

# Sports d'endurance en montagne – Les *clés* de la *réussite* –



François Nicot

<http://securite-en-montagne.e-monsite.com>

## **Sports d'endurance en montagne : les clés de la réussite**

Ce thème sera décliné en 5 volets, chaque volet faisant donc l'objet d'une conférence-débat. L'idée est de favoriser au cours de ces soirées une ambiance d'échanges, constructive et conviviale.

Les sports concernés sont essentiellement :

course à pied, trail, ski de fond, ski-alpinisme, cyclisme

Horaire : 20h00 – 22h00

Lieu : salle Veyton, Allevard

Entrée gratuite

## Programme :

### **Vendredi 18 décembre 2015**

Spécificités physiques de l'environnement montagnard

F. Nicot

### **Vendredi 15 janvier 2016**

Principes physiologiques des sports d'endurance : peut-on tous performer ?

F. Nicot

### **Vendredi 05 février 2016**

Effets de l'altitude sur la performance : le cumul des stress

F. Nicot

### **Vendredi 11 mars 2016**

Sports et nutrition : principes généraux et règles pratiques

F. Nicot

### **Vendredi 15 avril 2016**

Pathologies sportives : prévention et gestion des blessures

F. Nicot, avec les interventions de médecins du sport, kiné, ostéopathe, podologue

# Spécificités physiques de l'environnement montagnard

- ➡ Déterminants du milieu
- ➡ Caractéristiques physiques de l'altitude
- ➡ Quelques notions de météorologie pratique
- ➡ Mesure de l'altitude ... ou de la pression ?
- ➡ Pratique hivernale

# Les déterminants du milieu montagnard

A grayscale photograph of a mountain valley. A river flows through the center of the valley, surrounded by steep, rocky slopes. The sky is overcast, and the overall scene is desolate and rugged.

## Éléments fondamentaux

- Conditions météo (température, brouillard, vent, précipitations, orages)
- Orientation, cartographie, boussole + altimètre
- Nature du terrain (topographie)
- Couverture neigeuse
- Altitude
- Éléments de sécurité en progression

## L'être humain dans ce contexte

- Réponse physiologique (accommodation / acclimatation)
- Adaptations comportementales (équipement, apprentissage, acte moteur)







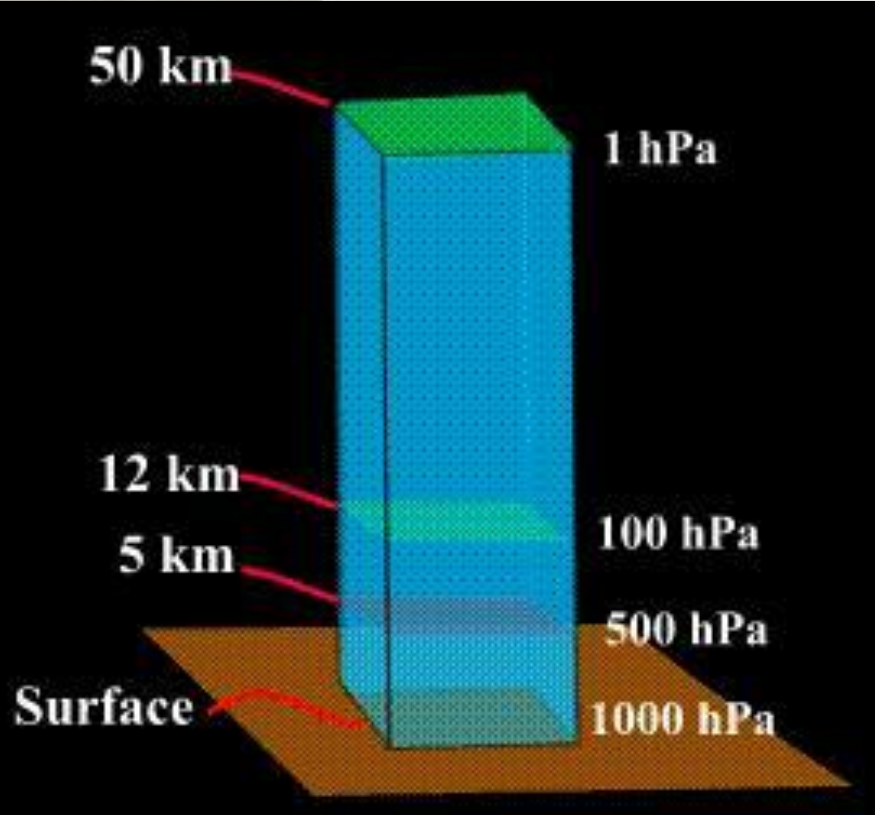




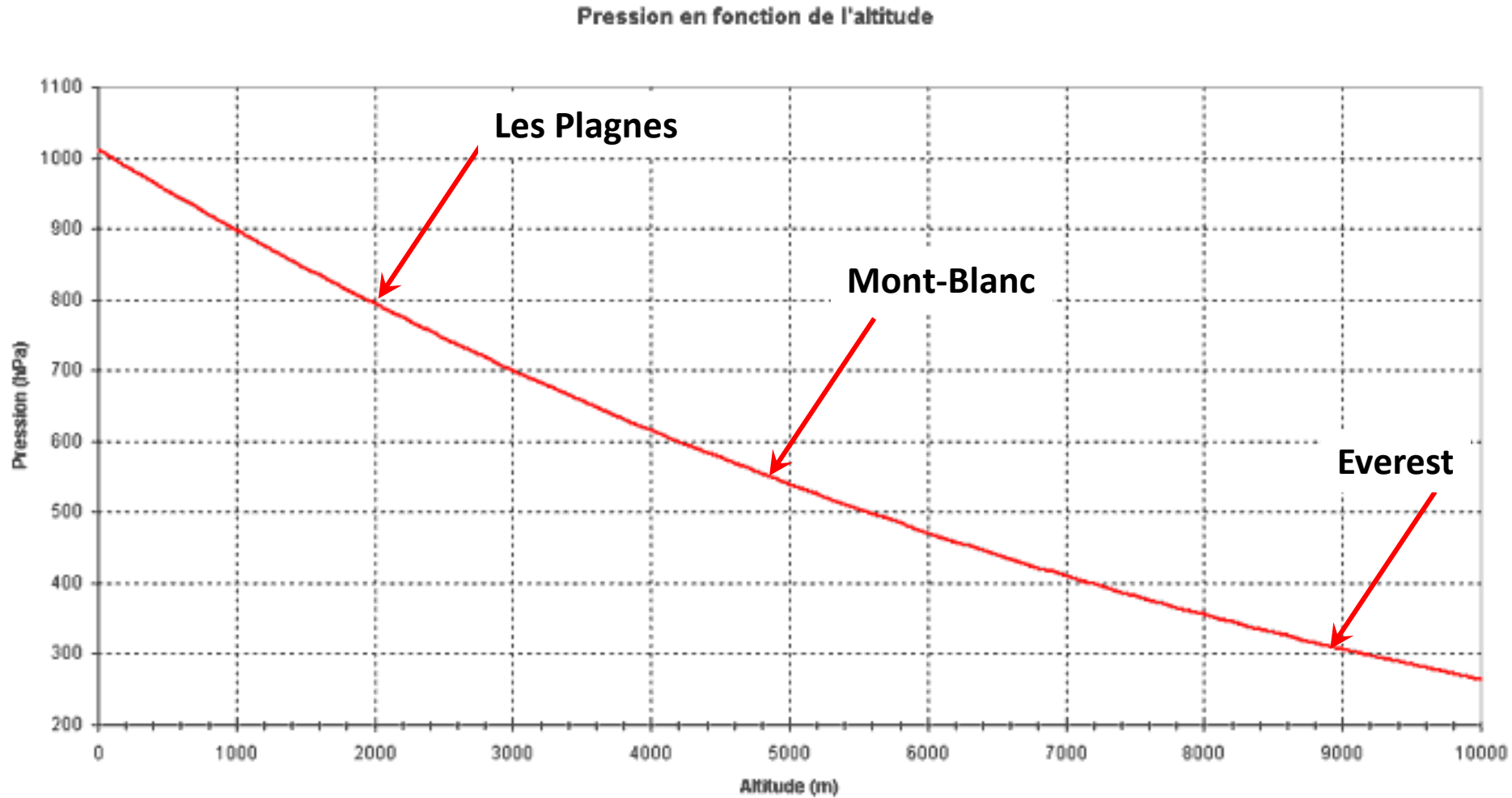
# On en est où ?

- ☞ Déterminants du milieu
- ☞ **Caractéristiques physiques de l'altitude**
- ☞ Quelques notions de météorologie pratique
- ☞ Mesure de l'altitude ... ou de la pression ?
- ☞ Pratique hivernale

# Décroissance de la pression



# Décroissance de la pression



# Décroissance de la température

## La température

Elle décroît avec l'altitude. On admet en moyenne :

1 °C / 100 m (air sec)

0.5 °C / 100 m (air saturé : pluie, brouillard, neige)

Limite pluie/neige : 300 m en dessous de l'isotherme '0 °C'

**Ex.** Allevard (alt. 450 m) :

$t^{\circ} = +2 \text{ °C}$

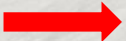
Météo = pluie

Au col du Barioz (alt. 1050 m) :

$(1050 - 450) \times 0.5 \sim 3 \text{ °C}$

$t^{\circ} = -1 \text{ °C}$

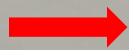
Météo attendue au col = neige

 Limite pluie/neige : vers  m d'altitude ?

# Décroissance de la température

Ex. Allevard (alt. 450 m) :  
 $t^{\circ} = +2^{\circ}\text{C}$   
Météo = pluie

Alt.  $0^{\circ}\text{C}$  :  $450\text{ m} + 100\text{ m} \times (2/0.5) = 850\text{ m}$   
 $850\text{ m} - 300\text{ m} = 550\text{ m}$

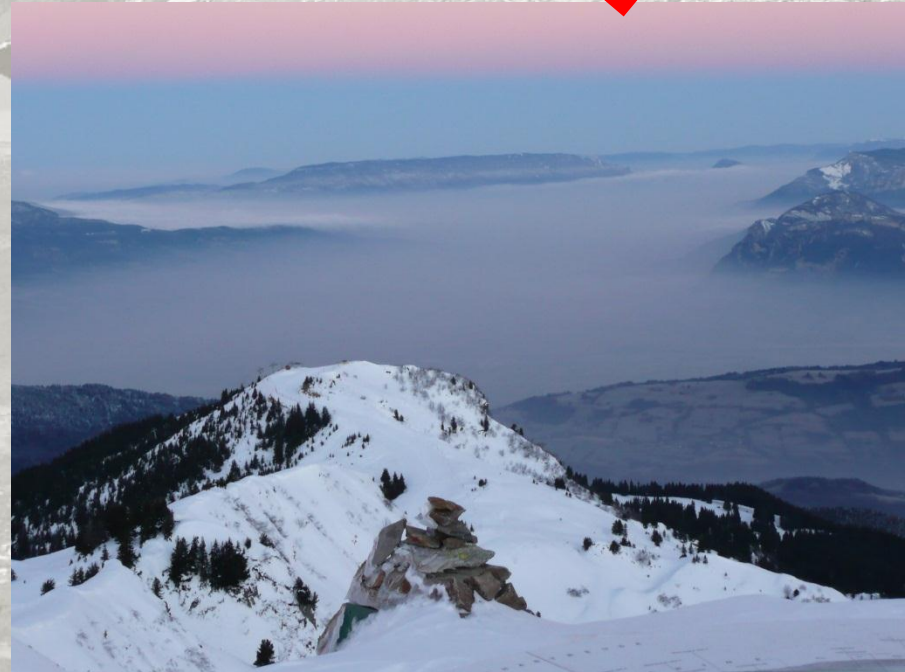
 Limite pluie/neige : vers 550 m d'altitude

# Un modèle ... et des anomalies

## La température

La décroissance régulière de la température avec l'altitude (modèle d'atmosphère standard) n'est pas toujours vérifiée. Le profil de température peut être fortement perturbé dans les cas suivants (en particulier) :

- Inversion de température : effet de subsidence, donnant lieu à une mer de nuages (phénomène fréquent l'hiver, dans les vallées montagnardes)
- Fortes instabilités convectives (*cumulonimbus* par temps orageux)
- Cas de plusieurs masses d'air différentes superposées
- Invasion en altitude d'une masse d'air chaude (arrivée d'un *front chaud*)
- Influence de la température du sol dans la partie basse de la couche



# L'influence du vent

## L'effet du vent

Déplacement de la masse d'air par rapport au corps

- Résistance à l'avancement face au vent
- Effet mécanique déstabilisant
- Refroidissement par convection (sans l'intermédiaire de la sudation)
- Refroidissement par évapo-transpiration (rôle de la sudation)
- Effet *windchill* : la température ressentie par l'organisme est inférieure à celle qu'il ressentirait sans vent, avec la même température extérieure
- Effet favorable en ambiances chaudes
- Effets désagréables à dangereux en ambiances froides



# L'influence du vent : indice Windchill

## Effet Windchill

vent/temp	+5 °C	+0 °C	-5 °C	-10 °C	-15 °C	-20 °C	-25 °C	-30 °C	-35 °C
5 km/h	+4 °C	-1 °C	-6 °C	-11 °C	-16 °C	-21 °C	-26 °C	-31 °C	-36 °C
10 km/h	+2 °C	-4 °C	-10 °C	-14 °C	-20 °C	-25 °C	-30 °C	-36 °C	-42 °C
15 km/h	+0 °C	-8 °C	-13 °C	-17 °C	-25 °C	-30 °C	-37 °C	-43 °C	-51 °C
20 km/h	-1 °C	-9 °C	-16 °C	-22 °C	-29 °C	-35 °C	-41 °C	-48 °C	-55 °C
25 km/h	-3 °C	-11 °C	-19 °C	-25 °C	-32 °C	-39 °C	-45 °C	-53 °C	-59 °C
30 km/h	-5 °C	-13 °C	-20 °C	-27 °C	-34 °C	-41 °C	-47 °C	-56 °C	-62 °C
35 km/h	-7 °C	-14 °C	-22 °C	-29 °C	-36 °C	-43 °C	-50 °C	-58 °C	-65 °C
40 km/h	-9 °C	-15 °C	-23 °C	-30 °C	-37 °C	-45 °C	-52 °C	-61 °C	-68 °C
45 km/h	-11 °C	-16 °C	-25 °C	-32 °C	-39 °C	-47 °C	-54 °C	-63 °C	-70 °C
50 km/h	-12 °C	-17 °C	-26 °C	-33 °C	-40 °C	-48 °C	-55 °C	-64 °C	-72 °C
55 km/h	-12 °C	-18 °C	-26 °C	-34 °C	-40 °C	-49 °C	-56 °C	-65 °C	-74 °C
60 km/h	-12 °C	-19 °C	-27 °C	-36 °C	-41 °C	-50 °C	-57 °C	-66 °C	-74 °C
65 km/h	-12 °C	-20 °C	-28 °C	-36 °C	-43 °C	-51 °C	-58 °C	-68 °C	-75 °C

La sensation de froid par une température de 0° C et avec un vent de 20 km/h est la même que par une température négative de - 9° C sans vent

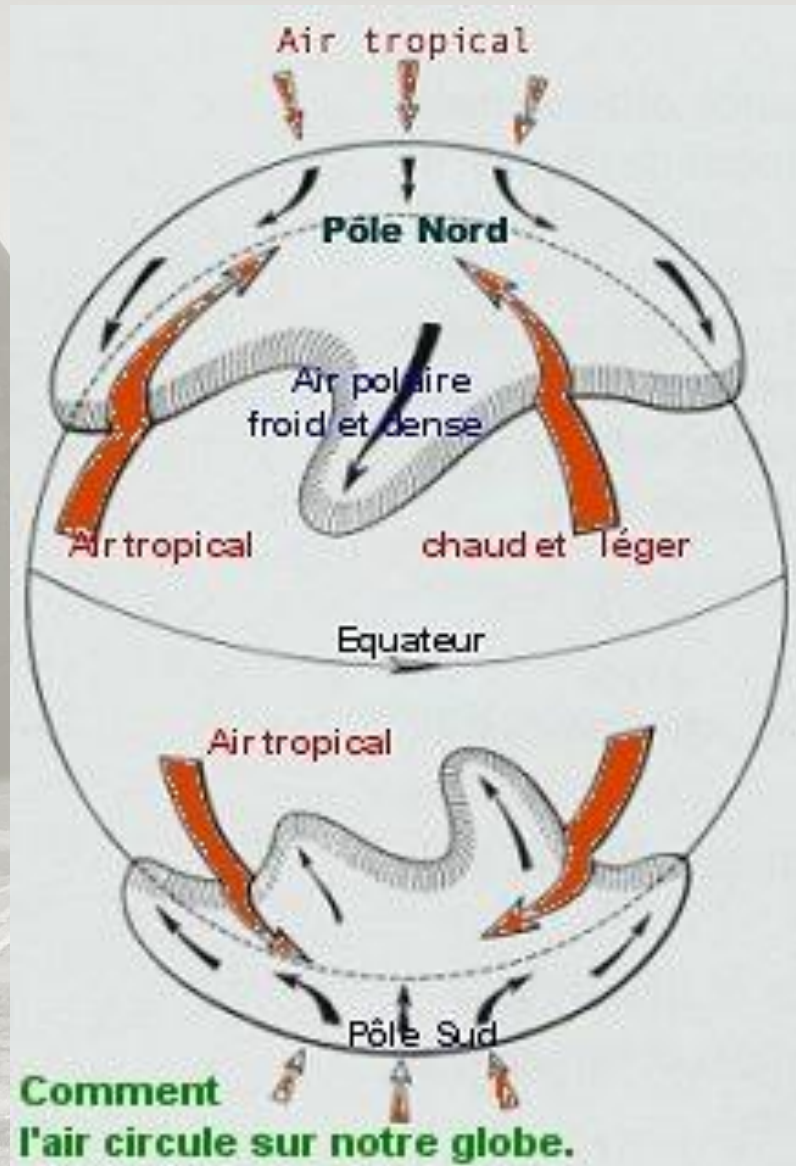
# On en est où ?

- ➡ Déterminants du milieu
- ➡ Caractéristiques physiques de l'altitude
- ➡ **Quelques notions de météorologie pratique**
- ➡ Mesure de l'altitude ... ou de la pression ?
- ➡ Pratique hivernale

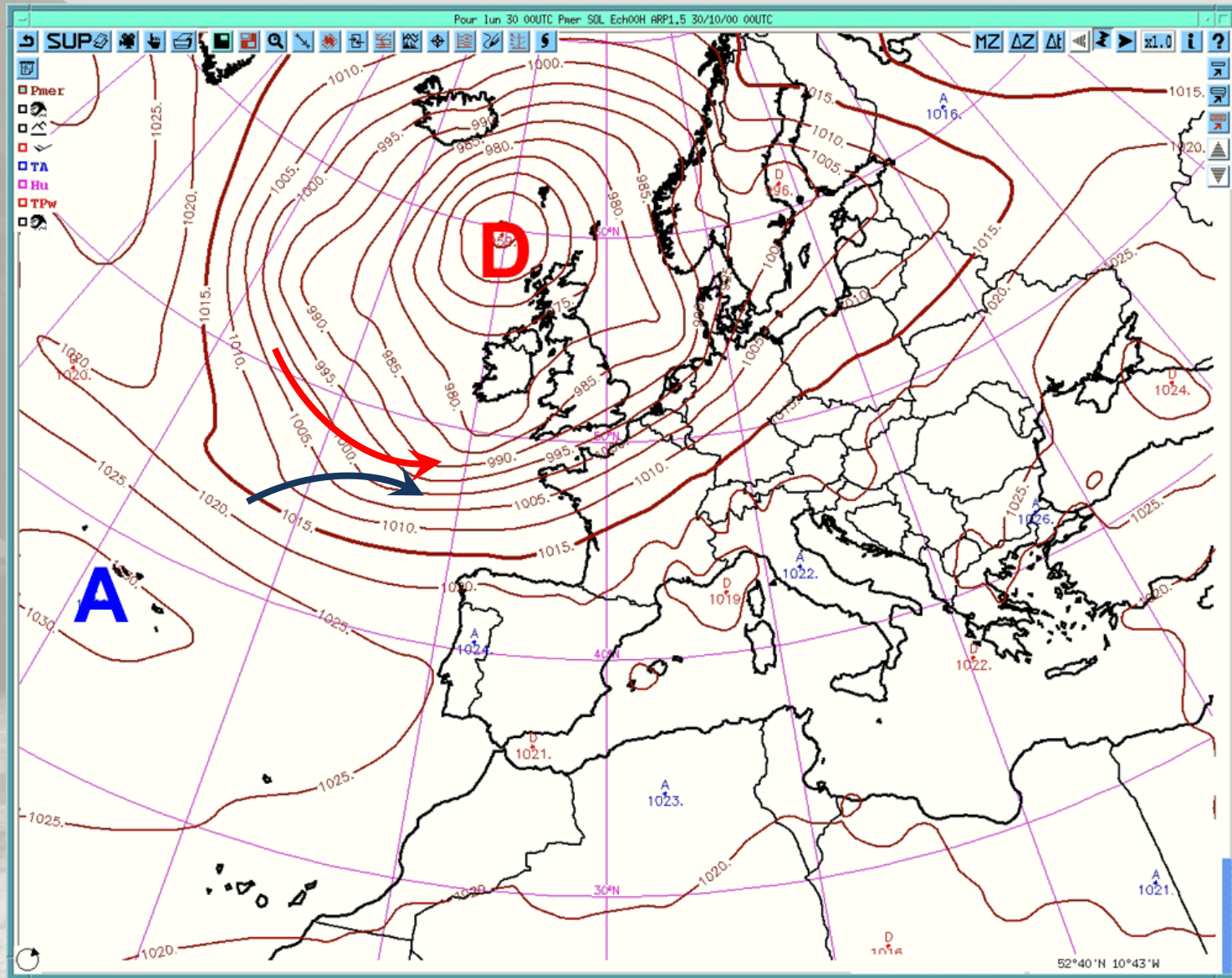
# Les éléments clés de la météorologie

- ✓ Apport considérable d'énergie solaire, inégalement distribuée
- ✓ Incidence des saisons
- ✓ Rotation de la terre (force de Coriolis, etc.)
- ✓ Présence d'océans (réserve d'eau) et de continents
- ✓ Décroissance de la température et de la pression avec l'altitude
  
- Présence de **centres d'action** (Anticyclones, Dépressions)
- Existence de **masses d'air**, très contrastées
- Circulation et **confrontation** des masses d'air

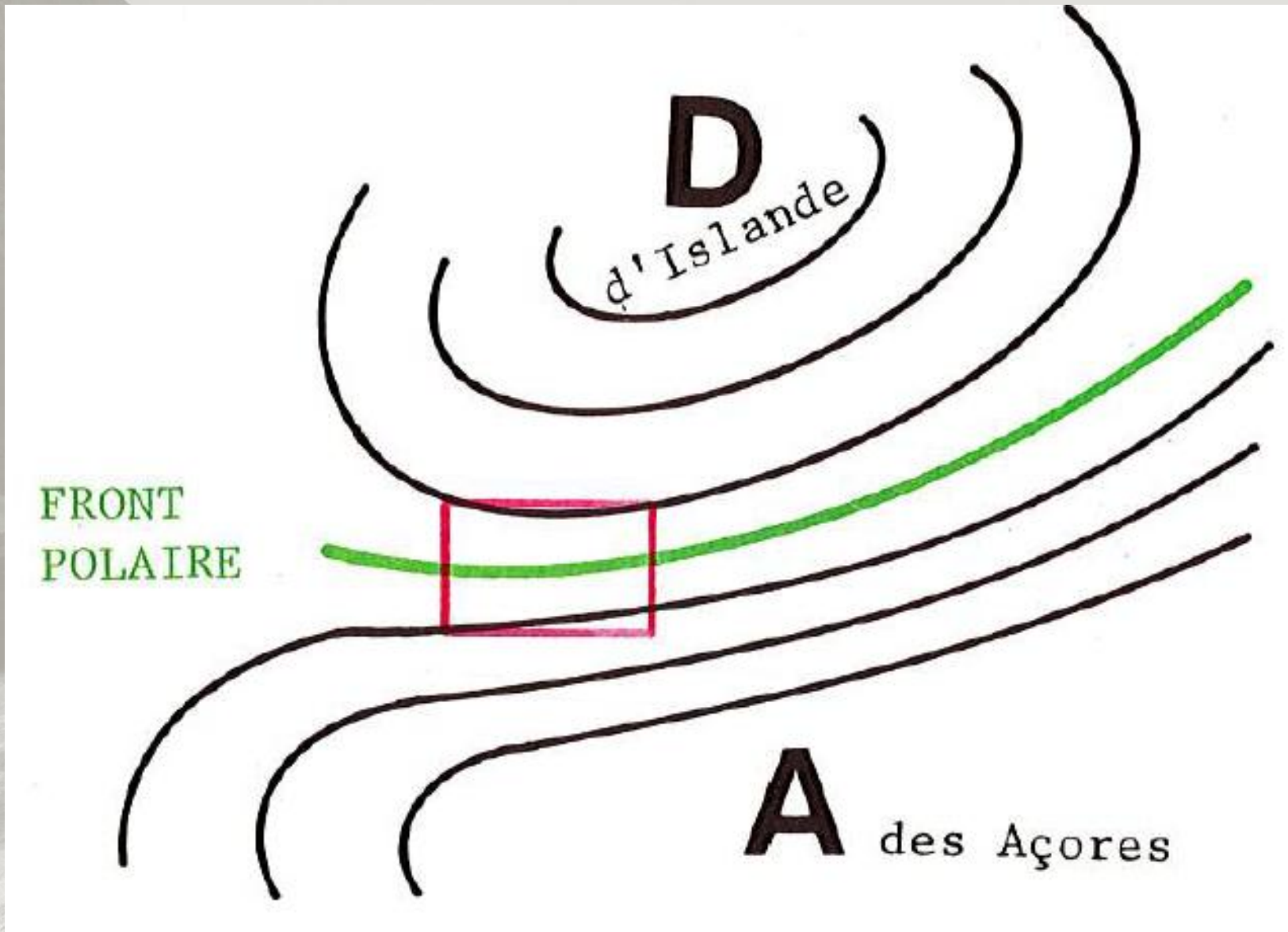
# Chronologie d'une perturbation



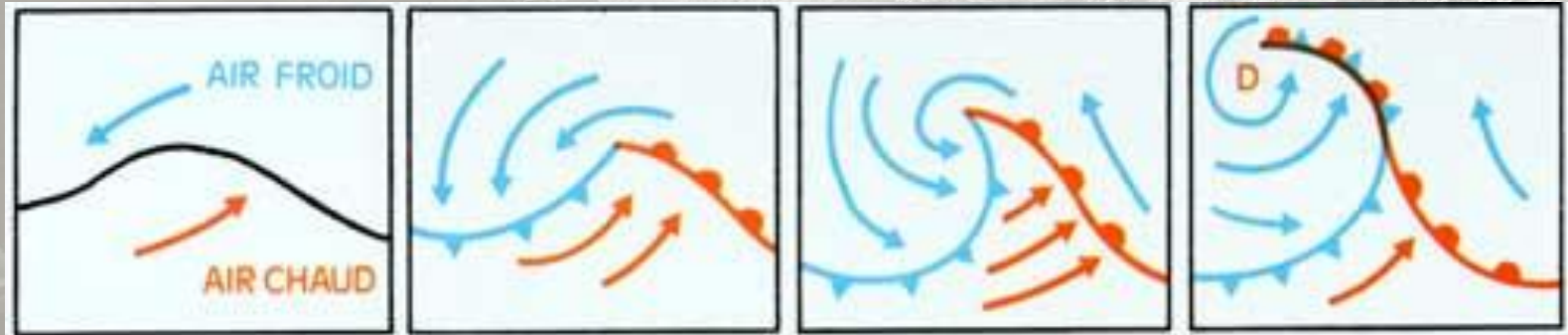
# Déplacements des masses d'air autour des c. d'action



# Chronologie d'une perturbation

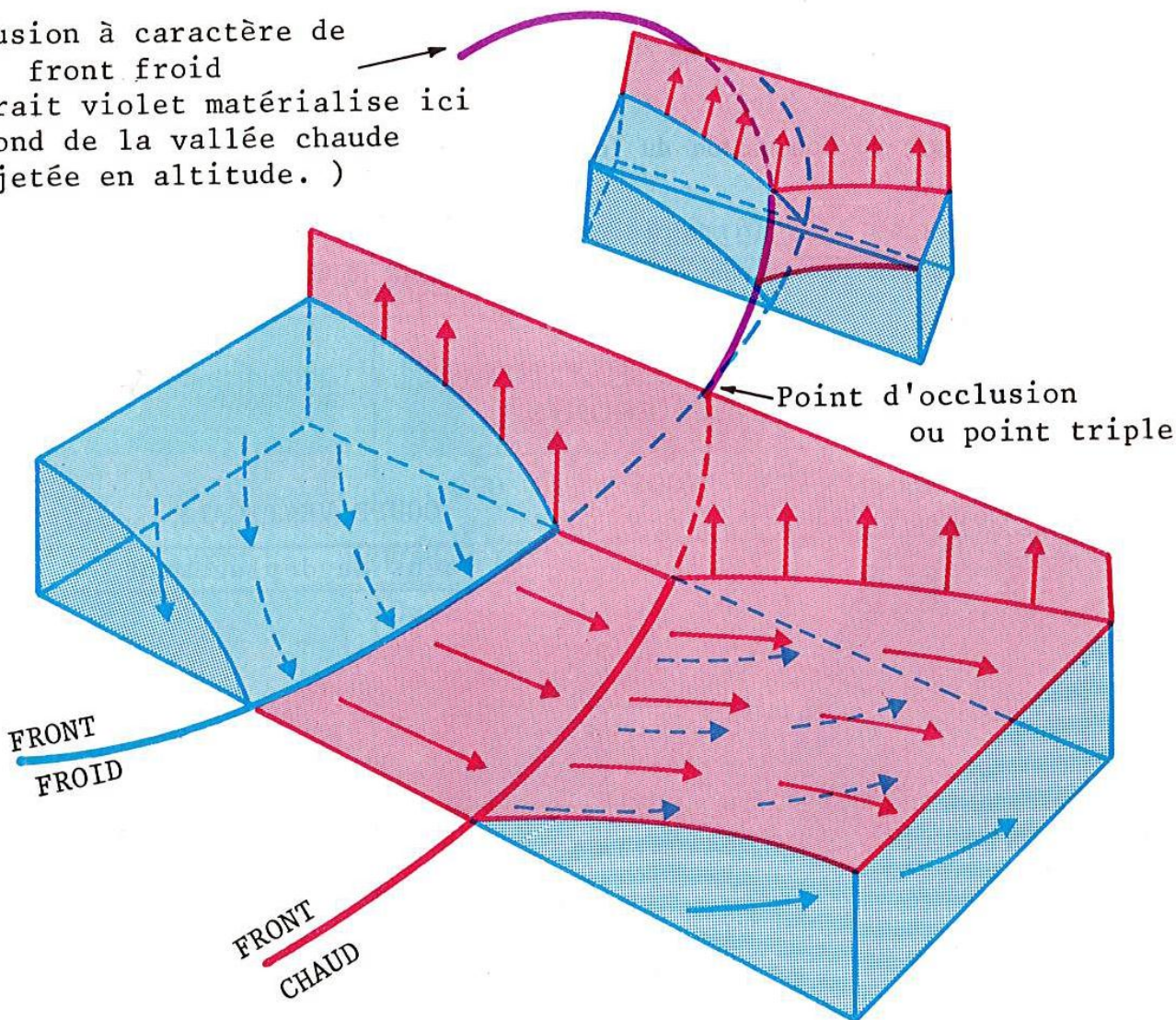


# Chronologie d'une perturbation



# Chronologie d'une perturbation

Occlusion à caractère de front froid  
(Le trait violet matérialise ici le fond de la vallée chaude rejetée en altitude.)

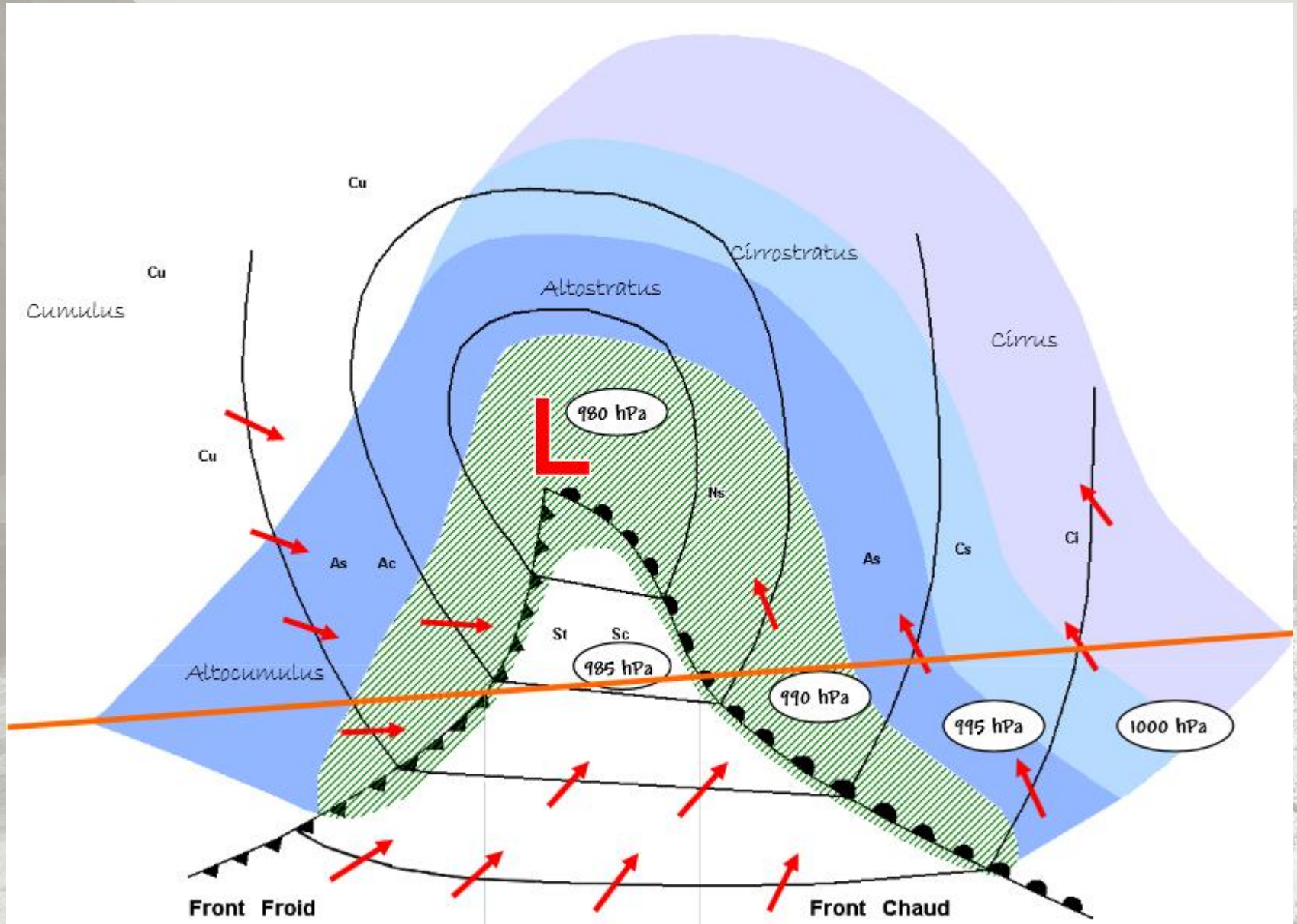


g. 10.8.





# Chronologie d'une perturbation



# Chronologie d'une perturbation



**Cirrus**



**Cirrocumulus**



**Cirrostratus**



**Altostratus**



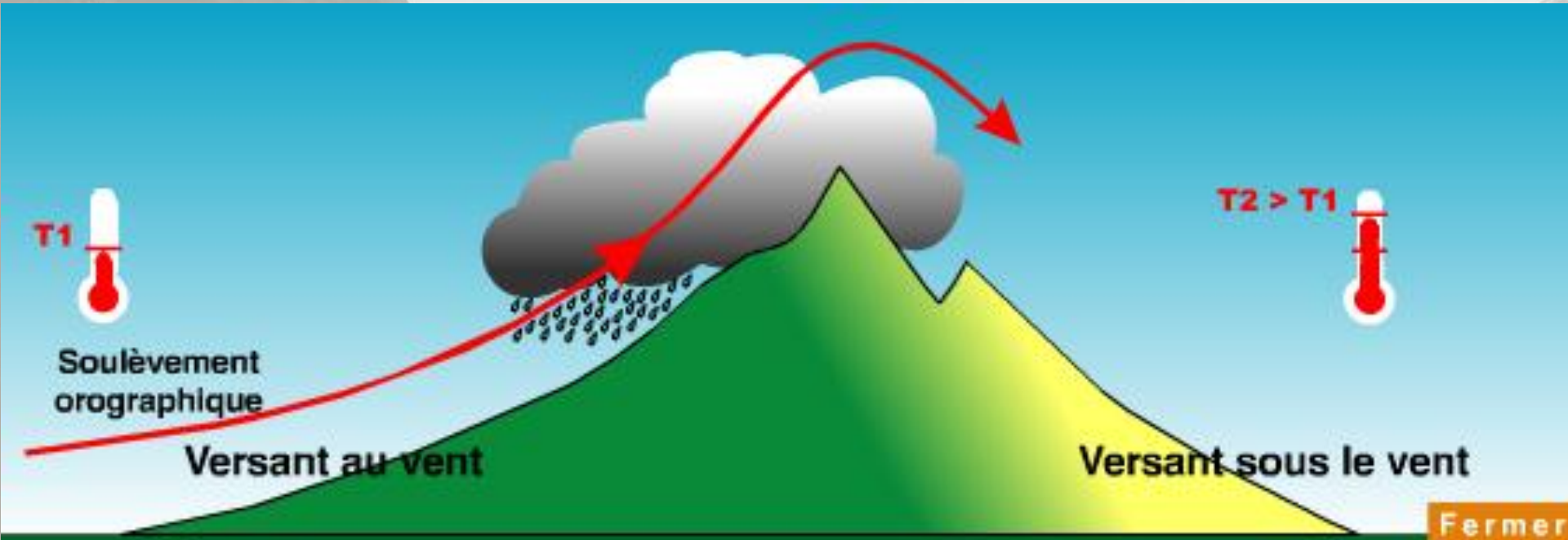
**Altostratus**



**Altostratus**

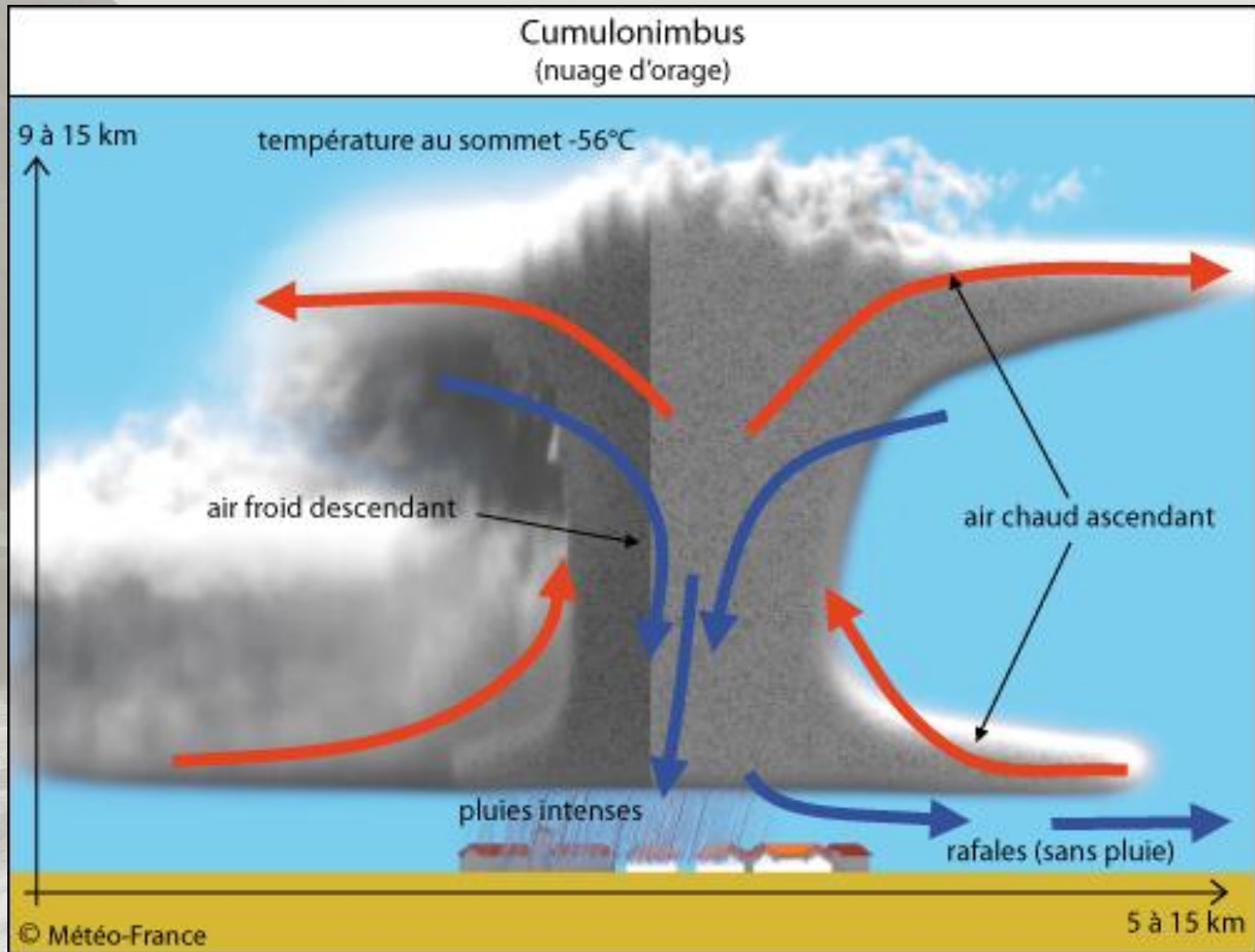


# Phénomène de foehn





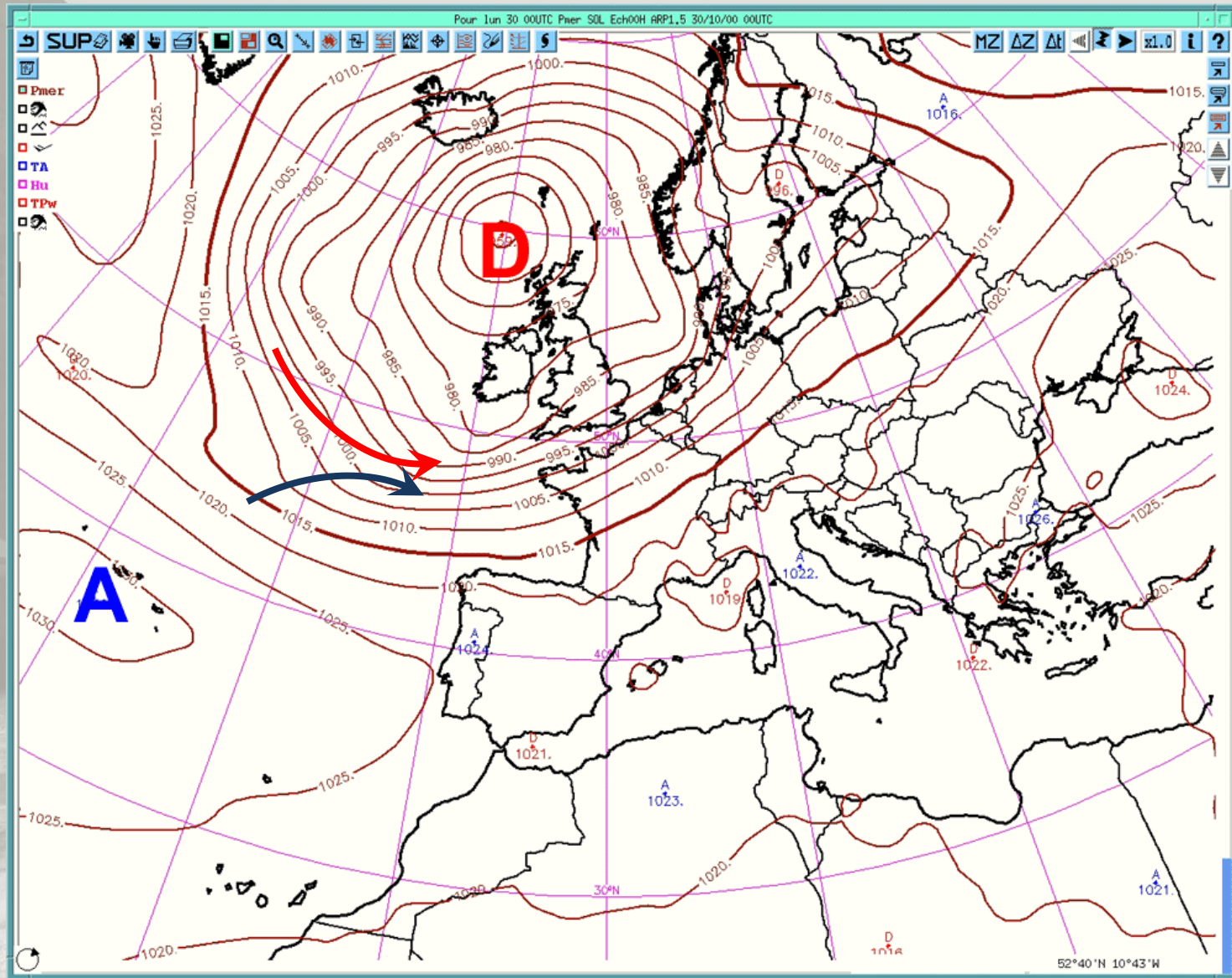
# Cellule convective orageuse



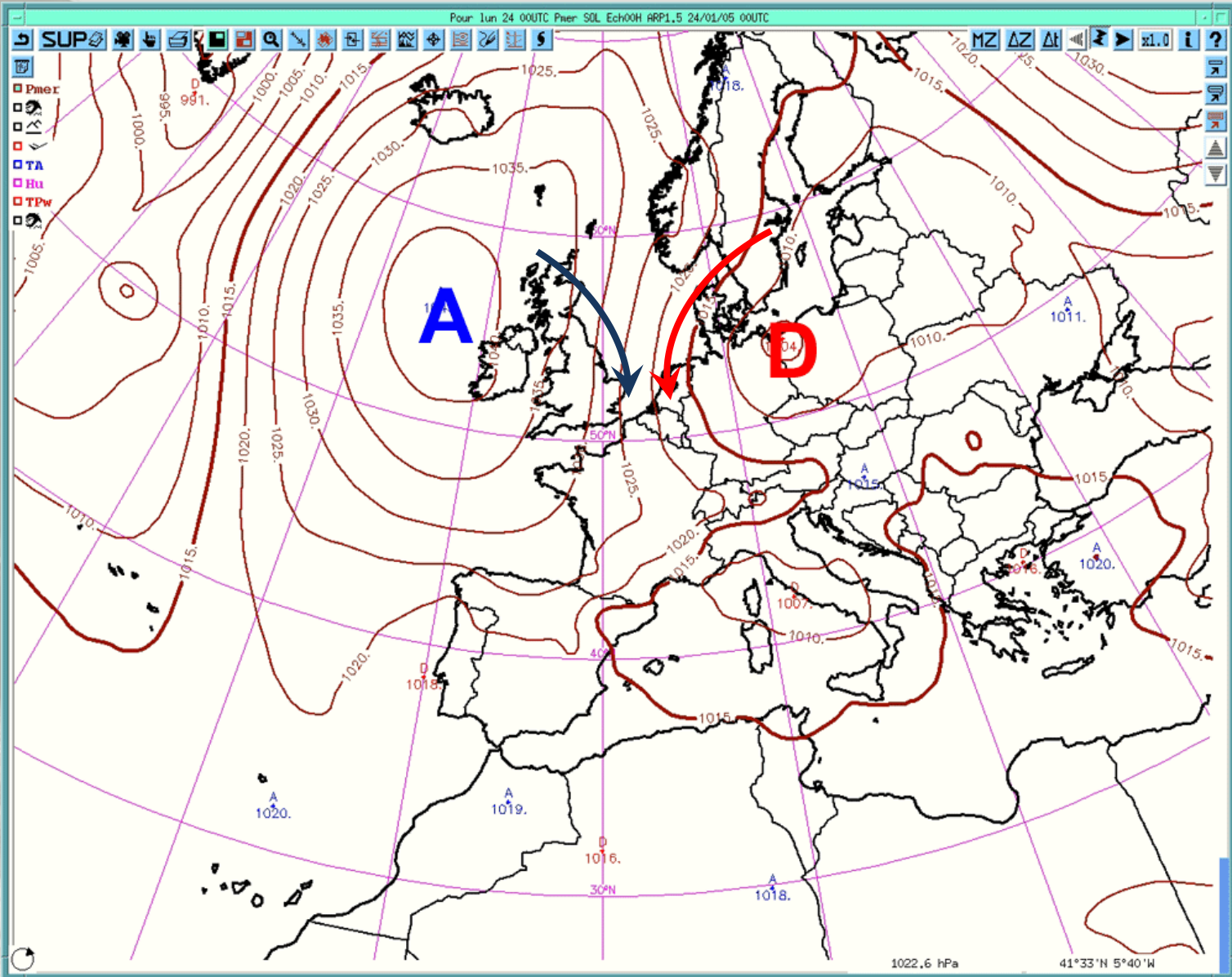




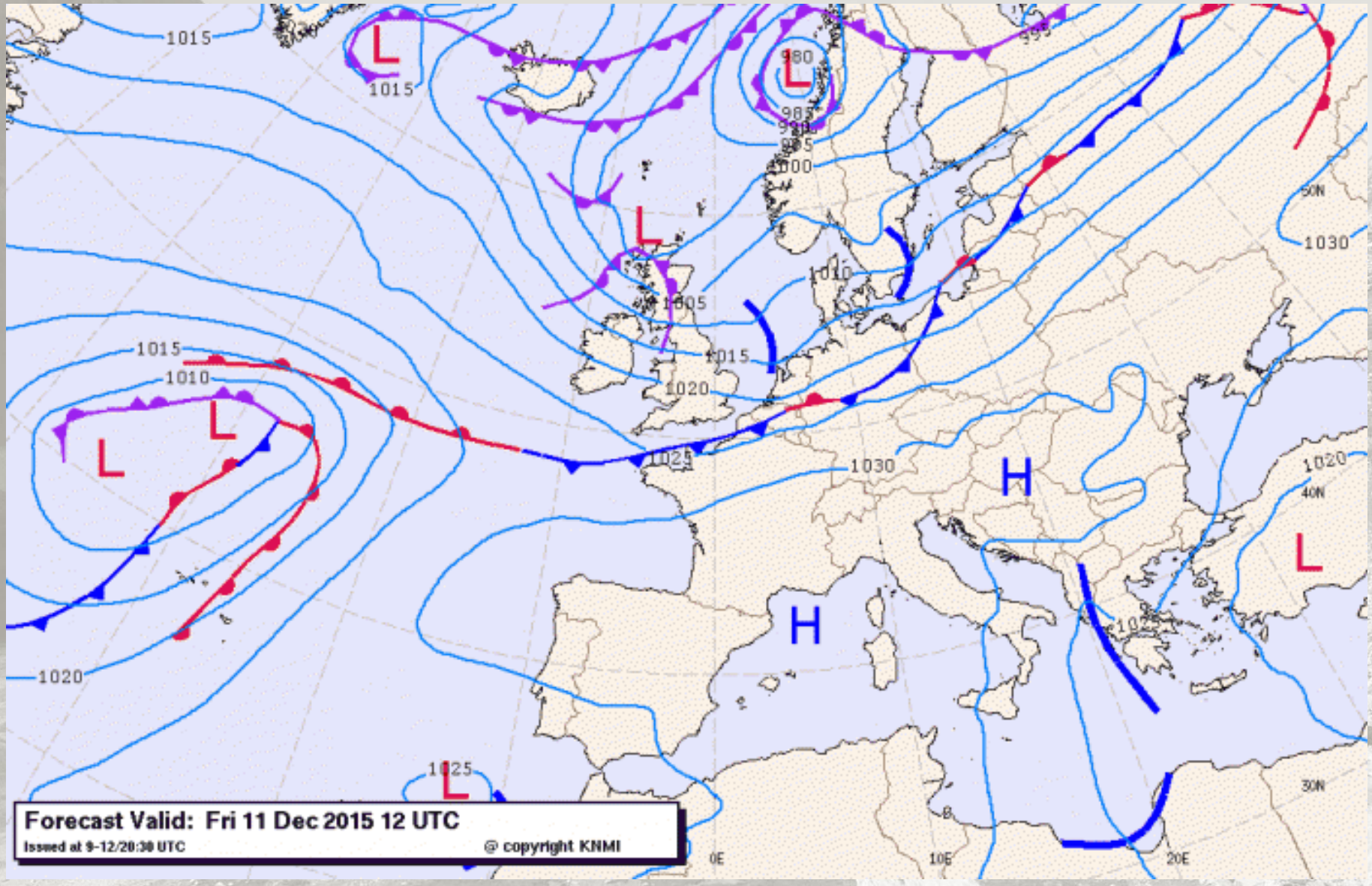
# Flux d'Ouest : douceur et fortes précipitations

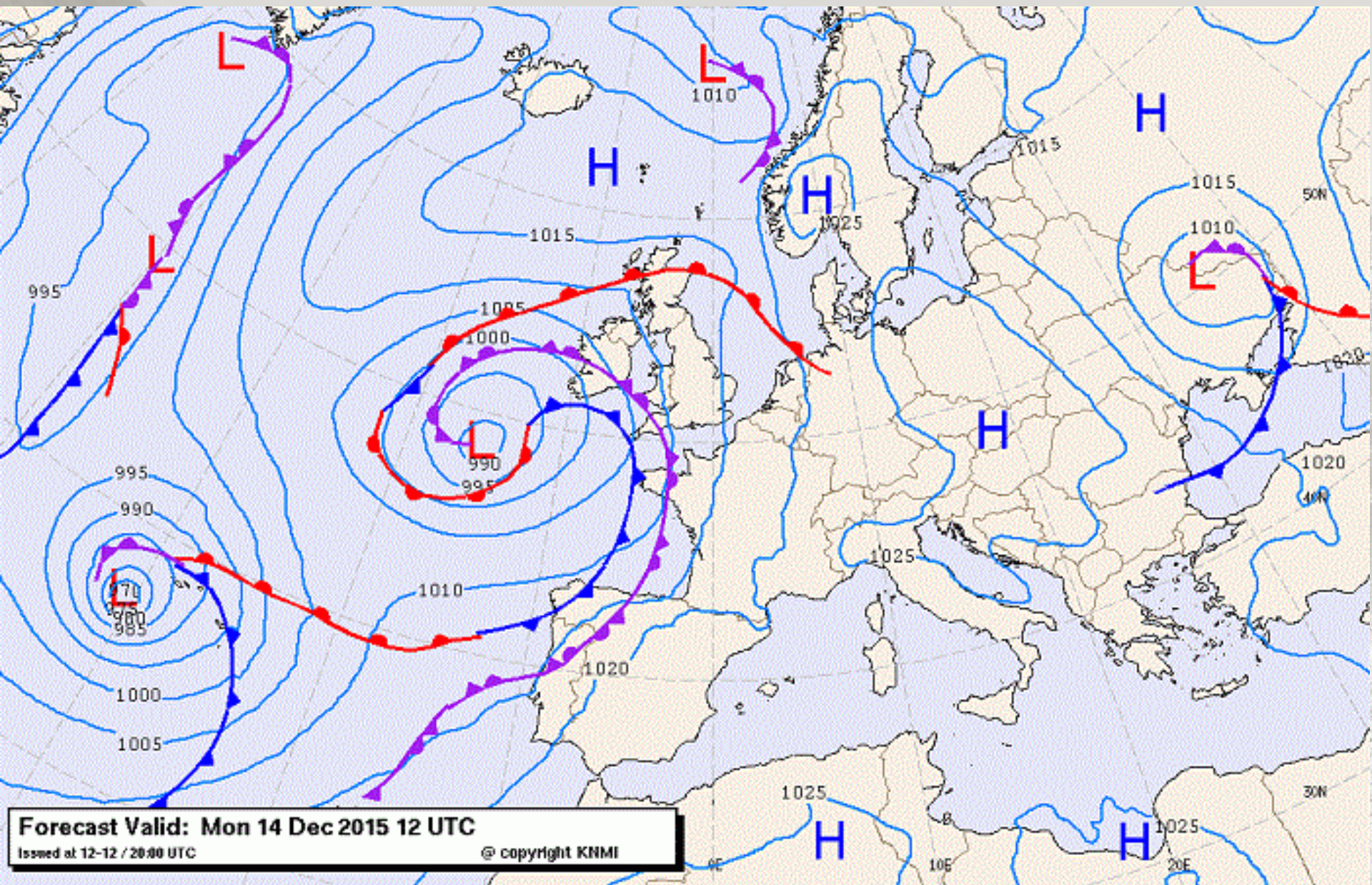


# Flux de Nord à Nord-Ouest : promesse de neige ...



# Que pensez-vous de cette situation ?!...



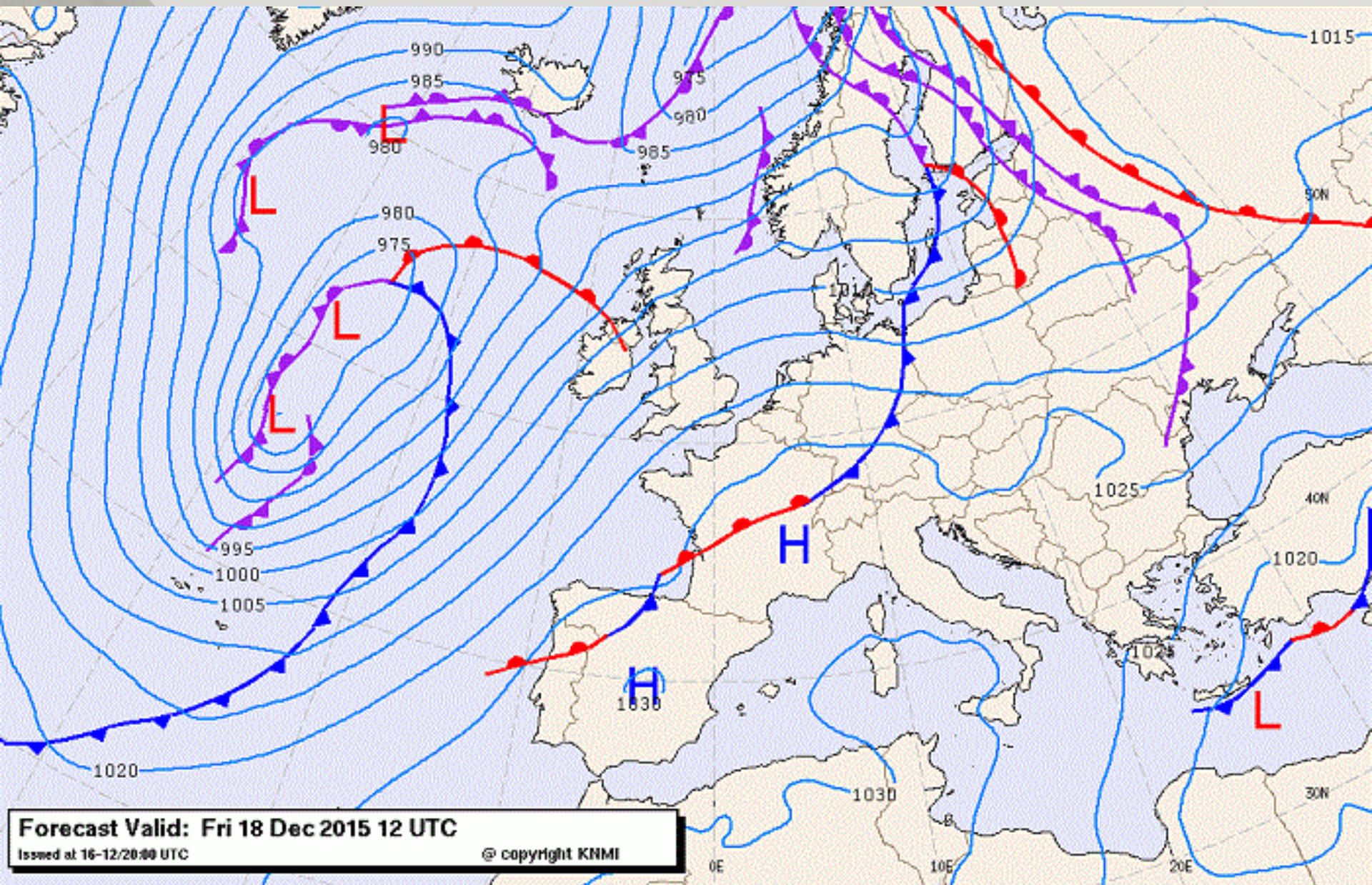


Une solide barrière de hautes-pressions est toujours présente sur l'Europe-Centrale.

Lundi 14/12, une dépression se positionne au Sud-Ouest de l'Irlande, elle se prolongera en thalweg jusqu'aux Açores. Dans ces conditions, le flux de Sud va un peu s'accroître et les températures en profiteront pour grimper encore 1 ou 2 degrés. Les basses-pressions ne parviendront pas à se décaler vers l'Est et nous atteindre mais un léger front très atténué atteindra néanmoins nos régions en nuit de Mardi à Mercredi.

Ensuite, l'anticyclone regonfle par la péninsule ibérique. Gardant ses racines subtropicales, il sera à nouveau accompagné d'un air très doux pour la saison. Cette douceur pourrait même devenir exceptionnelle Jeudi avec un isotherme 0°C au delà des 3000 mètres.





Une poussée anticyclonique se produit par la péninsule ibérique. Ces hautes-pressions gardent leur racine subtropicale, du coup la masse d'air associée est particulièrement douce pour la saison.

Vendredi le flux d'Ouest se renforce temporairement.

Arrivée d'une vallée de basses-pressions entre l'Irlande et le Portugal pour le week-end.

Le flux s'orientera alors au secteur Sud-Ouest et une nouvelle hausse des températures est attendue.

La dégradation associée à ces basses-pressions gagnera nos régions Lundi, mais elle ne devrait pratiquement pas produire de précipitations. Nouvelle hausse du champ de pressions Mardi avec encore ces hauts-géopotentiels en provenance d'Afrique du Nord.

La probabilité d'un changement de temps avant la fin de l'année devient de plus en plus faible ...



# On en est où ?

- ➡ Déterminants du milieu
- ➡ Caractéristiques physiques de l'altitude
- ➡ Quelques notions de météorologie pratique
- ➡ **Mesure de l'altitude ... ou de la pression ?**
- ➡ Pratique hivernale



# Mesures altimétriques (1)



## Altimètres GPS

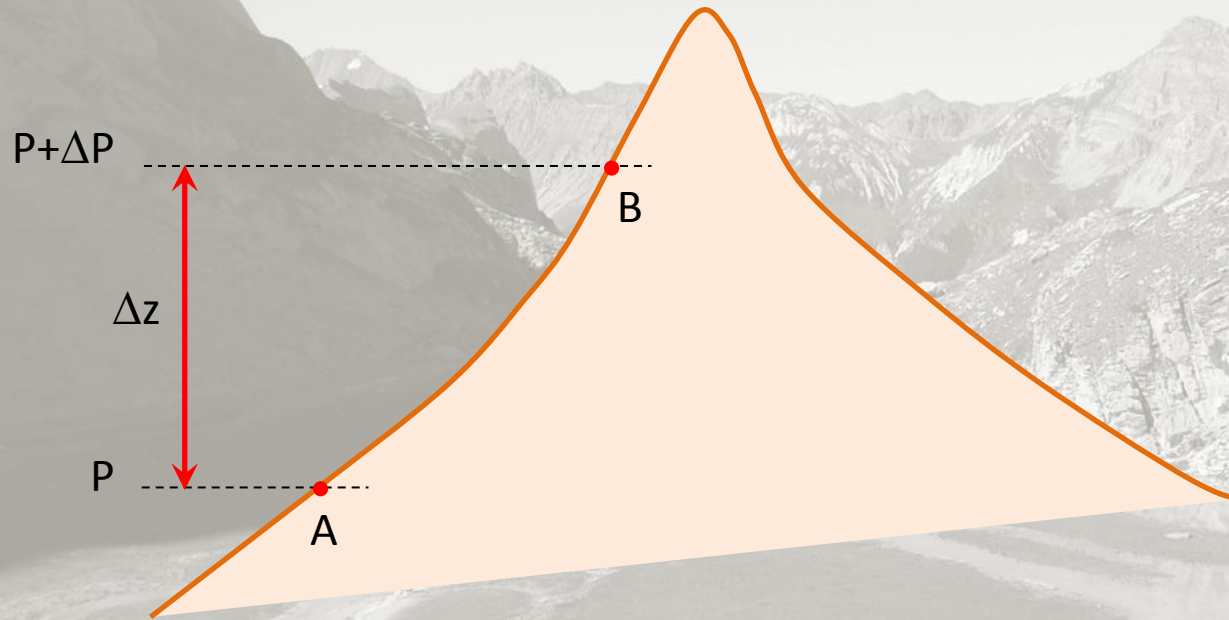
- Indépendants des conditions météo (pression, température)
- Pas besoin de recalage
- Perturbés par la présence d'une couverture forestière
- Nécessitent de pouvoir capter une constellation de satellites (effet écran dû aux sommets environnants)

## Altimètres barométriques

- Ne nécessitent pas d'intermédiaires (satellites, etc.)
- Dépendent directement des conditions météo, et de leur évolution
- Sensibilité de la mesure vis-à-vis de la température, de l'hygrométrie
- Exigent un recalage permanent

# Mesures altimétriques (2)

Différence de pression  $\Delta P$  entre deux points A et B situés à une différence d'altitude  $\Delta z$



Pour une masse d'air donnée, au repos et à l'équilibre

$$\Delta P = - \rho g \Delta z$$

# Mesures altimétriques (3)

$$\Delta P = - \rho g \Delta z$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Cette relation est d'autant plus précise que  $\Delta z$  est petit (quelques mètres)  
La masse volumique de l'air,  $\rho$ , dépend de la température  $T$  !

Loi des gaz parfaits :

$$P = \rho R T$$

$$R = 287.05 \text{ (u.i.)}$$



$$\frac{\Delta P}{P} = - \frac{g}{R T} \Delta z$$

Ex.  $P = 800 \text{ hPa}$ ,  $\Delta z = 10 \text{ m}$ ,  $T = 0^\circ \text{ C}$



$$\Delta P = 1 \text{ hPa}$$

**Attention, dans les calculs il faut prendre la température en ° Kelvin (K), en ajoutant 273 à la température en ° Celsius (C)**

# Mesures altimétriques (4)

## Modèle barométrique des altimètres

Ce modèle est le modèle standard de l'atmosphère : masse d'air au repos  
Il indique que la pression décroît avec l'altitude selon une loi précise

$$\frac{\Delta P}{P} = - \frac{g}{R T} \Delta z$$

Les **altimètres barométriques** utilisent ce modèle dans le **sens inverse** :



Pour : - une variation de pression donnée  $\Delta P$   
- une température donnée  $T$

on peut en déduire la variation d'altitude correspondante

$$\Delta z = - \frac{R T}{g} \frac{\Delta P}{P}$$

C'est le modèle qu'utilisent les altimètres barométriques

# Mesures altimétriques (5)

Utilisation pratique du modèle

$$\Delta z = - \frac{R T}{g} \frac{\Delta P}{P}$$

A l'instant  $t_1$ , l'altimètre a mesuré la pression  $P_1$ , et calculé l'altitude  $z_1$

A l'instant  $t_2$ , l'altimètre a mesuré la pression  $P_2$

La température moyenne entre  $t_1$  et  $t_2$  est  $T$

L'altimètre calcule à l'instant  $t_2$  une nouvelle altitude  $z_2$  :



$$z_2 = z_1 - \frac{R T}{g} \frac{P_2 - P_1}{P_1}$$

Ex.  $P_1 = 800$  hPa,  $z_1 = 2000$  m  
 $P_2 = 810$  hPa,  $T = 0$  ° C



$z_2 = 1901$  m

Un cycle de calcul dure quelques secondes ( $t_2 - t_1$ )

Un altimètre réalise en une heure de nombreux cycles de calcul !

# Mesures altimétriques (6)

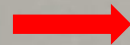
## Question 1

Que se passe-t-il lorsque les conditions météo évoluent ?

L'évolution des conditions météo est liée à l'évolution du champ de pression par déplacement des centres d'action (*anticyclones, dépressions*)

En un point donné, la pression **P** peut augmenter (régime anticyclonique) ou diminuer (régime dépressionnaire) au cours du temps

$$\Delta z = - \frac{R T}{g} \frac{\Delta P}{P}$$



En un même point, l'altimètre affiche entre deux instants donnés une variation d'altitude  $\Delta z$   
Cette variation est d'autant plus importante que l'évolution météo est marquée

## Conclusion

- A chaque cycle de calcul, l'altimètre commet une erreur lorsque les conditions météo changent
- Ces erreurs sur le calcul de l'altitude se cumulent au fil des cycles
- Nécessité de **recaler fréquemment** les altimètres barométriques (lorsqu'on connaît l'altitude du point où l'on se trouve)

# Mesures altimétriques (7)

## Question 2

Ordre de grandeur de l'erreur engendrée lorsque les conditions météo évoluent

Typiquement, à l'approche d'un *front perturbé*, on peut observer en deux heures une baisse de pression  $\Delta P$  de 5 hPa

Ex.  $P_1 = 800 \text{ hPa}$ ,  $z_1 = 2000 \text{ m}$   
 $\Delta P = 5 \text{ hPa}$ ,  $T = 0^\circ \text{ C}$

  $\Delta z = 50 \text{ m}$

L'erreur engendrée est donc significative !!!

# Mesures altimétriques (8)

## Question 3

## Effet de la température

- Une variation de température sans variation de pression n'engendre pas de variation d'altitude
- Mais, pour une même variation de pression, la variation d'altitude est d'autant plus forte que la température est élevée et que l'altitude est importante

Altitude  $z = 0$  m

Altitude  $z = 2000$  m

Température (° C)	$\Delta z$ (m)	$\Delta z$ (m)
-10	7.61	9.68
0	7.89	10.05
10	8.17	10.42
20	8.46	10.78

$\Delta P = 1$  hPa



# Mesures altimétriques (9)

## Question 4

Tous les altimètres prennent-ils en compte la température ?

- En principe **oui**
- Mais tous ne prennent pas en compte la température qu'ils mesurent. Cette mesure est entachée d'erreurs :
  - Effet de l'insolation directe
  - Influence de la t° corporelle

Ces altimètres s'appuient sur un modèle standard de l'atmosphère :

La température décroît régulièrement avec l'altitude, depuis le niveau de la mer (15 °C), de 0.65 °C tous les 100 m.

A une altitude  $z$    $T$  (en °C) =  $15 - 0.0065 \times z$

Le modèle altimétrique devient alors :

$$\Delta z = - \frac{R}{g} (288 - 0.0065 z) \frac{\Delta P}{P}$$

# On en est où ?

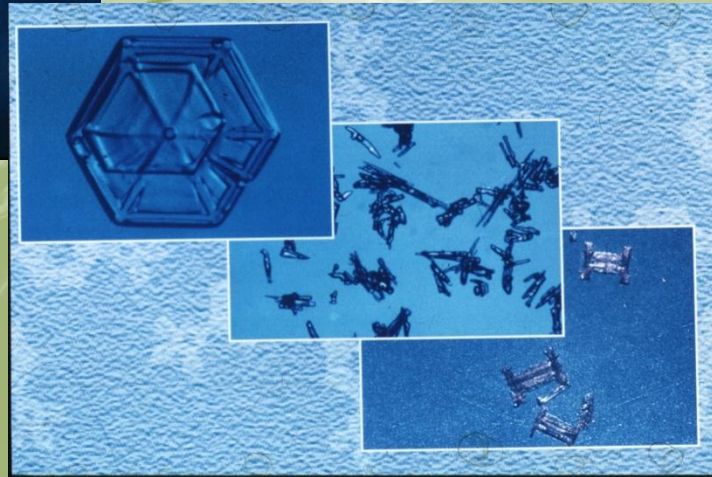
- ☞ Déterminants du milieu
- ☞ Caractéristiques physiques de l'altitude
- ☞ Quelques notions de météorologie pratique
- ☞ Mesure de l'altitude ... ou de la pression ?
- ☞ **Pratique hivernale**

## Formation des cristaux

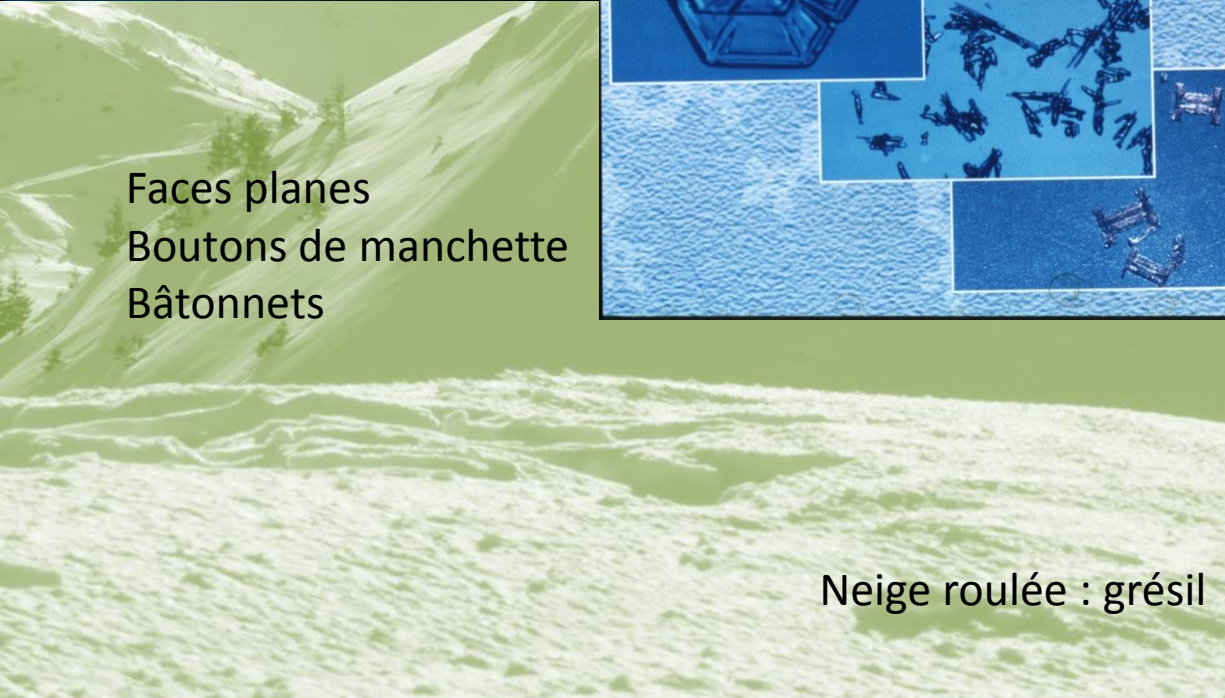
- Existence d'un noyau de congélation (particules salines, poussières, ...)
- Phase de coalescence : des conditions thermodynamiques favorables sont nécessaires pour permettre la croissance d'un cristal de glace autour du noyau
- Chute gravitaire du cristal vers le sol
- Transformations physico-chimiques au cours du déplacement : sous l'effet de la température, de l'humidité, du vent, le cristal se transforme (il existe des dizaines de milliers de cristaux de neige différents !)
- Parfois, lorsque les conditions le permettent, des cristaux s'agglomèrent pour constituer des flocons
- Lorsque les couches atmosphériques traversées sont trop chaudes, les cristaux (ou les flocons) se transforment en gouttes de pluie



Cristal dendritique :  
le modèle parfait !



Faces planes  
Boutons de manchette  
Bâtonnets

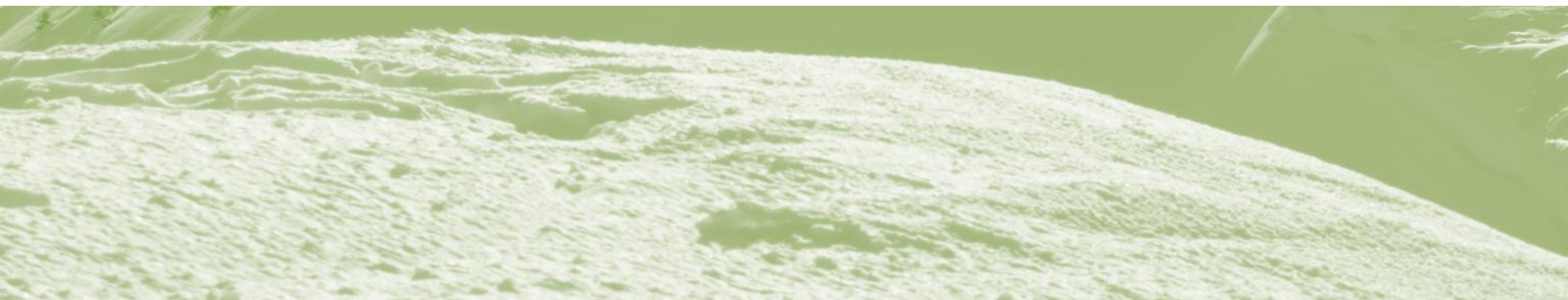


Neige roulée : grésil



## Métamorphose de la neige

- La neige au sol est constituée d'eau sous ses trois phases (solide, liquide, vapeur)
- La densité de la couche fraîche au sol varie entre 50 et 150 kg/m<sup>3</sup>
- Rapidement, sous l'effet d'agents atmosphériques (température, précipitations, vent), topographiques (pente, orientation, altitude) et mécaniques (surcharges, ...), la neige au sol se transforme
- Ces transformations (métamorphoses) vont induire un tassement de la couche de neige, et donc une augmentation de la densité ; elles s'accompagnent ou non d'une augmentation du nombre et de la taille des ponts reliant les grains en contact



## Gradient de température (G : en °C / m)

$$G = (T_1 - T_2) / H$$

$T_2$

H

$T_1 \sim 0^\circ\text{C}$

La température à la surface du manteau neigeux est plus basse par ciel dégagé (nuit claire) et avec vent

Givre de surface

Flux géothermique

La surface du manteau neigeux se refroidit par rayonnement la nuit par ciel clair et avec vent

**Givre de surface**

## Exemples:

T1 = 0 °C  
T2 = -20 °C  
H = 2 m



$$G = 20 / 2 = 10 \text{ °C/m}$$

T1 = 0 °C  
T2 = -10 °C  
H = 20 cm



$$G = 10 / 0.2 = 50 \text{ °C/m}$$

Faible gradient :	$G < 5 \text{ °C/m}$
Moyen gradient :	$5 \text{ °C/m} < G < 20 \text{ °C/m}$
Fort gradient :	$G > 20 \text{ °C/m}$





## Effet de rayon de courbure

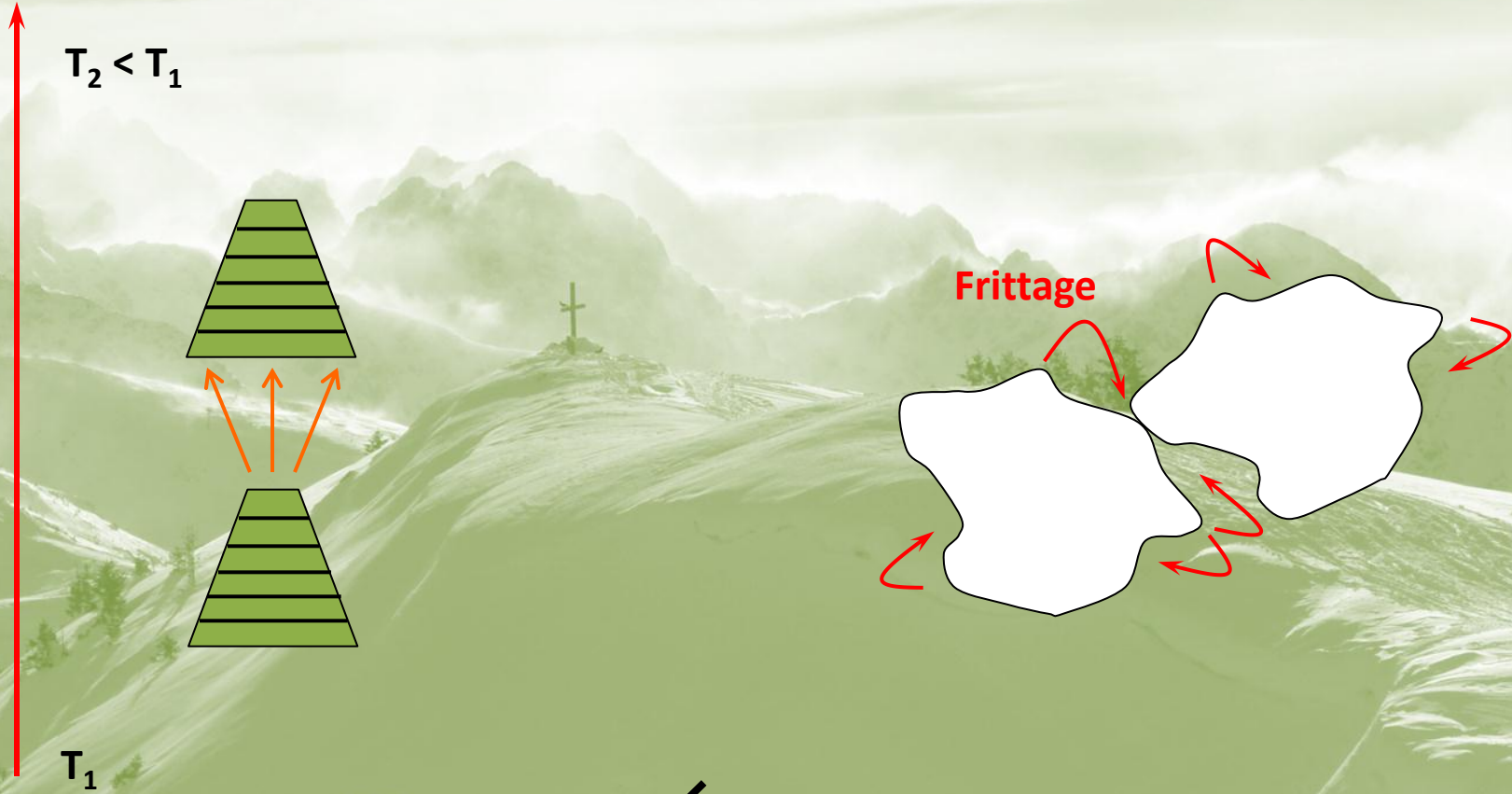
- Transfert de masse (par sublimation puis condensation solide) depuis les zones convexes vers les zones concaves
- Les grains s'émousent, les formes s'arrondissent
- Formation de grains fins

## Mécanisme de frittage

- Transfert de masse (par sublimation puis condensation solide) vers les zones de contact entre grains (zones concaves)
- Création de ponts de glace

## Mécanisme de givrage

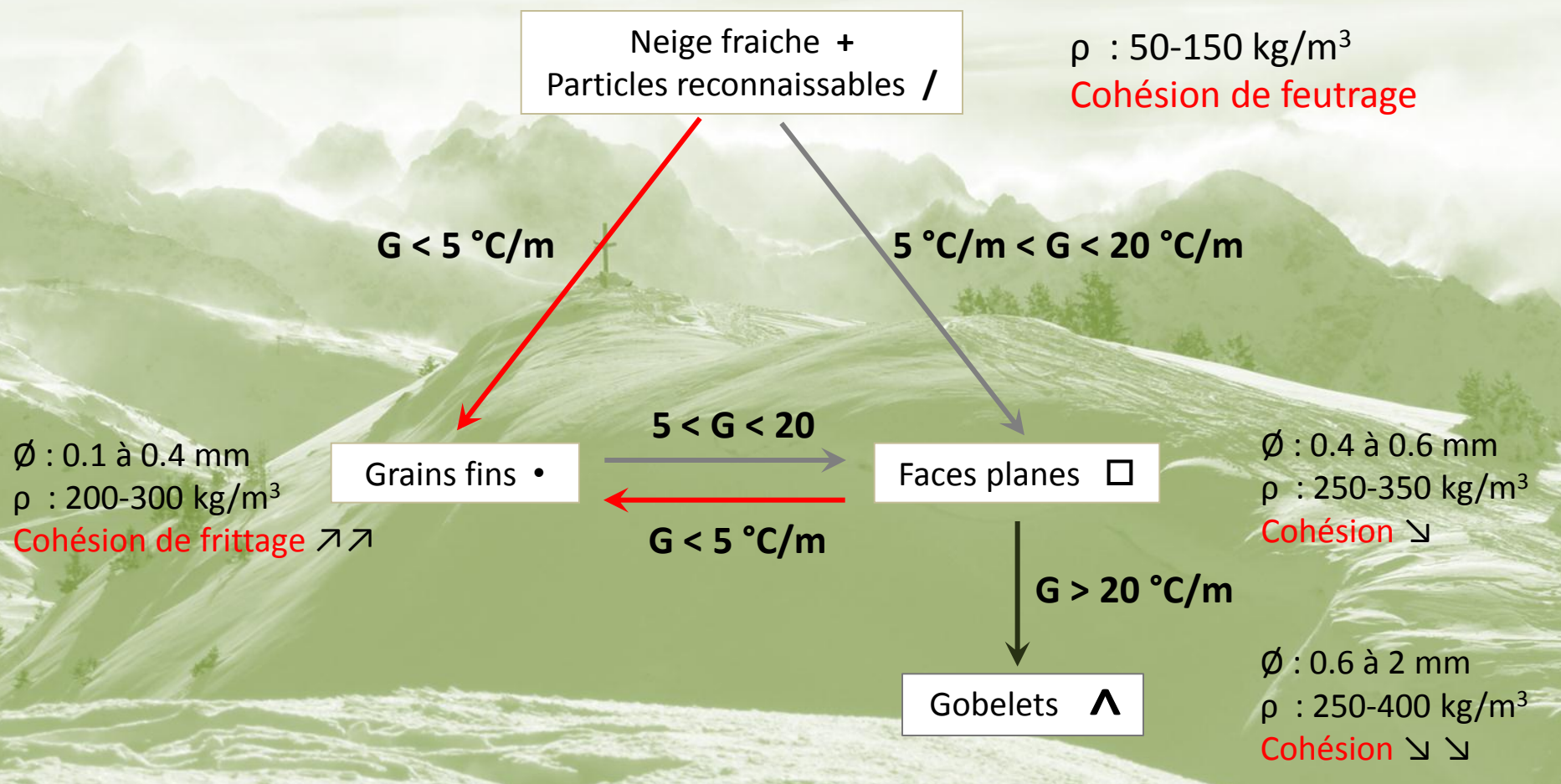
- Transfert de masse (par sublimation puis condensation solide) depuis les zones « chaudes » vers les zones « froides »
- Forte angularité des grains, par cristallisation dans le système hexagonal
- Formation de grains à faces planes, et de gobelets (givre de profondeur)



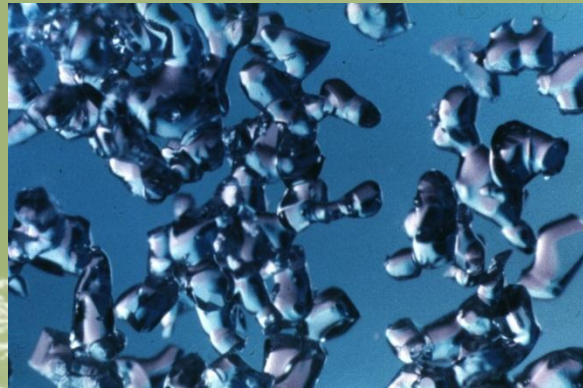
exige de forts gradients

**Effet de rayon de courbure**

d'autant plus marqué que la température est élevée



- Lorsque le gradient de température entre la base et le sommet de la couche de neige est faible ( $< 5\text{ °C}$ ), des grains fins se forment par **effet de rayon de courbure**.
- Lorsque le gradient de température augmente ( $> 5\text{ °C}$ ), l'effet de rayon de courbure est concurrencé par le phénomène de **givrage**. Des grains à face plane ou des gobelets se forment.
- Phénomène de **frittage** : des ponts de glace apparaissent entre les grains, d'autant plus facilement que les grains sont petits.

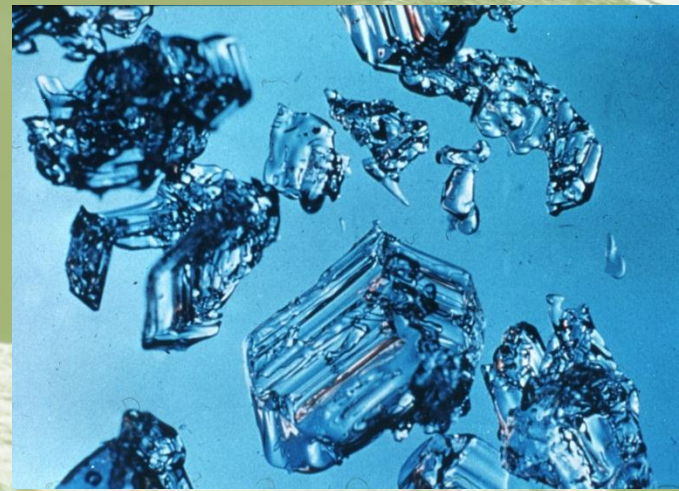


**Grains fins**

- Au cours de l'hiver, les périodes froides vont favoriser le développement de grains faiblement liés les uns aux autres (faces planes, gobelets : givre de profondeur)
- Ceci d'autant plus facilement que la hauteur du manteau est faible (début d'hiver, hiver faiblement enneigé)
- Ce givre se forme par échange vertical de matière sous l'effet du gradient de température entre le sol et la surface de la couche de neige
- Faible connexion entre les grains, faible cohésion



**Givre de surface**



**Givre de profondeur**

### La teneur en eau liquide (TEL) : % eau liquide (en masse)

Neige sèche : TEL = 0 %

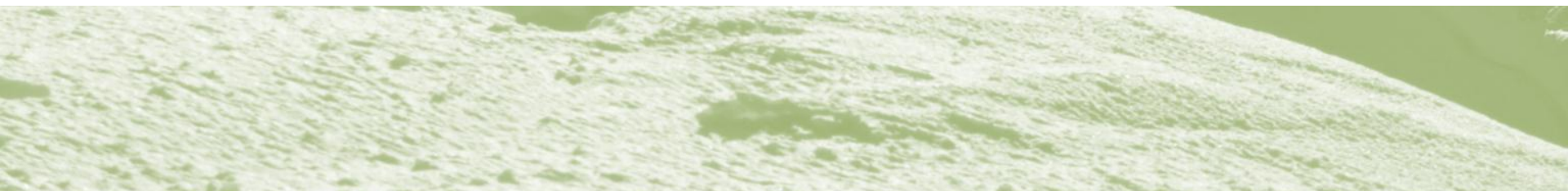
Augmentation de la TEL : par apport de chaleur (fonte de la neige en surface) ou de pluie

La TEL n'est pas la même en tout point du manteau  
(hétérogénéité du manteau : l'eau s'infiltré le long de chemins de percolation)

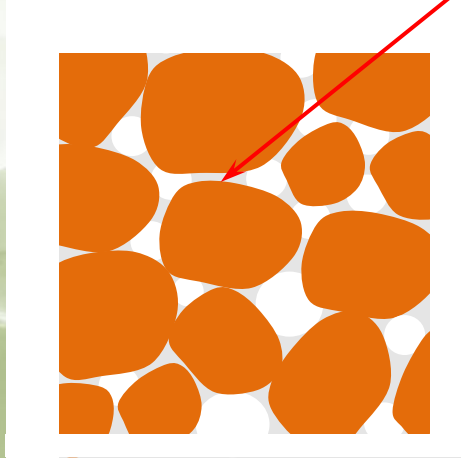
On distingue 2 régimes :

- Faibles TEL (TEL < 2 %)
- Fortes TEL (TEL > 7 %)
- Capacité de rétention du manteau (saturation en eau liquide) : TEL ~ 12 %

Lorsqu'en un point du manteau la TEL > 0 %, la température en ce point est nulle  
(température de fusion de la glace)



Pont capillaire



TEL = 2 %

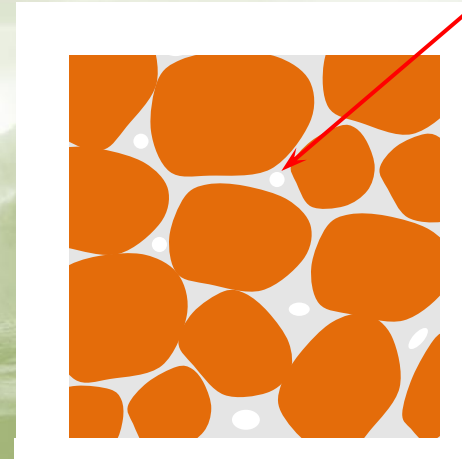
Régime non saturé

Présence : de ponts capillaires  
de forces capillaires



Cohésion

Bulle de vapeur d'eau



TEL = 10 %

Vers la saturation

Disparition : des ponts capillaires  
des forces capillaires



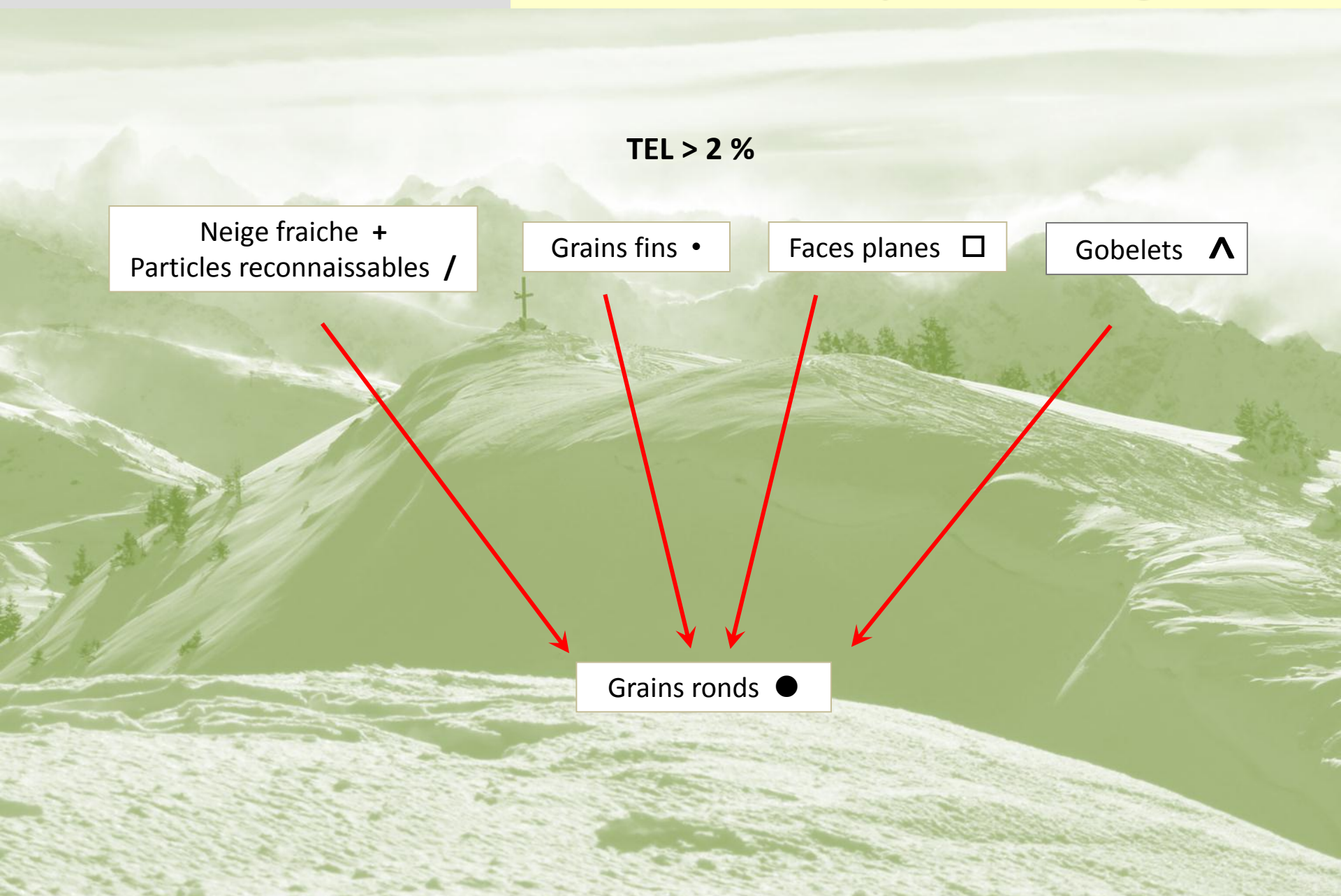
Perte de cohésion

- Au cours du printemps, l'alternance de périodes chaudes (journées), et froides (nuits), va favoriser la circulation d'eau liquide et les cycles de gel – dégel
- L'eau liquide peut circuler entre les grains, favorisant les échanges de masse et de chaleur
- Une neige à grains ronds se forme (névé), d'autant plus rapidement que la TEL est élevée
- Le nombre de contacts par grain croît, les espaces vides se combler, la densité résultante augmente : jusqu'à celle de la glace ! ( $915 \text{ kg/m}^3$ )



**Grains ronds**





TEL > 2 %

Neige fraîche +  
Particules reconnaissables /

Grains fins •

Faces planes □

Gobelets ^

Grains ronds ●

- Les couches de neige au sol constituent le manteau
- Le manteau représente une « mémoire » de l'hiver
- Il apparaît comme un empilement de strates
- Chaque strate peut être reliée à un événement climatique de l'hiver (chutes de neige, redoux, période ventée, période froide, etc)



- Chaque strate est homogène, et possède une cohésion propre
- Les faiblesses mécaniques du manteau se situent au niveau des interfaces entre les strates
- D'un point de vue pratique, sur le terrain, on ne peut examiner que la stabilité des strates supérieures du manteau
- Plus le nombre de strates est important (chutes de neige fréquentes), plus la stabilité du manteau est compromise

## Méthode pratique :

**La strate supérieure est-elle cohérente** (a-t-elle une cohésion) ?

**Non** : Faible danger de plaque  
(situation survenant immédiatement après une chute de neige par températures basses et sans vent)

**Oui** : La stabilité de la strate est liée à la résistance de son interface avec la strate inférieure

## Cohésion de la neige

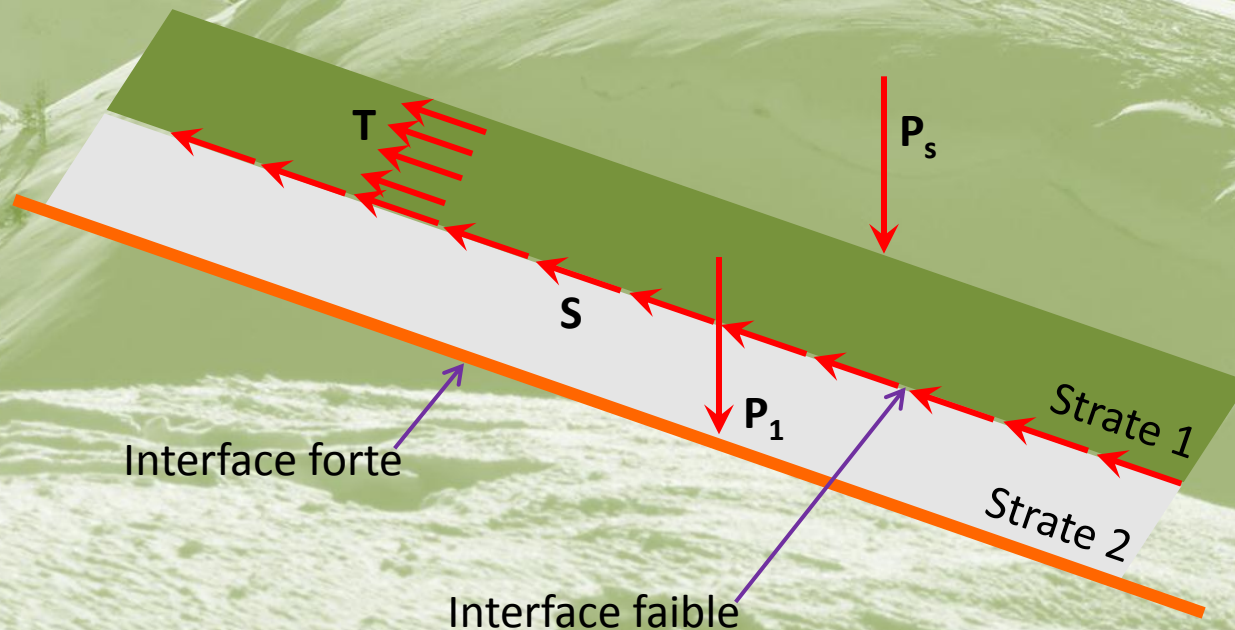
- **Neige fraîche** : cohésion de **feutrage**  
fonction de la forme des particules (présence de dendrites), de l'action du vent
- **Neige sèche transformée** : cohésion de **frittage**  
fonction de la taille des particules, de la température, du gradient de  $t^\circ$
- **Neige humide** : cohésion par **ponts de glace** / **ponts capillaires**  
fonction du nombre et de la taille des ponts / fonction de la TEL



- Surcharge ( $P_s$ )
- Faible résistance au cisaillement ( $S$ ) à la base de la strate
- Des efforts de traction ( $T$ ) se développent dans la strate
- Rupture dans la zone de faible résistance en traction

(1) La résistance au cisaillement ( $S$ ) ne suffit plus à équilibrer les efforts ( $P_s + P_1$ )

(2) Des efforts de traction ( $T$ ) apparaissent



## Equilibre mécanique de la strate

$$T = (P_s + P_1) \sin(\alpha) - S$$

Surcharge

Poids de la strate

Résistance  
au  
cisaillement

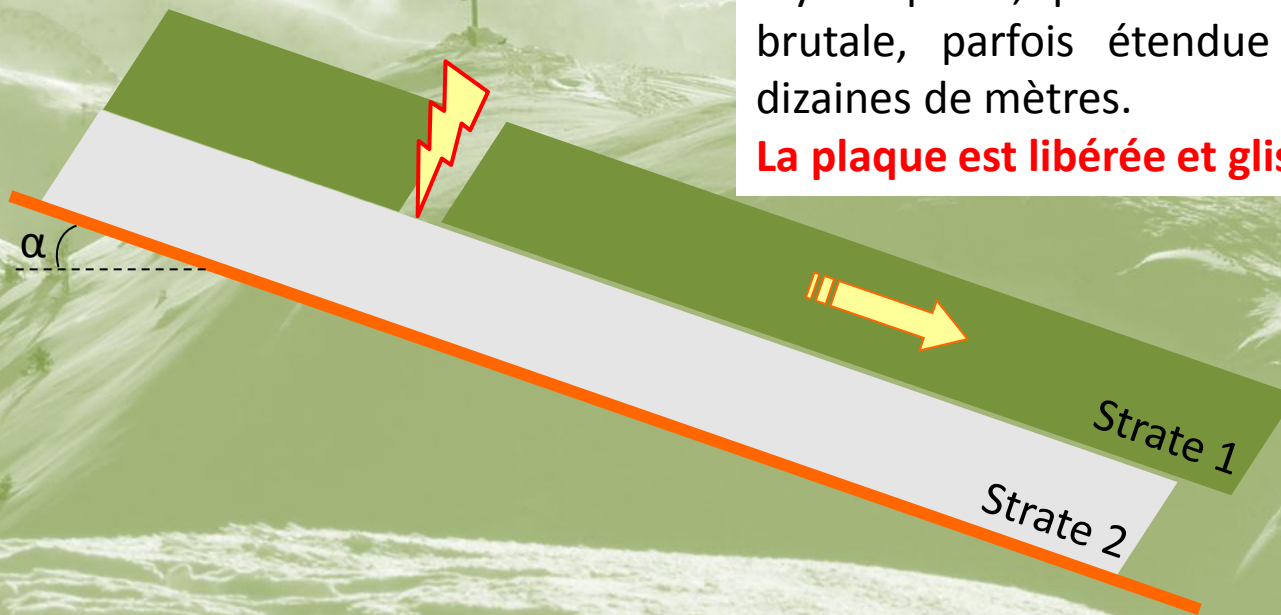
T est élevée lorsque :

- La pente ( $\alpha$ ) est forte
- La strate est épaisse ( $P_1$  élevé)
- La surcharge est importante ( $P_s$  élevé)
- La résistance au cisaillement  $S$  est faible

Que se passe-t-il lorsque  $T$  dépasse la résistance en traction de la strate ?

Il y a rupture, quasi linéaire, très nette et brutale, parfois étendue sur plusieurs dizaines de mètres.

**La plaque est libérée et glisse vers l'aval**



**Facteur favorisant la rupture en traction**

- Pente ( $\alpha$ ) importante  
Attention aux pentes raides
- Strate épaisse ( $P_1$ )
- Surcharge importante ( $P_s$ )  
Mise en place de distances de délestage  
Moins la strate est épaisse, plus l'effet de la surcharge est critique
- Faible résistance en traction de la strate  
Nature de la neige (neige poudreuse / gains fins)  
Profil de pente convexe (induit des tractions élevées)  $\neq$  Profil de pente concave  
Présence d'une falaise
- Faible résistance au cisaillement ( $S$ )  
Présence d'une couche fragile constituant l'interface  
(givre de profondeur, neige roulée)  
Présence d'une croute de regel

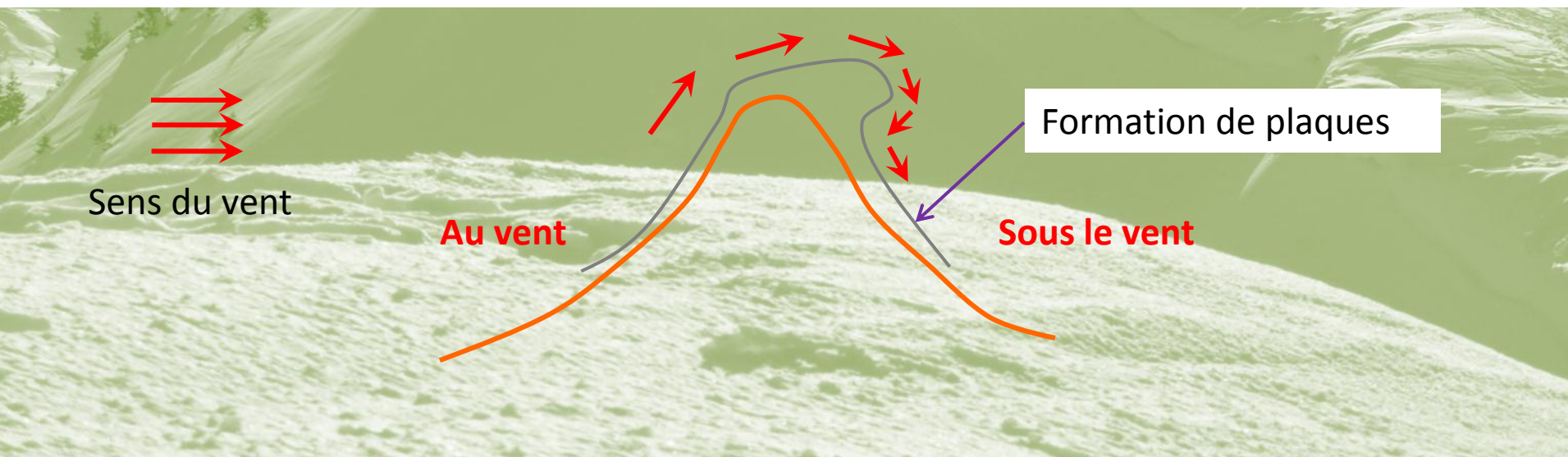


## Facteur favorisant la formation d'une plaque

**Définition** d'une plaque

Strate cohésive ayant un faible ancrage avec le manteau

- Effet du vent : accélère le phénomène de frittage
- Proximité de cols : accélération du vent (effet Venturi)
- Proximité des crêtes : formation de corniche avec différenciation des versants « **au vent** » et « **sous le vent** »
- Reprise de la neige sur le versant au vent
- Dépôt de la neige transportée sur le versant sous le vent

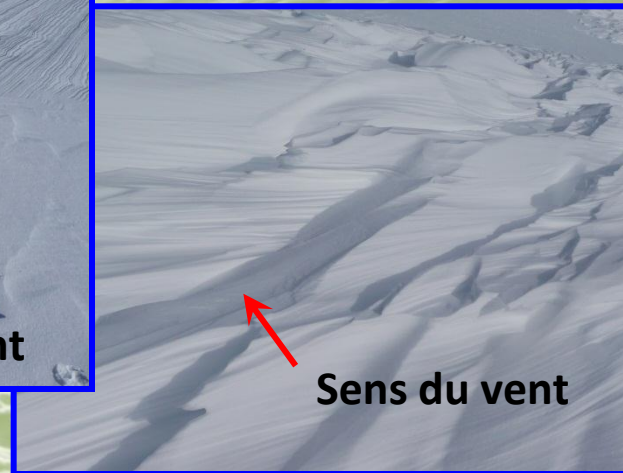


## Signes d'activité éolienne

- Présence de corniches
- Phénomène de chasse neige sur sommets et crêtes
- Surface du manteau neigeux : vaguelettes, rides, zastrugis
- Présence de givre opaque sur les aspérités (branches, poteaux, etc.)



Vagues, rides



Zastrugis

