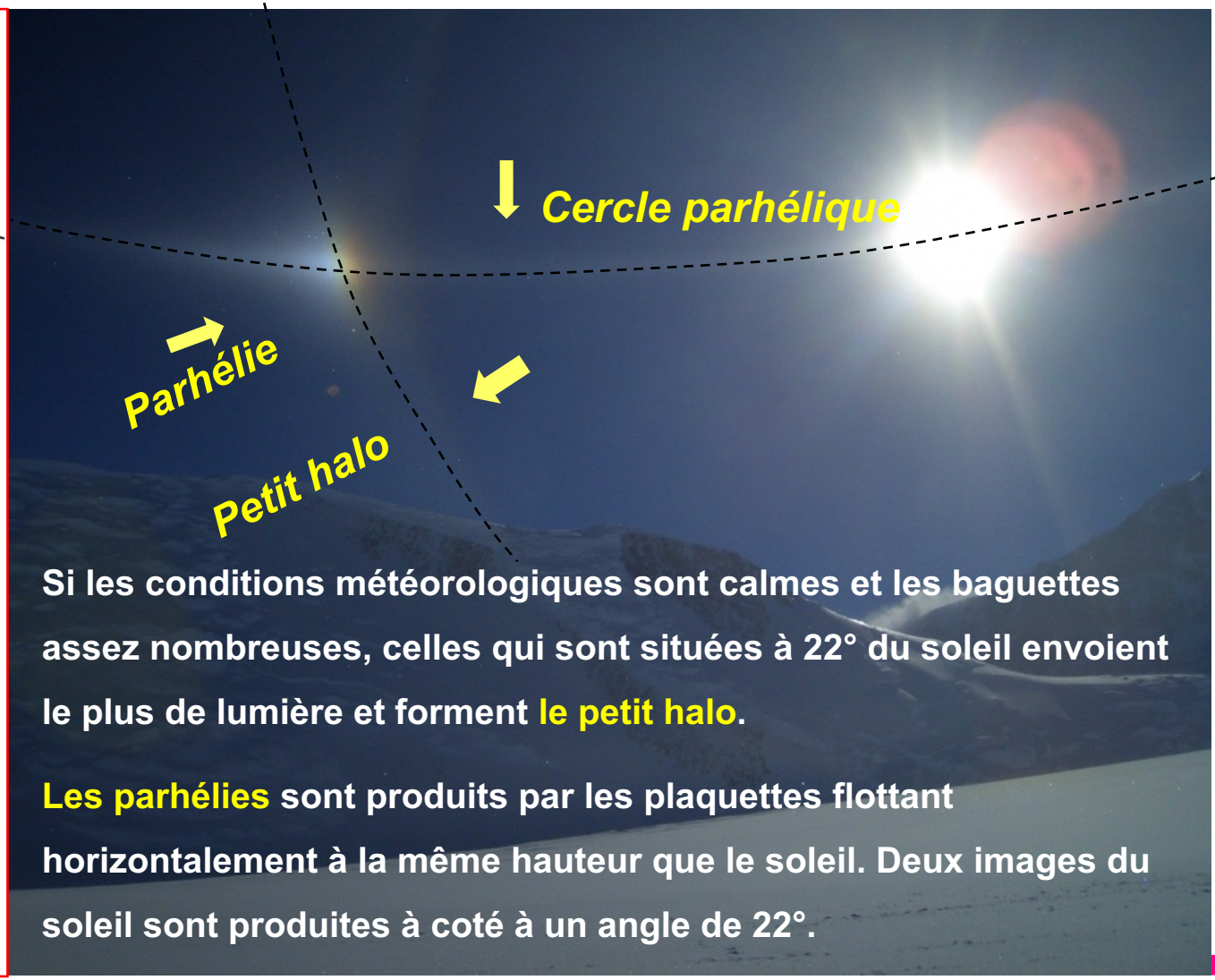
Les parhélies sont produits par les plaquettes flottant horizontalement à la même hauteur que le soleil. Deux images du soleil sont produites à coté à un angle de 22°.

Les Arcs autour du soleil:



Un cristal de glace se comporte comme un prisme d'angle de 60°. Au minimum de déviation, elle vaut 22°.

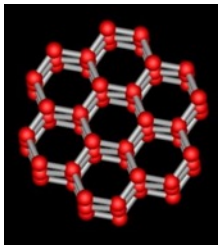




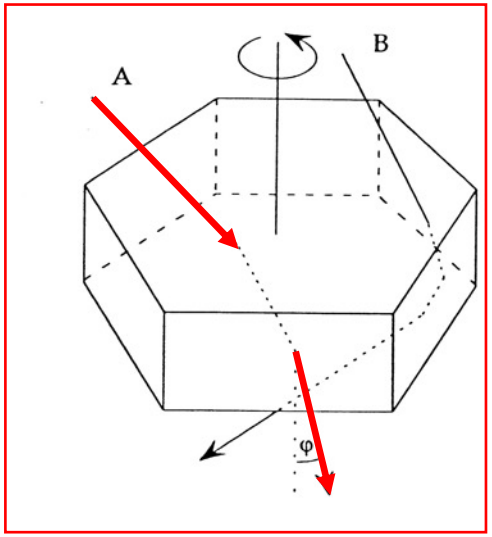
Si les conditions météorologiques sont calmes et les baguettes assez nombreuses, celles qui sont situées à 22° du soleil envoient le plus de lumière et forment le petit halo.

Les parhélies sont produits par les plaquettes flottant horizontalement à la même hauteur que le soleil. Deux images du soleil sont produites à coté à un angle de 22°.

Arc circumzénithal



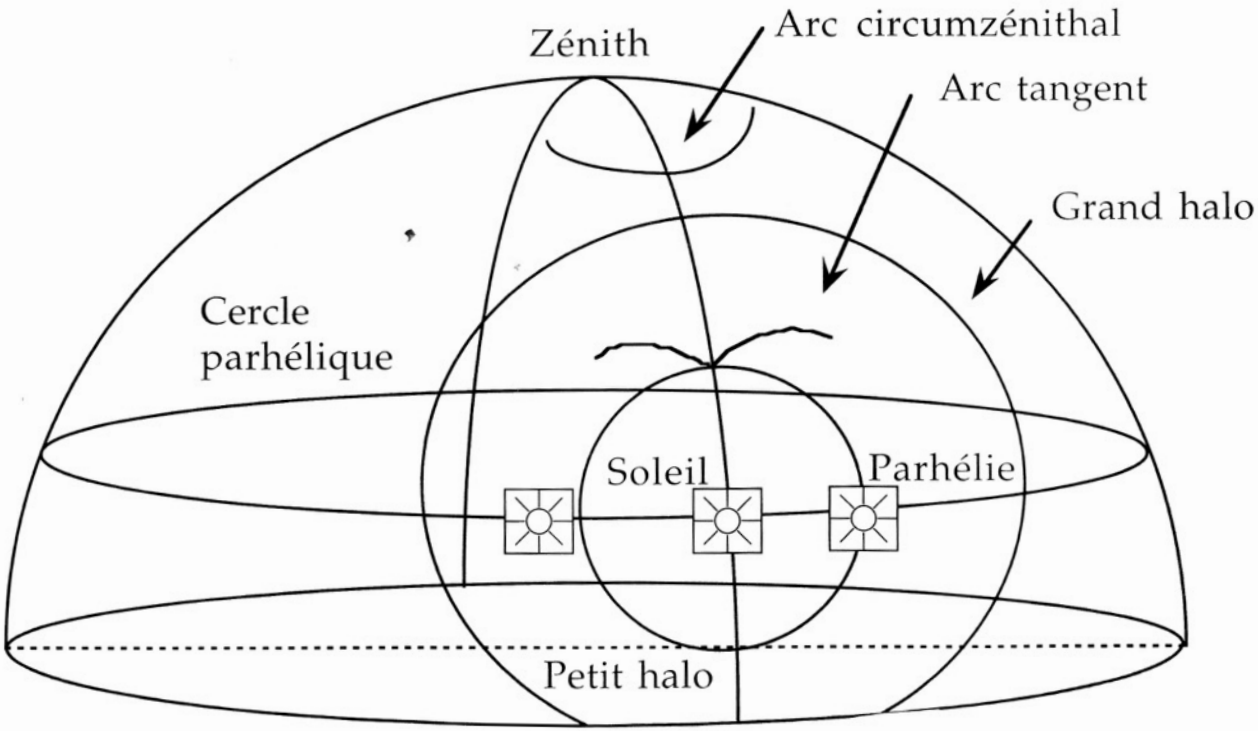
Trajectoire d'un rayon (A) donnant l'arc circumzénithal:



Quand les cristaux flottent et tournent (axe vertical) l'angle d'émergence avec la verticale varie peu.

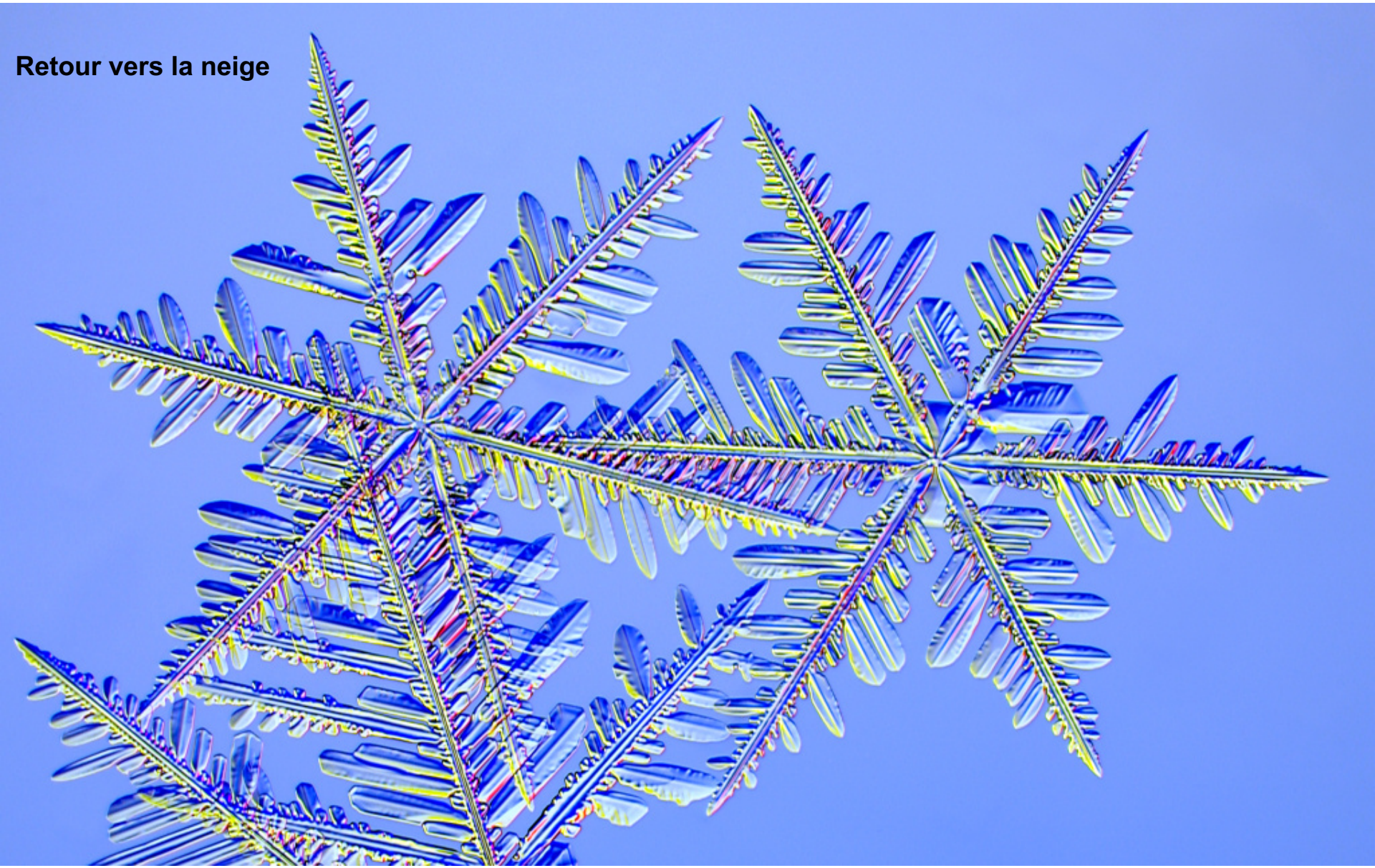
Arc en ciel

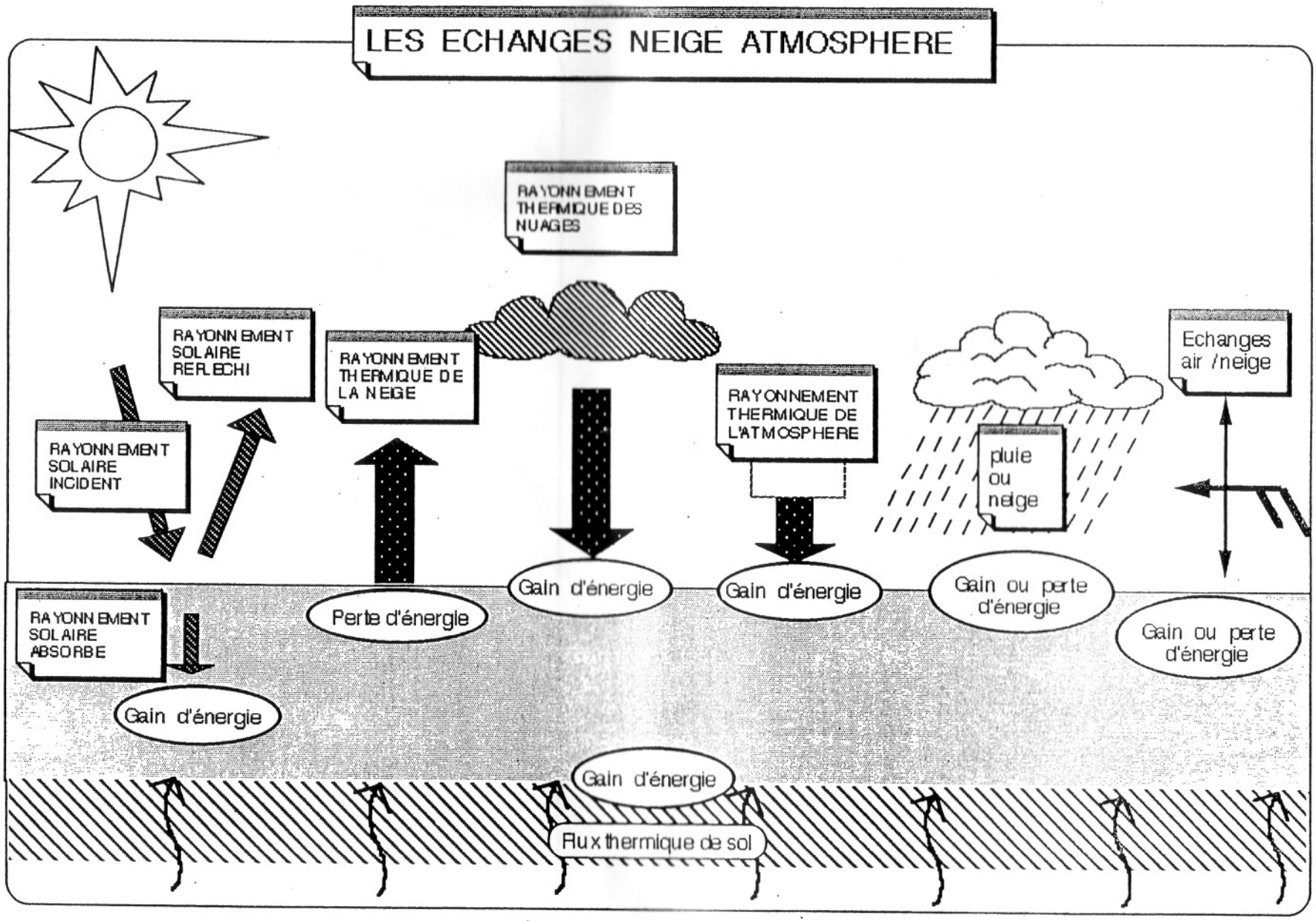
Arc en ciel II



LE GRAND HALO (46°)

Tout ce qui a été dit du halo de 22° s'applique également au halo de 46°, à la seule condition de remplacer le prisme de 60° par un prisme de 90°, car ce sont les rayons qui entrent par le sommet et qui ressortent par une face latérale qui donnent ce halo. Ils peuvent également suivre le chemin inverse. Ce grand halo est rarement complet et beaucoup moins lumineux que le petit halo. Les parhélies associés sont extrêmement rares.


Retour vers la neige


LES ECHANGES NEIGE ATMOSPHERE
RAYONNEMENT THERMIQUE DES NUAGES
RAYONNEMENT SOLAIRE REFLECHI
RAYONNEMENT THERMIQUE DE LA NEIGE
RAYONNEMENT SOLAIRE INCIDENT
RAYONNEMENT THERMIQUE DE L'ATMOSPHERE
Echanges air /neige
pluie ou neige
RAYONNEMENT SOLAIRE ABSORBE
Perte d'énergie
Gain d'énergie
Gain d'énergie
Gain ou perte d'énergie
Gain ou perte d'énergie
Gain d'énergie
Gain d'énergie
Flux thermique de sol

Gradient vertical

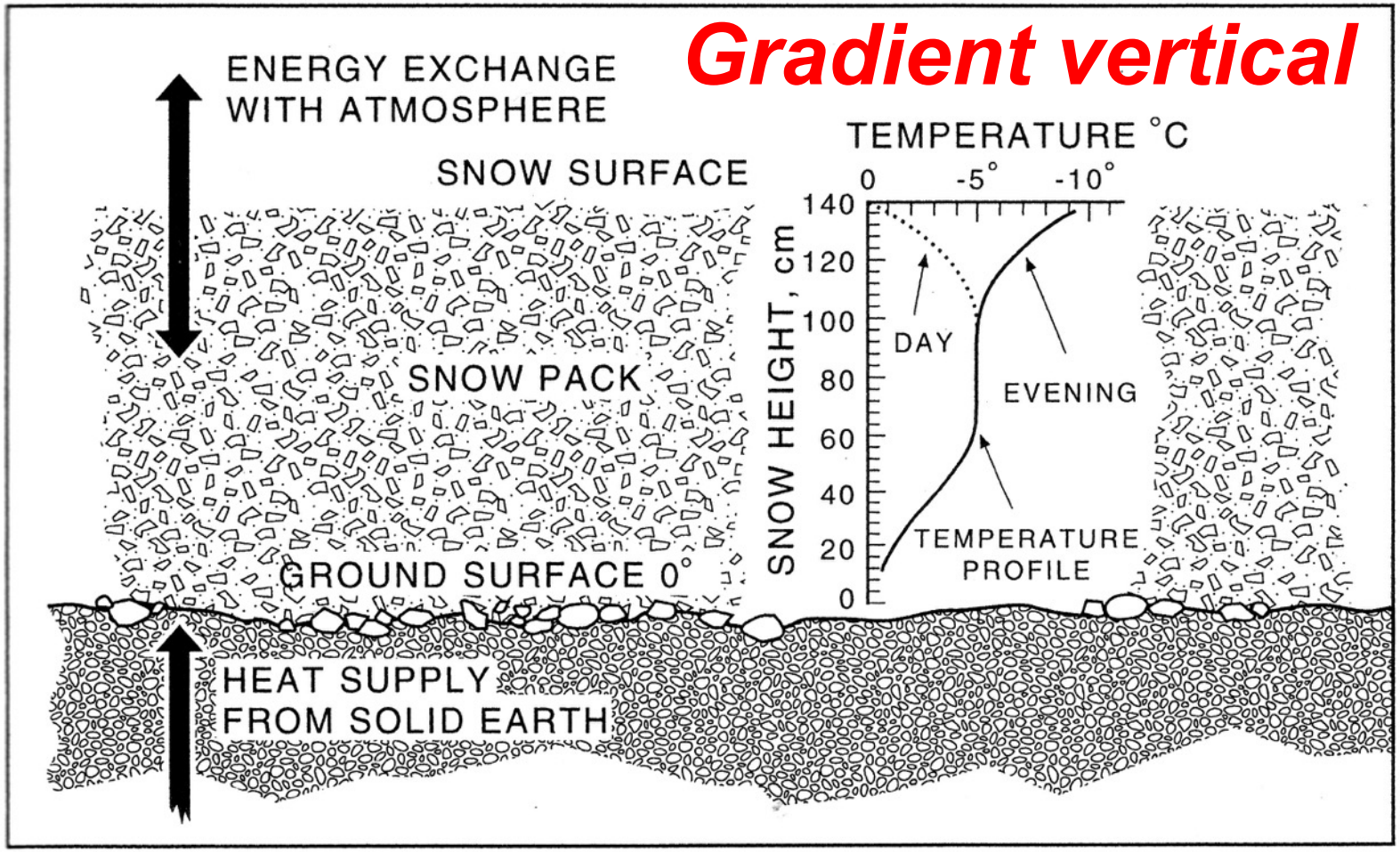


FIGURE 2.8. Temperature profile of a snowpack. Temperature gradients exist at the top and at the bottom, near the surface of the snowpack and at the ground surface. In the middle, the snowpack is at an equitemperature state (Perla and Martinelli, 1979).

Métamorphoses de la neige

Neige sèche

1. **Faible gradient (0<< 0.02 C^0/cm)**

   condensation – sublimation

   grains fins Ø=0.2-0.4 mm, ponts de glace

2. **Gradient moyen (0.02< < 0.2 C^0/cm)**

   grains à faces planes Ø=0.3-0.6 mm

3. **Gradient fort (> 0.2 C^0/cm)**

   évaporation et condensation

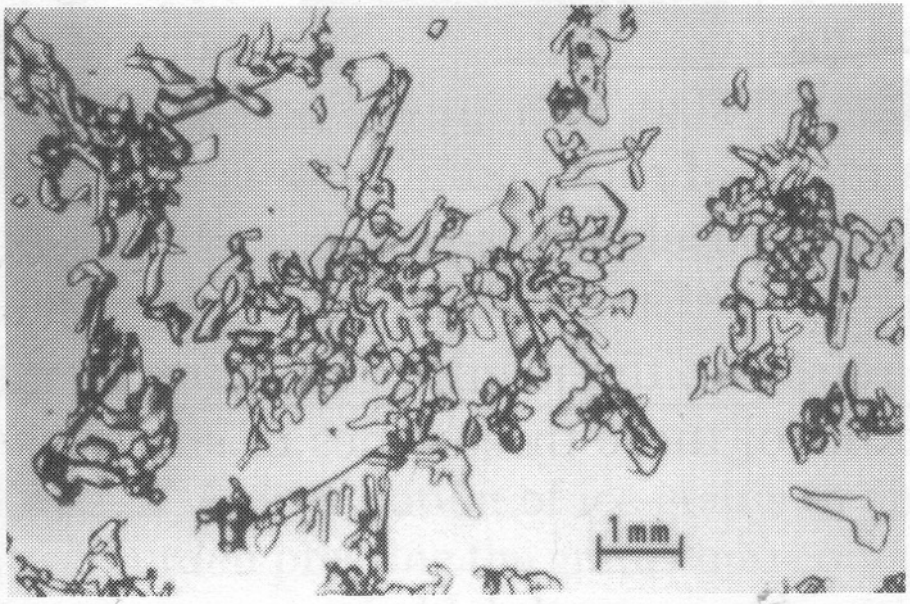
   cristaux pyramidaux, gobelets, givres de profondeur

Le vent : **fragmentation, frittage des grains, Accumulation**

Evolution

Gradient faible (0-0.05°C/cm)

grains fins Ø=0.2-0.4 mm, ponts de glace



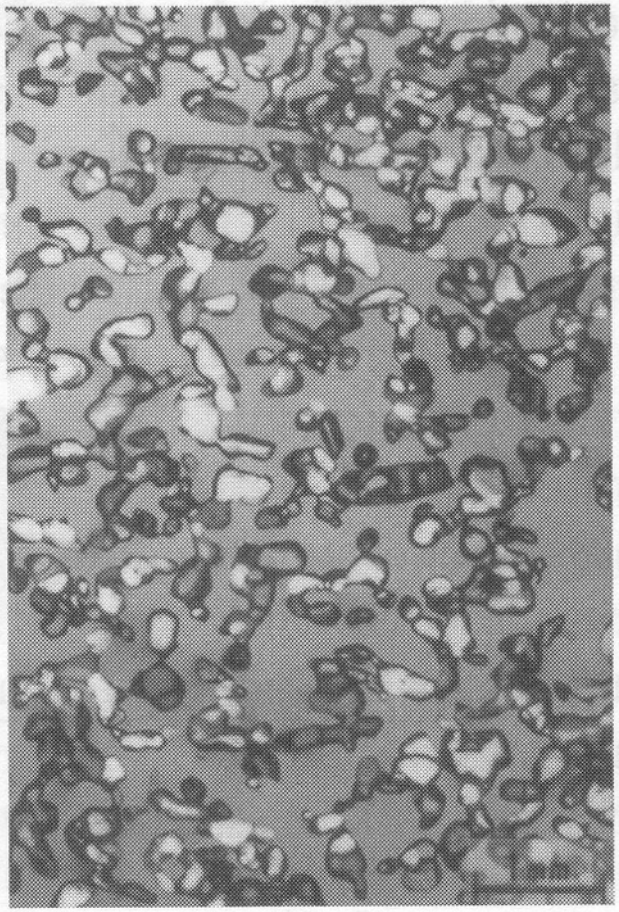
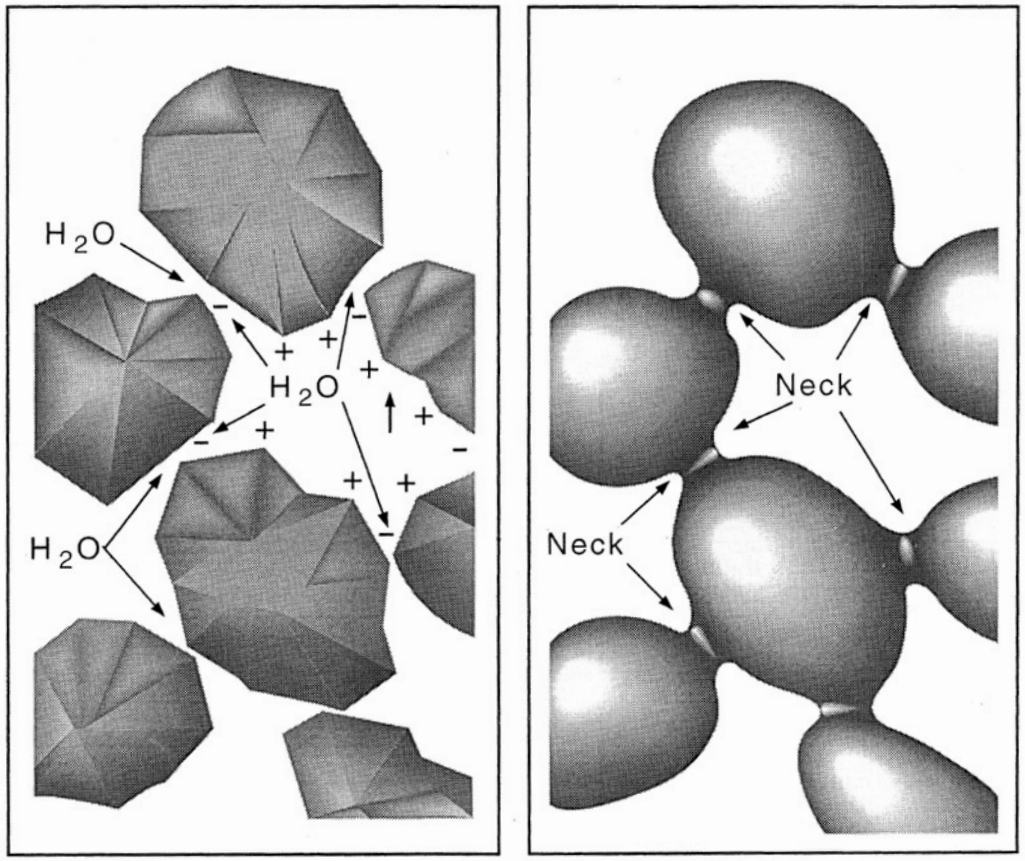


FIGURE 2.6. Equitemperature (ET) metamorphism of newly fallen snow. The faceted, dendritic arms of the new snow grains in the left frame have disappeared in the right frame, metamorphosing into rounded, sintered grains. (Reprinted with permission from Colbeck *et al.*, 1990. Photographs courtesy of E. Akitaya.)



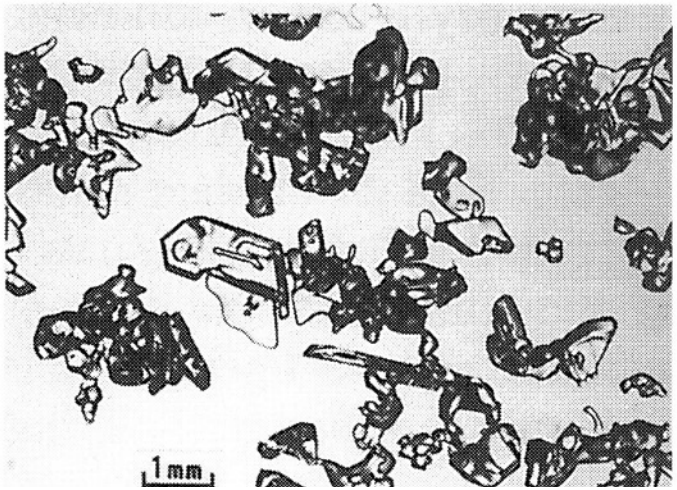
Similaire à la formation des cristaux dans les nuages super-saturé, mais ici le gradient est dans la direction opposée

Convexités:
Glace → vapeur d'eau

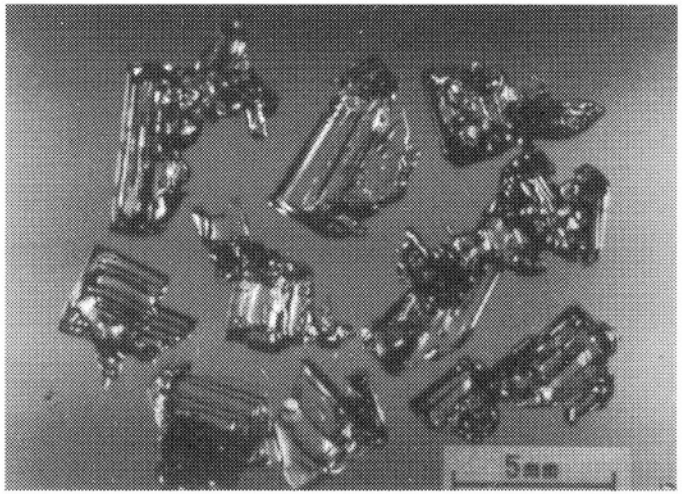
Concavités:
vapeur d'eau → glace

FIGURE 2.7. A distribution of ice grains in an equitemperature snowpack with the overburden pressing the grains into contact. The + symbols indicate where the vapor pressure is high because of positive curvature, and the − symbols show the regions that have low vapor pressure because of the negative curvature. The migration of water vapor and the transport of liquid-like water by capillary action are illustrated in the frame on the left; in the adjacent frame, necks of ice grow at the concavities, bonding the grains together, which makes the snowpack stronger (Perla and Martinelli, 1979).

Evolution de la neige



(a)



(b)

Gradient fort (>0.2°C/cm)

« Gobelets »

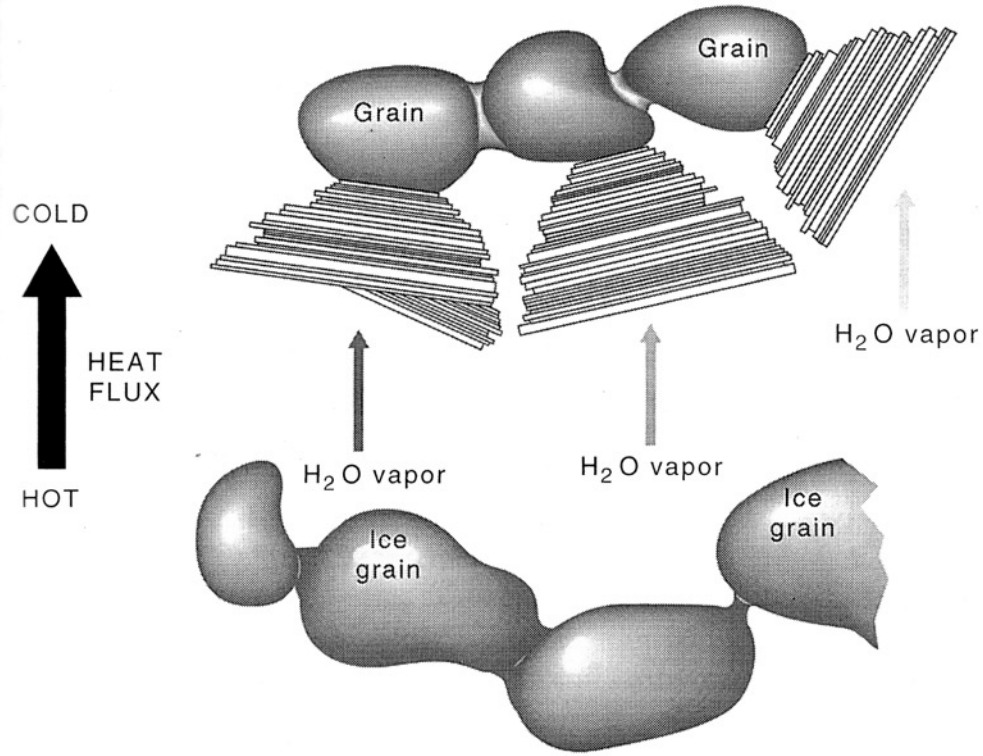


FIGURE 2.10. Temperature-gradient (TG) snow in successive stages of growth. Notice the change in scale from (a) to (b). (Reprinted with permission from Colbeck *et al.*, 1990. Photographs courtesy of K. Izumi.)

Métamorphoses de la neige

Neige humide

l'eau dans la neige

grains fronds Ø = 0.3- 2 mm, ponts de glace

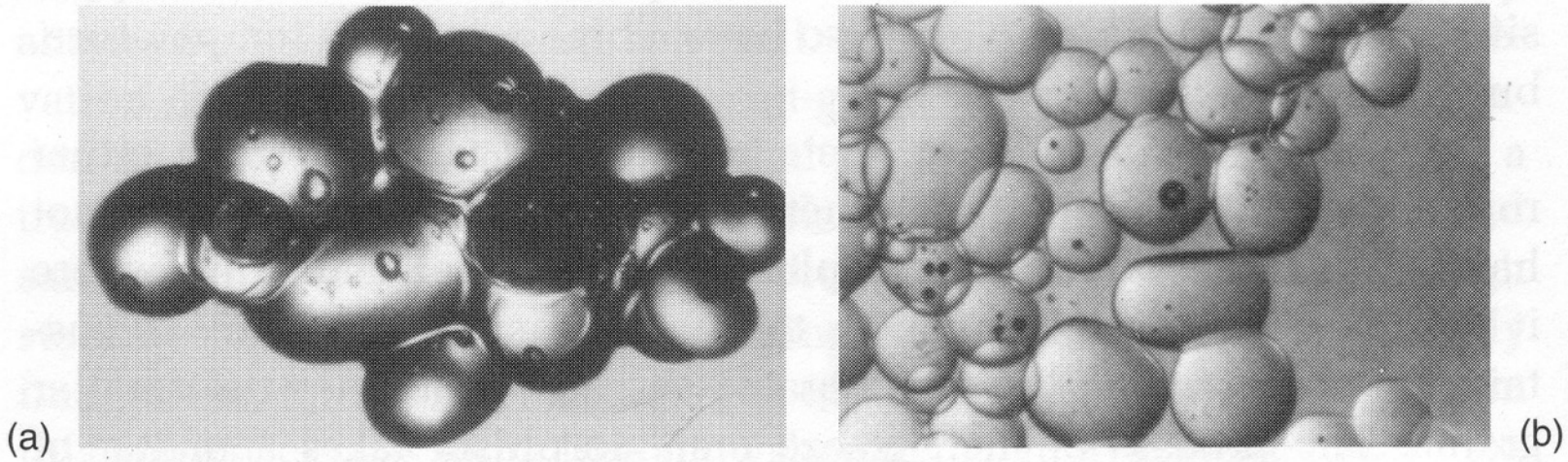
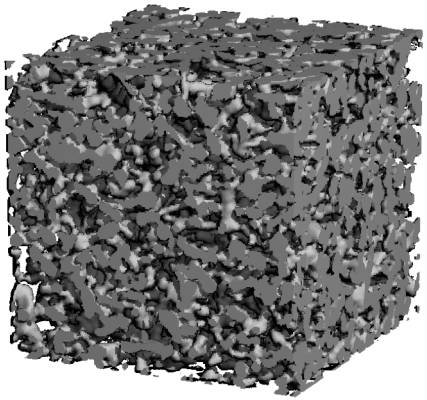
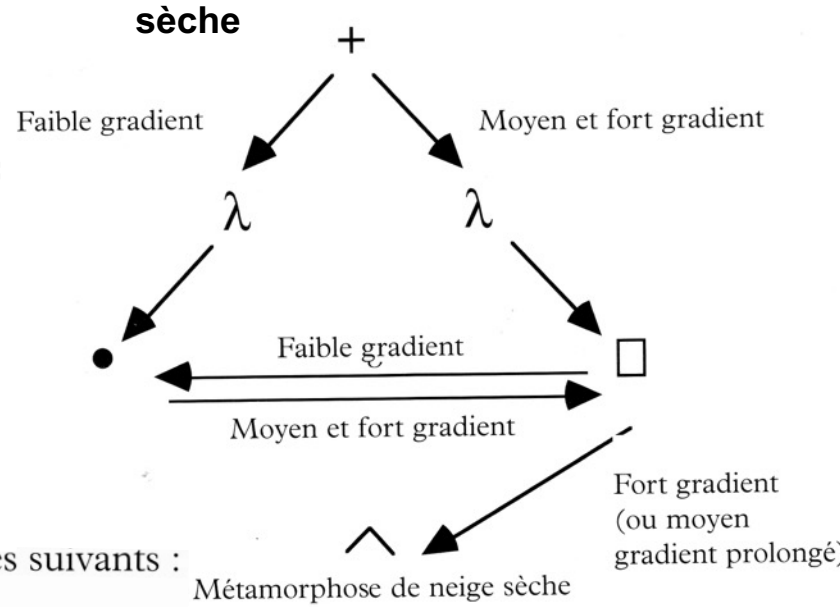


FIGURE 2.11. Ice grains subject to meltwater metamorphism and refreezing. (Reprinted with permission from Colbeck *et al.*, 1990. Photographs courtesy of S. Colbeck.)

Métamorphoses de la neige





On schématise les différents types de grains par les symboles suivants :

	Symbole	*Masse volumique (kg/m³)*	*Taille moyenne (mm)*
Neige fraîche	+	20-100	-
Neige roulée	⅄	-	-
Givre de surface		-	-
Particules reconnaissables	λ	50-250	0,1-1
Grains fins	●	150-450	0,2-0,4
Grains à faces planes	□	150-400	0,3-0,6
Gobelets	^	200-400	0,5-5
Grains ronds	○	250-500	0,3-2

humide

Avalanches

Foto: Jürg Schweizer

Propriétés mécaniques de la neige

a) Compressibilité - traction
b) Hétérogénéité
c) Restructuration irréversible
d) Consistance (cohésion)
e) Cohésion de feutrage (neige fraiche)
f) Cohésion de frittage (ponts de glace)
g) Cohésion capillaire (neige humide)
h) Cohésion regel

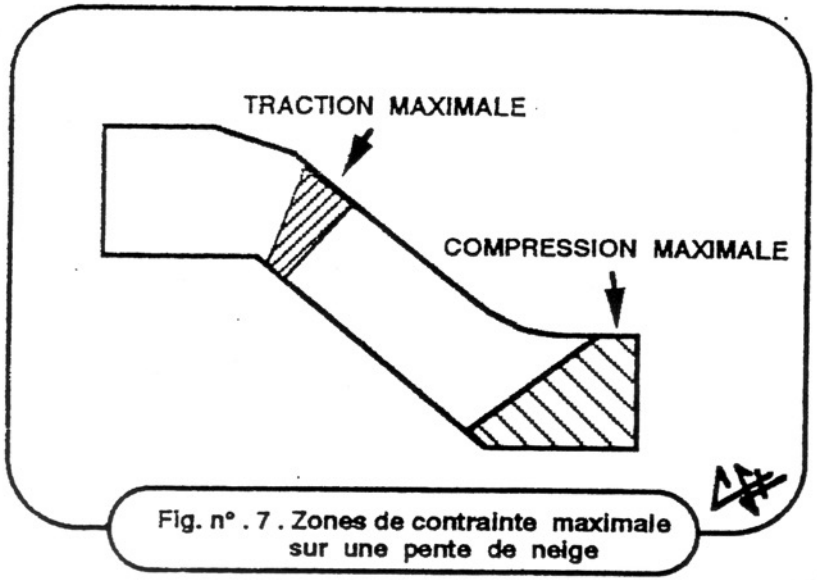
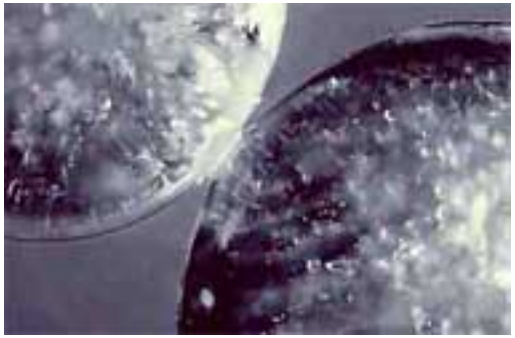
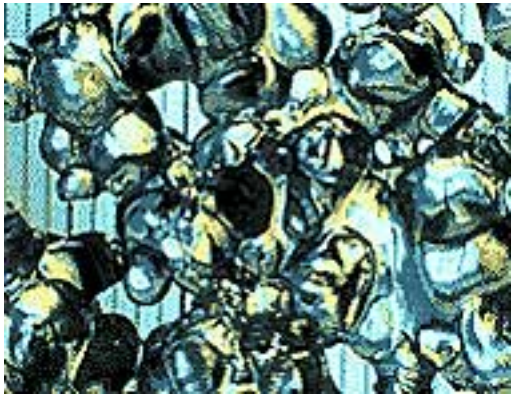


Fig. n° . 7 . Zones de contrainte maximale sur une pente de neige

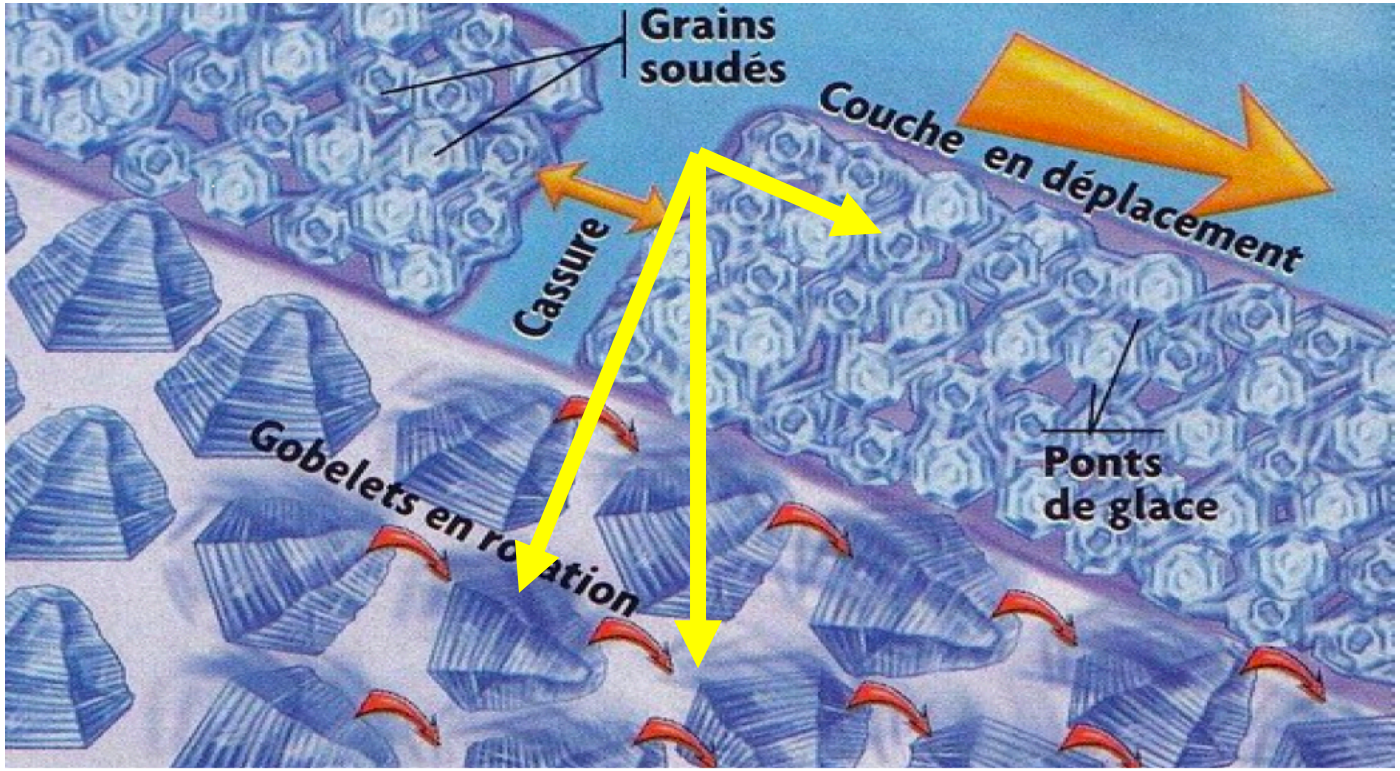
Cohésion de feutrage


Cohésion de frittage


Cohésion capillaire ou regel

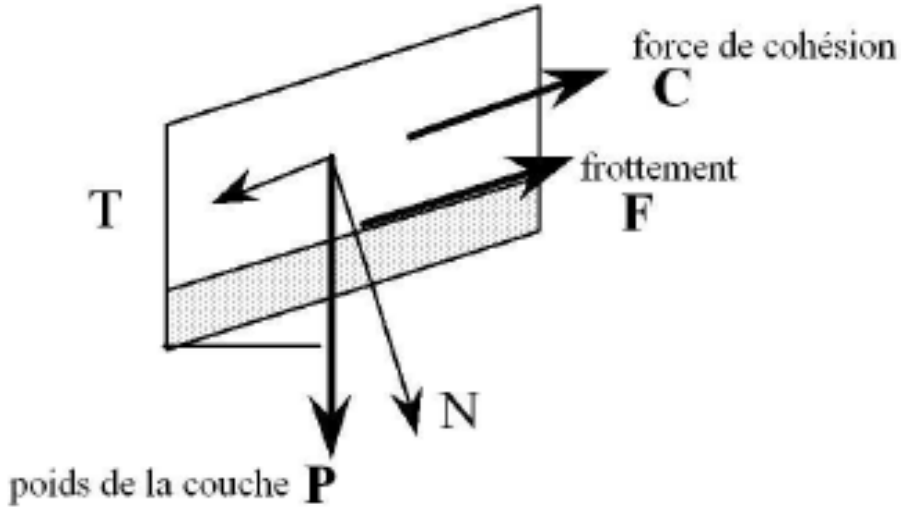
Propriétés mécaniques de la neige

Compression ⇔ traction, cisaillement, reptation



Déclencher une avalanche

Stabilité $T < F + C$



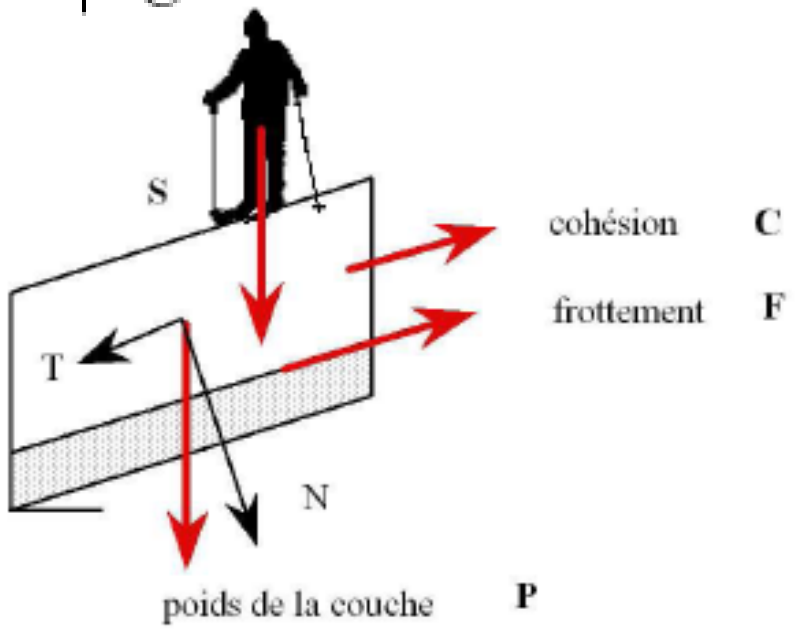


Figure 5.22 La strate supérieure est soumise à trois forces : le poids P, les forces de cohésion et le frottement F. Elle est en équilibre si le frottement F et la cohésion C contrebalancent la composante tangentielle T du poids.

Figure 5.23 Lors du passage d'un skieur, le frottement F et la cohésion C doivent compenser l'augmentation de la composante tangentielle du poids pour que l'équilibre persiste.

Moyens sommaires d'investigations

I. **Profil stratigraphique sommaire**

II. **Test de la pelle**

III. **Test du bâton**

IV. **Méthode de Munter**

(bloc de neige sur une pelle)

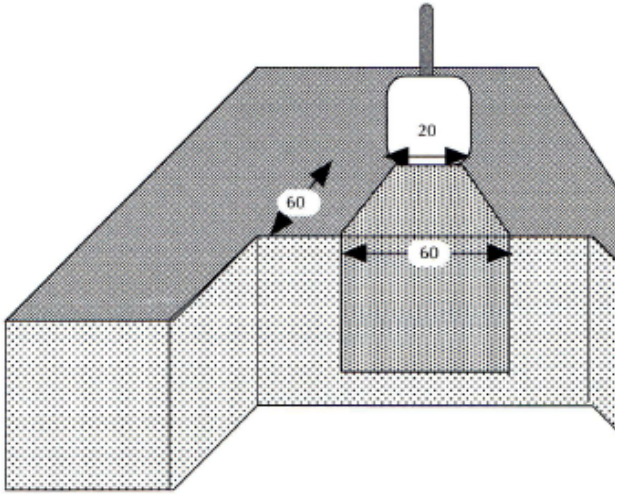


Figure 4.10 La méthode de Faarlund. Il existe de nombreuses variantes. Celle-ci est celle indiqué par l'IFENA en Suisse. Les nord-américains, qui l'utilisent beaucoup, optent pour un bloc de forme carré de base 30 cm. Voir [6] et chap. 6.

Figure 4.11 Test de la pelle (méthode de Faarlund) accompagné d'un rapide stratigraphique. Cliché C. Ancey.

les caractéristiques d'un manteau neigeux?

Sondage stratigraphique.

Elle consiste à enfoncer un tube en laissant tomber le long d'une tige un poids (appelé mouton, de poids *P*) d'une distance fixée *h*. L'opérateur fixe cette hauteur *h* pour avoir approximativement un enfoncement de 1 cm par lâcher.
On réitère l'opération *n* fois jusqu'à ce que cet enfoncement soit compris entre 3 et 5 cm. On continue ainsi de suite jusqu'à la pénétration totale. On désigne par *q* le nombre de tubes utilisés et *Q* le poids de la tige (en général *Q* = 1 kgf 1). En connaissant la mesure de la pénétration de la sonde (notée d en cm), on détermine une résistance au battage *R*

$$R = \frac{nhP}{d} + P + qQ.$$

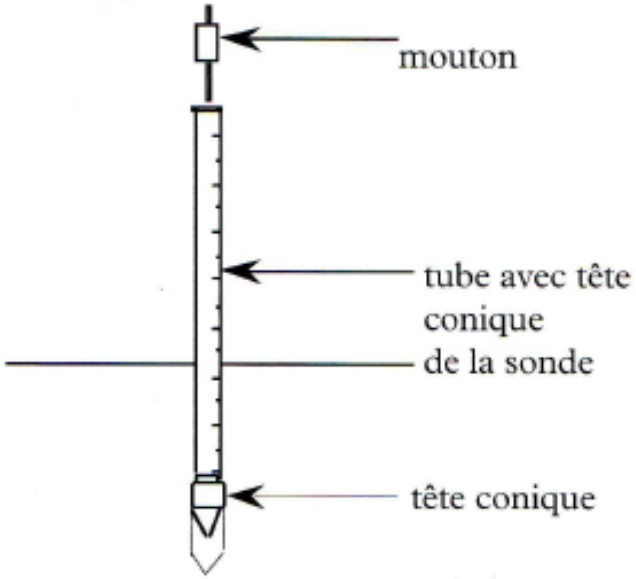


Figure 4.1 Schéma de principe d'une sonde de battage

Sondage stratigraphique

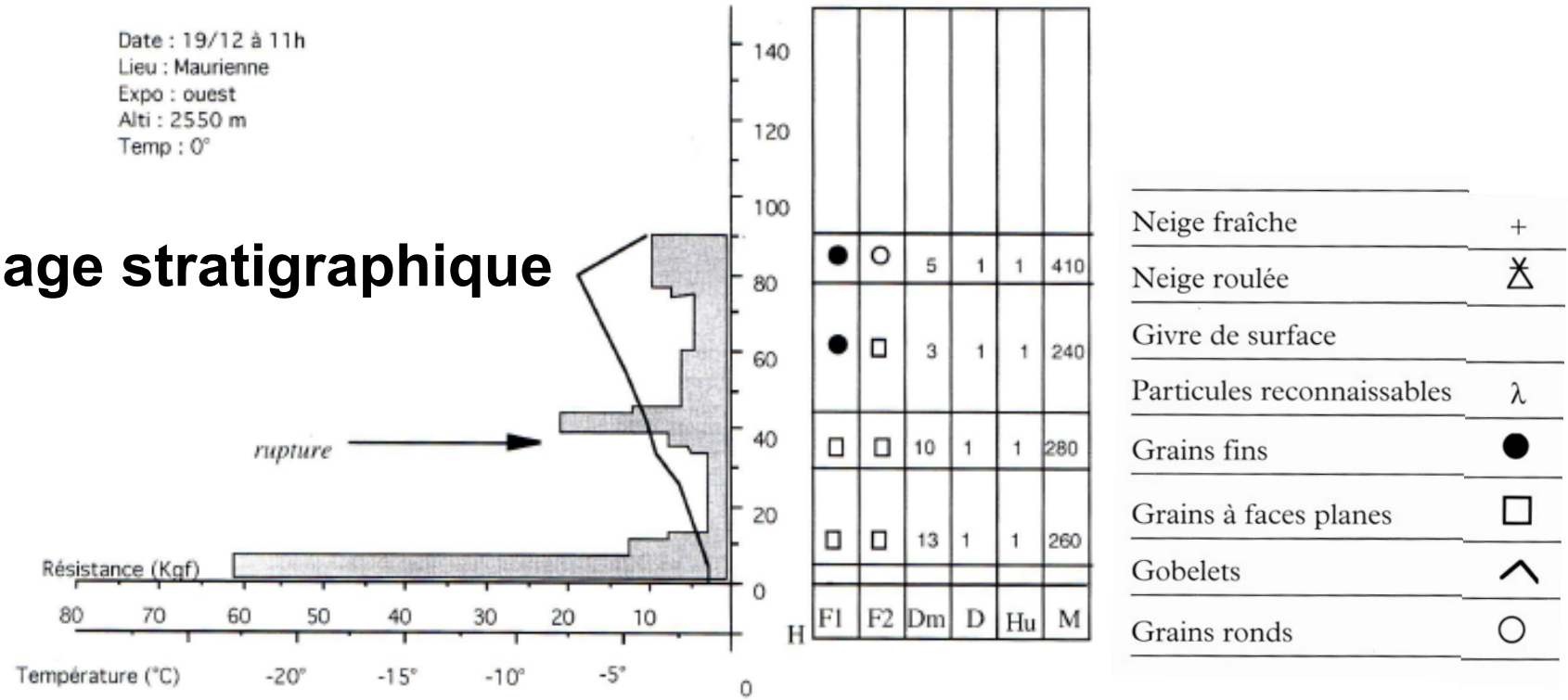


Figure 4.7 Profil réalisé dans la vallée de la Maurienne par beau temps le 10 avril à 16 heures à 2160 m. Le manteau se structure *grosso modo* en 3 parties : à la base, on trouve une épaisse couche de neige transformée (grains fins et ronds sur 40 cm) dont la résistance à la pénétration présente d'importantes variations (entre 10 et 50 kgf). Juste au-dessus, on est en présence d'une couche de faces planes (croûtée à l'interface) sur une vingtaine de centimètres ; sa résistance est médiocre (environ 3 kgf). La couche superficielle est composée de particules reconnaissables en cours de métamorphose (apparition de faces planes), elle reste encore légère (poudreuse skiable). Cette configuration du manteau est responsable d'une avalanche accidentelle ayant emporté deux skieurs (1 victime, 1 blessé). La rupture a mis en mouvement les 40 cm en surface.

Les Avalanches

Classement par type de neige

1. L'avalanche de neige récente

- La neige est peu évoluée, pulvérulente ou de faible cohésion
- Départ ponctuel, ou par une cassure linéaire (plaque friable).
- Leur écoulement se fait soit en surface comme un fluide dense soit sous
- forme d'aérosol, mélange de neige et d'air (avalanche de poudreuse).

2. L'avalanche de plaque dure

- La rupture initiale intéresse une neige de bonne cohésion, d'une masse volumique de 200 à 400 kg/m3
- plaques à vent, se forme sous l'action du vent ou après une chute de neige.

3. L'avalanche de neige humide (ou de fonte)

- La neige « mouillée » a une masse volumique élevée (350 à 500 kg/m3 en moyenne).
- au cours de réchauffements importants, avalanches de printemps
- vitesses sont faibles, de l'ordre de 20 à 60 km/h,
- un grand pouvoir d'érosion et une grande puissance dévastatrice
- neige très dense.

Avalanche en aérosol

a) écoulement très rapide (50-100m/s)
b) Mélange de l'air et des particules de neige
c) phénomènes rares

avalanche en aérosol dans la face nord du K2. (Himalaya). Cliché P. BÉGHIN.

Fig. 3. Airborne avalanche descending a steep slope (Himalayas)

Avalanche coulante

Fig. 2. Flowing avalanche impacting a wing-shaped structure in the Lauratet experimental site (France)

Phase départ

I. Départ en plaque

II. Départ ponctuel

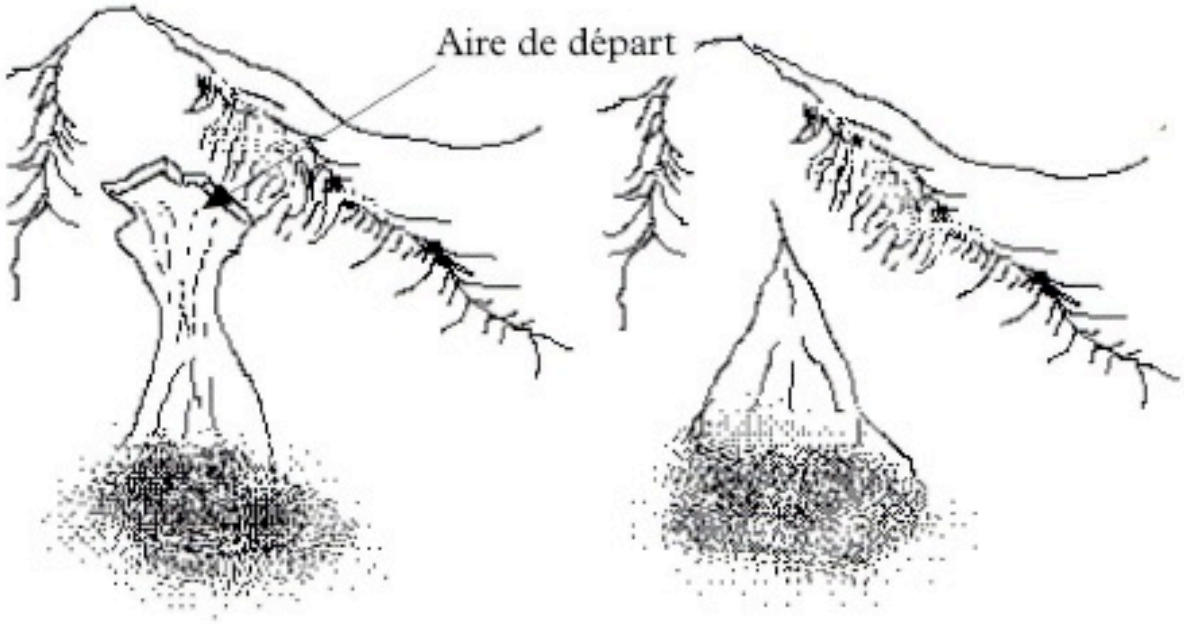


Figure 5.4 Modes de départ : départ en plaque ou ponctuel. L'aire de départ dans le cas d'avalanches avec départ en plaque est assez facile à délimiter.

Départ en plaque

Figure 5.6 Départ en plaque (col du Palet, Tignes). La fracture est en marche d'escalier et on voit distinctement les deux surfaces de glissement. Cliché C. Ancey.

Déclencher une avalanche

Étude globale : notion de plaque

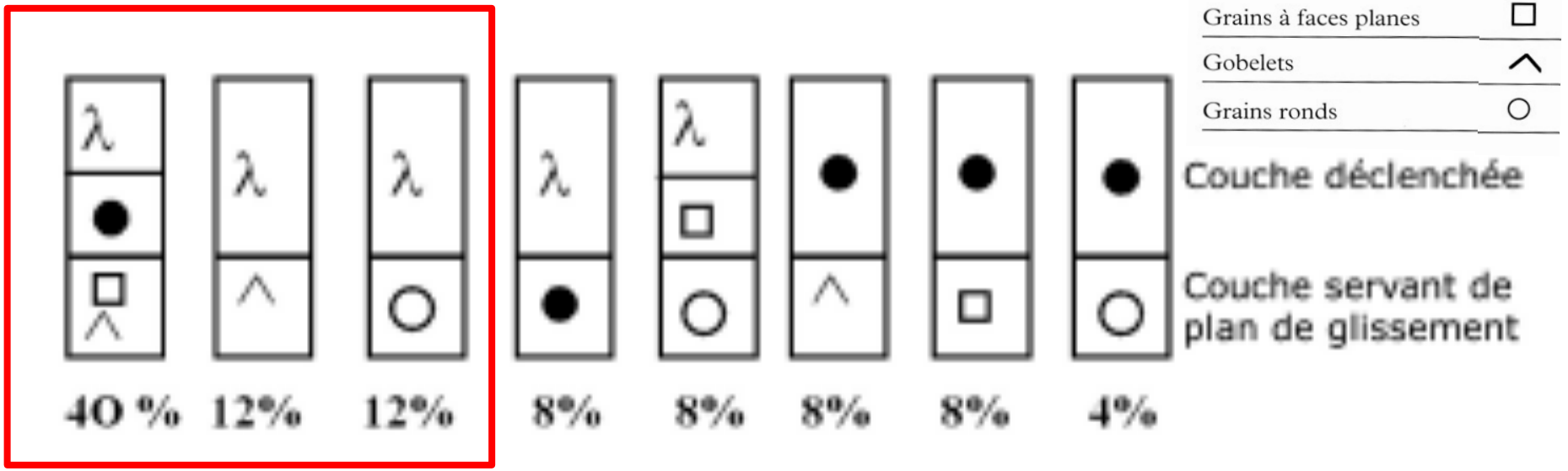


Figure 5.27 Les différents types de neige dans la couche déclenchée et la nature de la couche de glissement lors d'accidents concernant des skieurs (avalanches non spontanées). La configuration de loin la plus dangereuse semble être une couche de neige en cours de métamorphose (particules reconnaissables puis grains fins) sur une couche de gobelets ou de faces planes. Analyse réalisée sur un échantillon de 25 avalanches accidentelles [26].

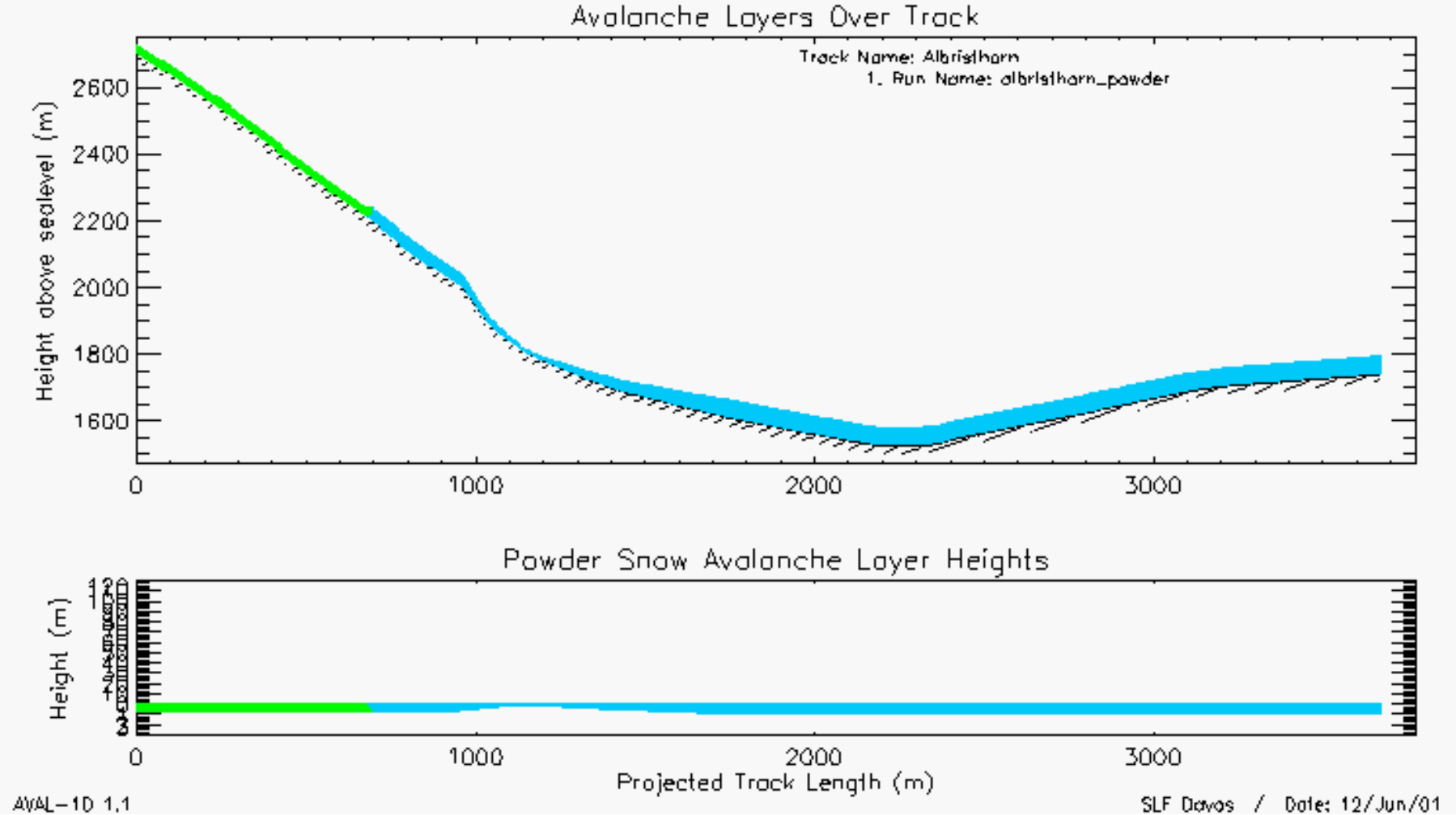
Figure 5.7 Départ ponctuel de neige très humide provoquée par le virage d'un skieur. Cliché C. Ancey.

Avalanche en aérosol

a) écoulement très rapide (50-100m/s)

b) Mélange de l'air et des particules de neige

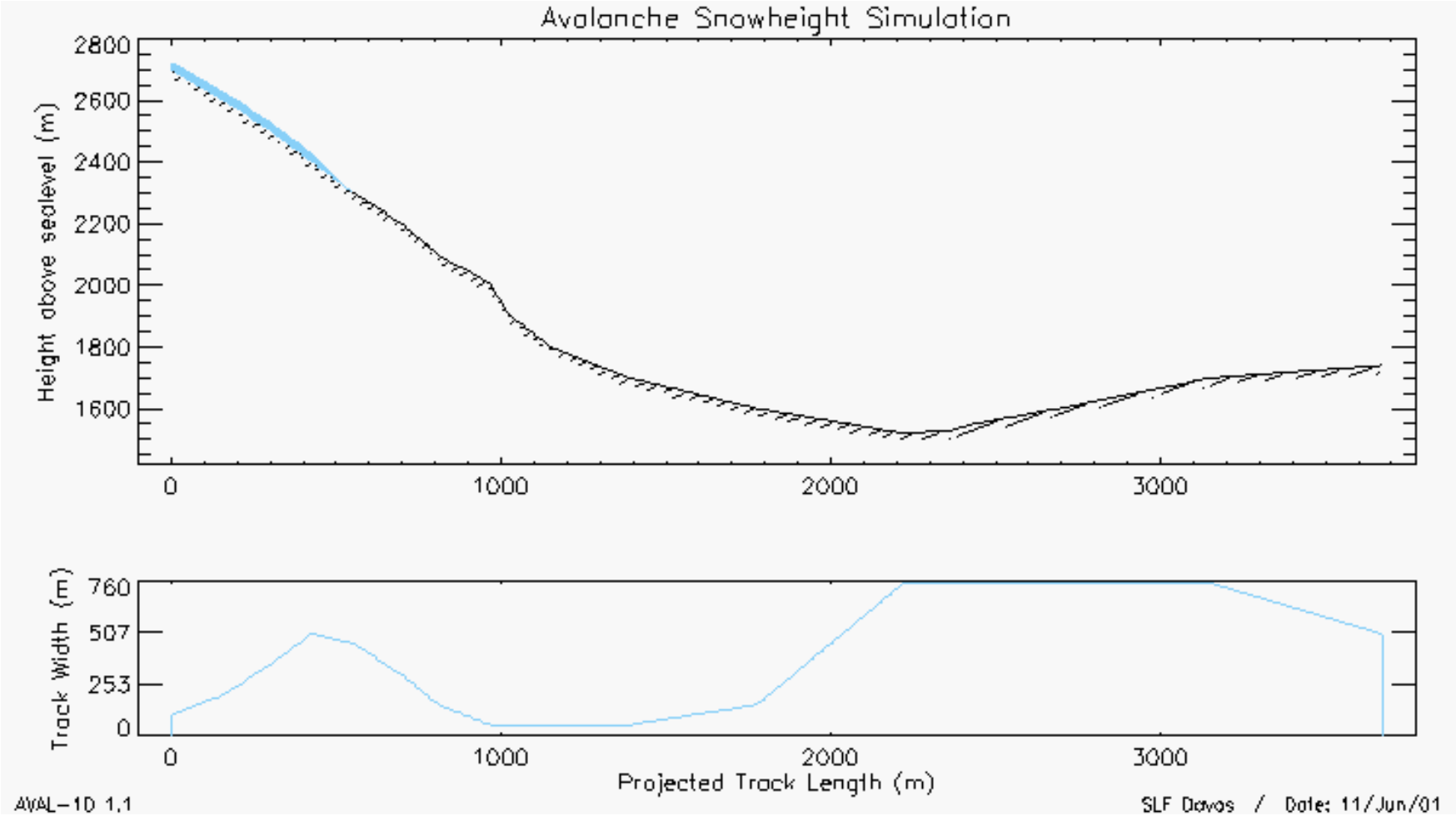
c) Agrandissment du volume en décendant



Avalanche coulante

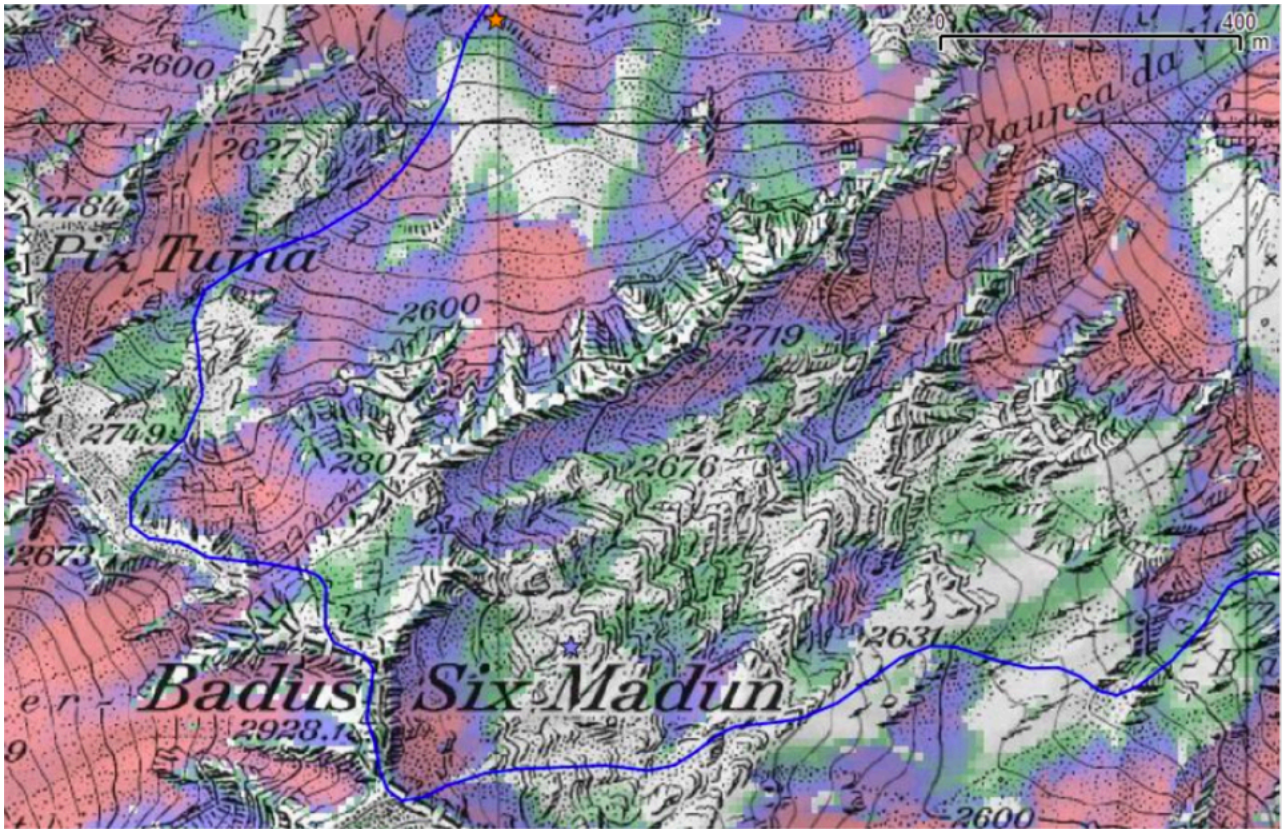
a) écoulement de neige coulant le long du sol en suivant le relief

b) Vitesse moderée (5-25m/s)



Prédiction des avalanches ??

- **Caractérisation de paysage**

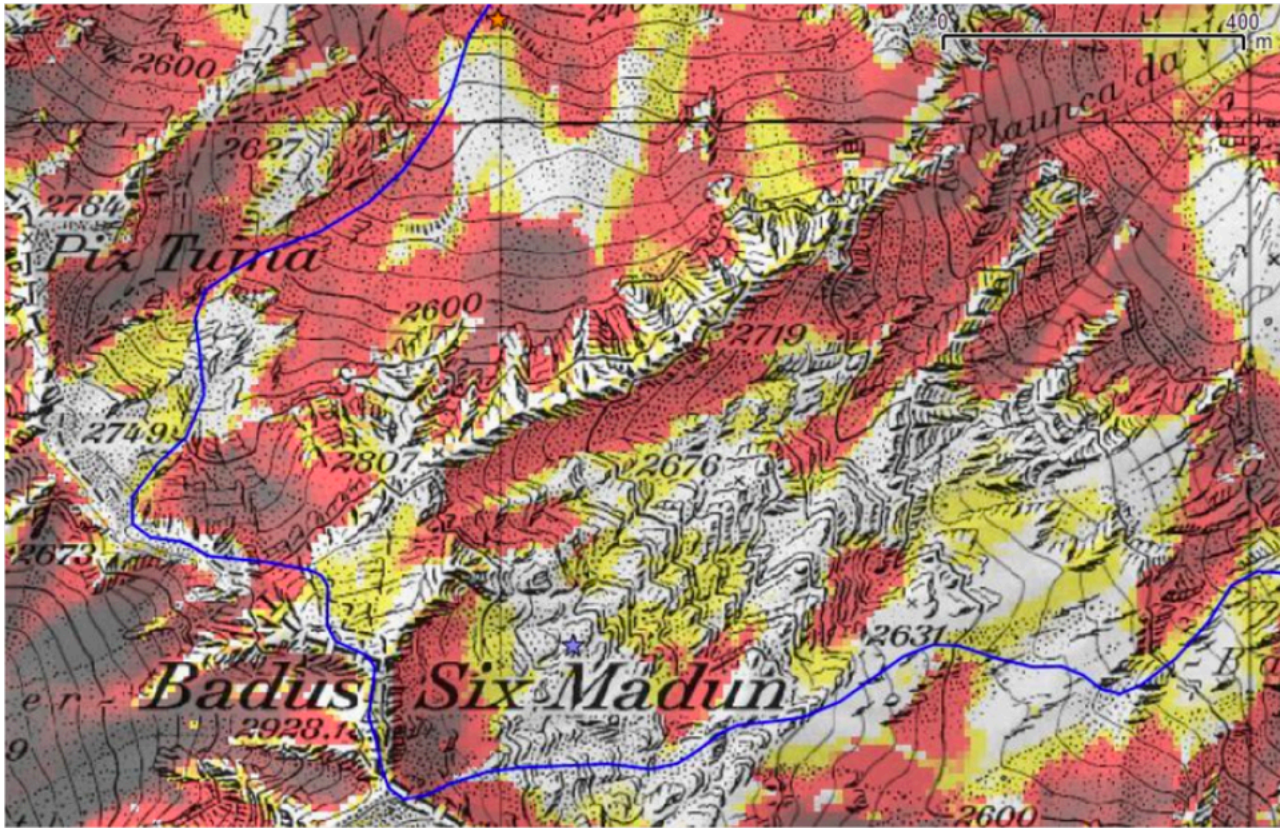


© skitourenguru

Prédiction des avalanches ??

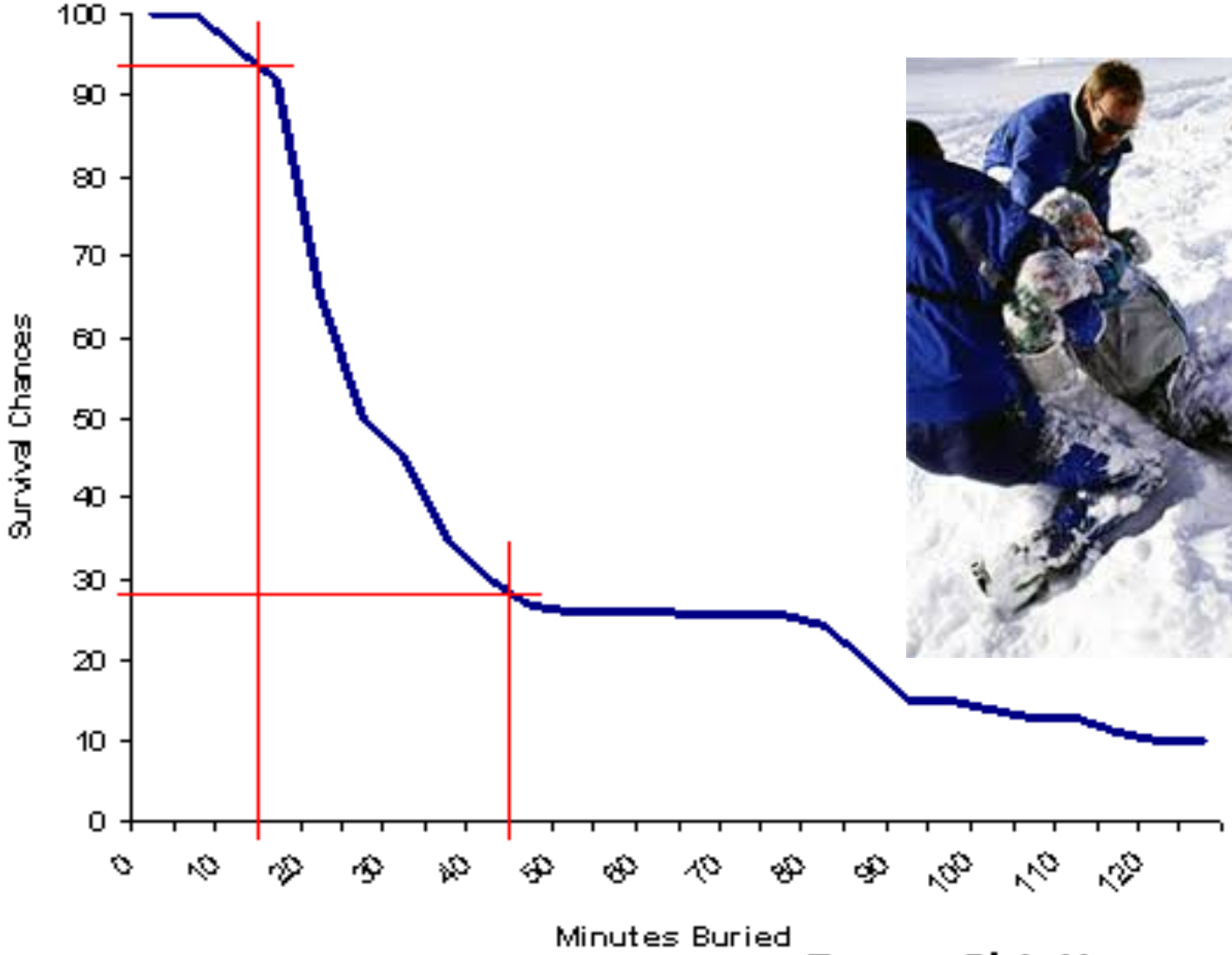
- **Carte de risque**

- Bulletin de avalanche
- Ski-Tracks
- Accidents précedents



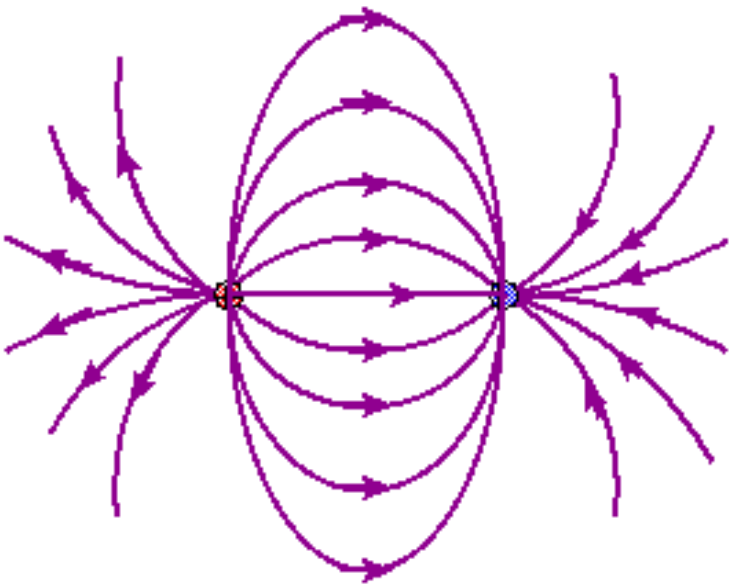
© skitourenguru

La courbe de survie

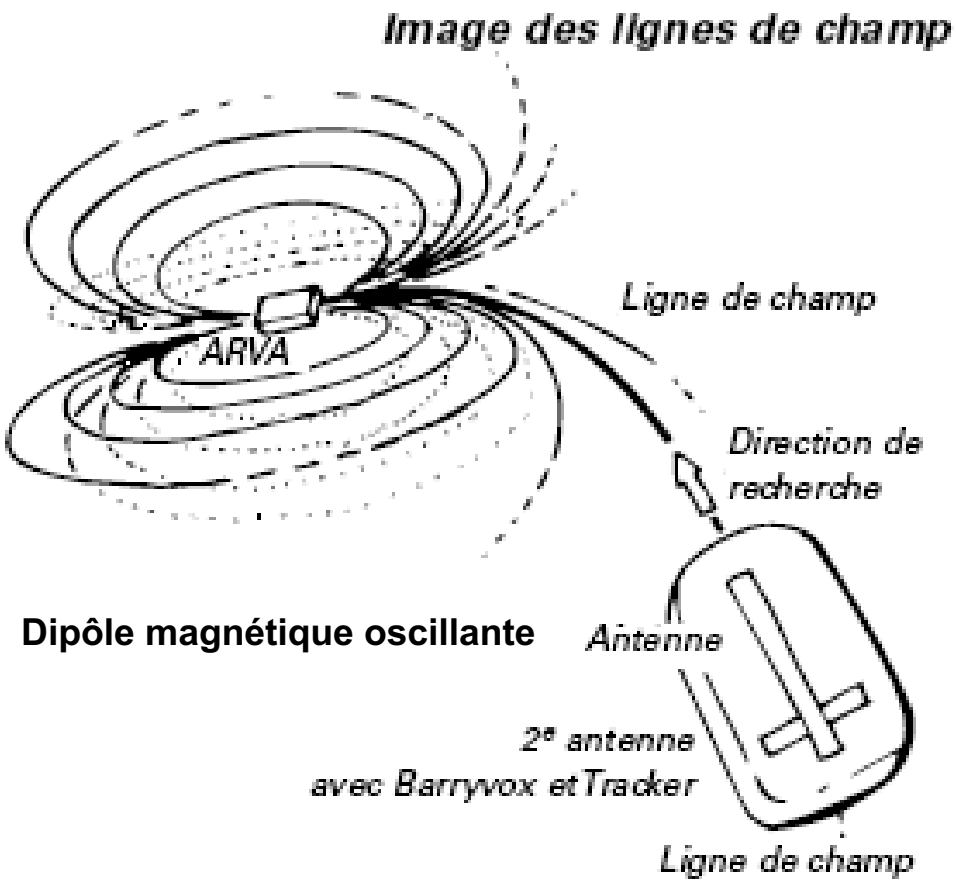


© www.PisteHors.com

L'ARVA crée un champ électromagnétique oscillante
Il ne s'agit PAS une onde électromagnétique !

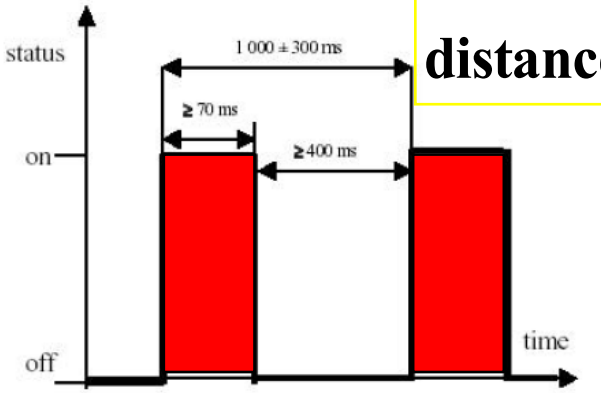


Dipôle électrique oscillante

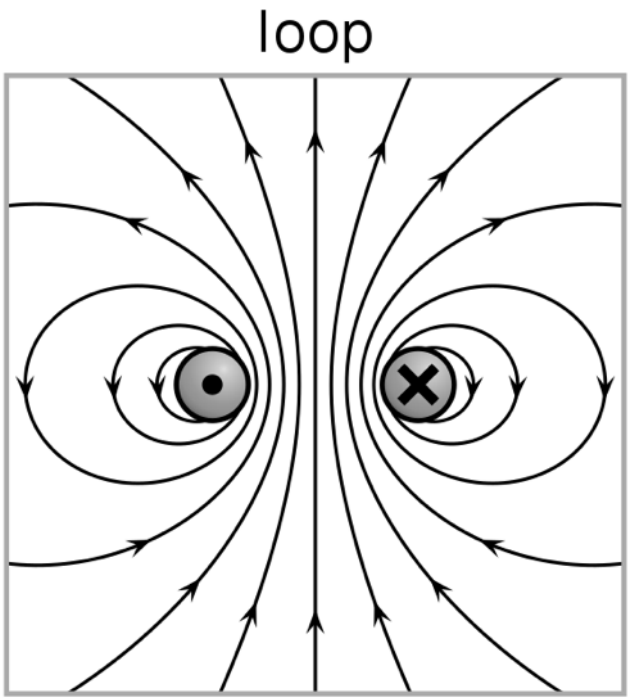


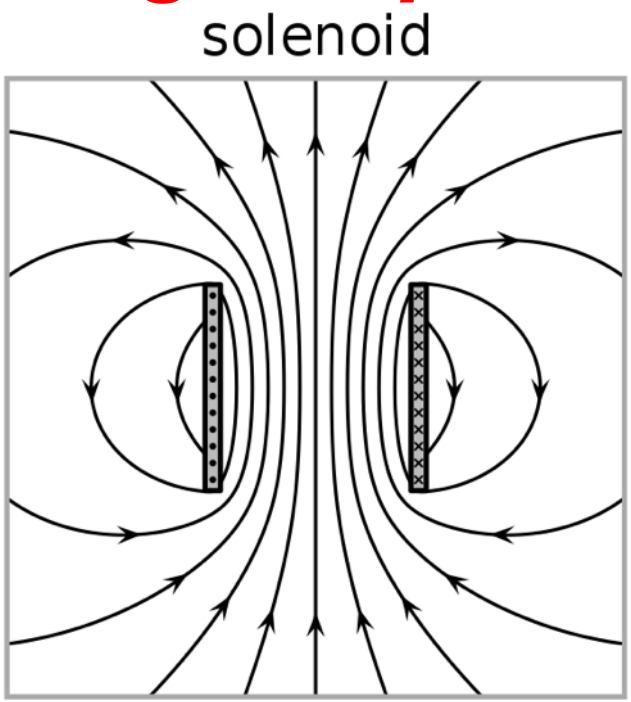
Dipôle magnétique oscillante

$$\nu = 457 \pm 0.1\ kHz$$
$$\lambda = c / \nu = 653\, m$$
$$\text{distance } r \lll \lambda$$



Dipôle magnétique





$$r \ll \lambda$$

$$\vec{B}, \vec{E} \sim 1/r^3$$

L'ARVA crée un champ électromagnétique oscillante
Il ne s'agit PAS d'une onde électromagnétique !
Zone proche !

$$\nu = 457 \pm 0.1\ kHz$$

$$\lambda = c/\nu = 653\,m$$

$$\text{distance } r \lll \lambda$$

Radiation d'un dipôle : des ondes électromagnétique dans la région loin du dipôle

L'amplitude du champs électrique décroit proportionnelle à la distance
L'énergie avec le carré de la distance

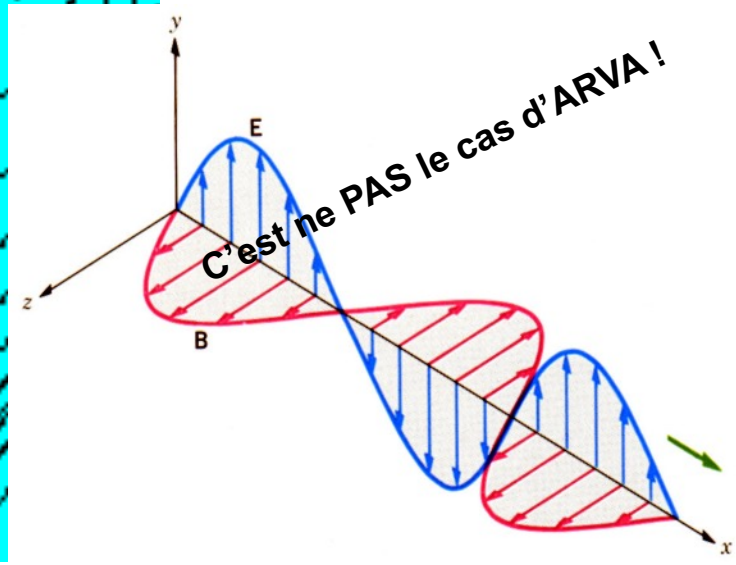
$r \gg \lambda$:

Amplitude du champs électrique :

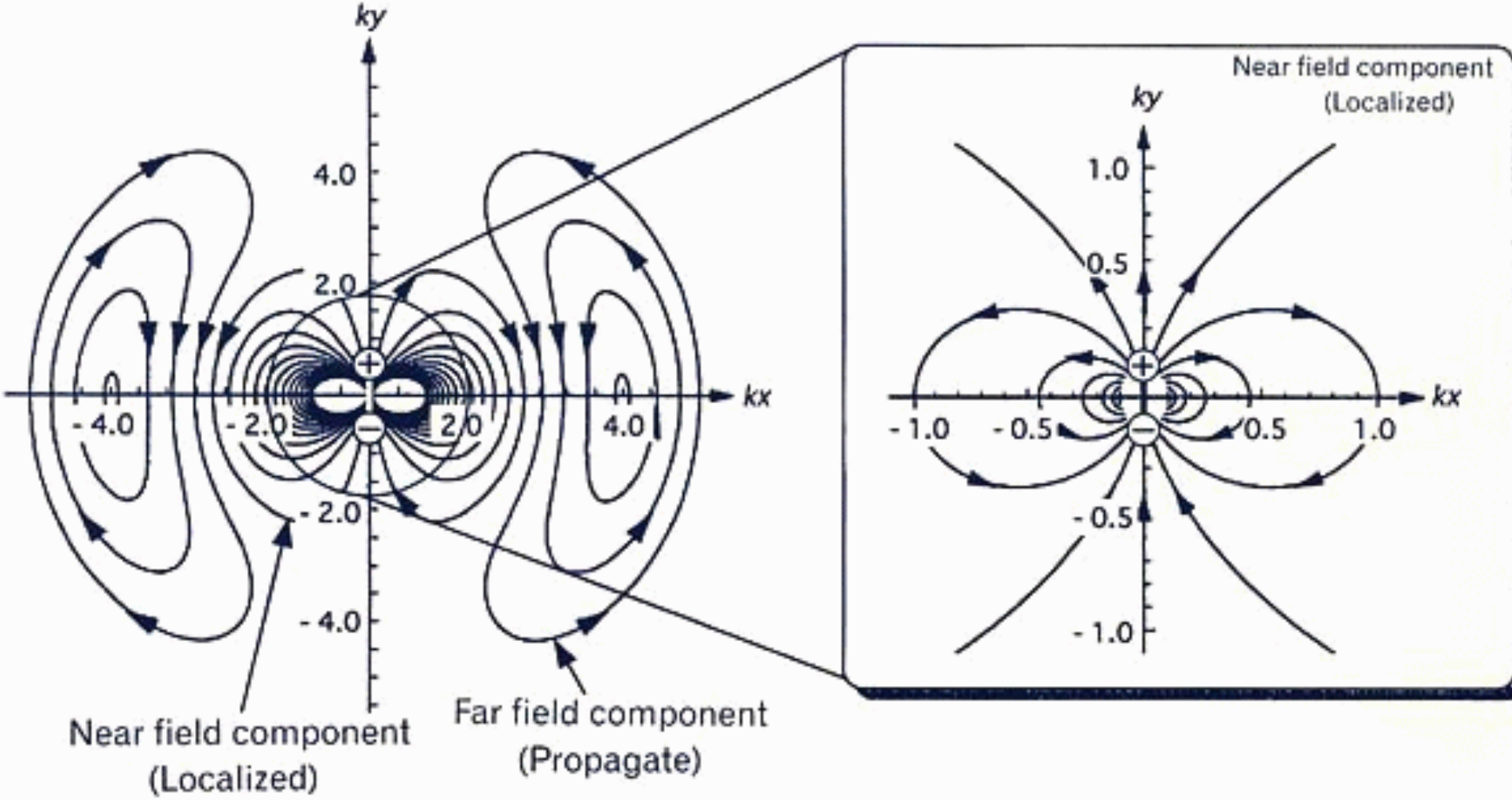
$\vec{E}(r) \sim E_0 / r$

Energie radiée :

$E_{nergie}(r) \sim E^2{}_0 / r^2$



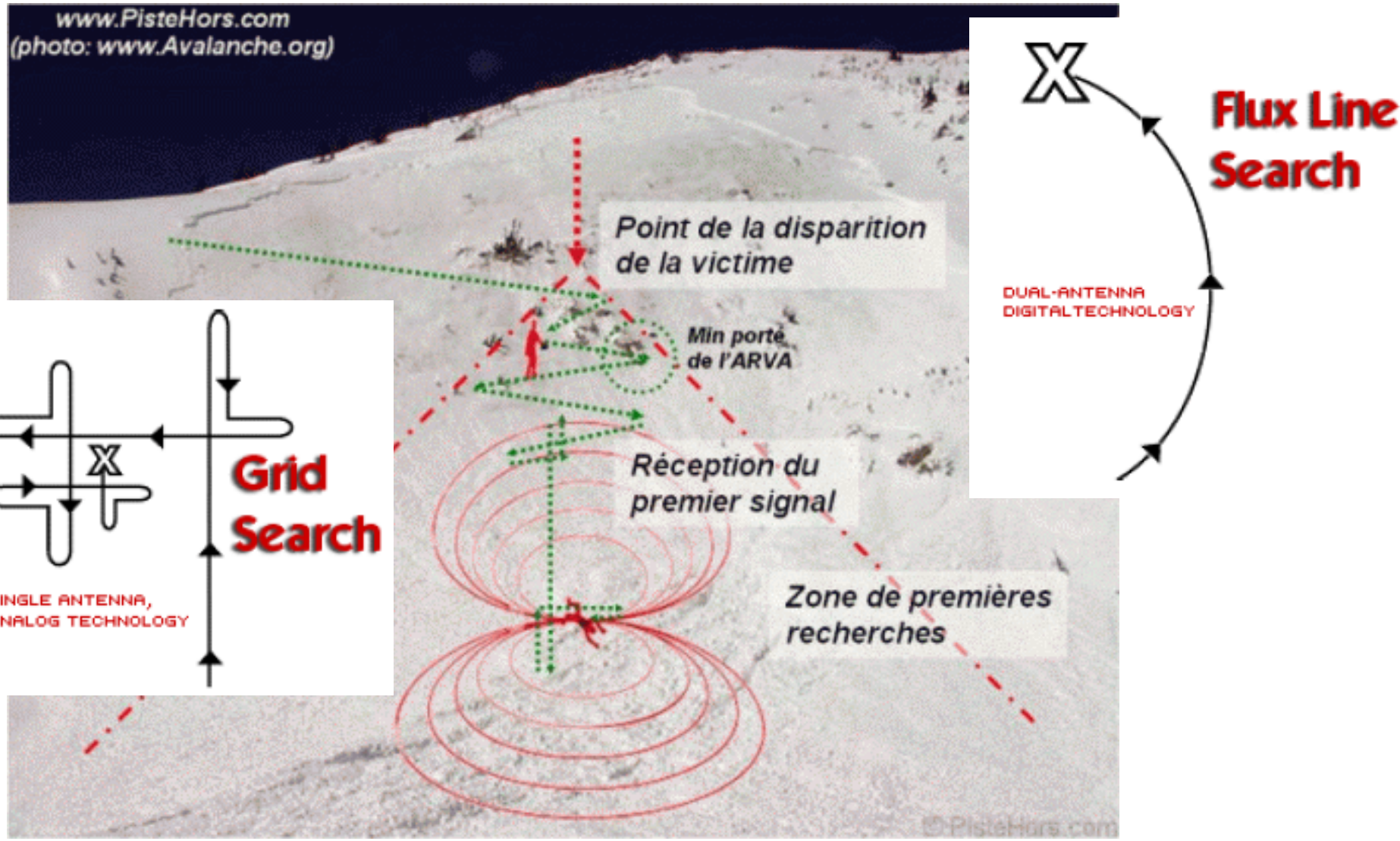
Zone lointaine et zone proche



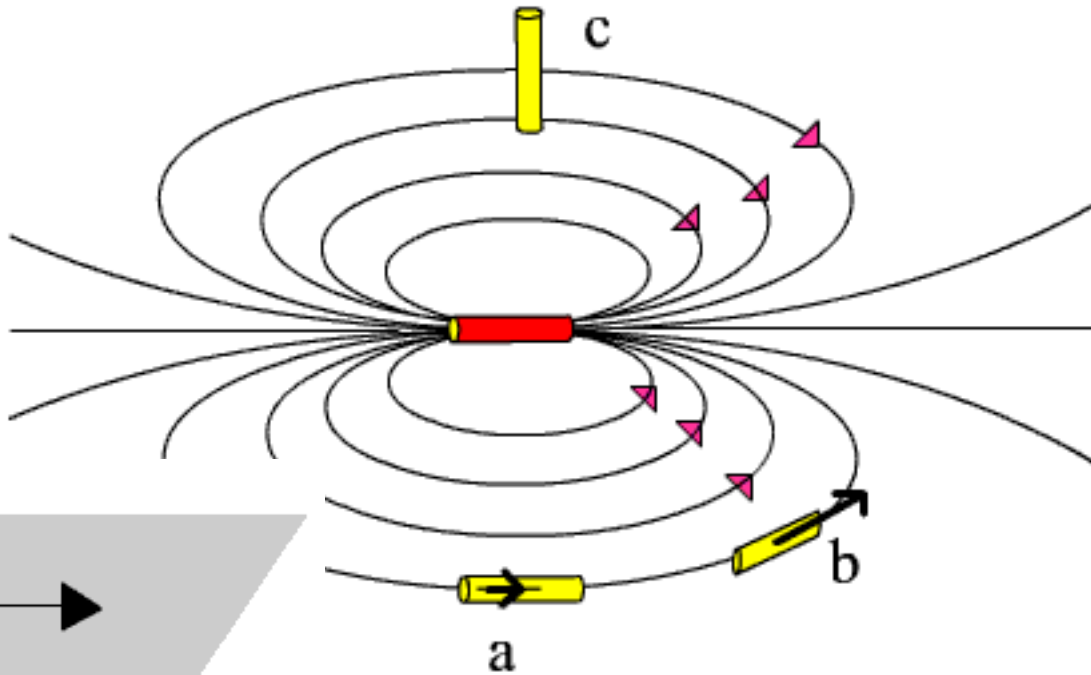
Zone loin $x \gg \lambda$: propagation des ondes électromagnétiques

Zone proche $x \ll \lambda$: champ électrique (dipôle) et magnétique quasi statique oscillent dans le temps

Stratégies de recherche



Complications



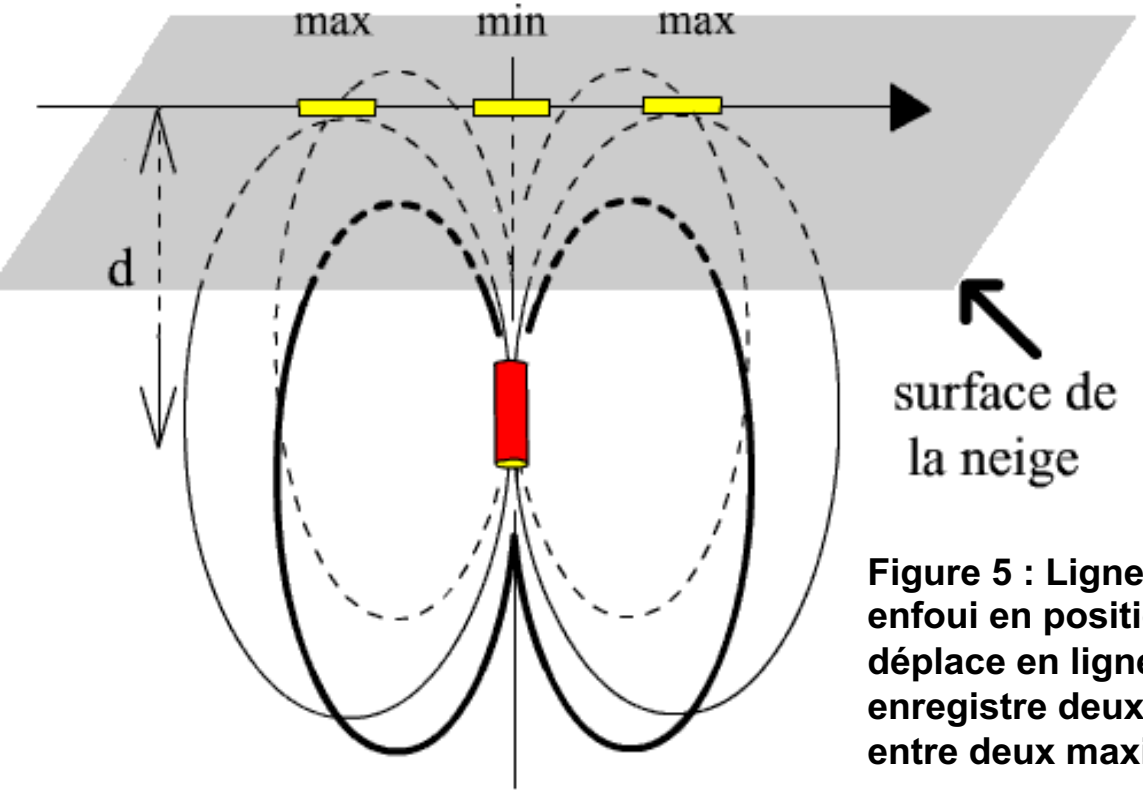
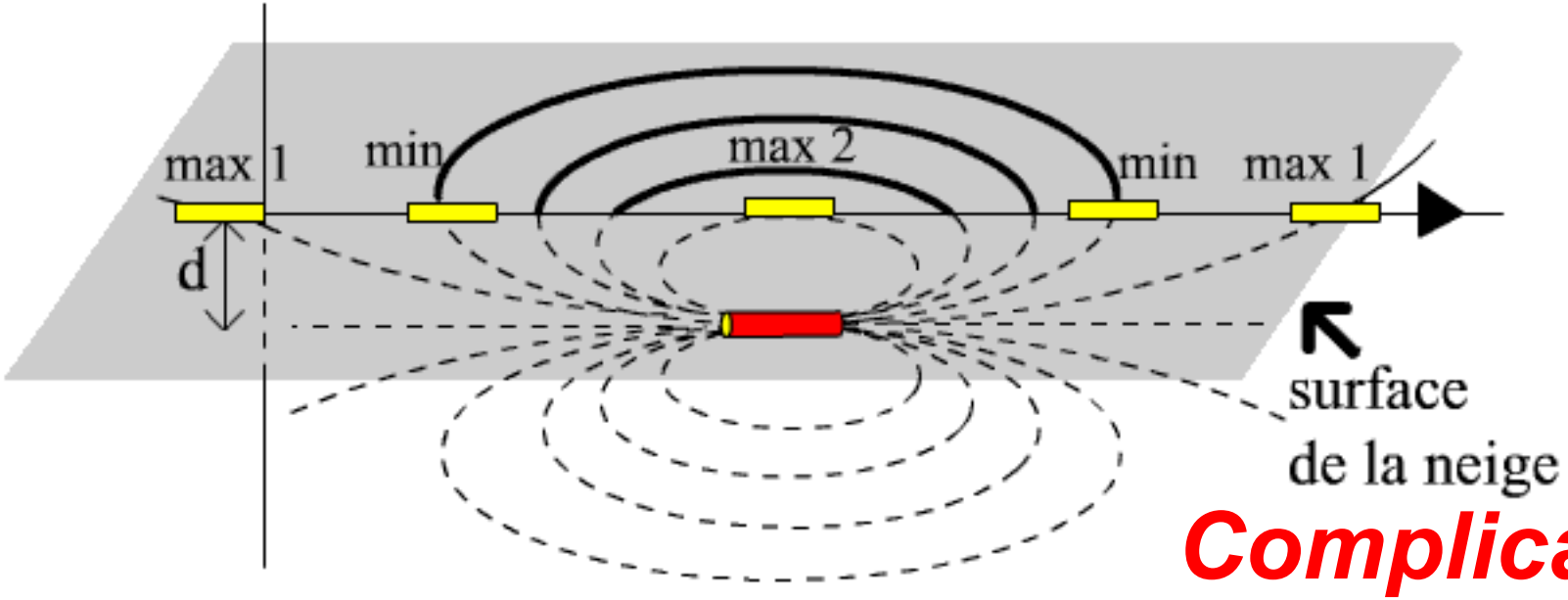


Figure 5 : Lignes de champ en 3D pour un DVA enfoui en position verticale, assez rare. Si on se déplace en ligne droite sans tourner le DVA, on enregistre deux maxima. Le DVA enfoui se trouve entre deux maxima.



Complications

Figure 4 : Lignes de champ dans un plan vertical. d est la profondeur d'enfouissement. En se déplaçant en ligne droite sans tourner le DVA, on enregistre plusieurs maxima. Le plus intense est à la verticale du DVA enfoui. Tous les maxima secondaires ne sont pas représentés car le déplacement peut se faire dans une autre direction.

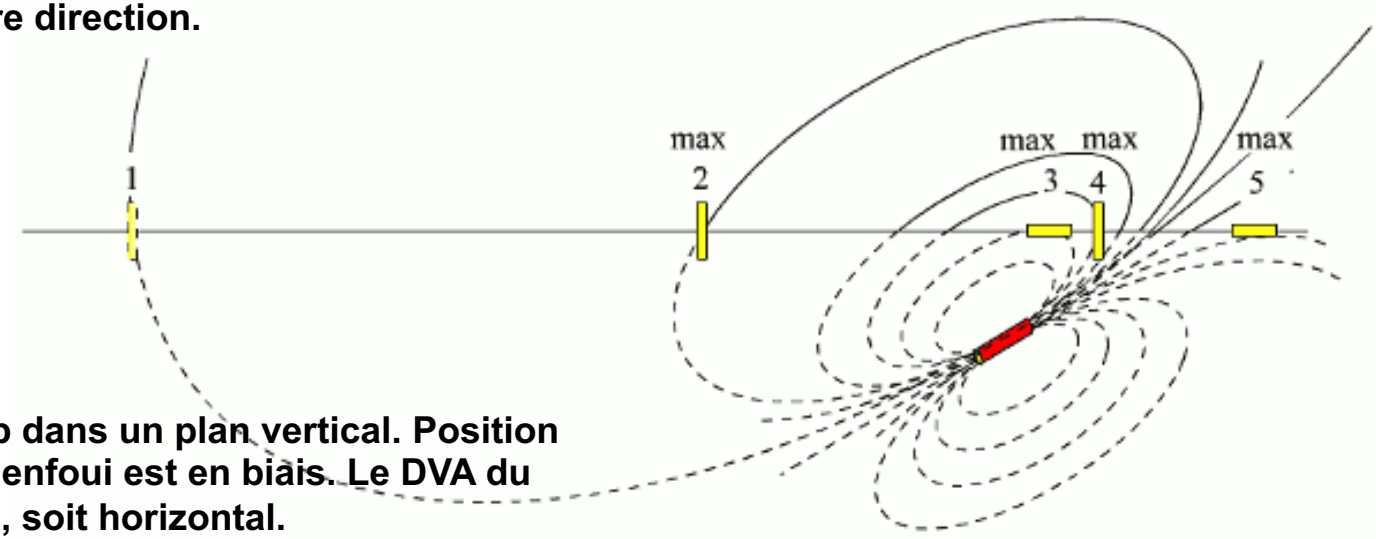
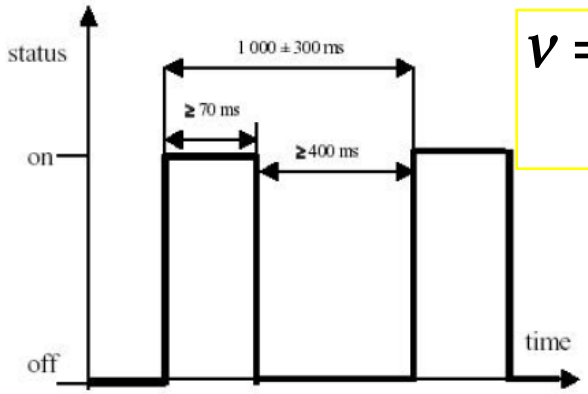


Figure 6 : Lignes de champ dans un plan vertical. Position des maxima quand le DVA enfoui est en biais. Le DVA du chercheur est soit vertical , soit horizontal.

Complications

Afin de permettre une compatibilité entre les différents constructeurs de ARVA, l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) a édité la norme ETS 300718. Cette norme décrit la structure du signal, mais aussi les caractéristiques de puissances et les contraintes mécaniques.

- ***Analogique :*** *L'ARVA récepteur renvoie un signal sonore qui s'intensifie lorsqu'il s'approche de l'ARVA émetteur.*
- ***Numérique :*** *L'ARVA récepteur traite et restitue l'information sous forme d'indications lumineuses sur un écran incorporé. Cet affichage n'indique pas la distance restant à parcourir jusqu'à la victime, mais donne un indice de progression ainsi qu'une direction pour aider le sauveteur à s'orienter.*



$$\nu = 457 \pm 0.1\ kHz$$

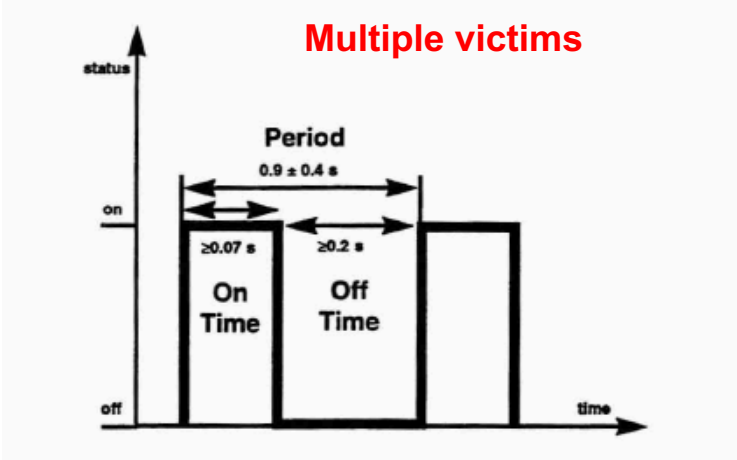


Figure 4. The ETS 300 718 standards on pulse periods and pulse widths are shown above. For an illustration of how widely these standards can vary, see Figure 5, below.

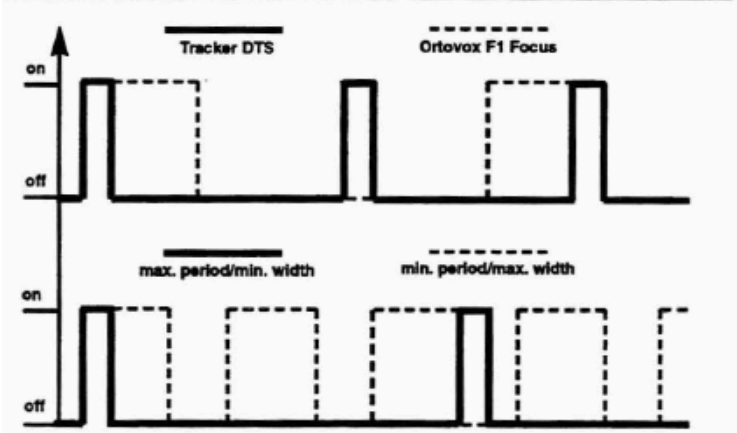
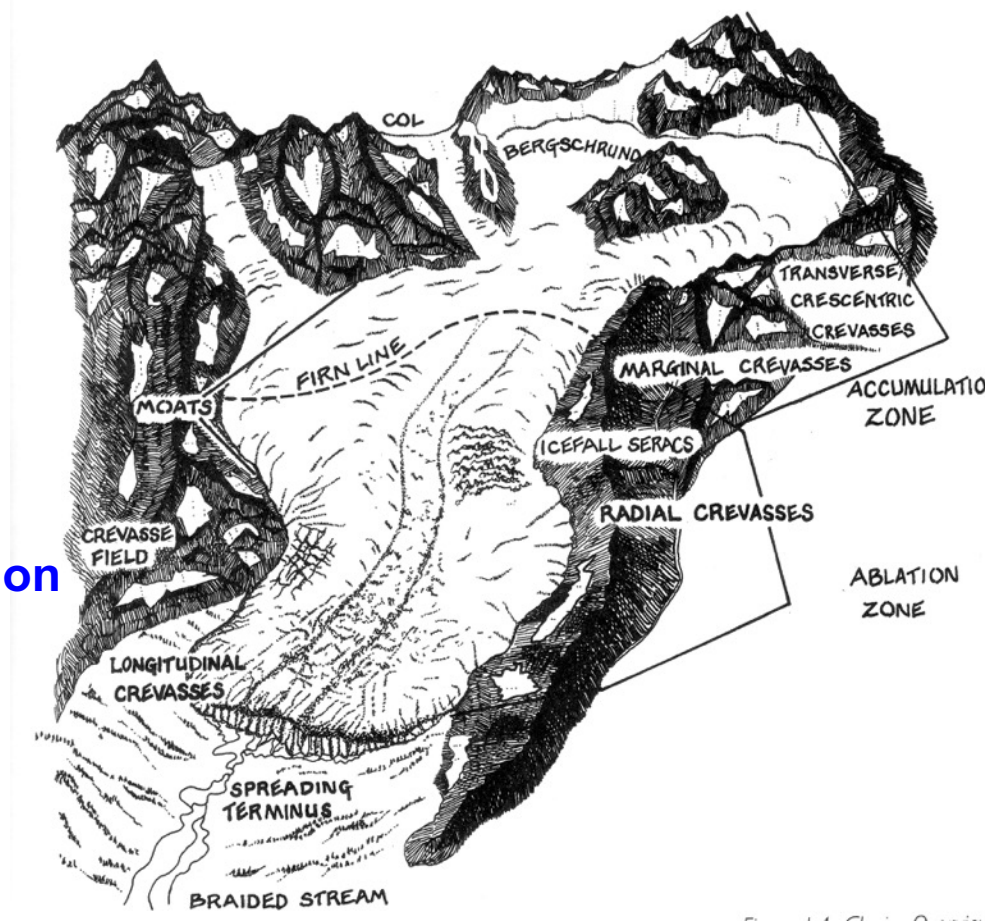


Figure 5. The upper diagram compares the pulse rates of the Tracker DTS and Ortovox F1 Focus. The lower diagram illustrates the widest possible differentiation in pulse rates that could occur under the existing ETS 300 718 guidelines.

Les glaciers



I. Transformation neige→ glace 2 ans (alpes) ↔ 100 ans (régions polaires)

II.Zone d'accumulation → zone d'ablation

III. Mouvement du glacier

1. glissage (1/3) sur les rochés
2. ramper ("creep") transformation
3. Zone de compression et de tension
4. Formation des crevasses transverses
5. Formation des crevasses radiales..
6. Rimaye (Bergschrund)

Ulrich.Goerla

Les glaciers

crevasses nearby.

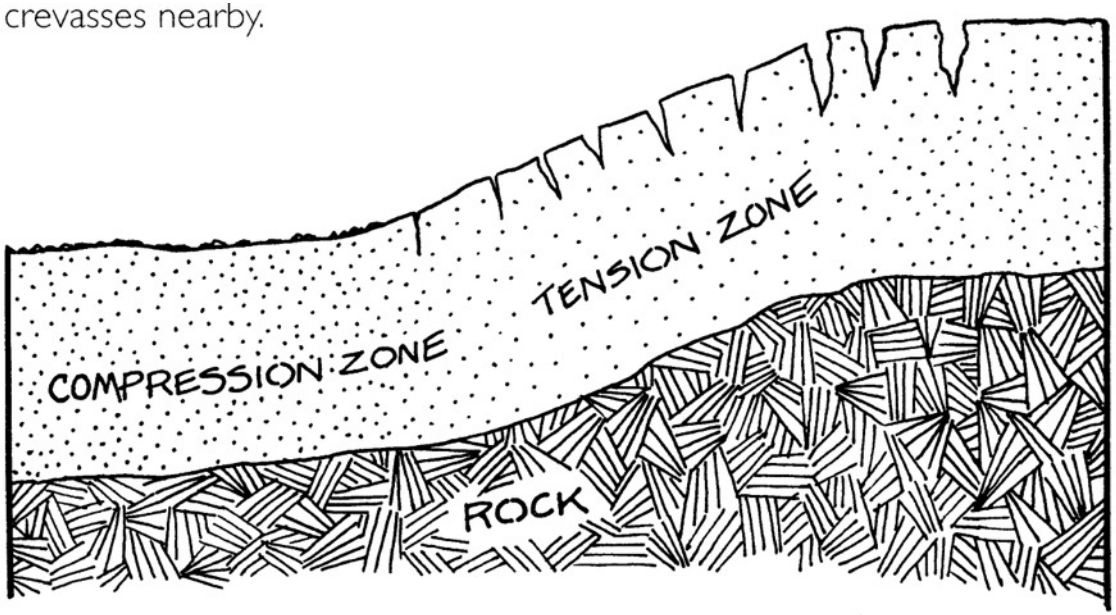
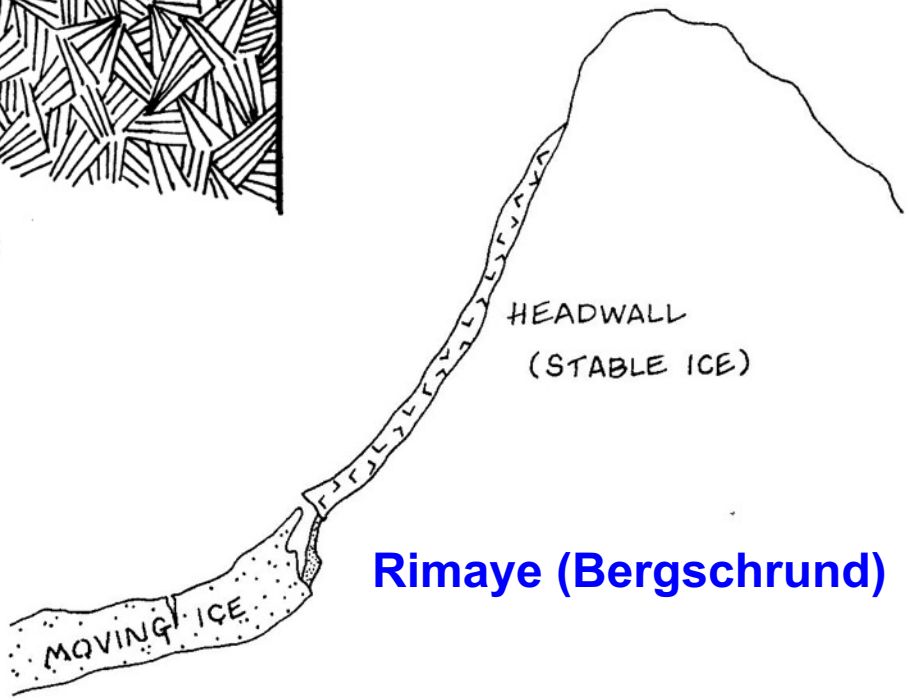


Figure 1.1 Cross-section of tension and compression zones

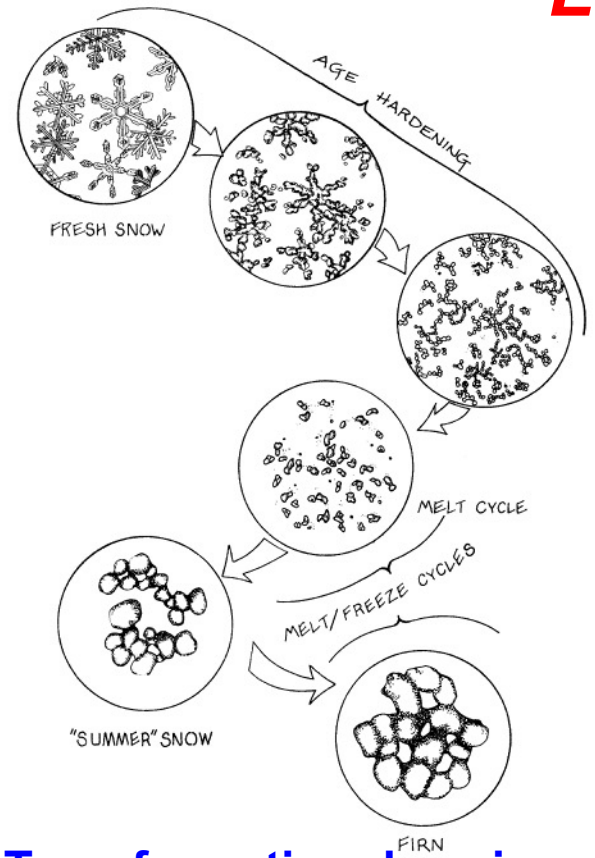
Les glaciers

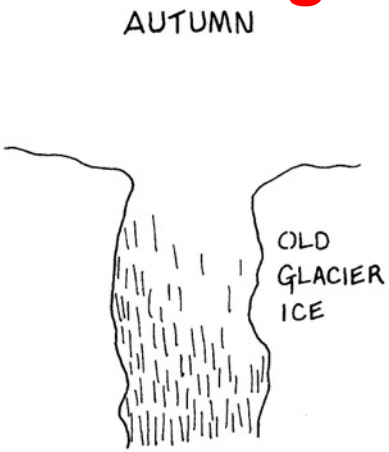


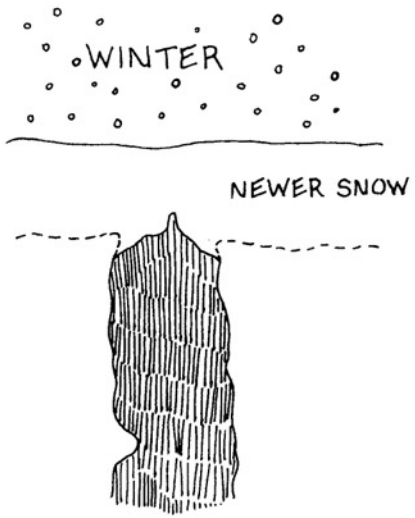
Rimaye (Bergschrund)

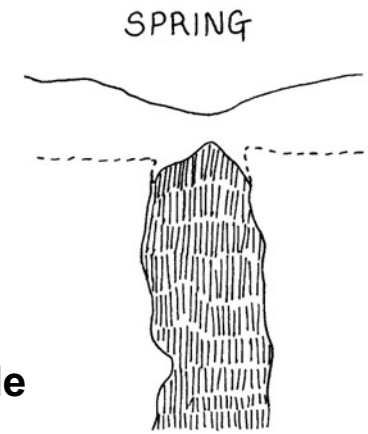
Figure 1.3 Cross-section of a bergschrund

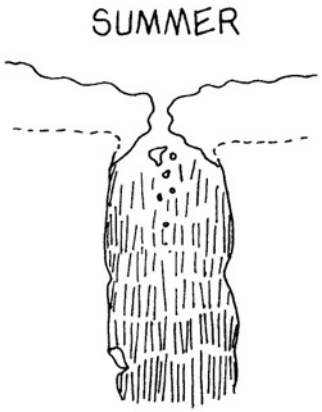
Les ponts de neiges











Transformation de neige par

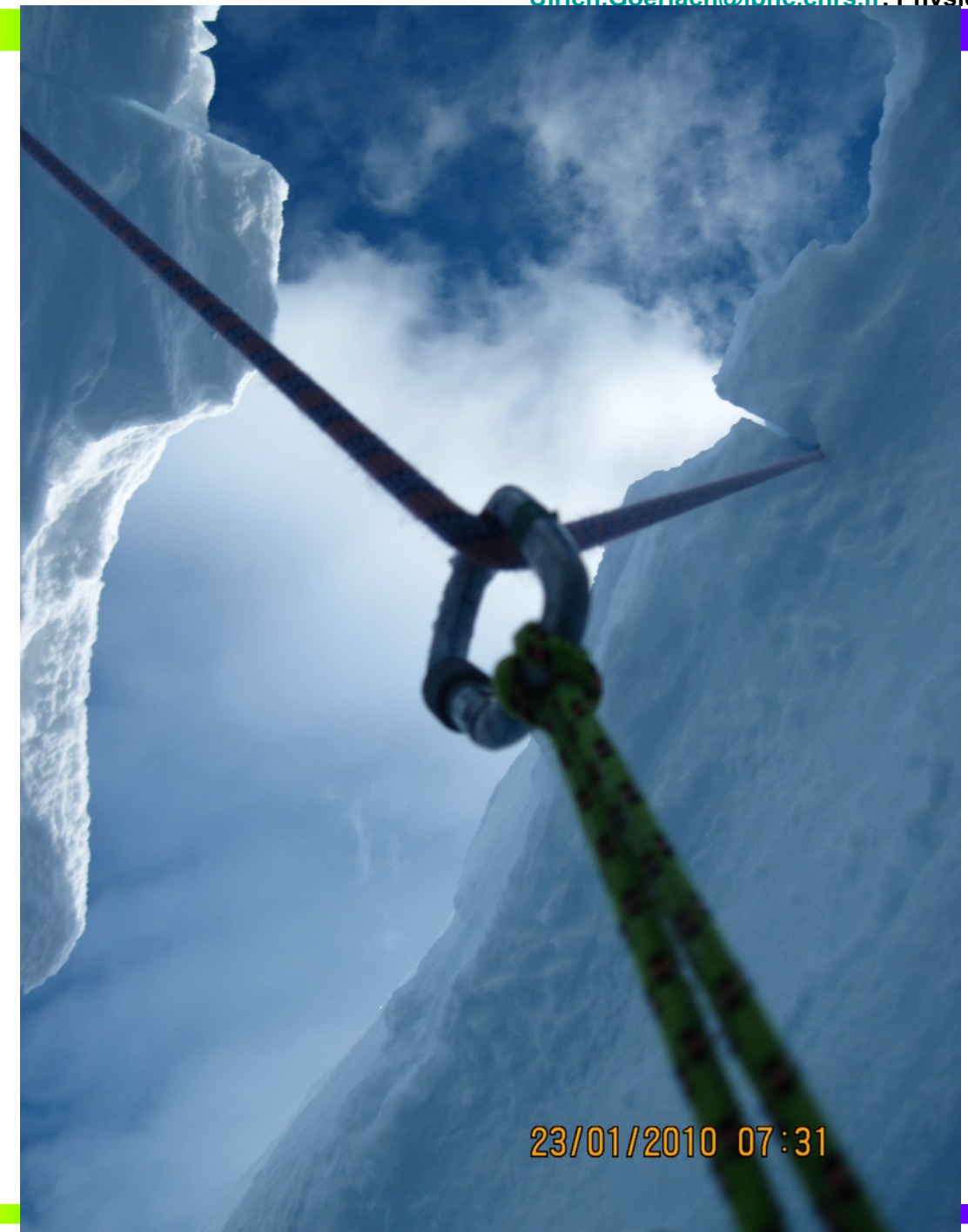
1. Le vent
2. Les températures, le soleil
3. Connexions entre les cristaux de neige ⇒ stabilité
4. Cycles de fonte et regel
5. Dépend fortement du climat (Alpes, Himalaya, polaire ...

Peninsula Antartica

23/01/2010 07:13

23/01/2010 07:12

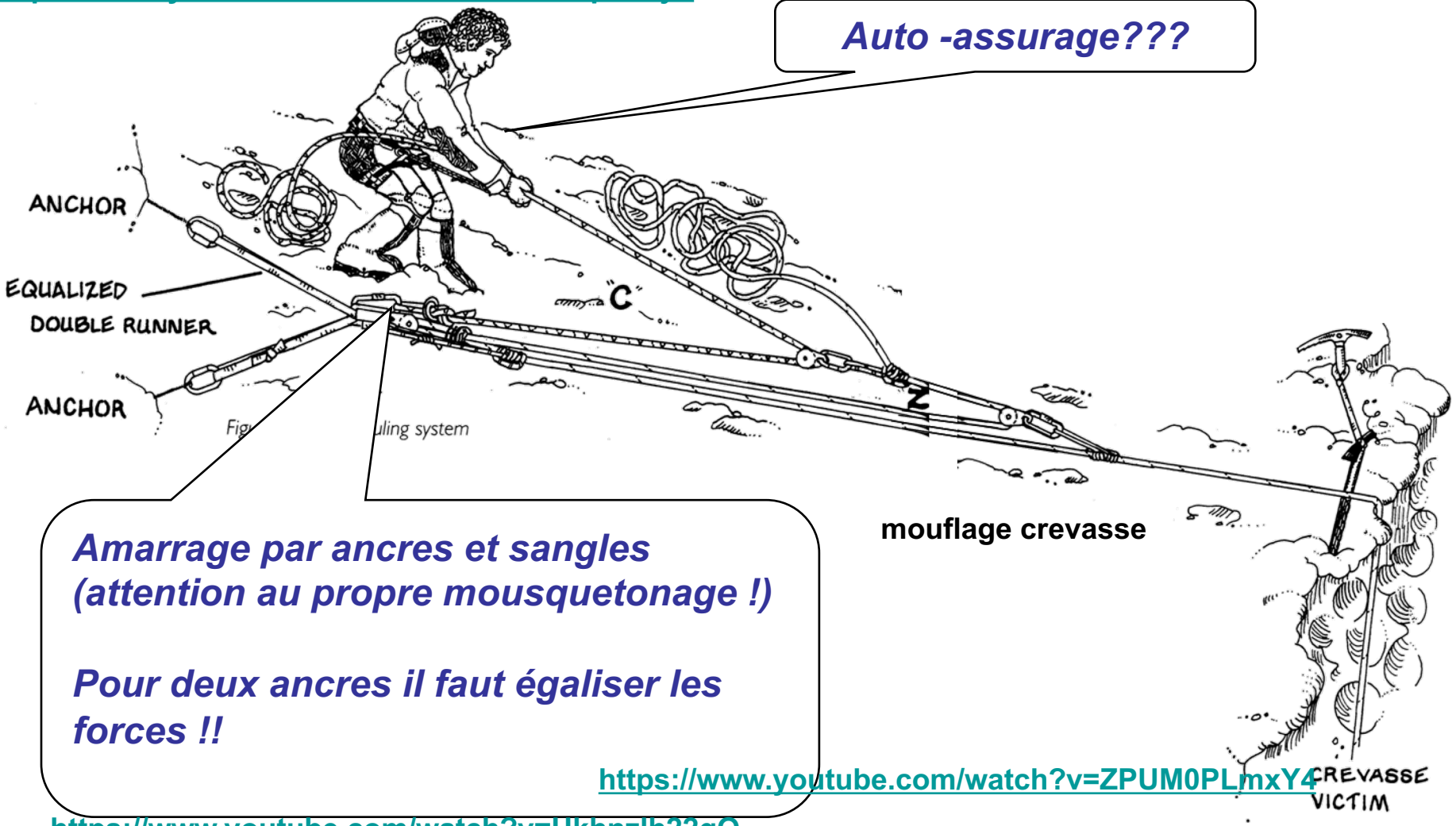
ATOMIC
TGL10
23/01/2010 07:31


23/01/2010 07:31

En réalité

https://www.youtube.com/watch?v=z6ceUqWPJjw

Auto -assurage???



mouflage crevasse

Amarrage par ancres et sangles (attention au propre mousquetonage !)

Pour deux ancres il faut égaliser les forces !!

https://www.youtube.com/watch?v=ZPUM0PLmxY4

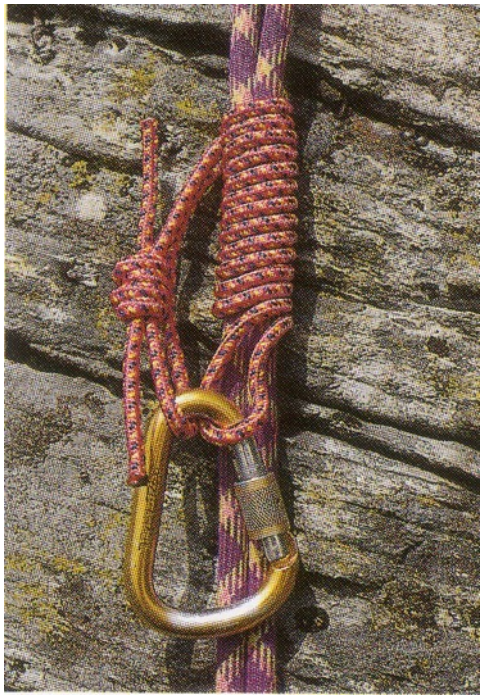
https://www.youtube.com/watch?v=Ukhnzlh22qQ

https://www.youtube.com/watch?v=wGBvVH-z1rg

Noeud de sécurité

Fonctionnement : Frottement entre la corde et la cordelette augmente avec la charge

Le nœud français : bidirectionnel



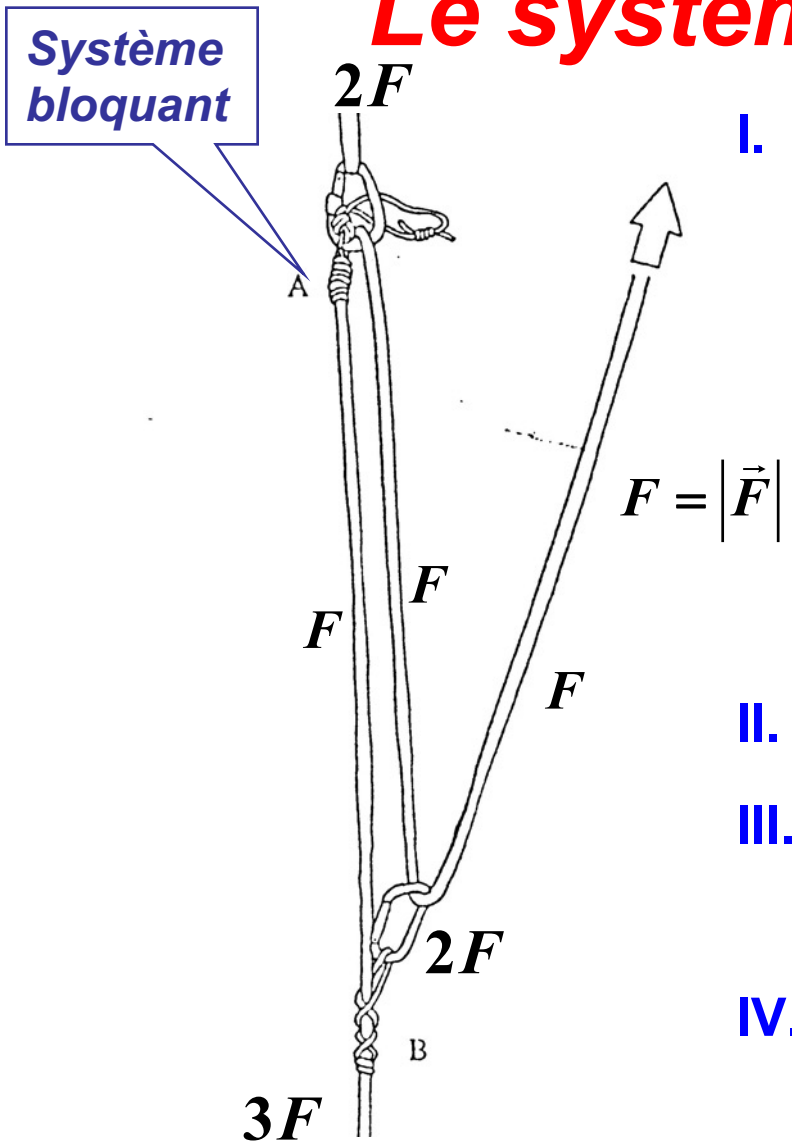
Le Prussik Bidirectionnel Se bloque facilement !

Machard tressé unidirectionnel

Machard unidirectionnel

XV
HOW TO: CREVASSE RESCUE
CAREFULLY TRANSFER VICTIM LOAD TO THE ANCHOR

Le système le plus simple



I. Regardez le système en mouvement, toutes les forces sont en equilibre (accélération = 0)

$$\sum \vec{F} = 0 = m\vec{a}$$

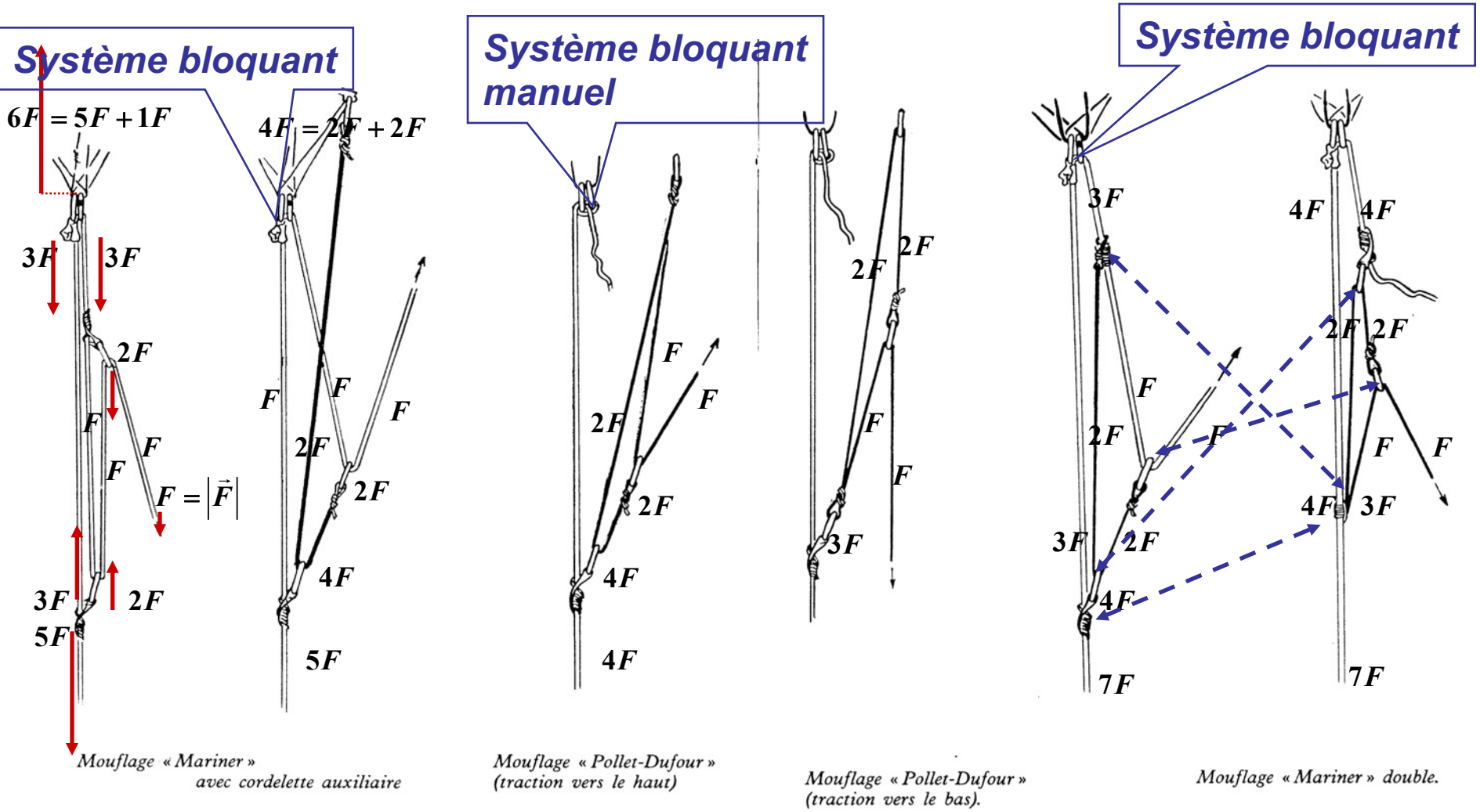
$$\vec{a} = 0; \; vitesse = const.$$

II. Les (auto)-bloquants ne sont pas actifs

III. La tension sur une corde et la même partout

IV. Aux points d'attachement (Machard, prusik) il faut additionner les forces

SE RESCUE



Mouflage « Mariner » avec cordelette auxiliaire

Mouflage « Pollet-Dufour » (traction vers le haut)

Mouflage « Pollet-Dufour » (traction vers le bas).

Mouflage « Mariner » double.

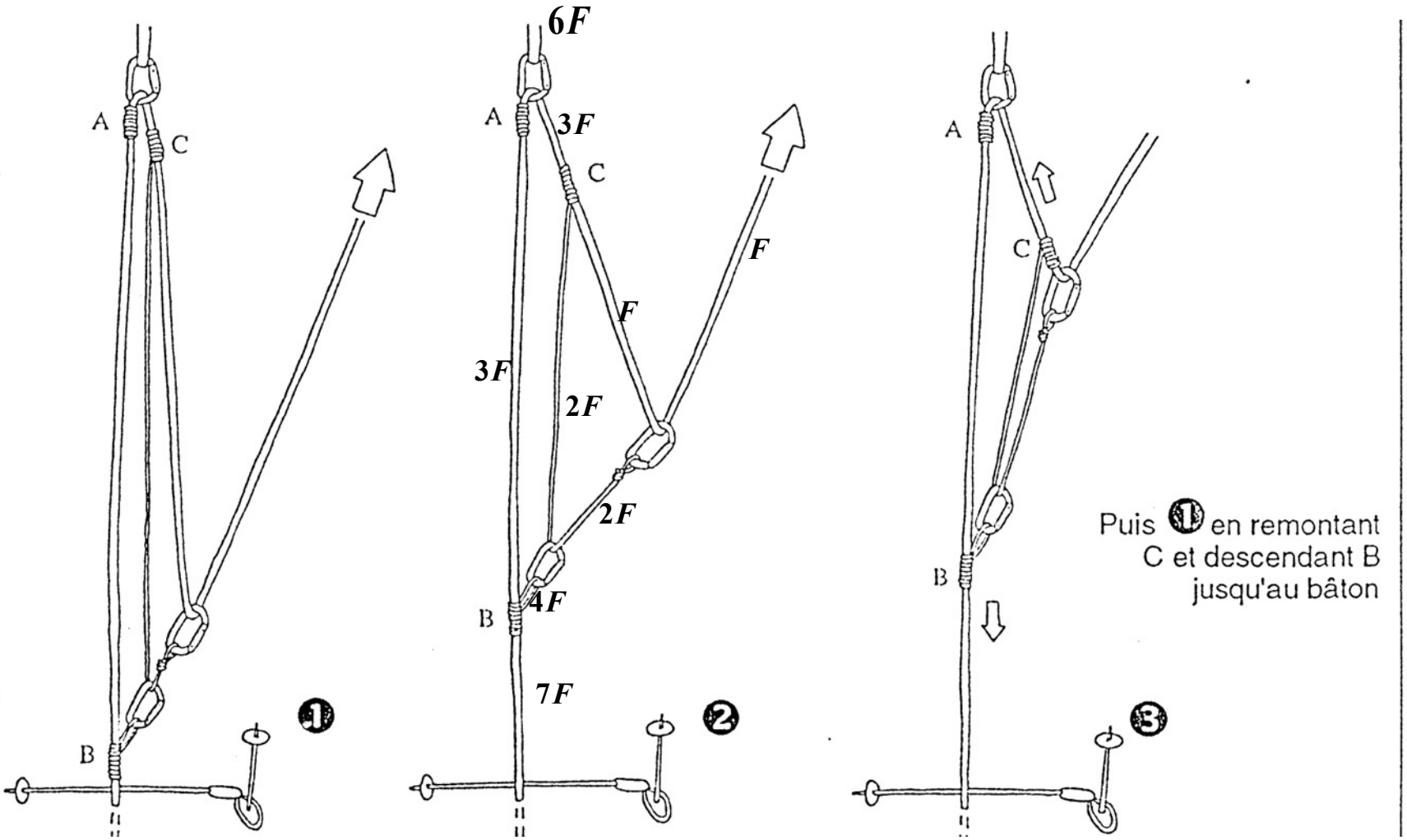
Avantage mécanique: $5 \times F$

Avantage mécanique: $4 \times F$

Avantage mécanique: $3 \times F$

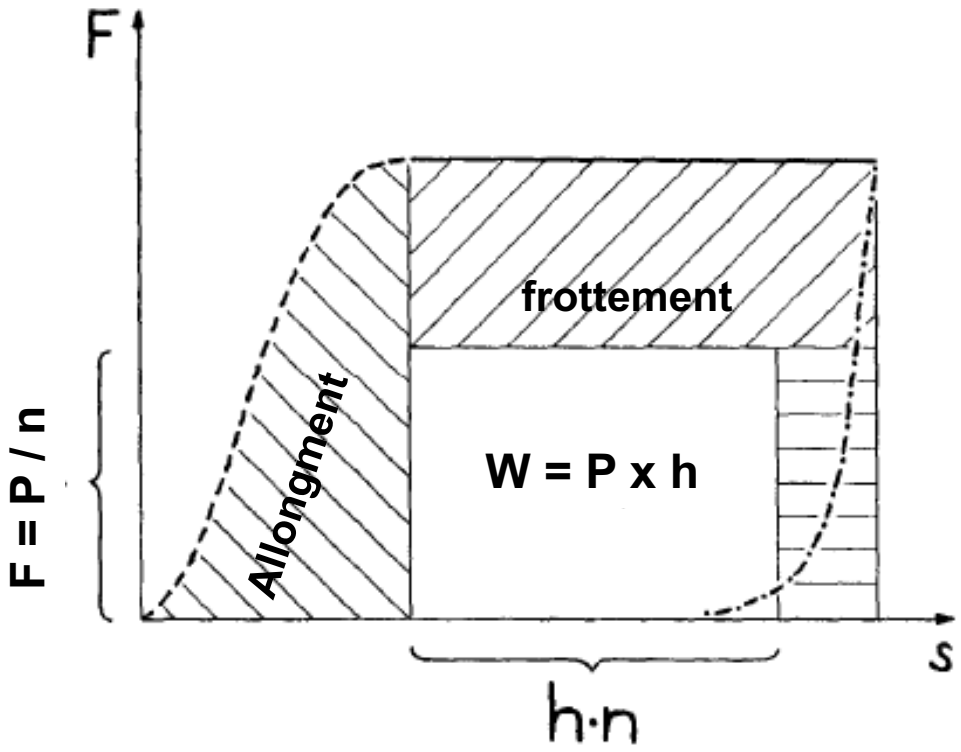
Avantage mécanique: $7 \times F$

La progression du sauvetage



Réajustement des points de blocage

La friction des cordes diminue le gain en force



- Monter un poids P d'une hauteur h représente un travail W
- « *n* » est le facteur théorique
- 1ère phase : la corde est seulement allongé, l'énergie se perde dans la corde
- 2ème phase : le poids est monté, mais perte d'énergie
- 3ème phase : blocage du poids, on perde on peu d'hauteur jusqu'à le système bloque vraiment.

Les effets de frottement divisent facilement le facteur théorique « *n* » par 2 ou 3 !!

Physique et Alpinisme

I. Les loi de la mécanique en escalade et alpinisme

a) Mouvement, équilibre, friction et adhérence
b) Coinceurs, « friends » et autres dispositifs
c) Les cordes, les nœuds, assurage, rappel, la corde et les chutes
d) Systèmes de secours, techniques de mouflage

II. La neige

a) Formation et transformation des cristaux de neige
b) Quelques phénomènes optiques dans l'atmosphère
c) Physique d'avalanches
d) Dipôles électromagnétiques et émission et réception d'un ARVA

III. L'atmosphère et l'altitude

a) L'atmosphère : composition pression et altitude, altimètres
b) L'acclimatation du corps humain, les oxymètres portables

IV. Orientation

a) Equation de temps, orientation par le soleil
b) Champ magnétique terrestre, boussole, corrections, navigation
c) GPS, fonctionnement