

# Neige 2<sup>ème</sup> partie

## Le métamorphisme de la neige

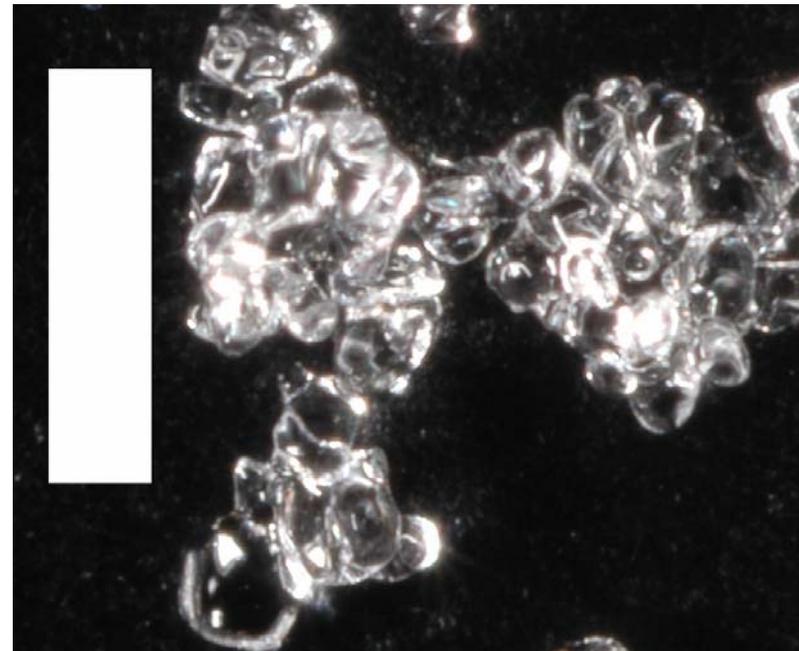
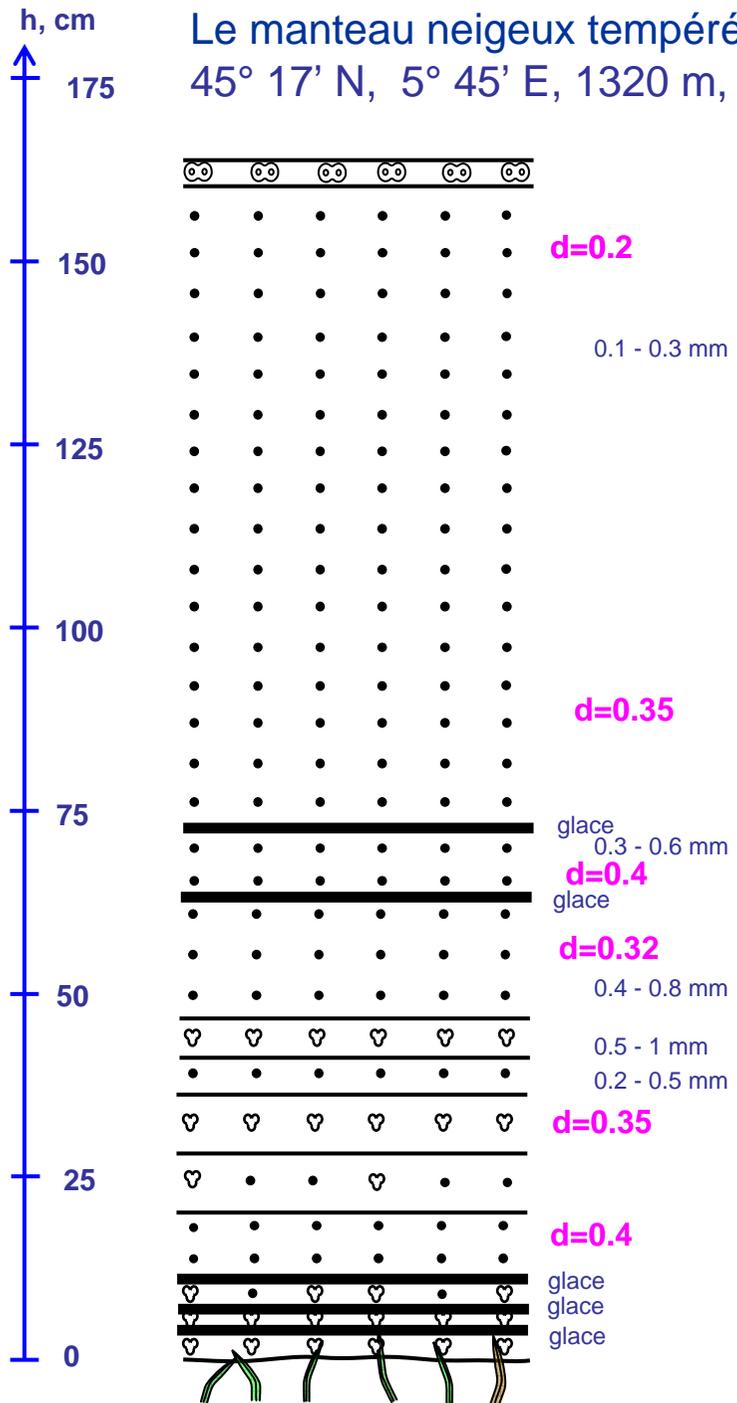
**Métamorphisme : ensemble des phénomènes physiques affectant le manteau neigeux, et produisant des changements dans:**

- La taille des grains
- La forme des grains
- La densité de la neige
- Les propriétés mécaniques de la neige
- Les autres propriétés physiques de la neige: perméabilité, albedo, conductivité thermique ...
- La composition chimique de la neige
- Etc.

Le manteau neigeux tempéré au Col de Porte,  
45° 17' N, 5° 45' E, 1320 m, le 15 mars 2005



Le manteau neigeux tempéré au Col de Porte,  
45° 17' N, 5° 45' E, 1320 m, le 15 mars 2005

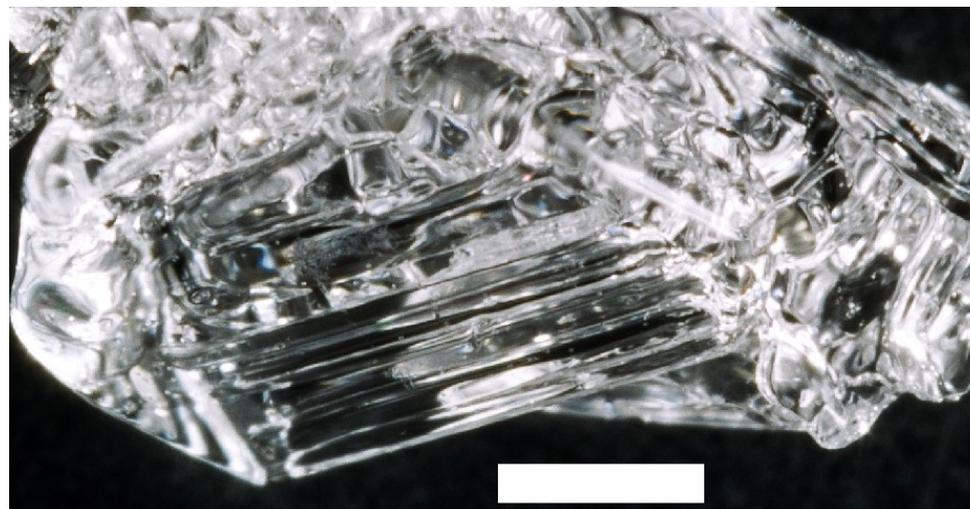
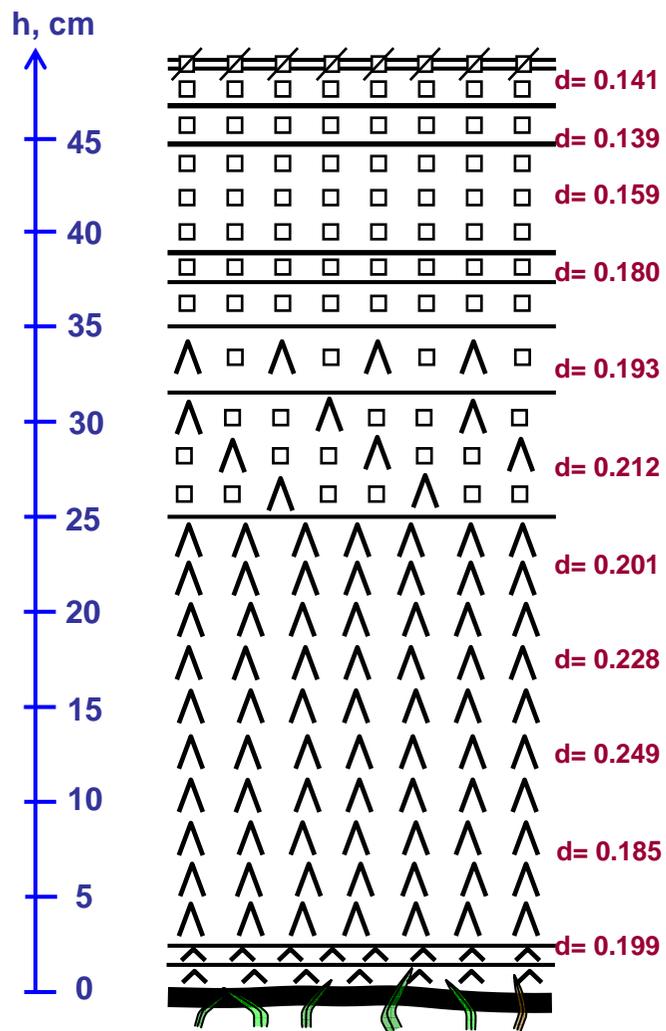


Le manteau neigeux subarctique à Fairbanks,  
Alaska, 64° 52' N, 147° 52' E, le 25 mars 2004

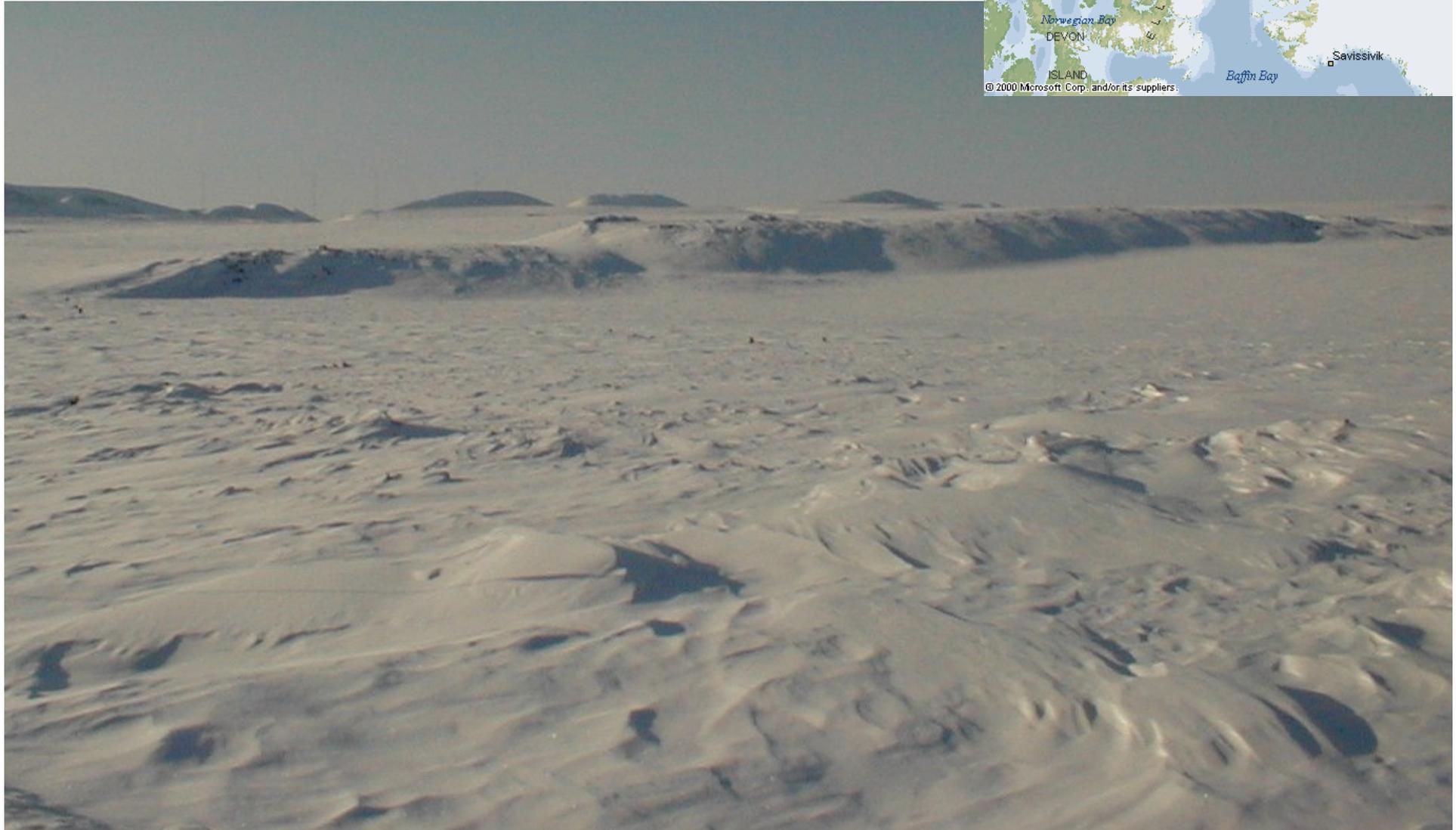




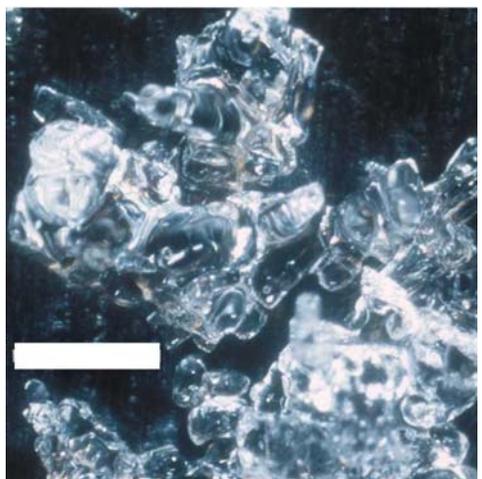
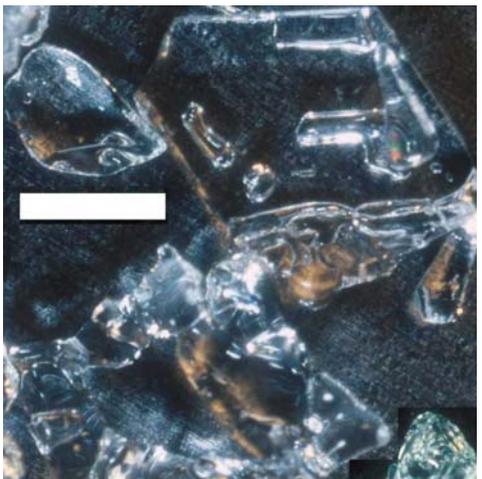
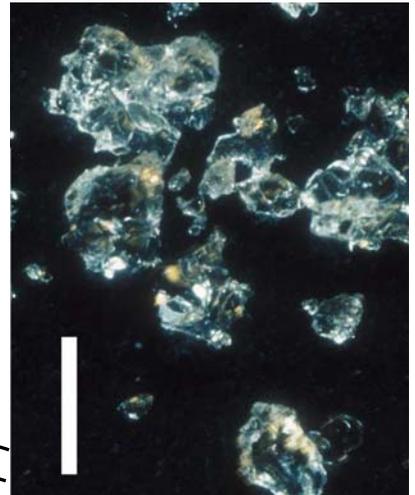
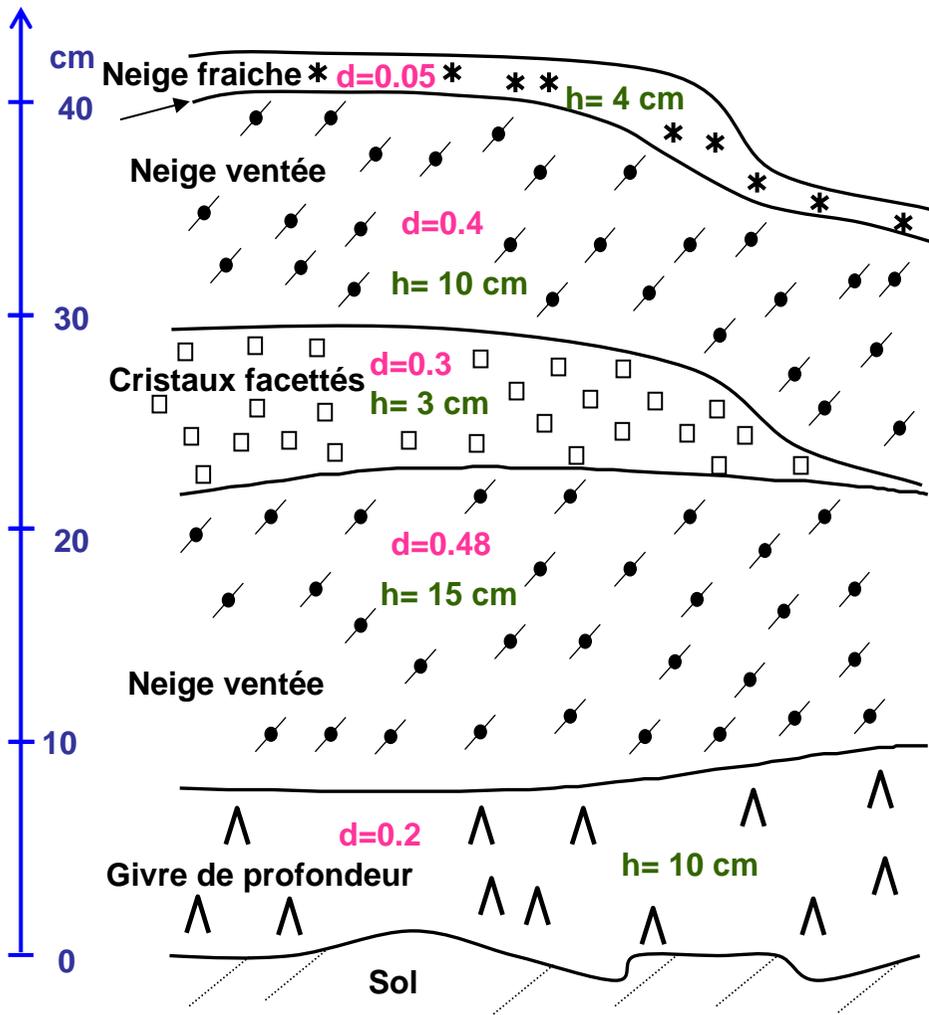
Le manteau neigeux subarctique à Fairbanks,  
Alaska, 64° 52' N, 147° 52' E, le 25 mars 2004



Le manteau neigeux Arctique à Alert,  
82°30'N, 62°20'W le 27 avril 2000



Le manteau neigeux Arctique à Alert,  
 82°30'N, 62°20'W le 27 avril 2000

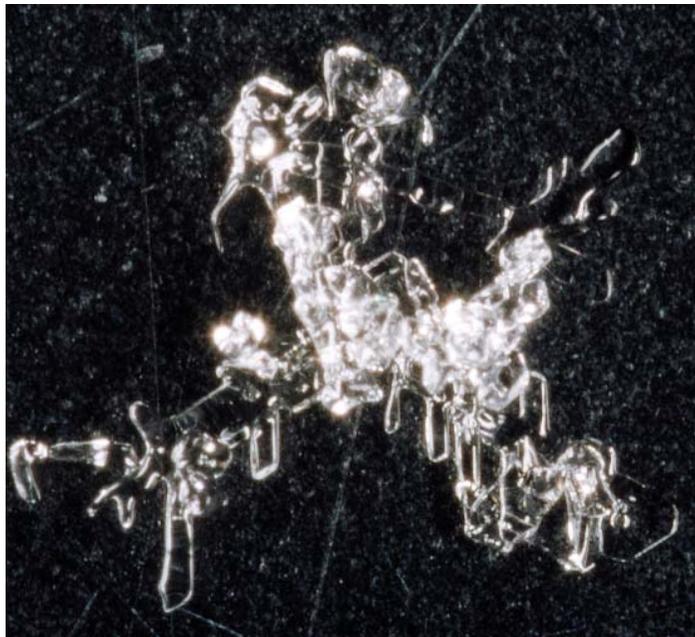
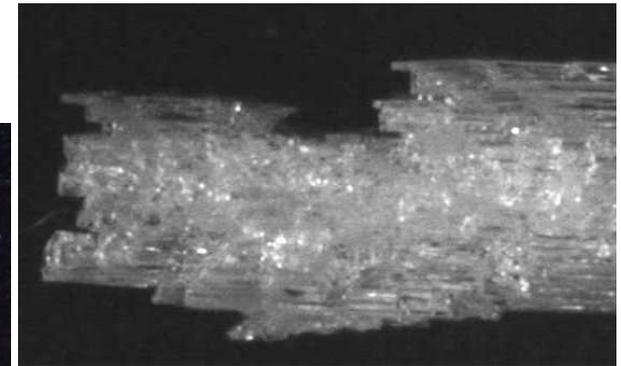
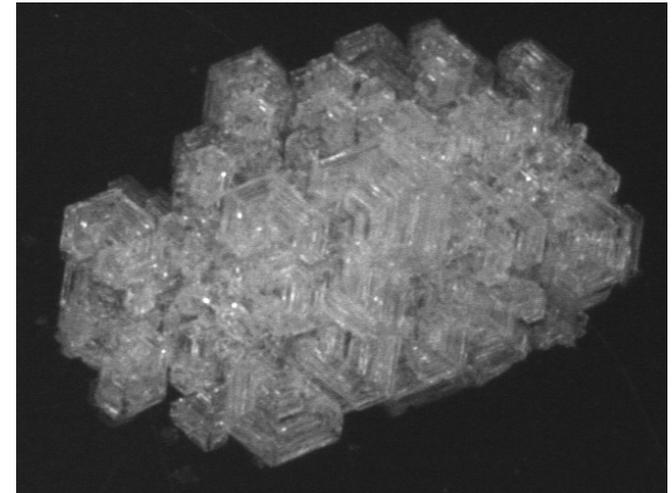
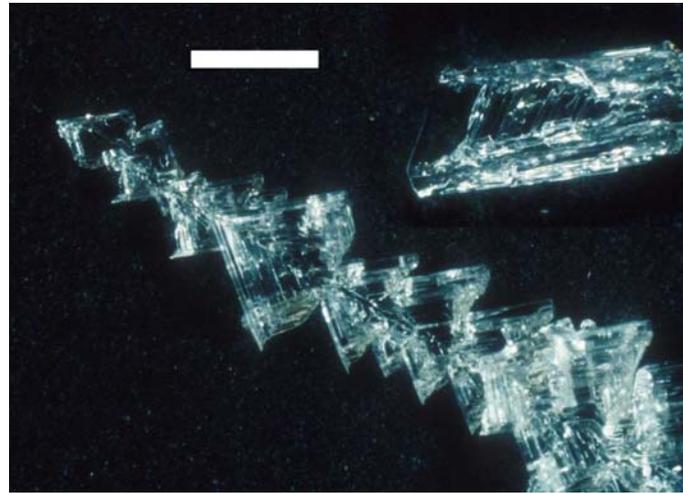


# Principaux types de neige rencontrés dans le manteau neigeux

V Givre de surface

+ Neige fraîche

λ Particules en voie de décomposition, encore reconnaissables



# Principaux types de neige rencontrés dans le manteau neigeux

- Grains fins

- Neige croutée, formée de grains ronds

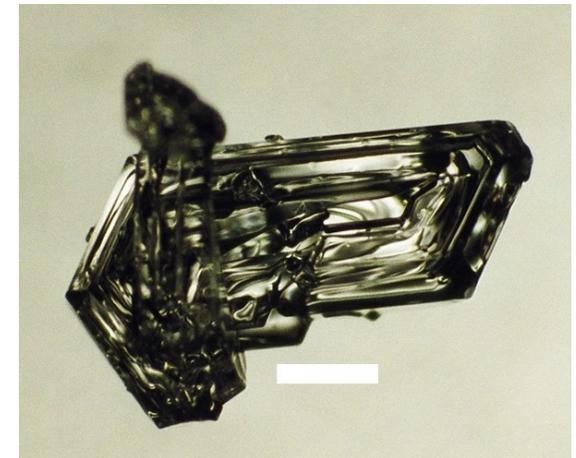
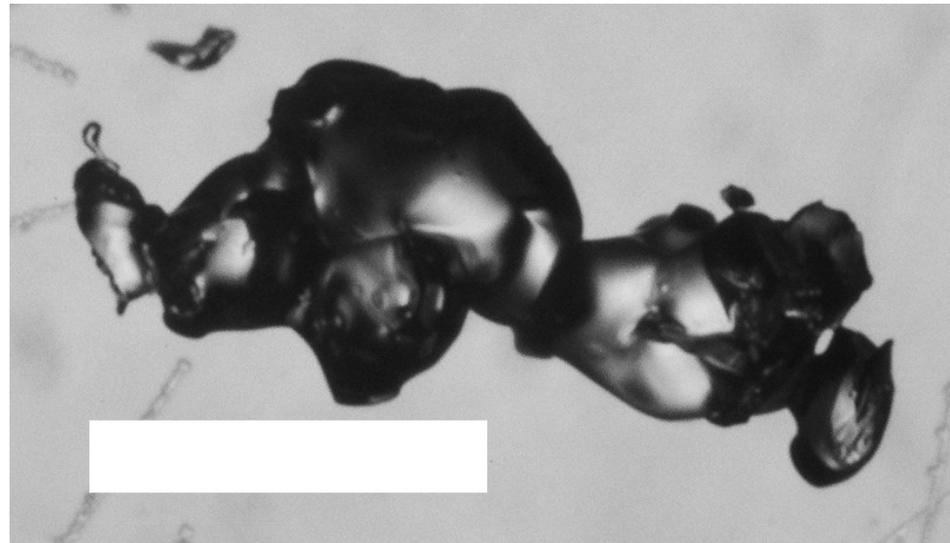
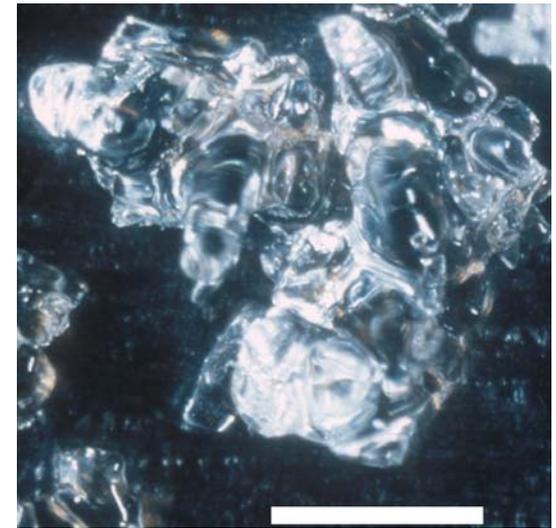
- Cristaux facettés

^

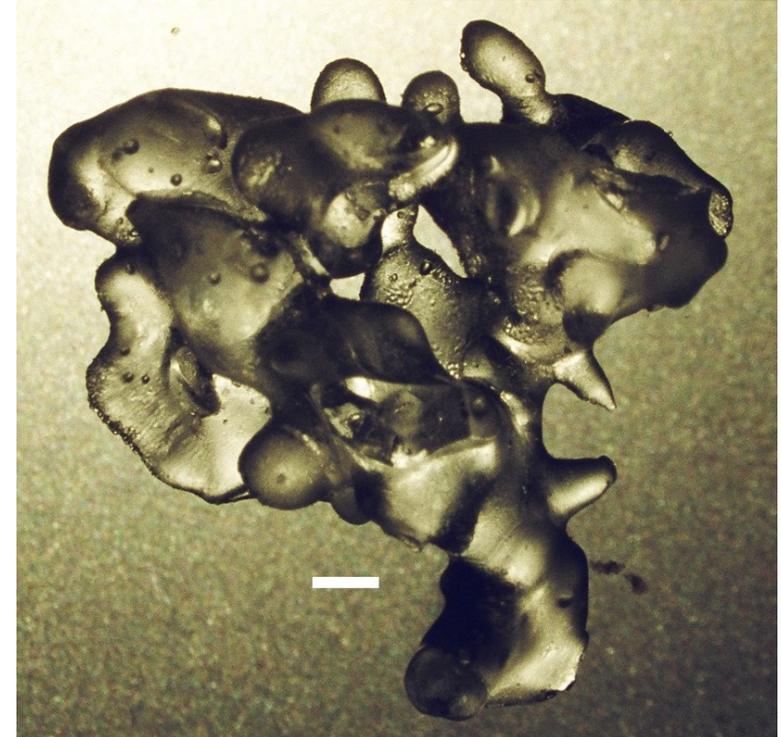
Givre de profondeur

⊐

Formes mixtes  
(facettes avec bords ronds, ou coexistence de facettes et de grains ronds)



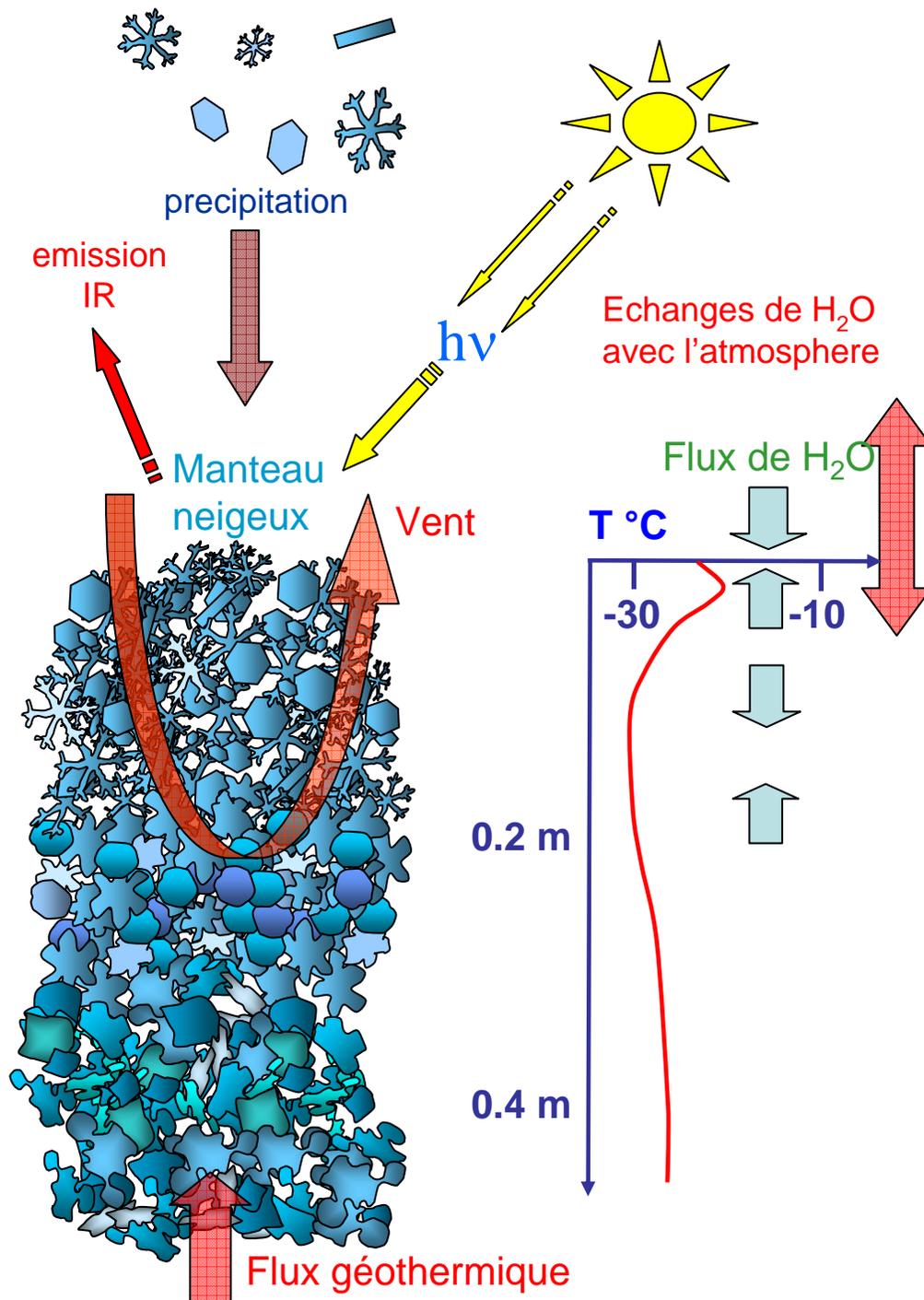
## Principaux types de neige rencontrés dans le manteau neigeux



 Neige humide

 Neige regelée

 Couche de glace



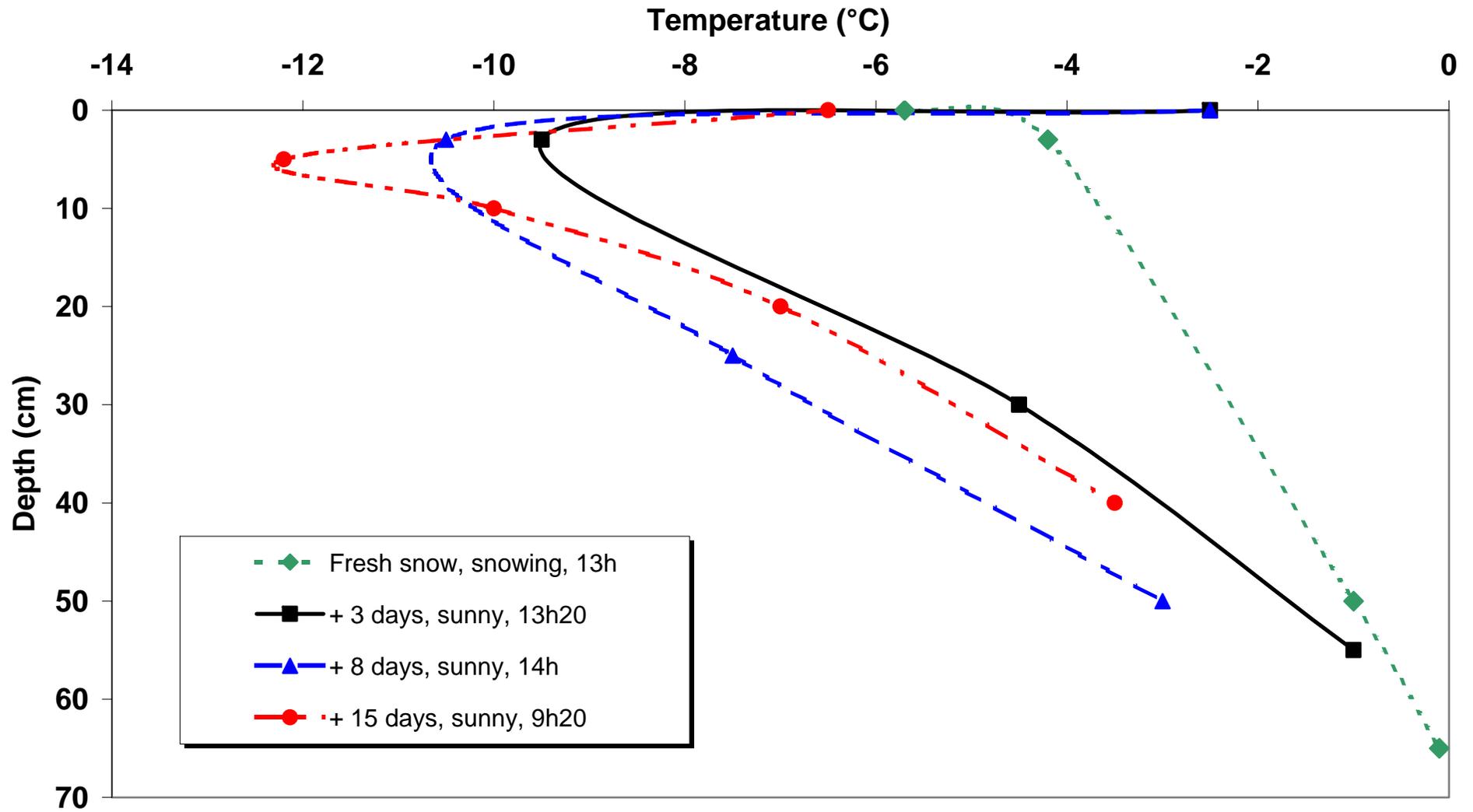
Après la précipitation, la neige est soumise à:

- Refroidissement radiatif
- Réchauffement solaire
- Flux géothermique
- Circulation de vent

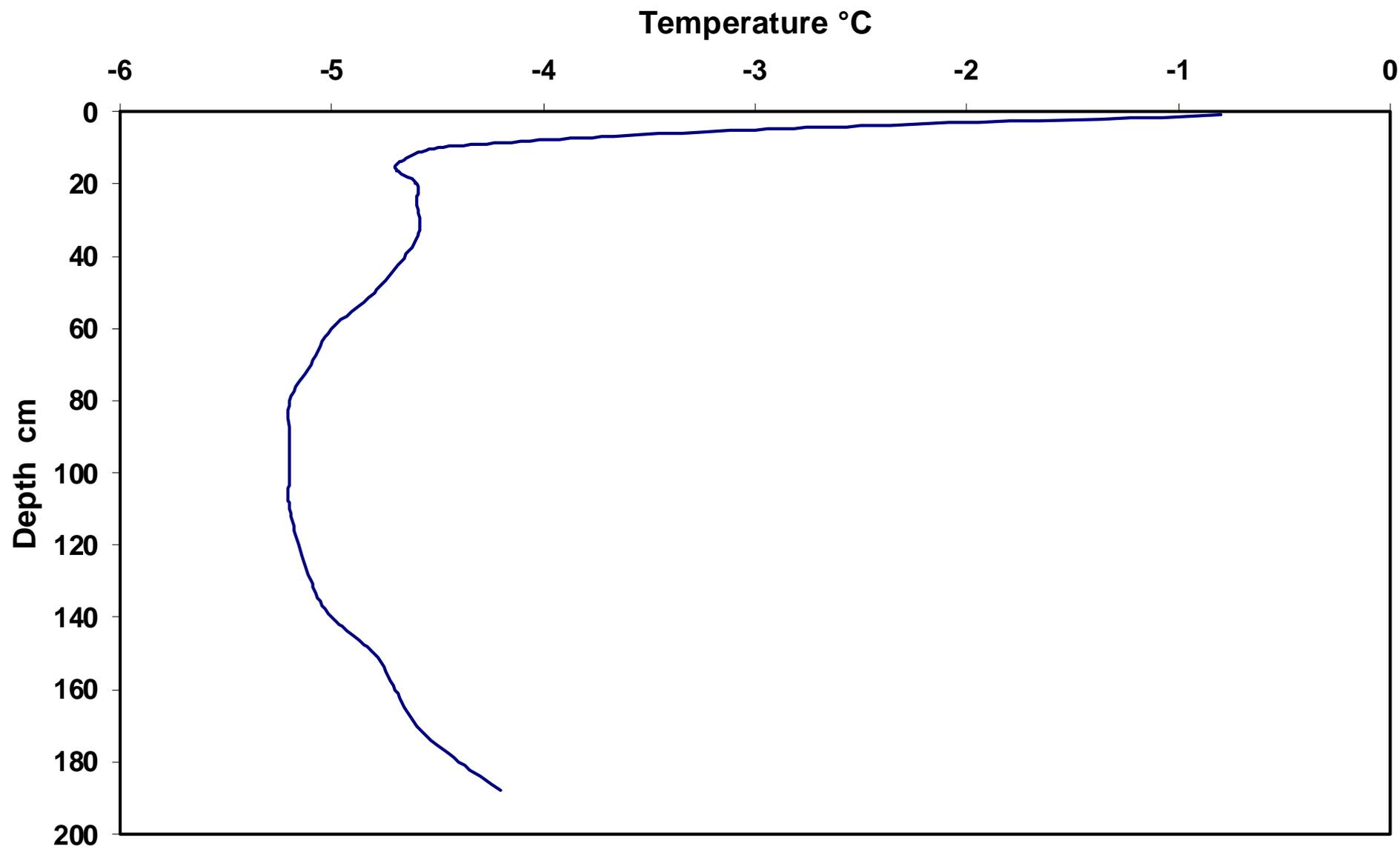
⇒ Etablissement d'un gradient thermique dans le manteau neigeux

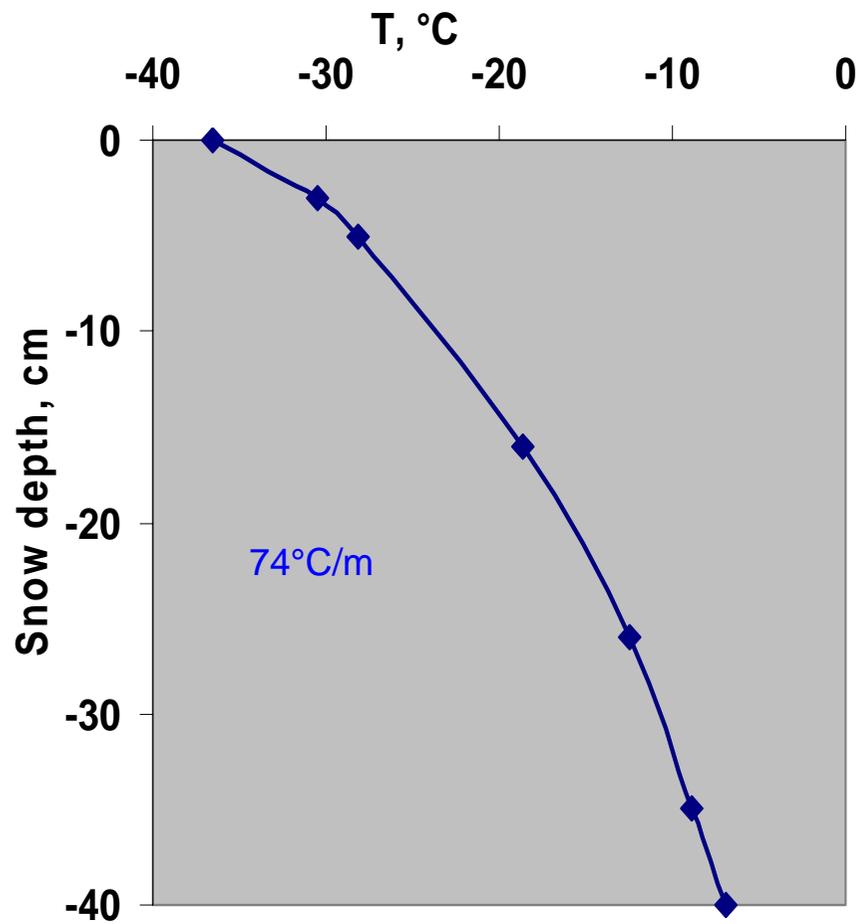
⇒ Echange de vapeur d'eau entre les différentes couches de neige et avec l'atmosphère

# Col de Porte, 20 January - 4 February 1998

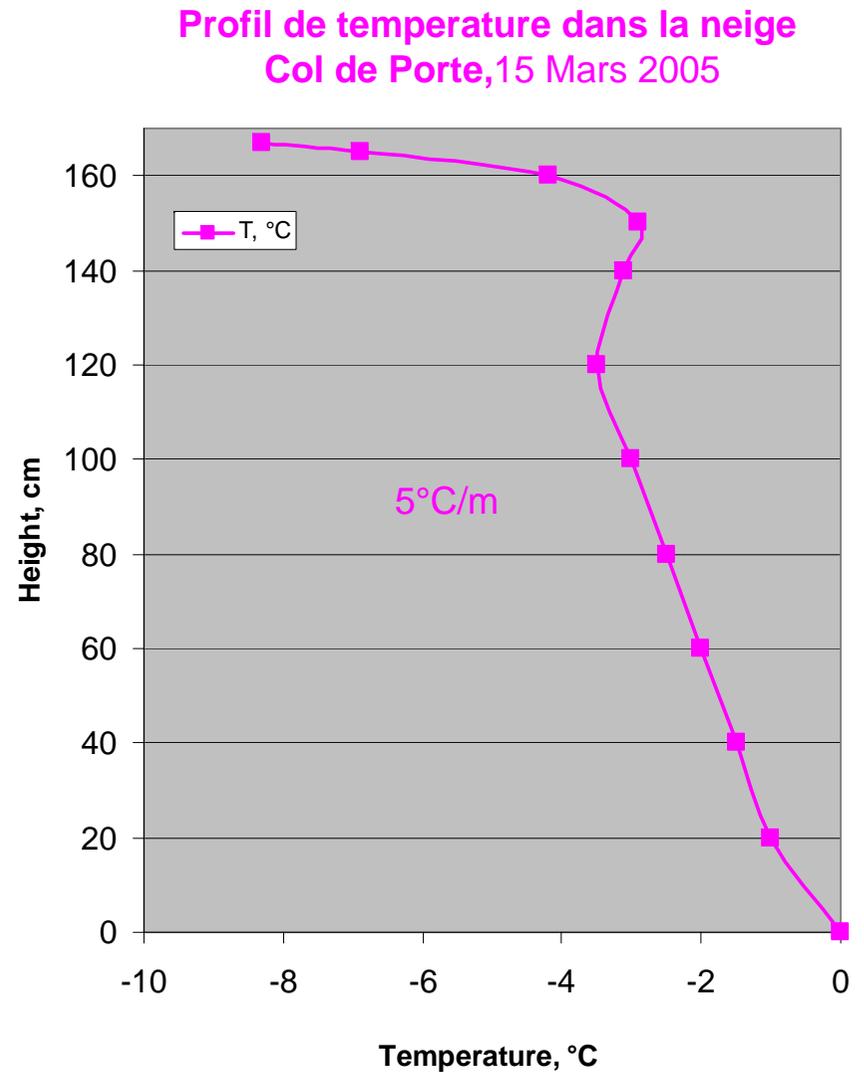


**Glacier d'Argentières, zone d'ablation, alt. : 2660 m, 12 avril 2002, 11 h**

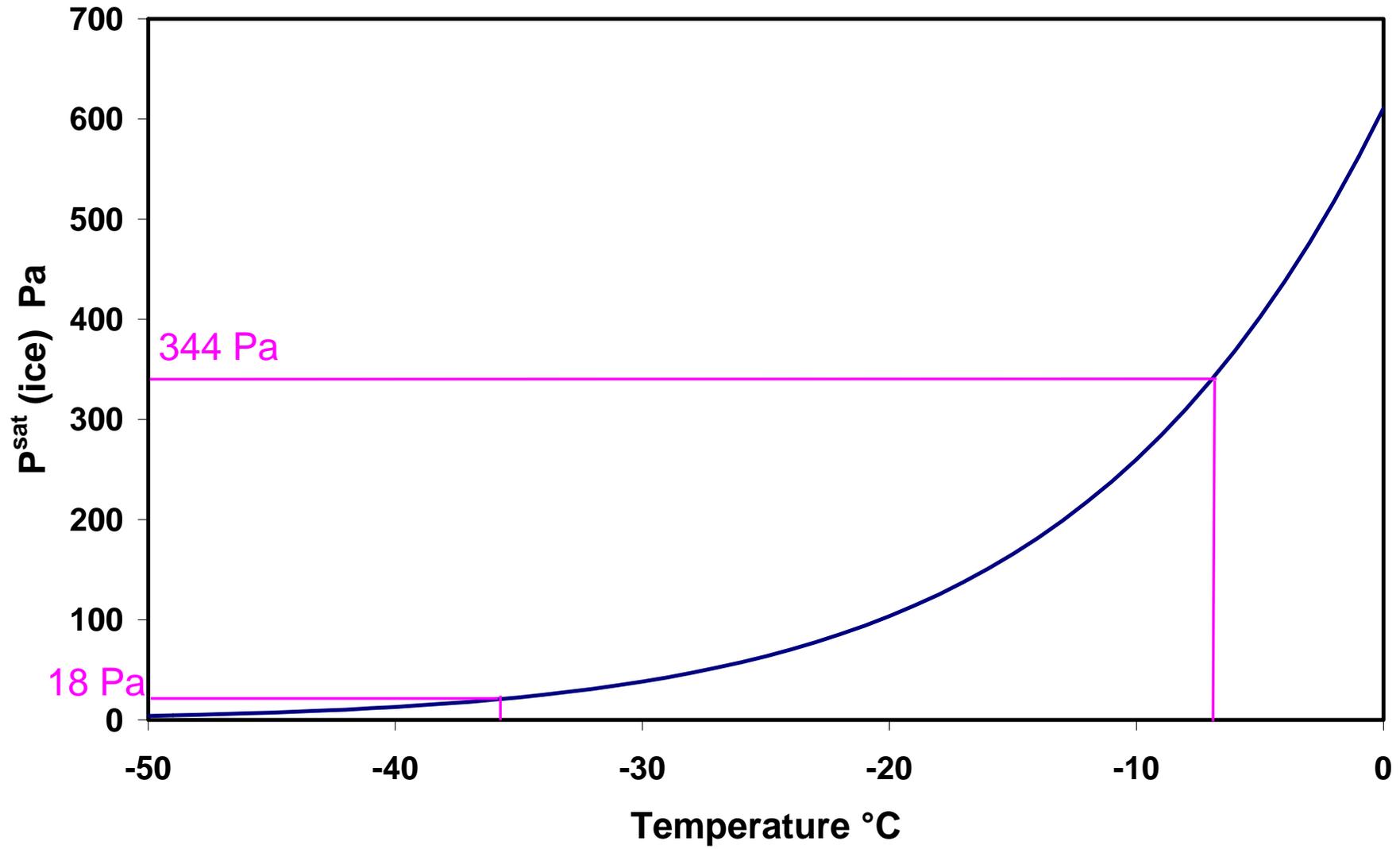




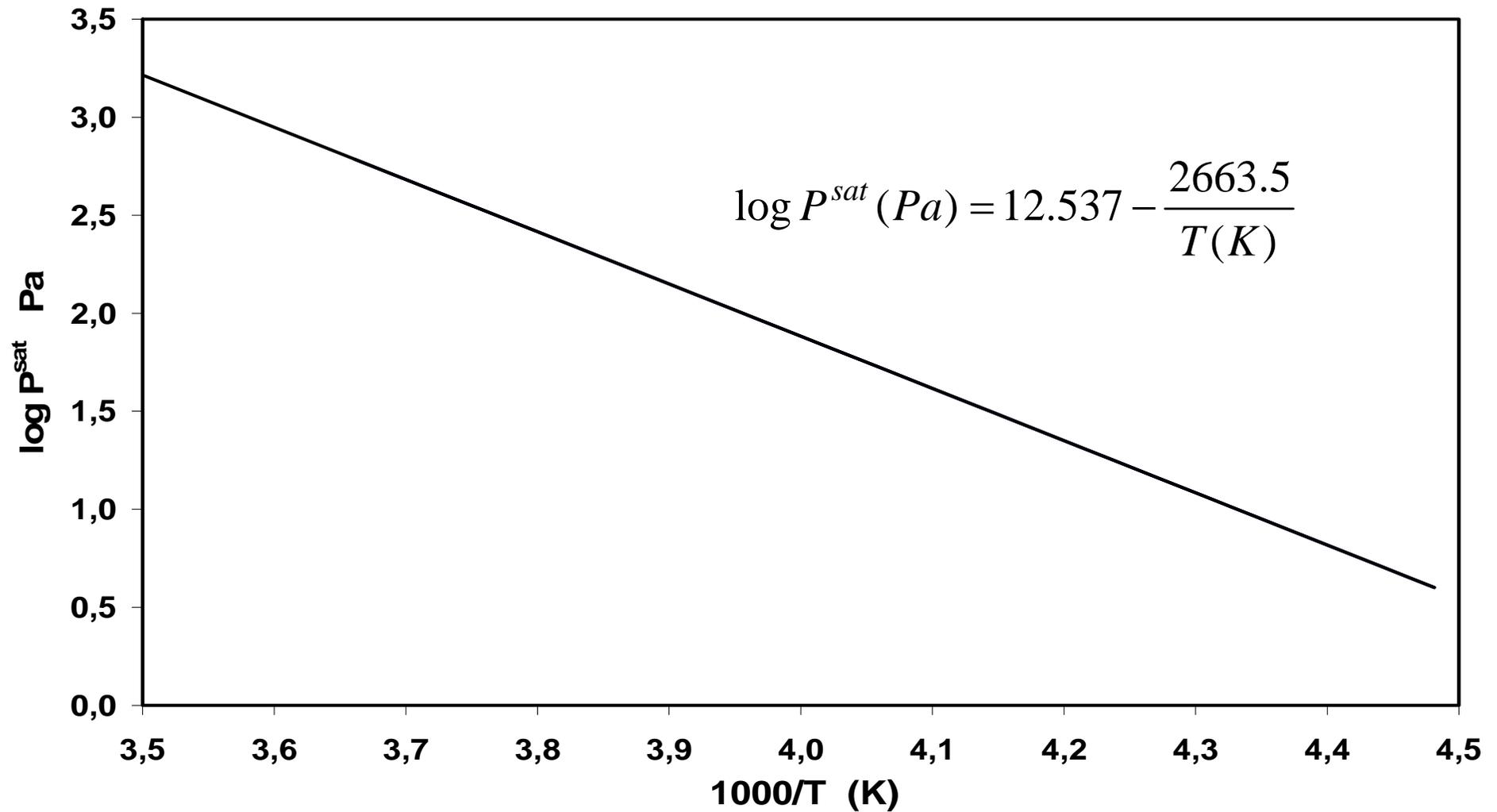
**Profil de temperature dans la neige  
Fairbanks, 16 January 2004**



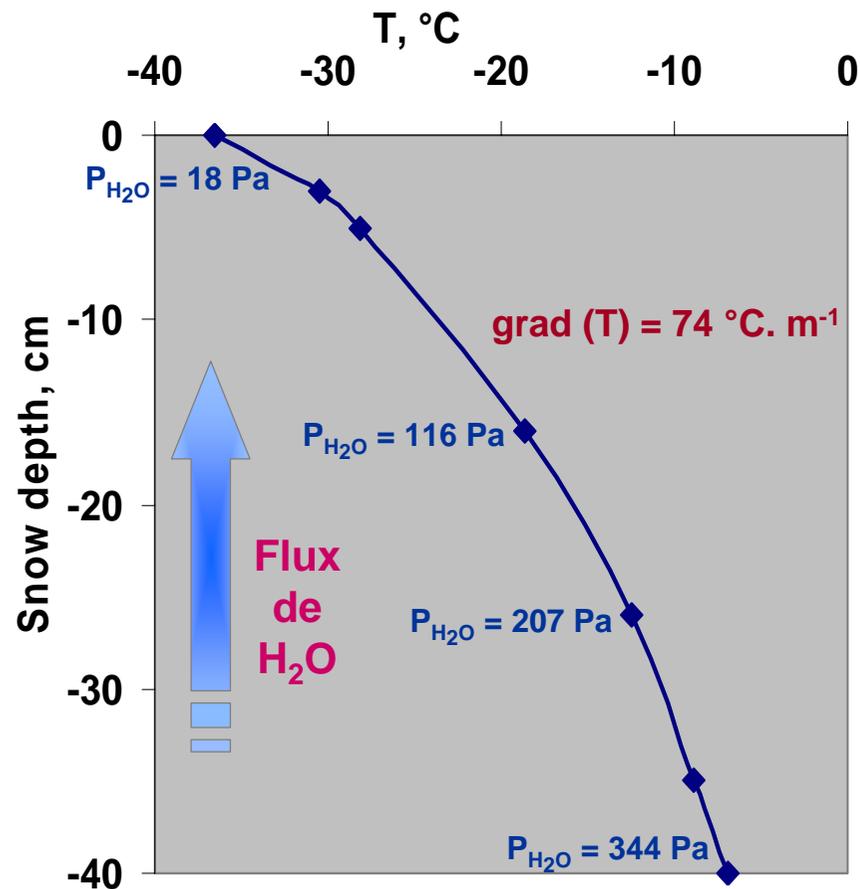
**Profil de temperature dans la neige  
Col de Porte, 15 Mars 2005**



Loi de Clapeyron :  $\frac{d \ln P^{sat}}{d(1/T)} = -\frac{\Delta H_{sub}}{R}$        $\Delta H_{sub} = -50973 \text{ J/mol}$

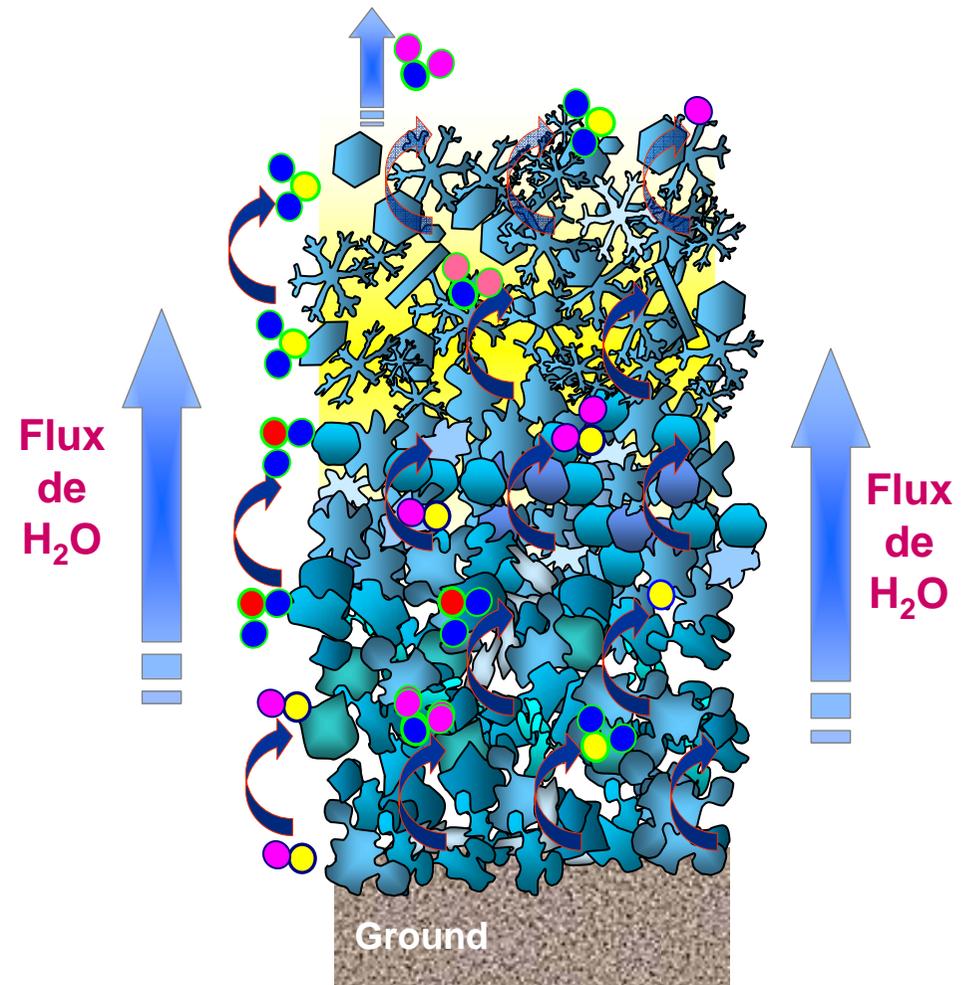


# Gradient de T et flux de vapeur d'eau



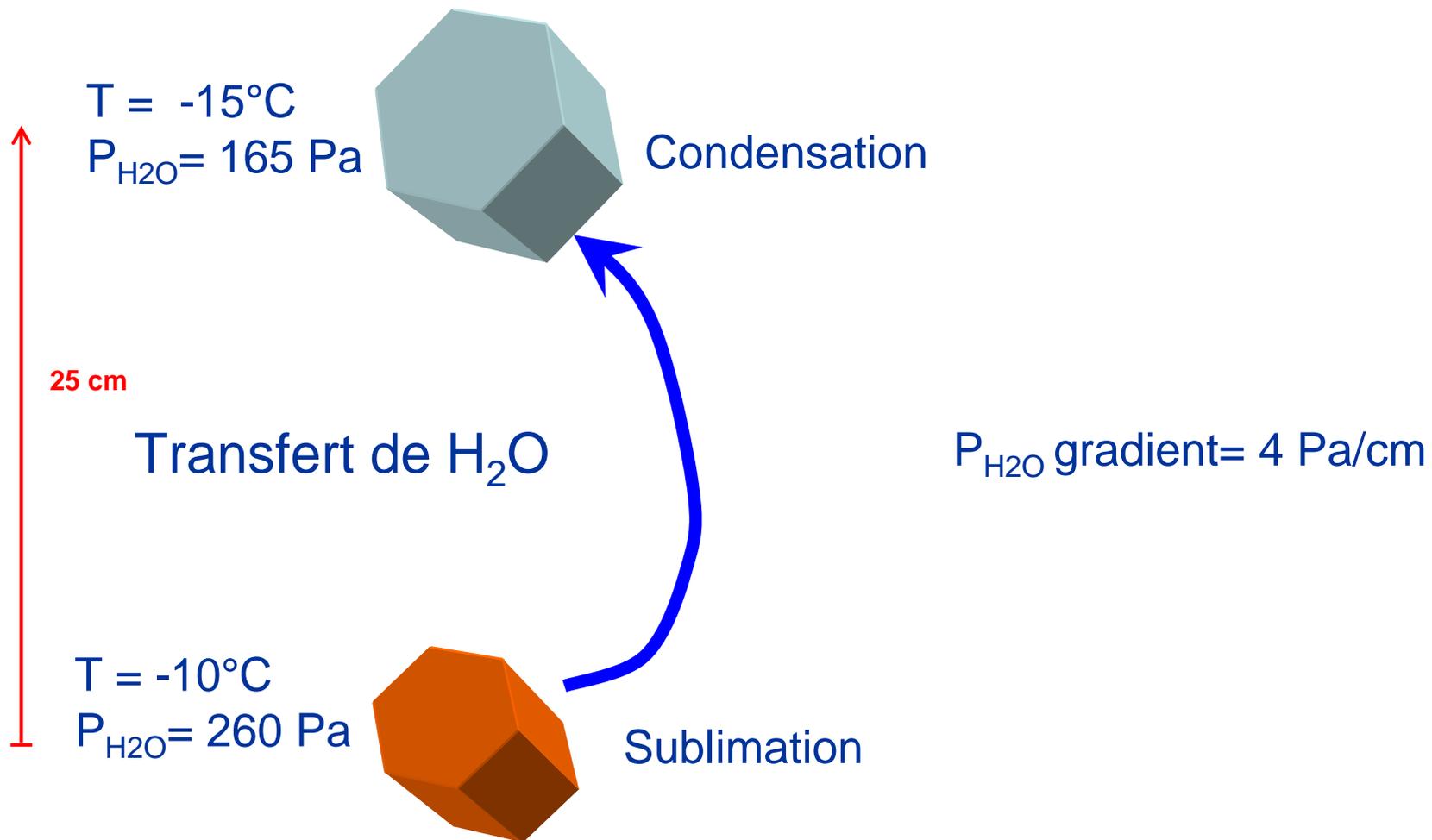
Profil de temperature dans la neige  
Fairbanks, 16 January 2004

## Métamorphisme de la neige : Échange de vapeur d'eau entre les couches et avec l'atmosphère



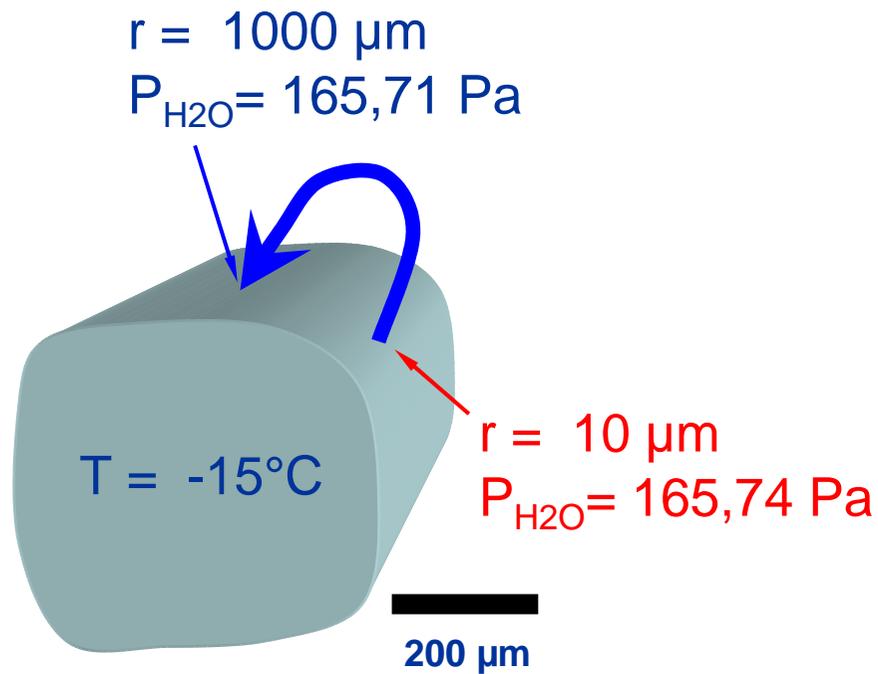
Le moteur du métamorphisme sec:  $\nabla H_2O$ , causé par :

1- Le gradient de temperature



Le moteur du métamorphisme sec:  $\nabla H_2O$ , causé par :

2- Le gradient de rayon de courbure

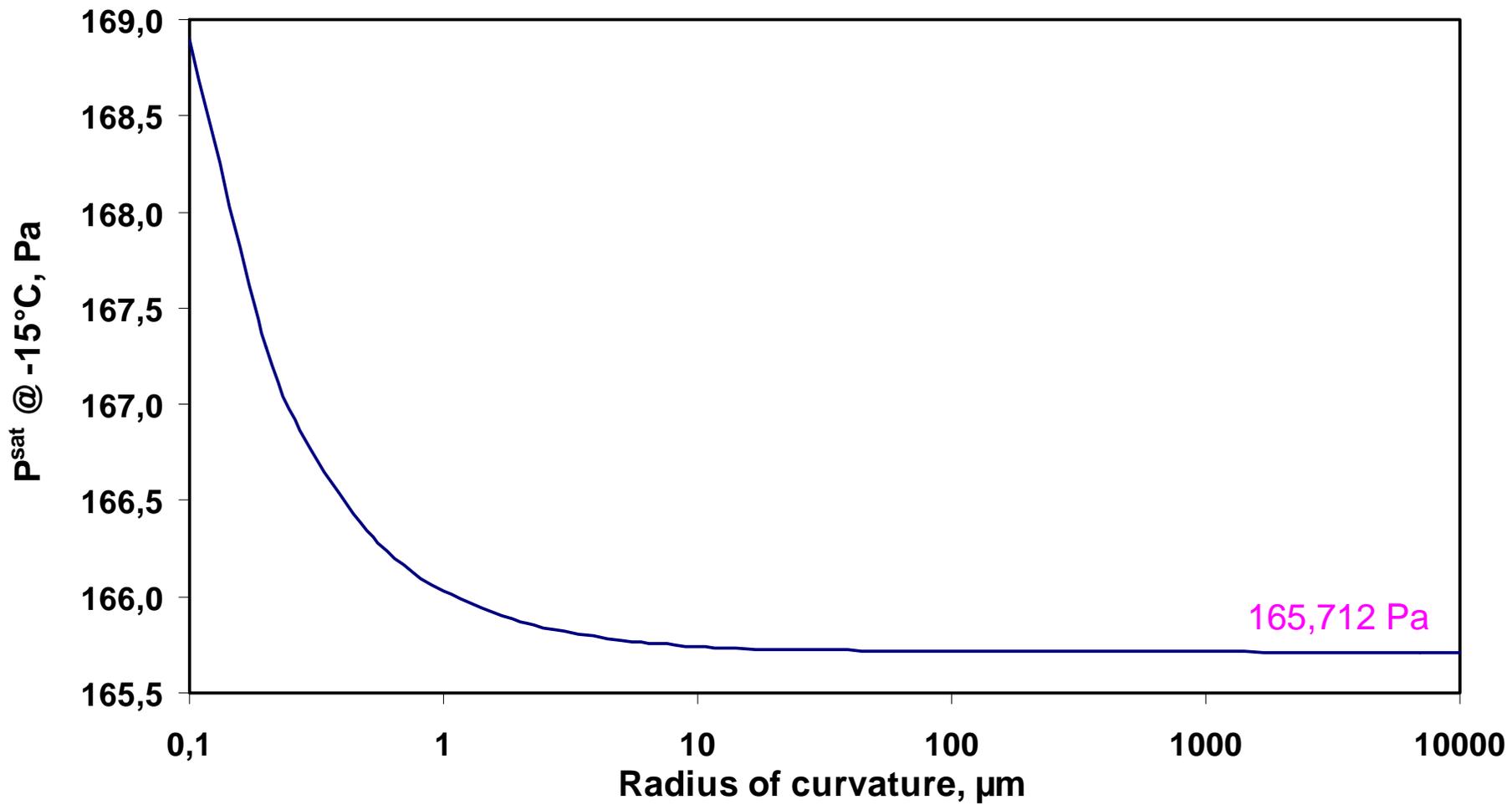


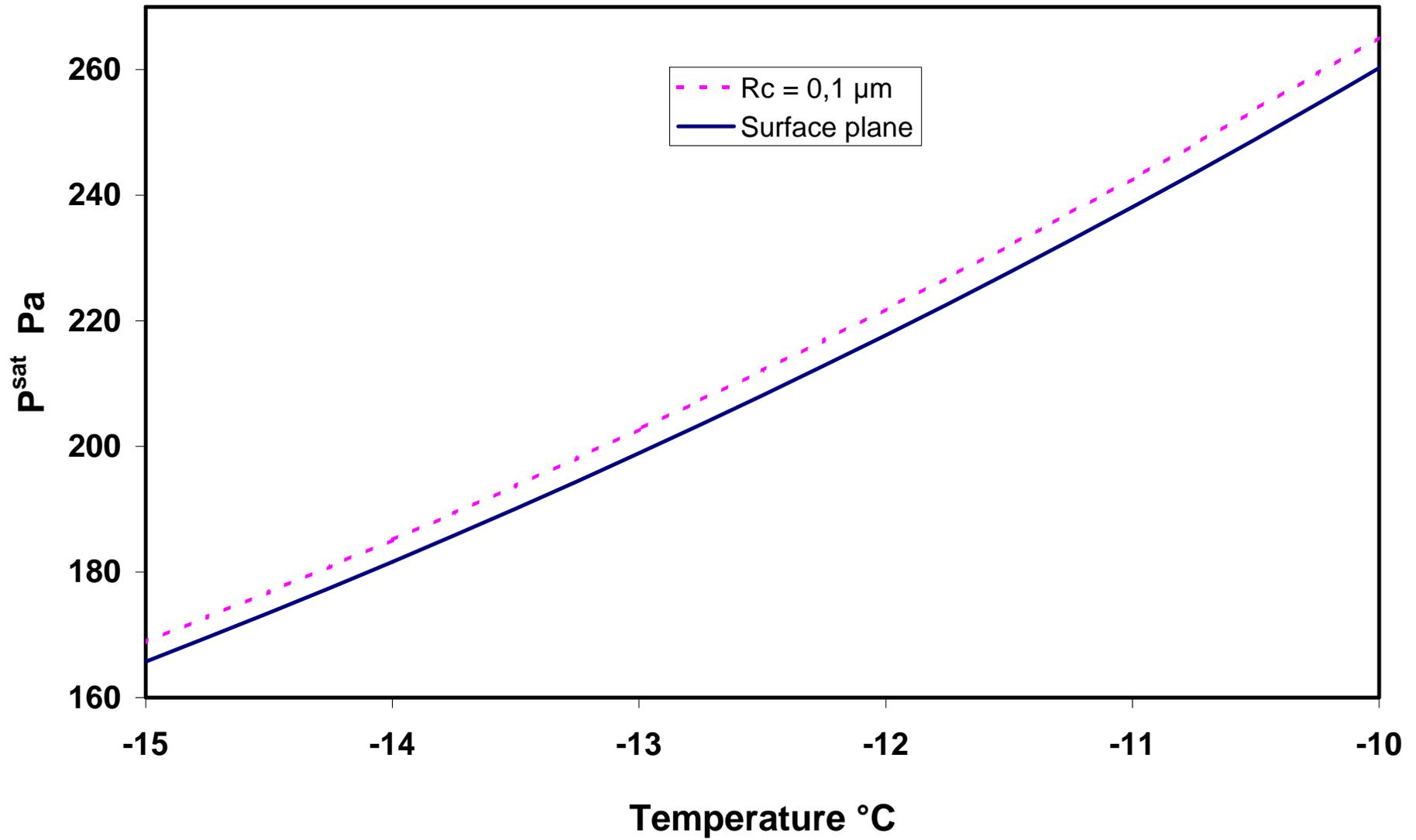
$$P_{H_2O}(r) = P_0 e^{2\gamma V_m / rRT}$$

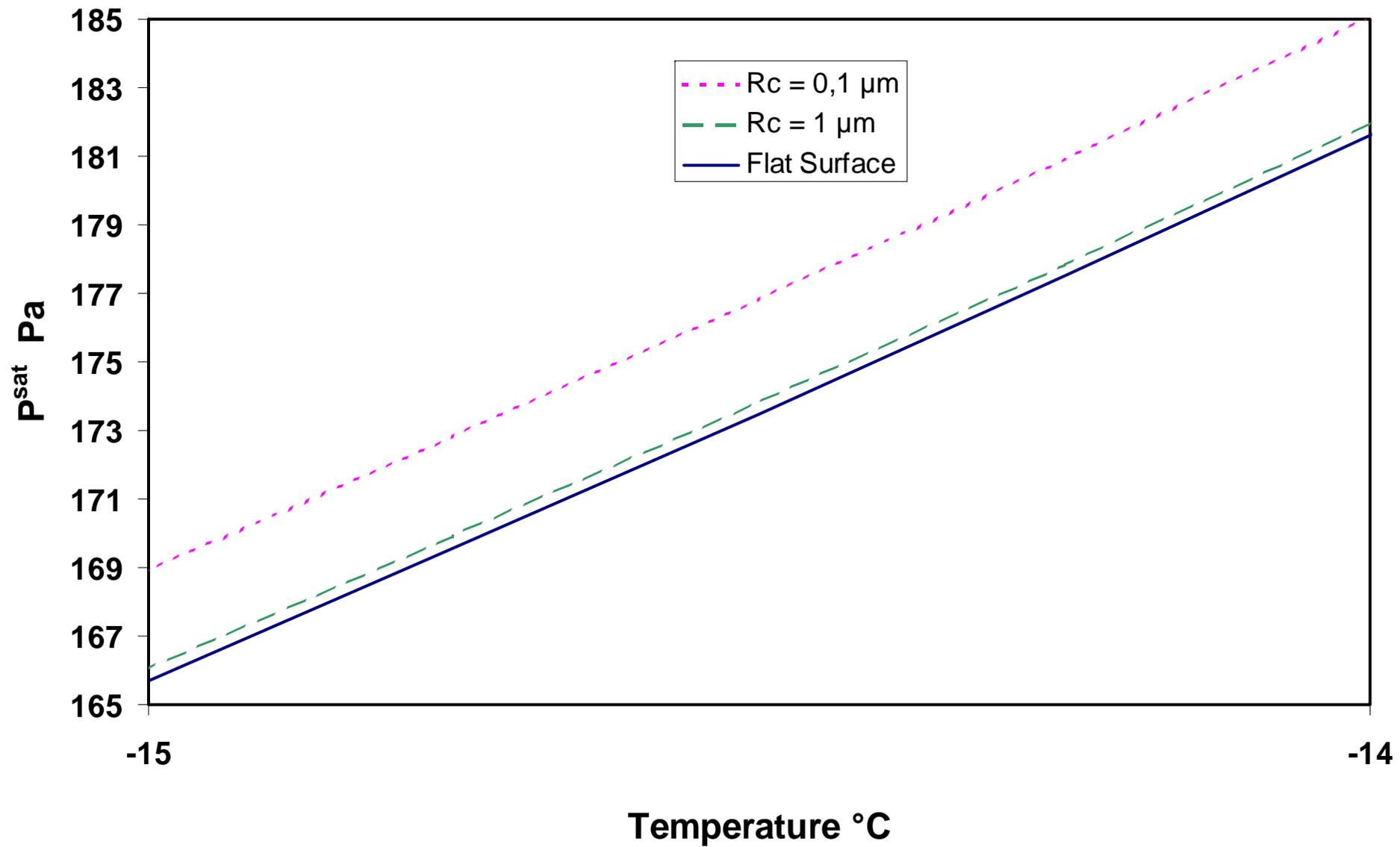
$$\gamma = 0.104 \text{ J m}^{-2}$$

$$V_m = 1.96 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$$

$$P_{H_2O} \text{ gradient} = 0.15 \text{ Pa/cm}$$







# Conséquences du métamorphisme

## 1- Le gradient de temperature

- Sublimation de certains grains
- Condensation sur d'autres grains  
⇒ changement de la taille des grains

## 2- Le gradient de rayon de courbure

- Sublimation des parties à faible rayon de courbure (angles vifs)
- Condensation sur les parties à fort rayon de courbure (surfaces concaves, surfaces planes)  
⇒ changement de la forme des grains

## 3- Autres conséquences du métamorphisme

- Changement de la densité de la neige
- Changement de la perméabilité de la neige
- Changement de la dureté de la neige
- Changement de la conductivité thermique de la neige

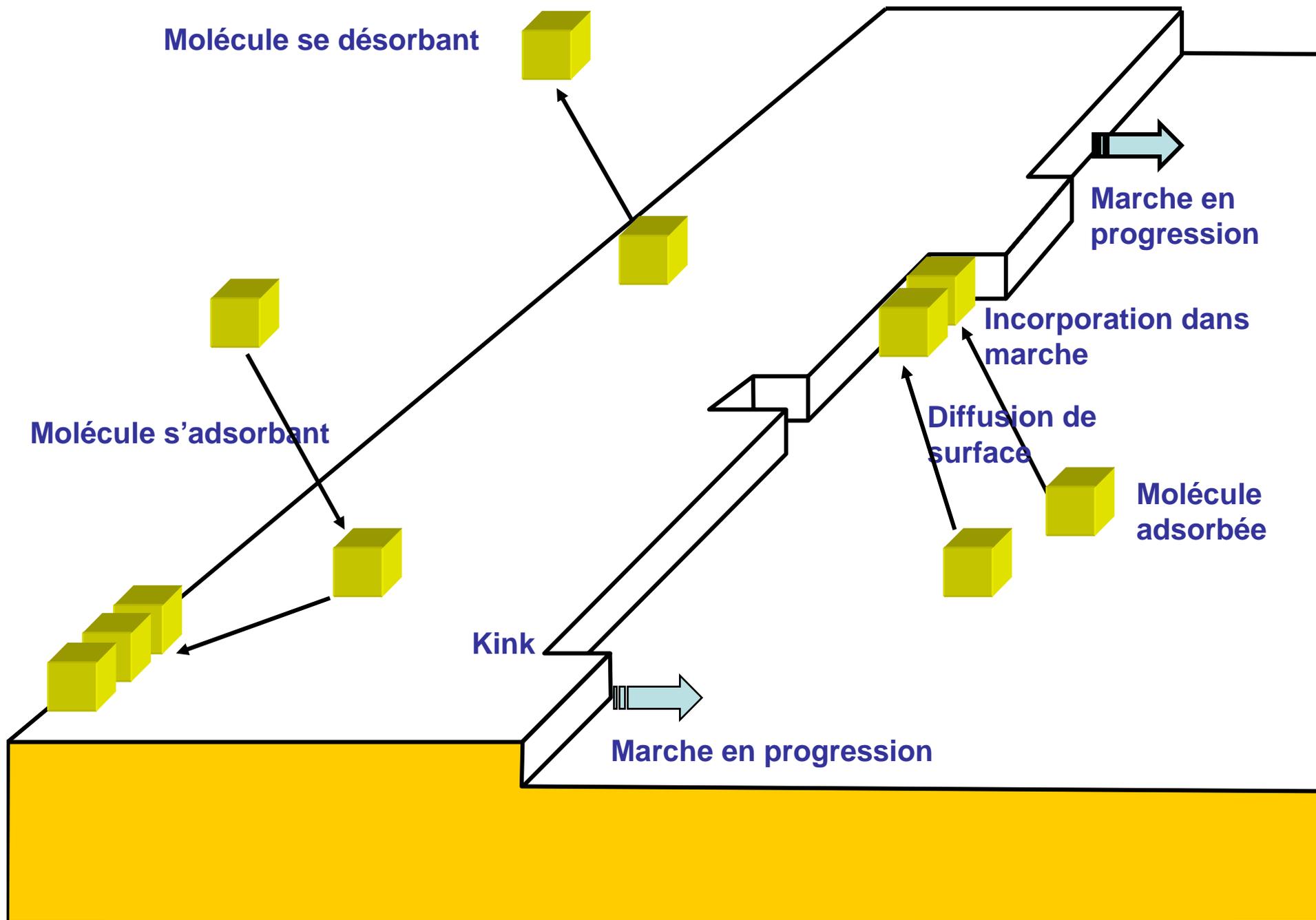
# Effet du métamorphisme sur la forme des grains

## Croissance et sublimation des cristaux de neige

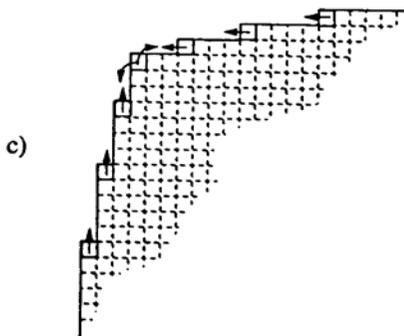
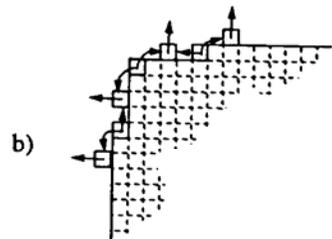
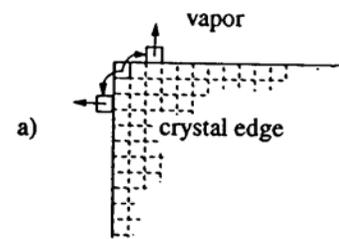
Par nucléation homogène de nouvelles couches de glace aux angles

### Forme des cristaux :

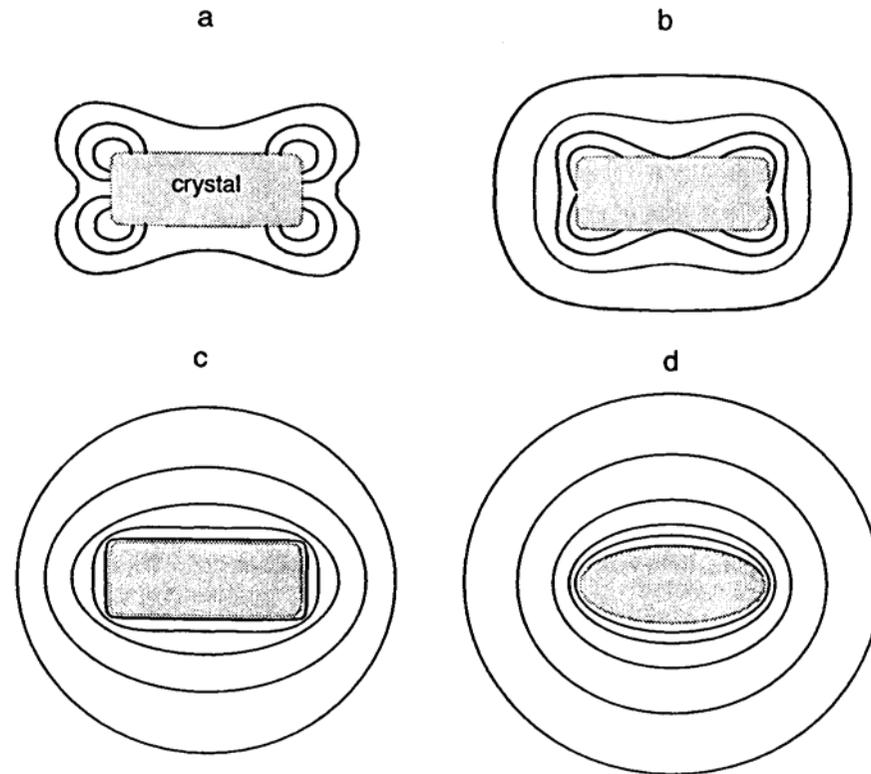
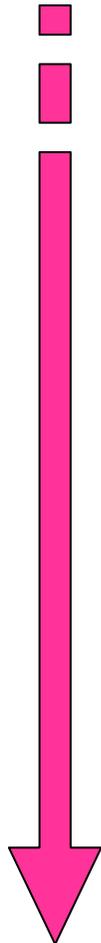
- Sublimation : grains arrondis
- Croissance très rapide : formes concaves, cristaux creux
- Croissance rapide : faces planes avec angles vifs
- Croissance à vitesse modérée : faces planes avec angles arrondis
- Croissance lente : grains arrondis



# Forme de cristaux pendant la sublimation



sublimation

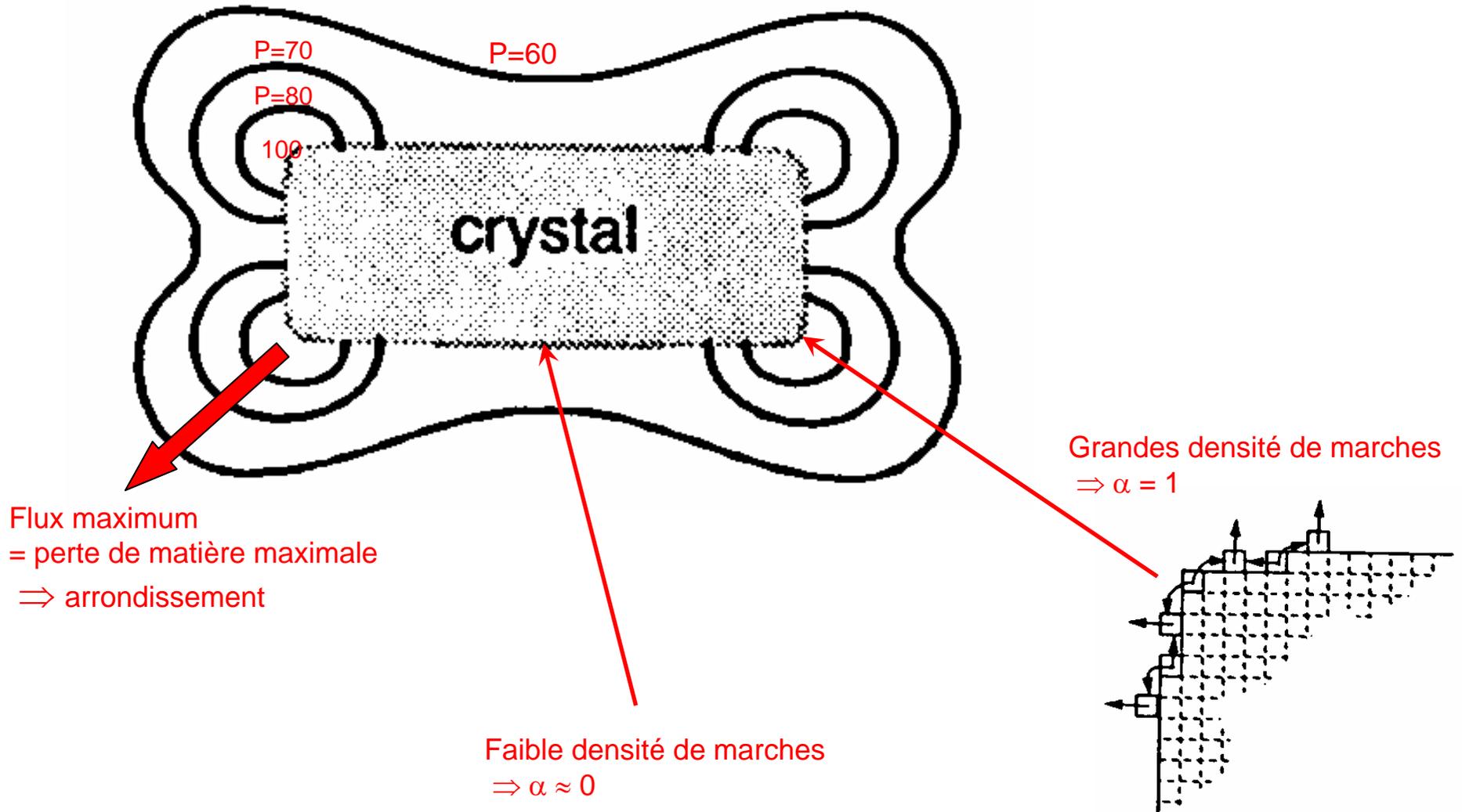


Arrondissement des grains

$$P_{sat}=100$$

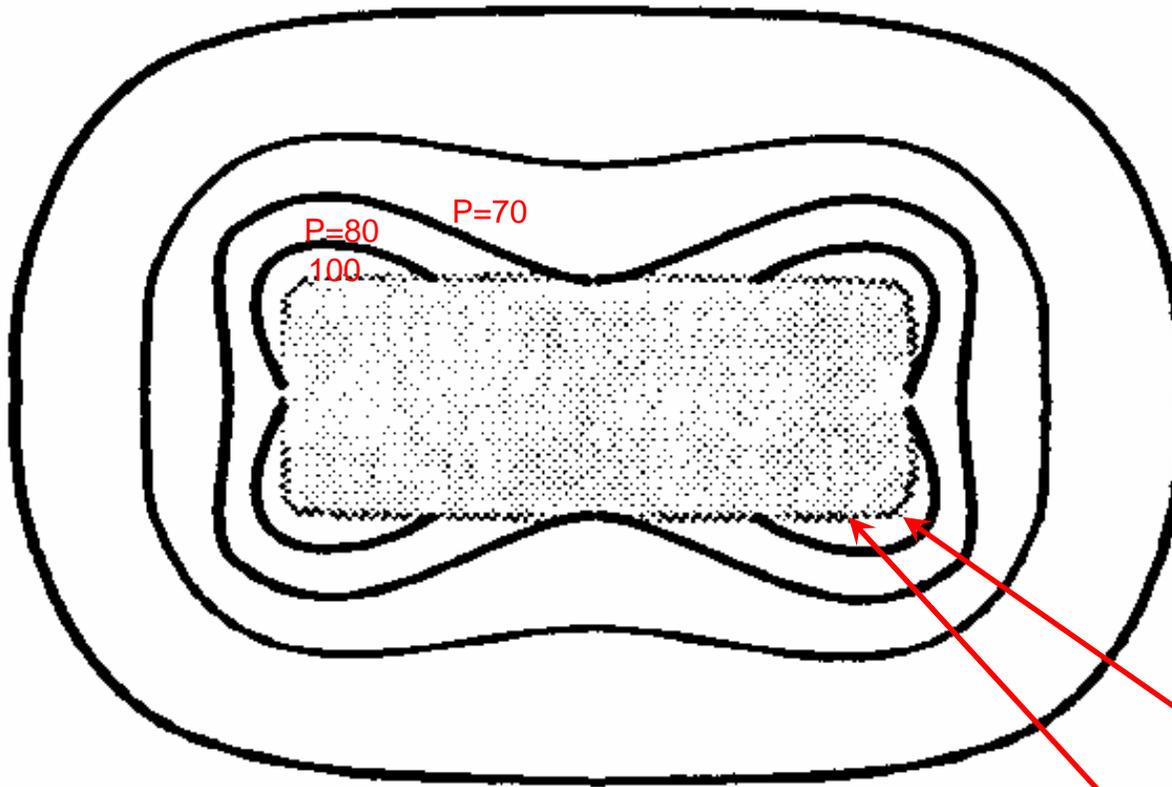
À l'∞, P=50 (sous-saturation ⇒ sublimation)

$$\varphi = \frac{\alpha (P_{H_2O} - P_{sat})}{\sqrt{2\pi m kT}}$$



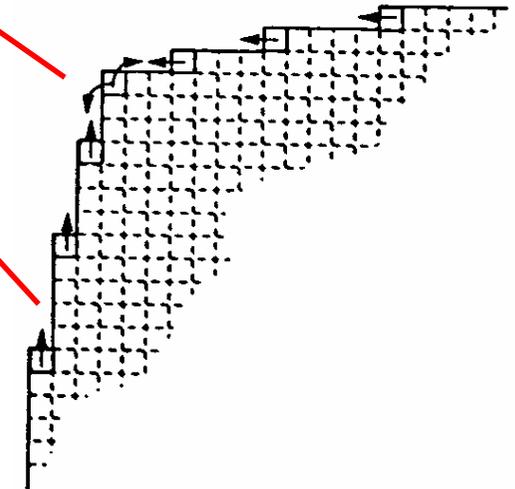
$$\varphi = \frac{\alpha (P_{H_2O} - P_{sat})}{\sqrt{2\pi m kT}}$$

Le Flux devient uniforme  
sur une plus vaste zone



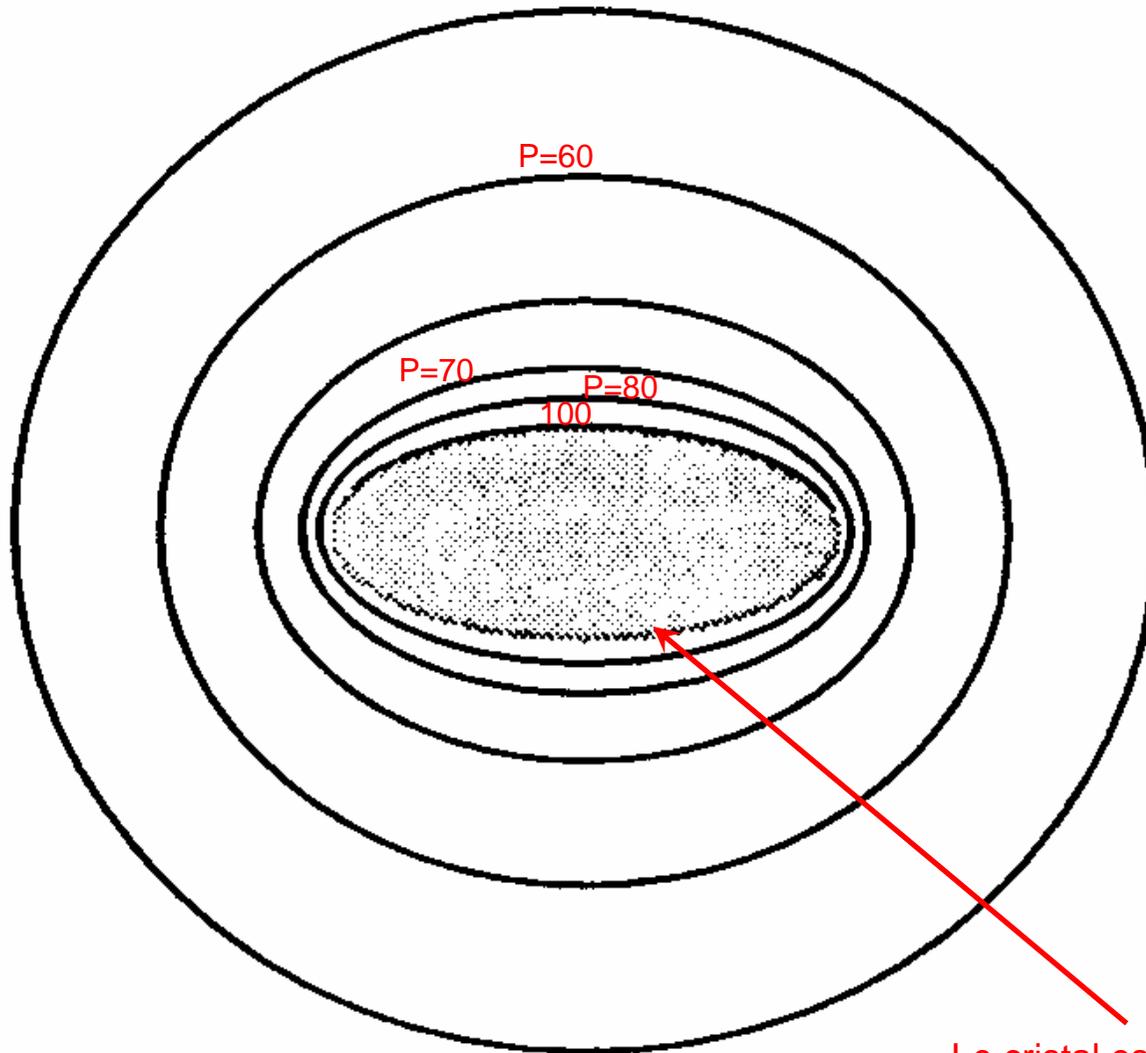
Les marches se propagent  
⇒ les zones où  $\alpha = 1$  s'étendent

Le cr  
ystal s'arrondit



$$\varphi = \frac{\alpha (P_{H_2O} - P_{sat})}{\sqrt{2\pi m kT}}$$

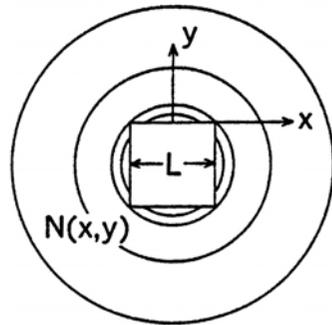
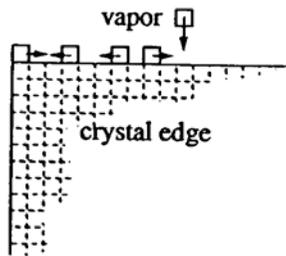
Le Flux devient uniforme  
sur tout le cristal



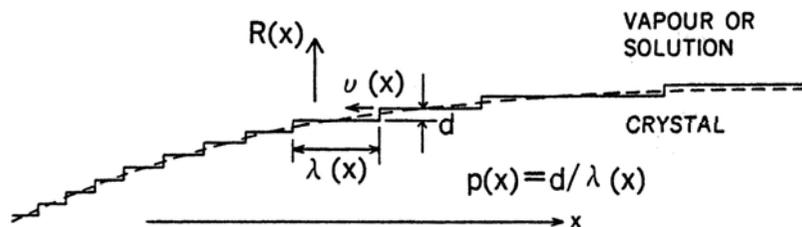
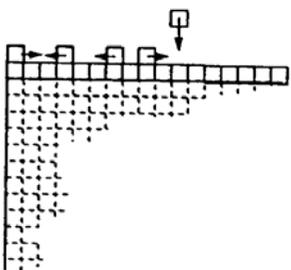
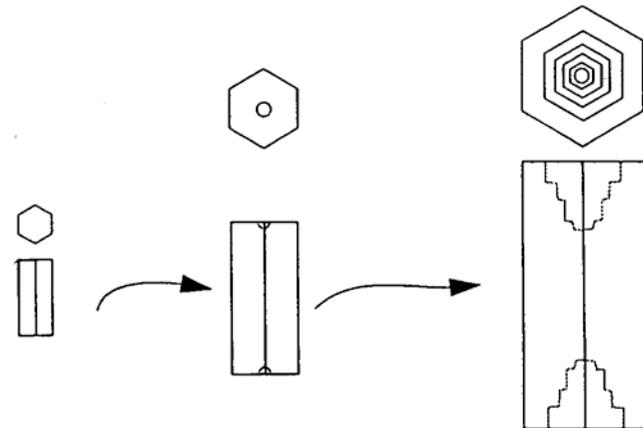
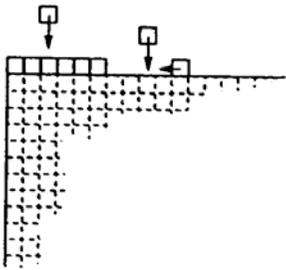
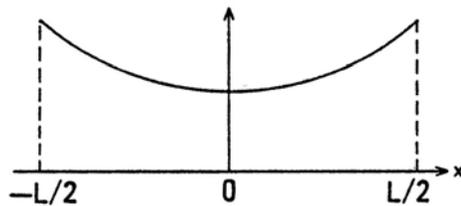
Le cristal est complètement arrondi.  
Les isobares sont uniformes autour du cristal.  
La sublimation a lieu sur toute la surface.  
La forme ronde est stable

# Forme des cristaux pendant la croissance très rapide

croissance  $\longrightarrow$  limitation par la diffusion  $\longrightarrow$  faces planes  $\longrightarrow$  formes creuses



$$\sigma(x) = \frac{N(x) - N_e}{N_e}$$



# Formes résultantes

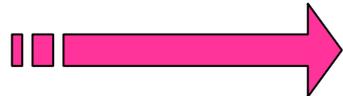
Croissance très  
rapide



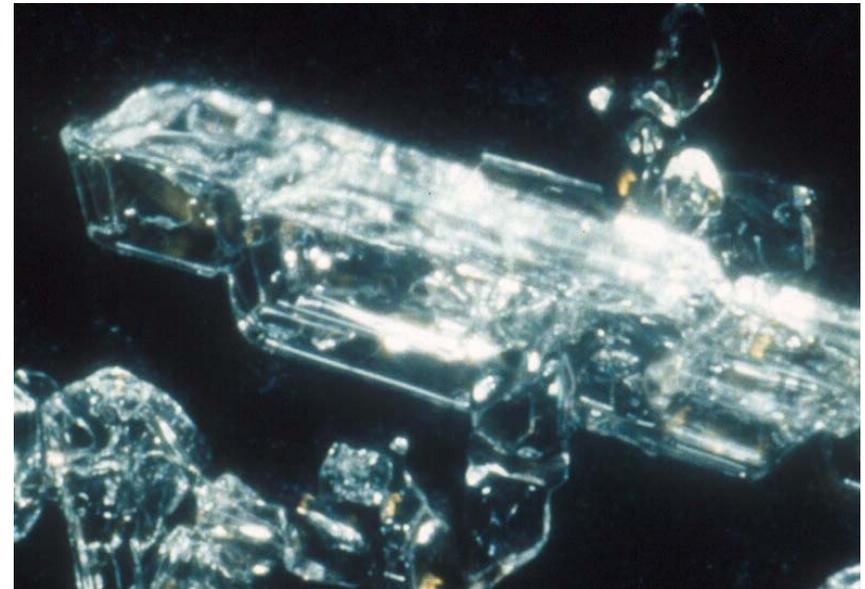
Formes  
concaves ou  
creuses



Croissance  
rapide



Faces planes  
avec angles vifs



# Formes résultantes

Croissance  
à vitesse  
modérée



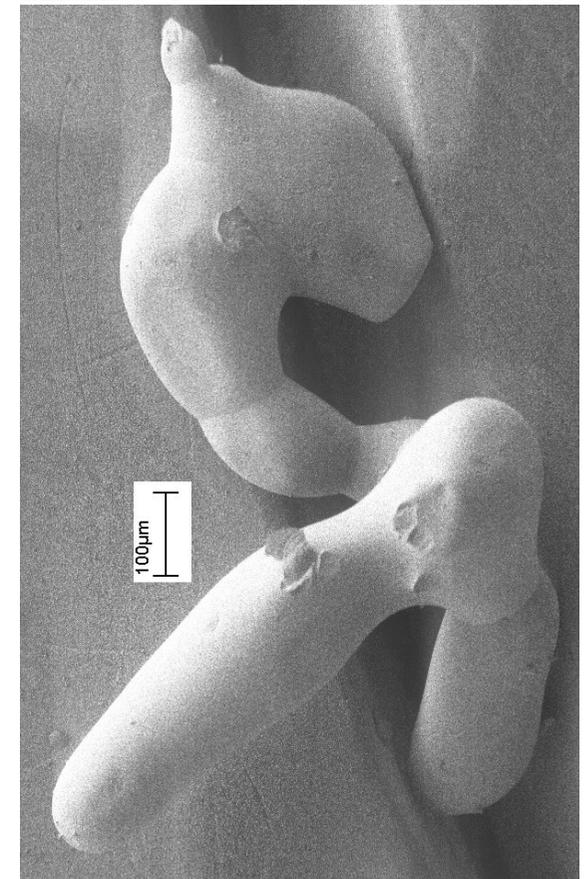
Faces planes  
avec angles  
arrondis

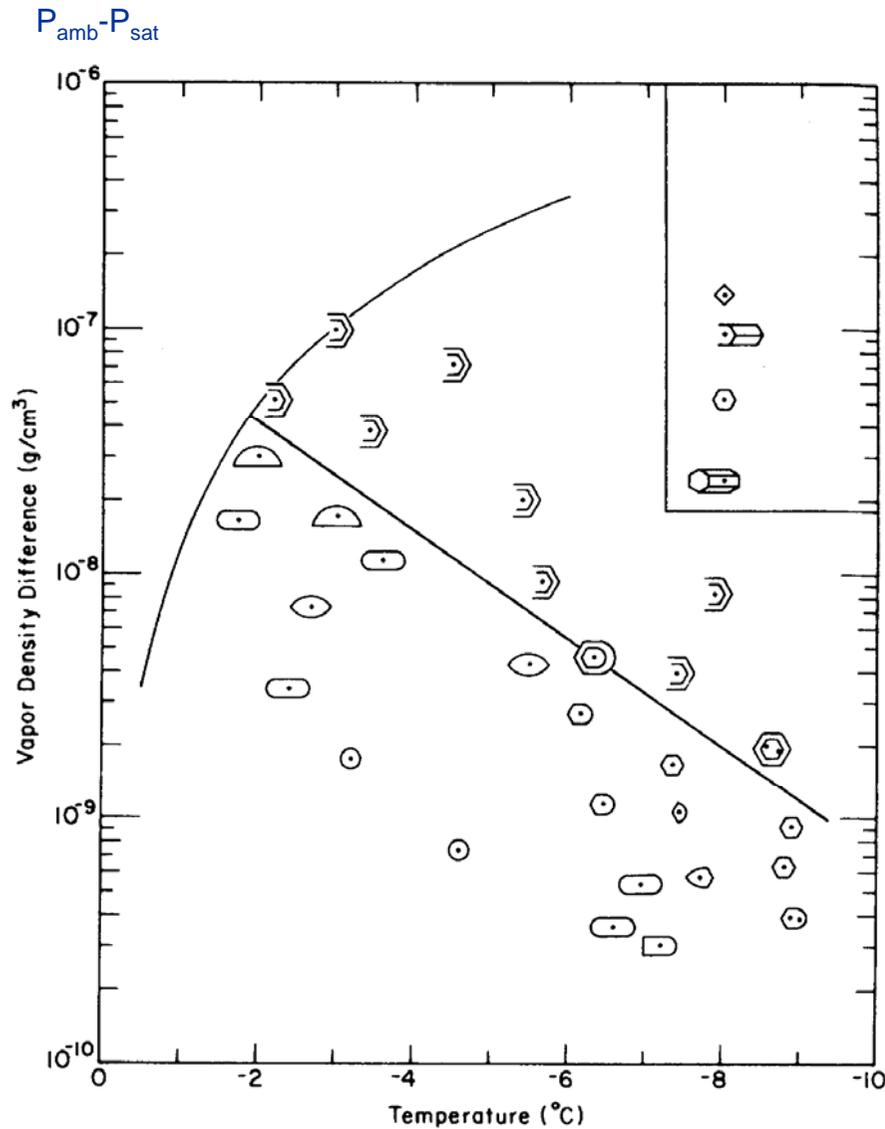


Croissance lente



Grains ronds

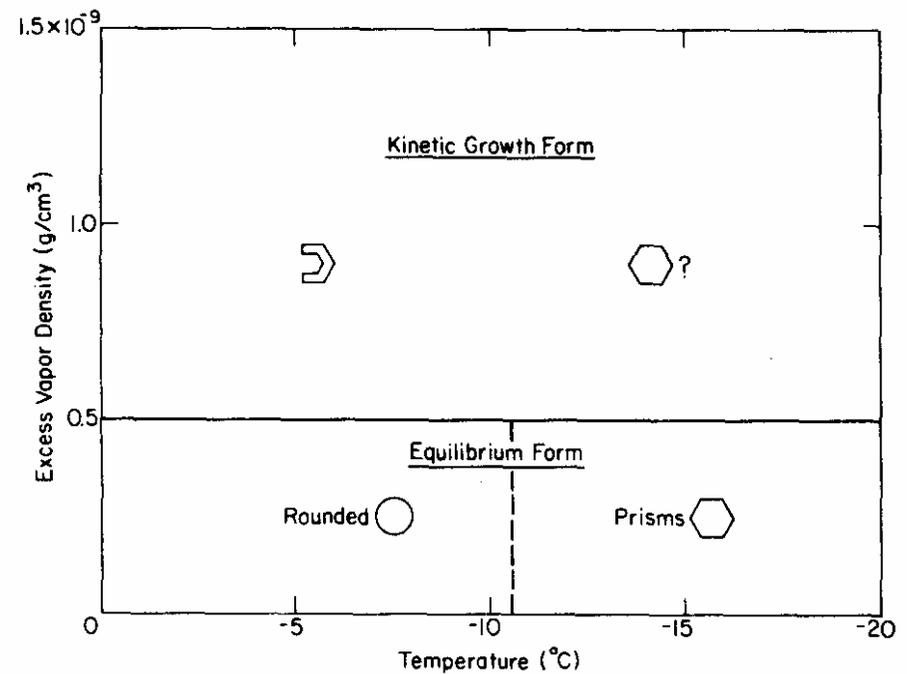


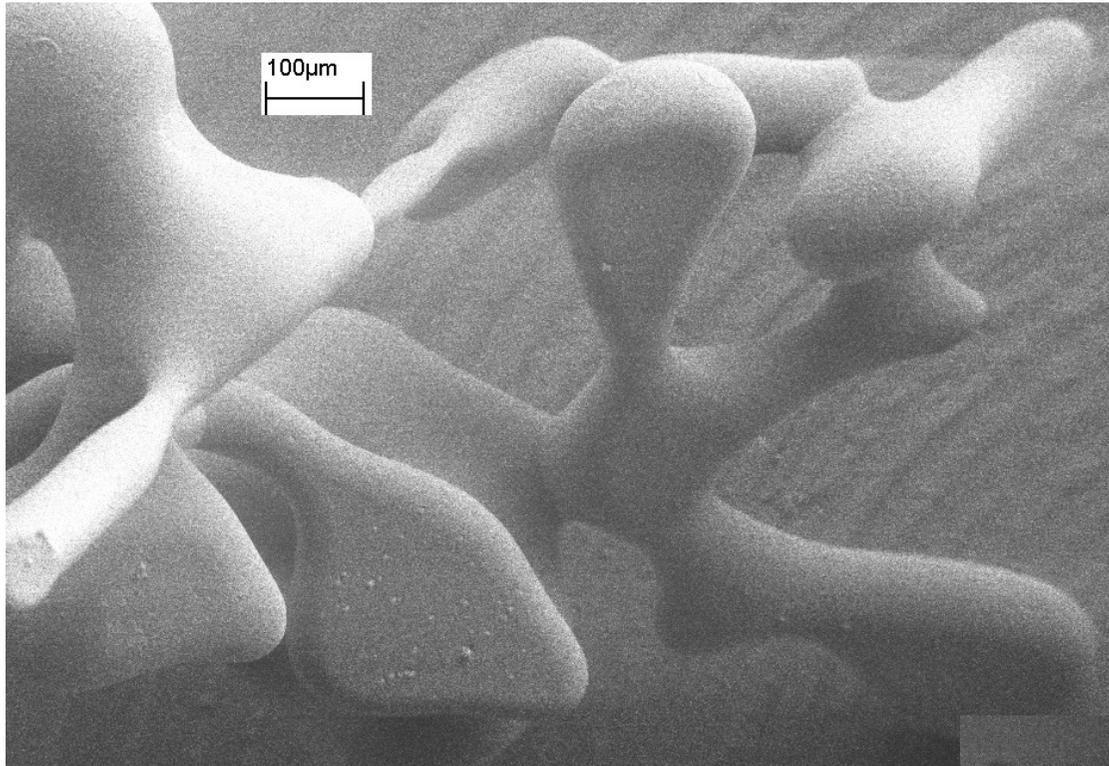


Colbeck (1983) Ice crystal morphology and growth rates at low supersaturations and high temperatures. *J. Applied Physics*, 54, 2677-2682.

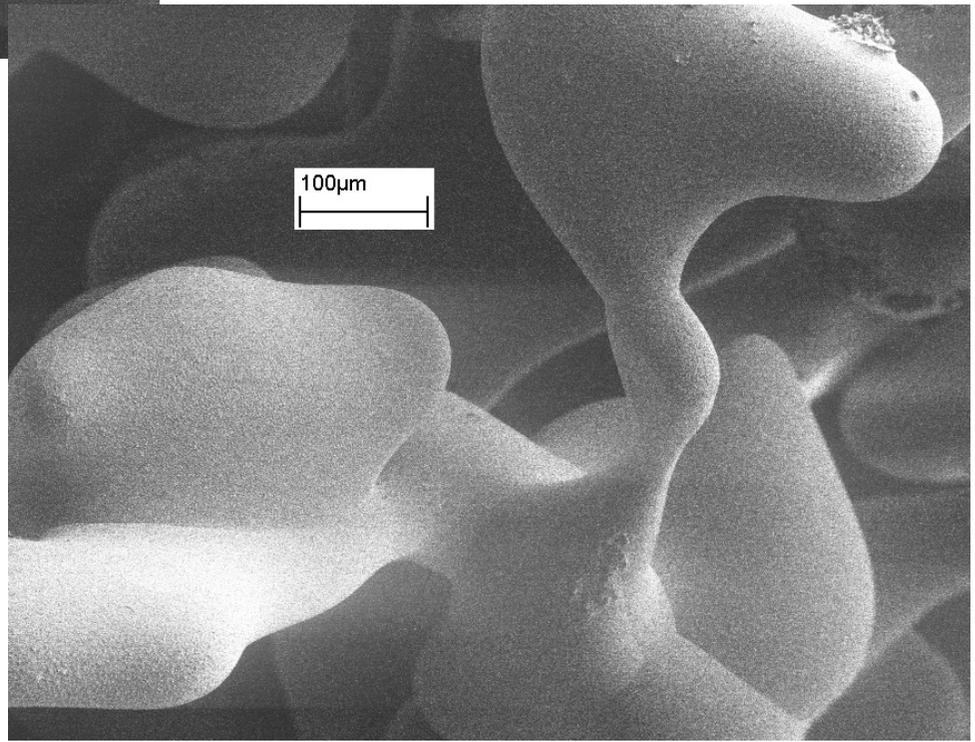
$P_{\text{sat}}$ ,  $\sigma_{\text{crit}}$ , etc... dépendent de  $T \Rightarrow$   
la transition facetté-rond dépend de  $T$

Formes facettées favorisées à basse  $T$  ??

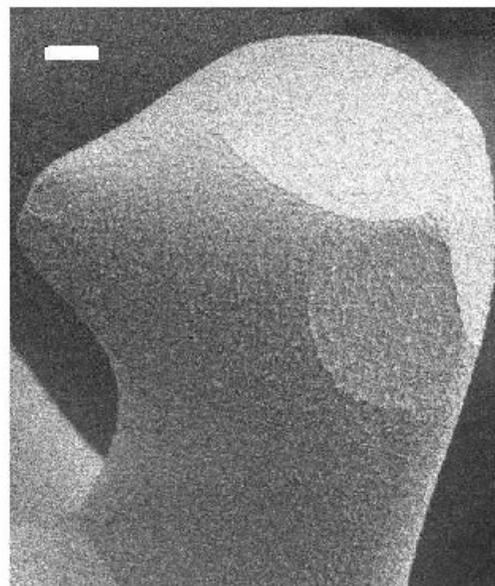
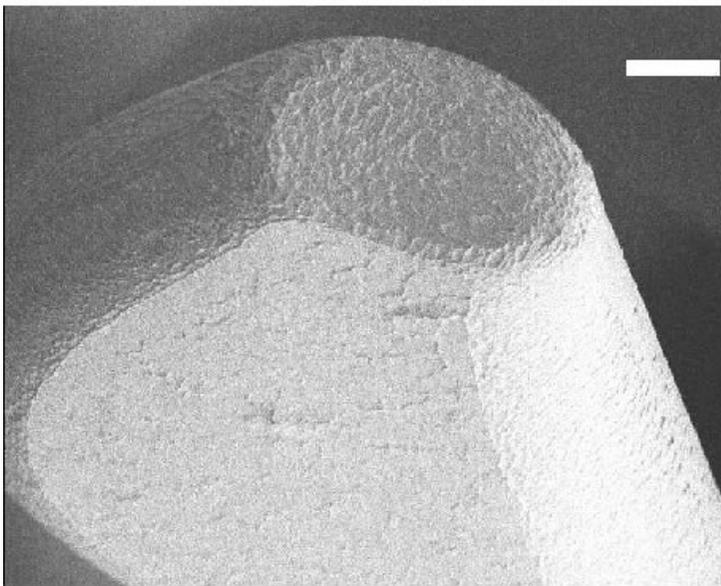
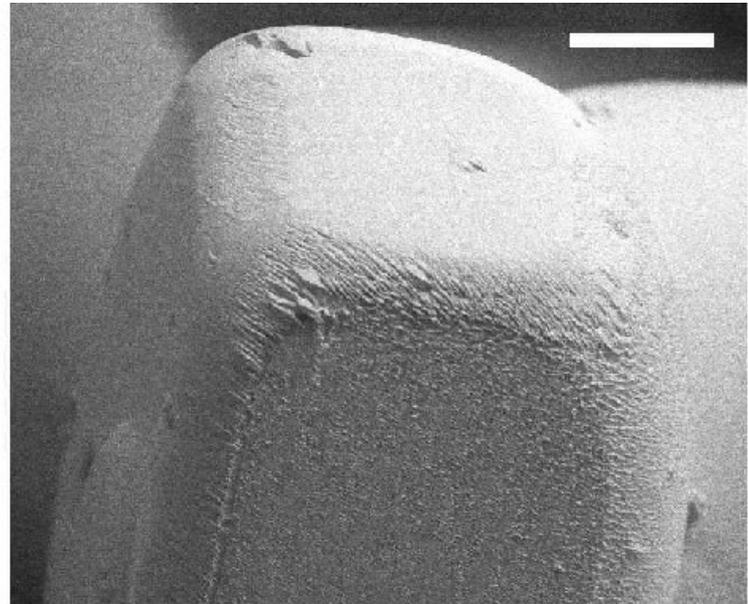
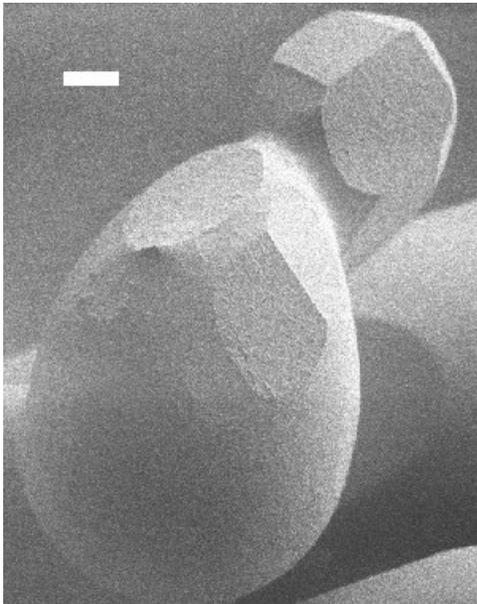




T=-15°C



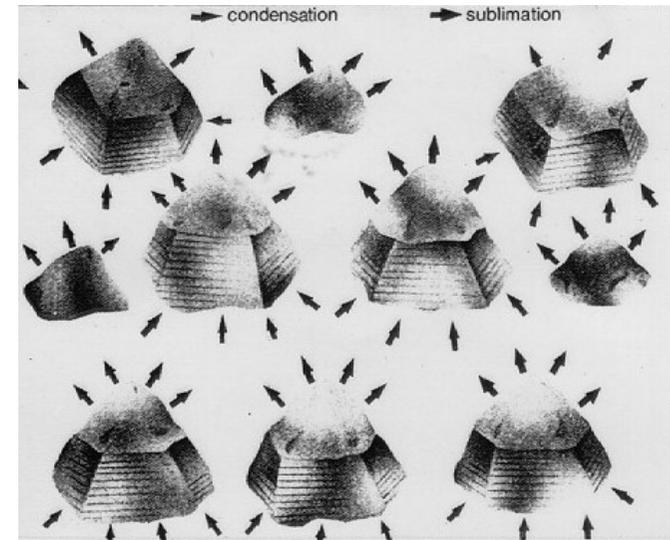
T=-15°C



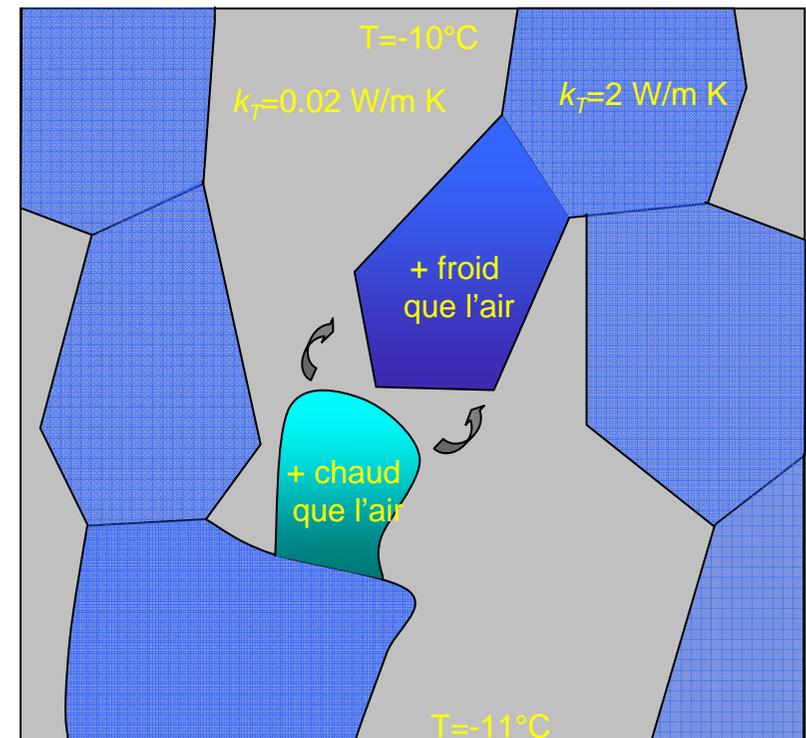
# Interactions entre les grains

## Si croissance rapide

- Croissance au niveau des angles et des zones convexes
  - Pas de croissance privilégiée aux contacts entre grains
  - Formation de facettes
- ⇒ formation d'un manteau neigeux sans cohésion



## Accélération de la croissance

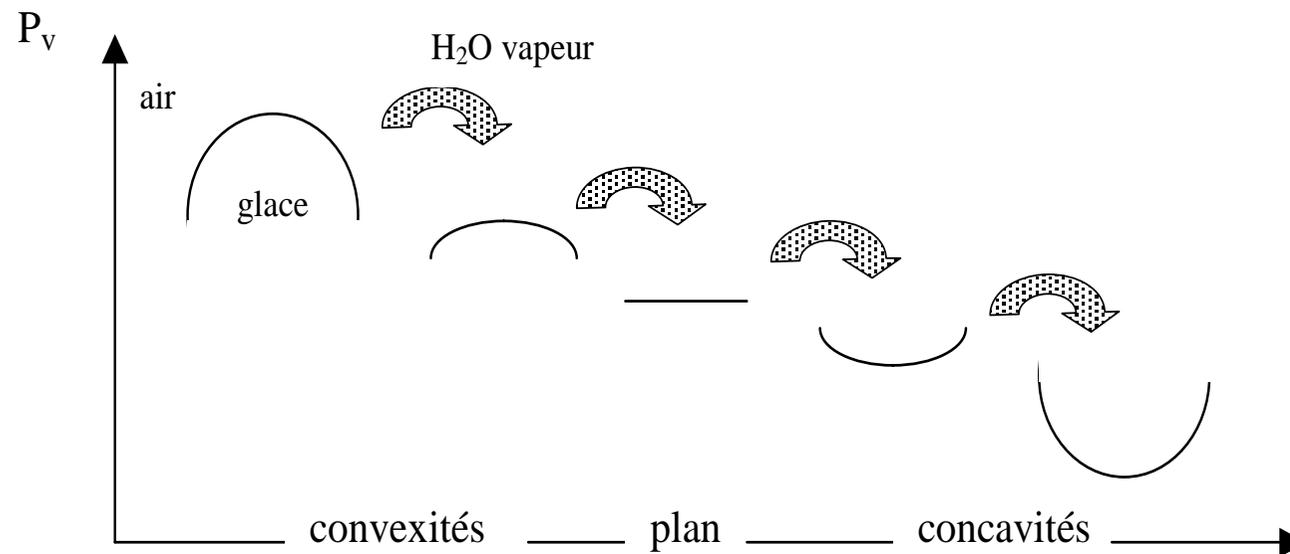


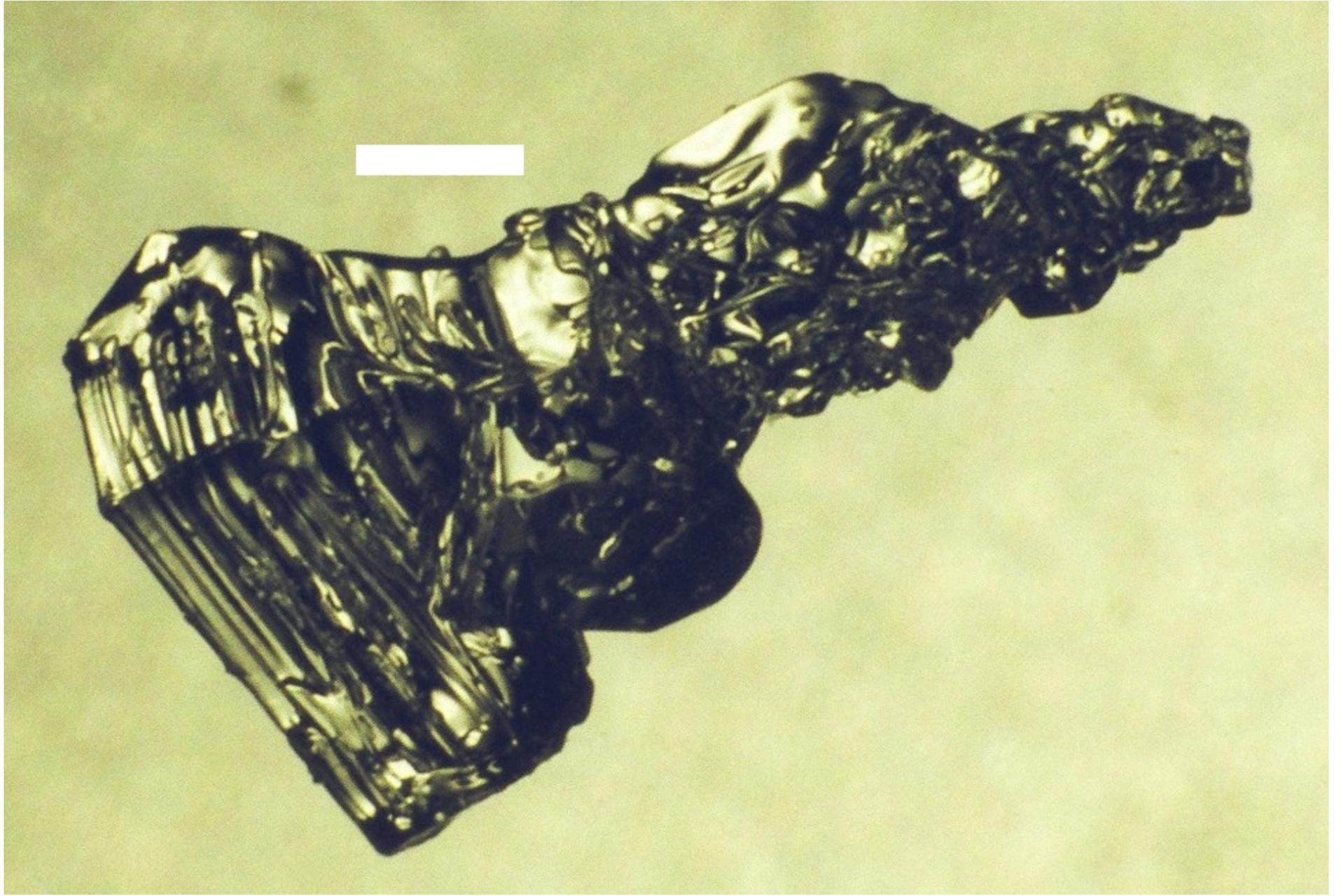
# Interactions entre les grains

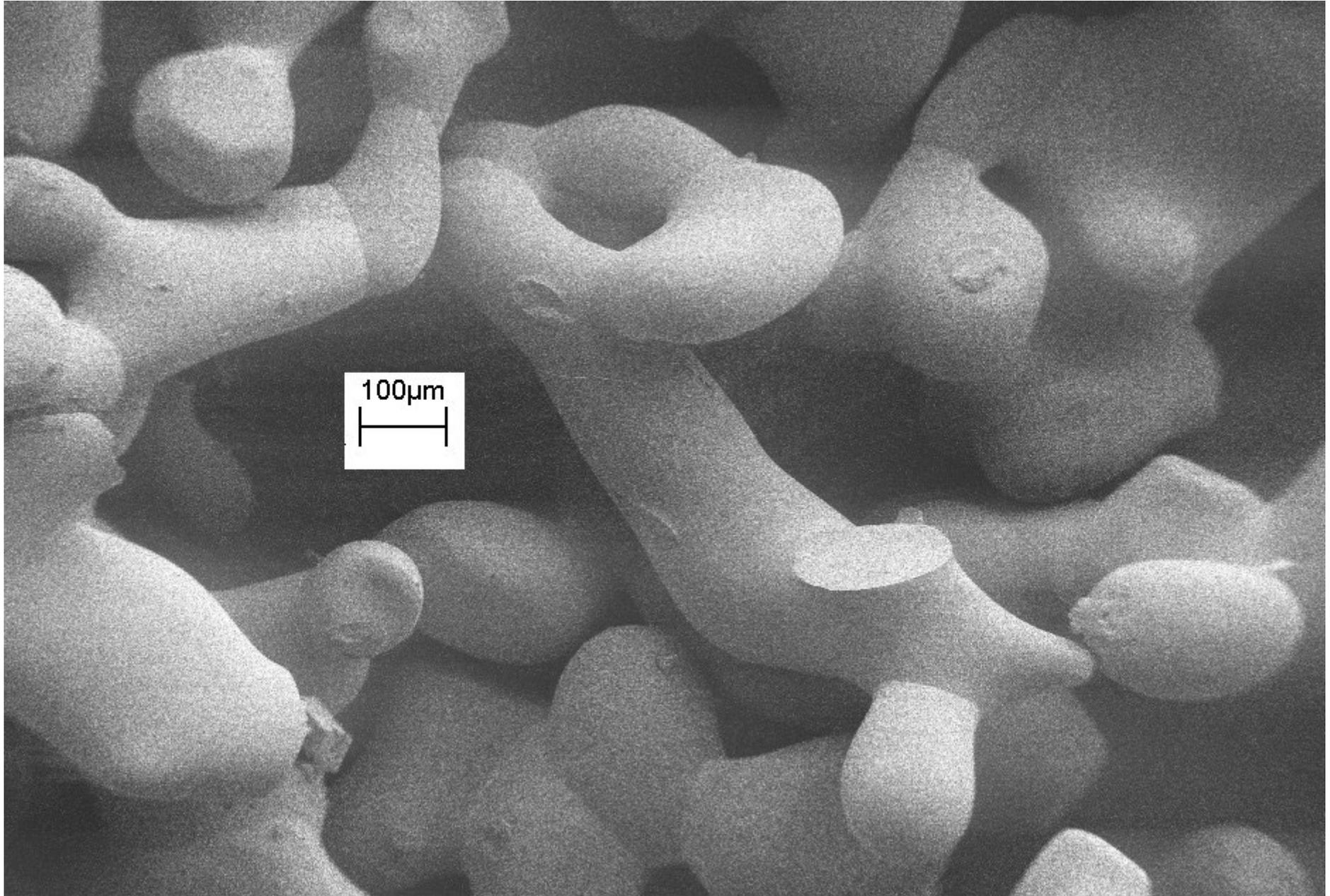
## Si croissance lente

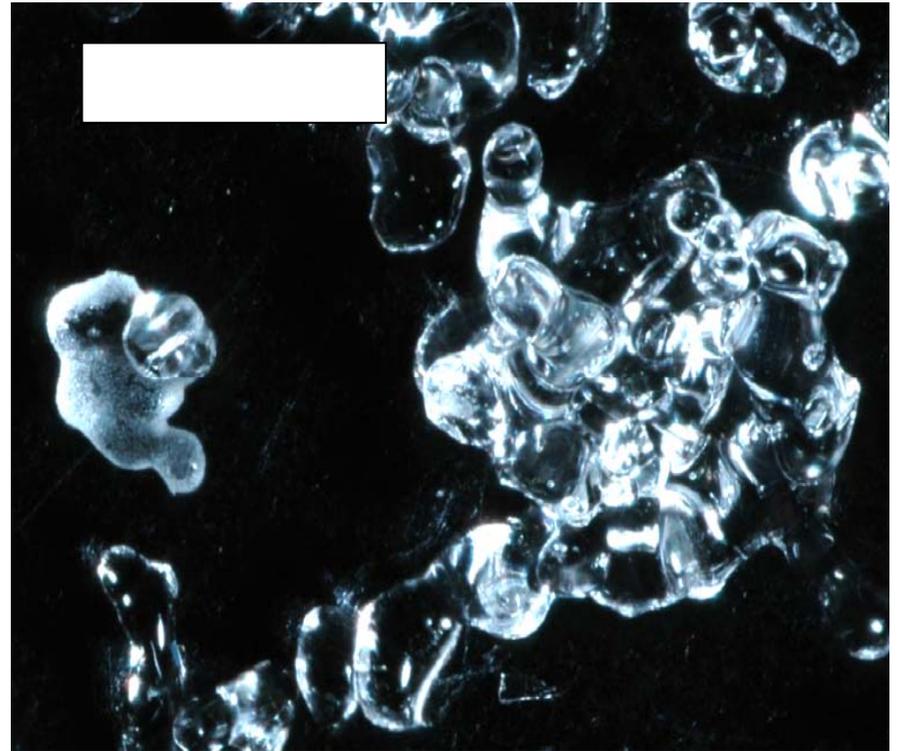
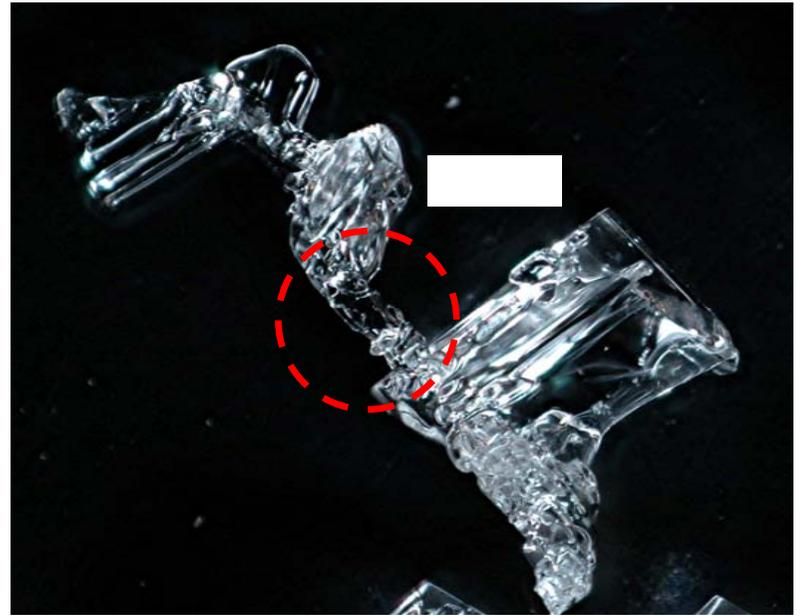
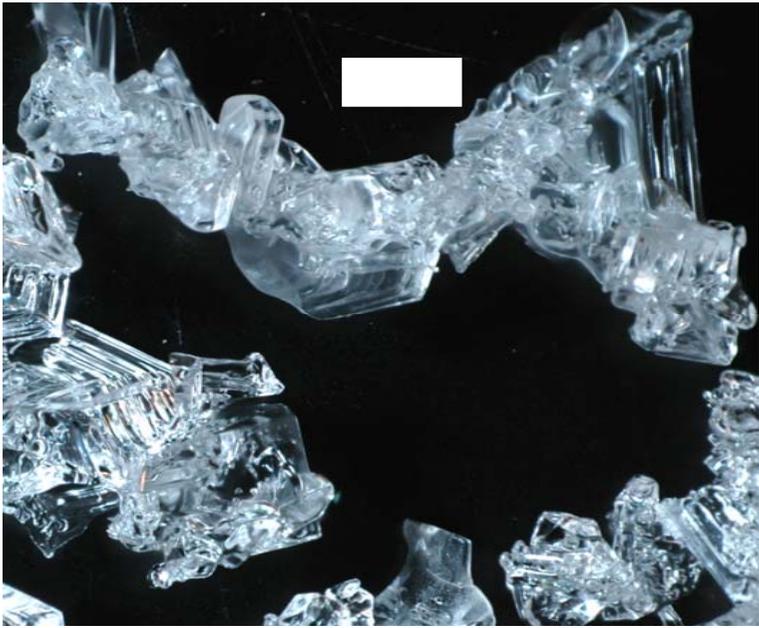
- Croissance préférentielle aux joints de grains (parties concaves)

⇒ formation de couches ayant une bonne cohésion









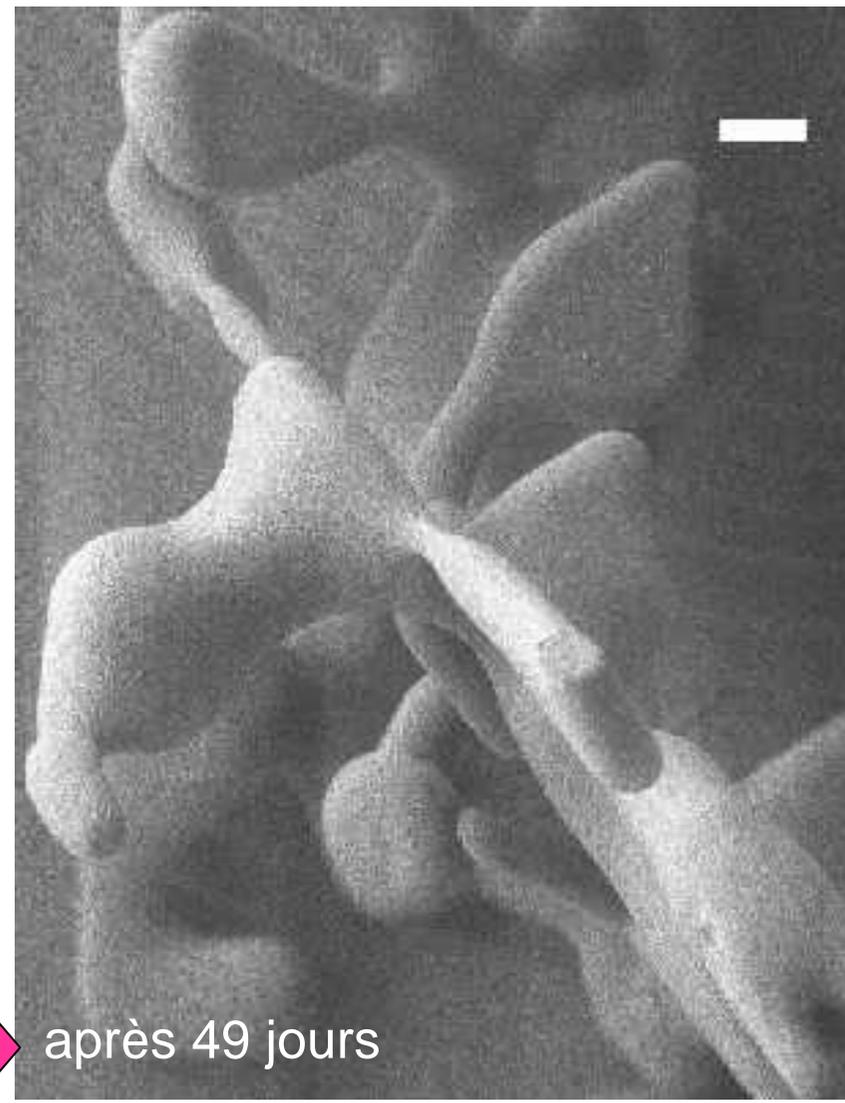
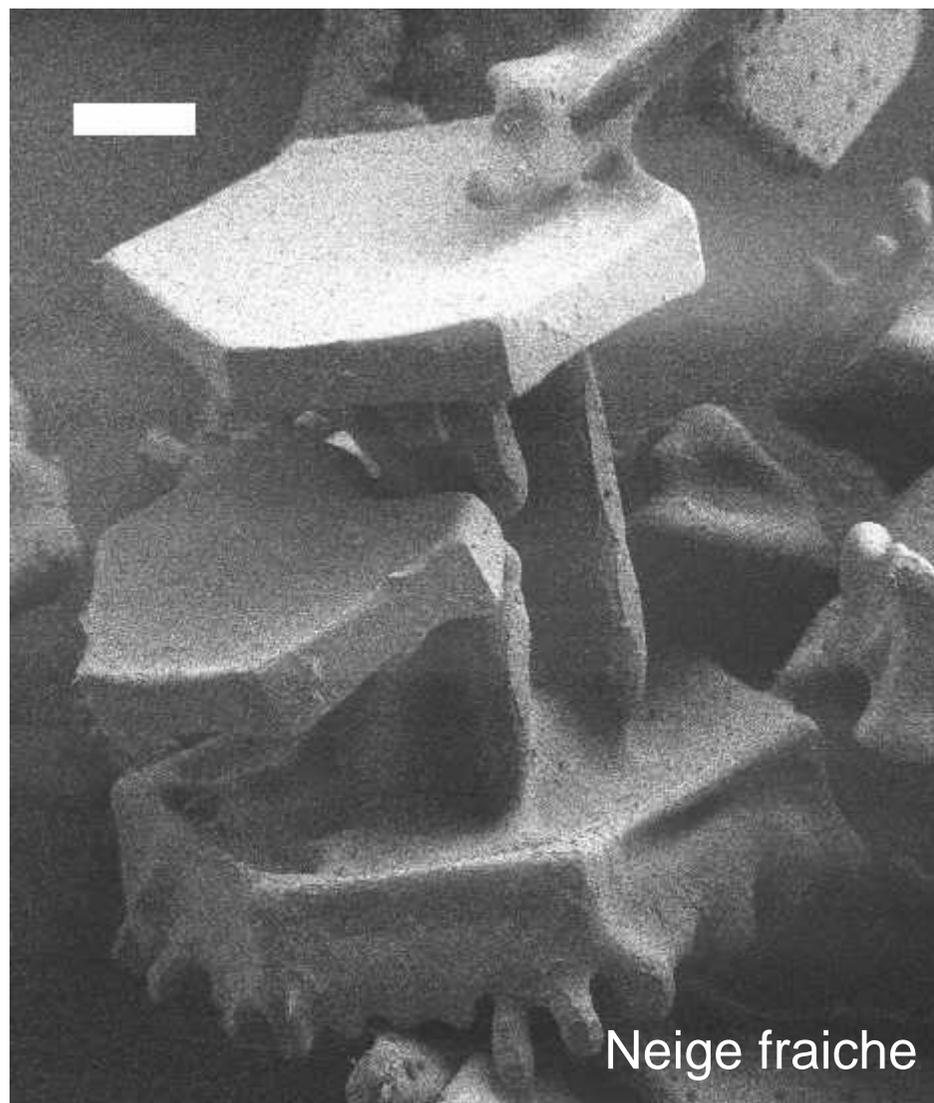
# Etudes du métamorphisme au laboratoire

Expériences isothermes en systèmes fermés

Echantillon A : 49 jours at  $-15^{\circ}\text{C}$

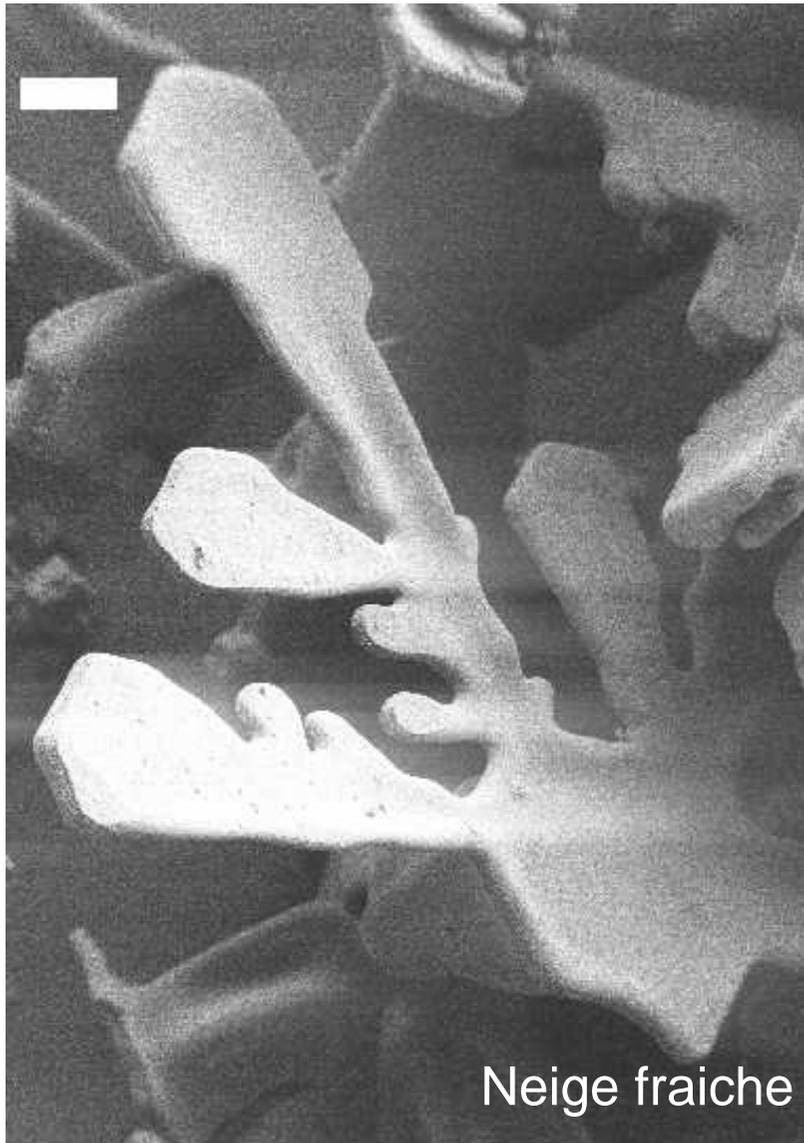
Echantillon B : 28 jours at  $-4^{\circ}\text{C}$   
34 jours at  $-15^{\circ}\text{C}$

# Echantillon A : -15°C, boutons de manchettes

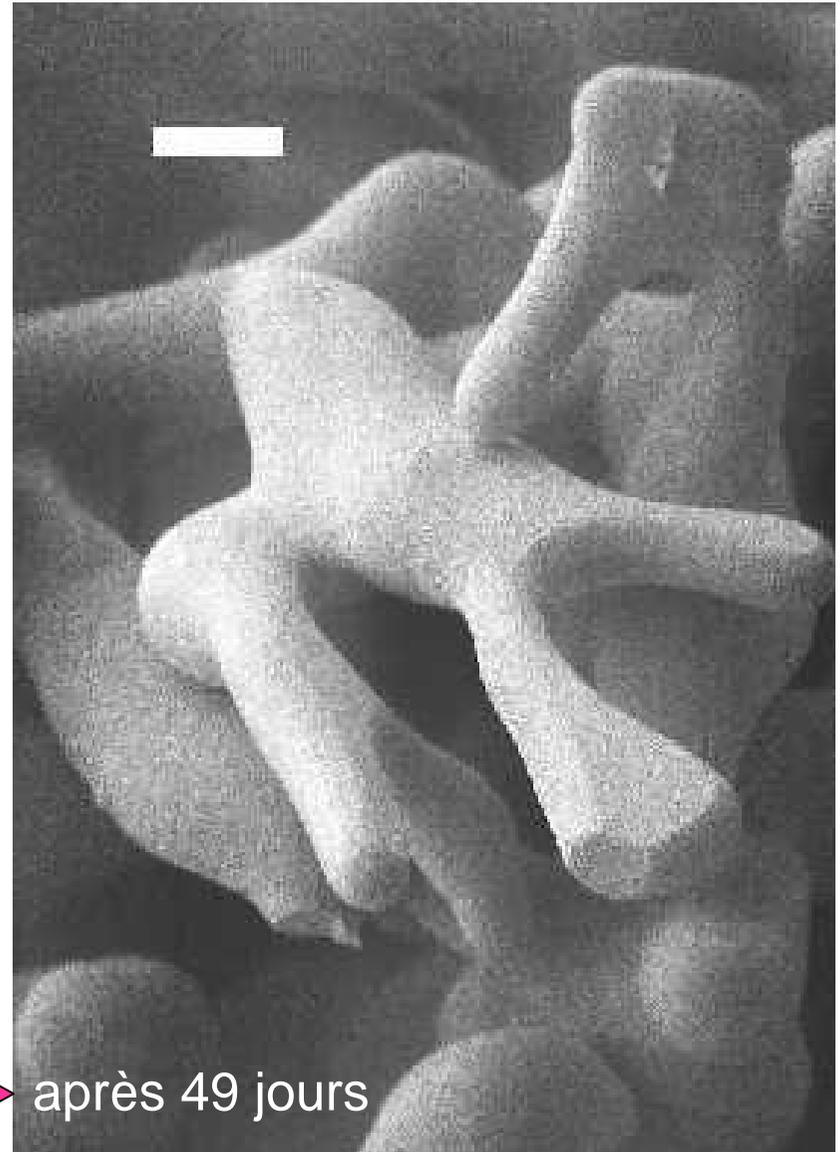


Barres d'échelle : 100 µm

# Echantillon A : $-15^{\circ}\text{C}$ , cristaux dendritiques



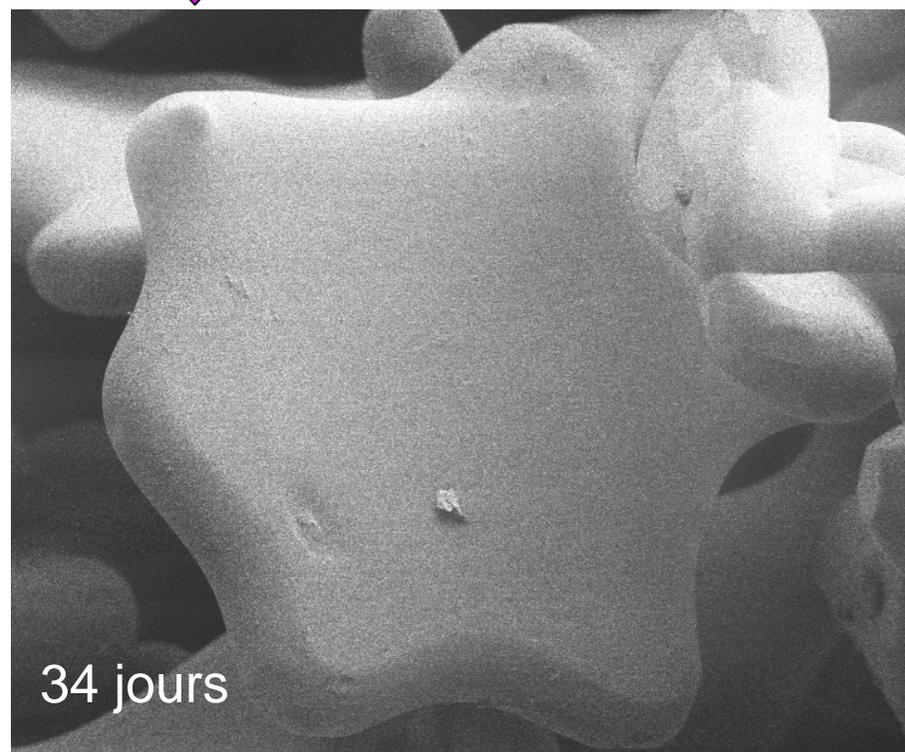
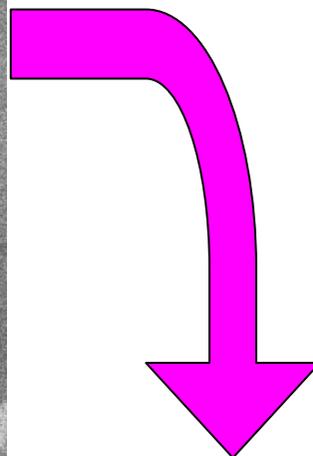
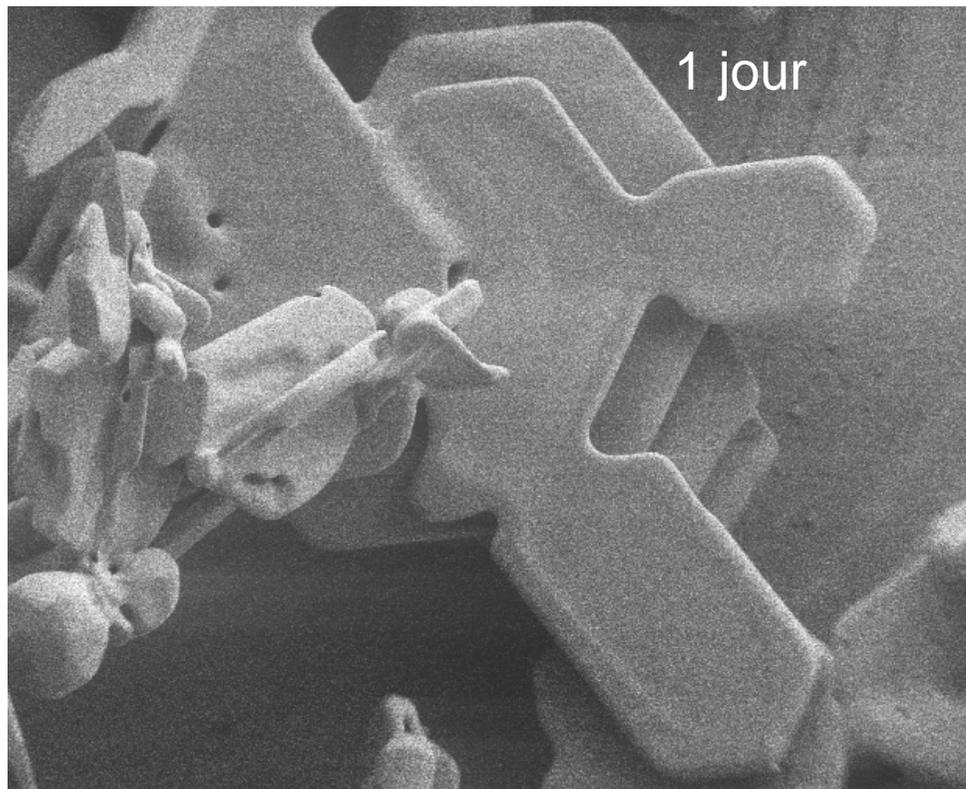
Neige fraîche



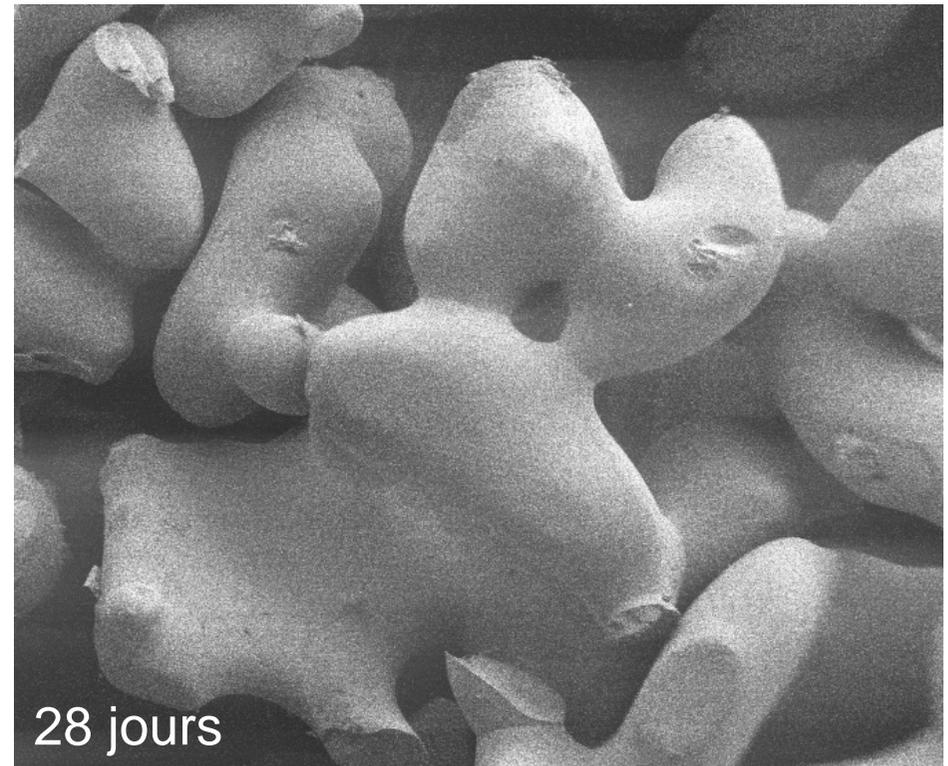
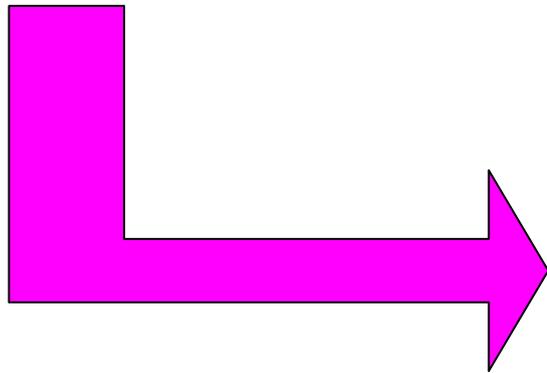
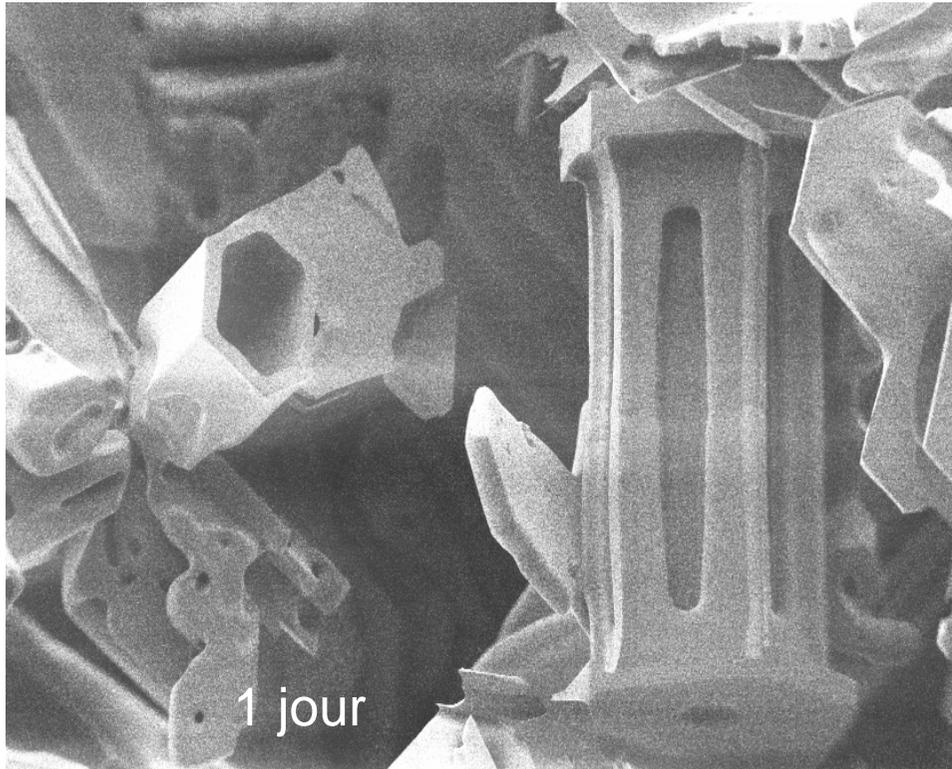
après 49 jours

Barres d'échelle :  $100\ \mu\text{m}$

# Echantillon B : -15°C



# Sample B : -4°C



# Observations du metamorphisme isotherme au laboratoire

à  $T = -4^{\circ}\text{C}$   $\Rightarrow$  formes rondes

à  $T = -15^{\circ}\text{C}$   $\Rightarrow$  formes rondes

# Animations: simulations du métamorphisme isotherme

Données : Frédéric Flin, Jean Bruno Brzoska  
Centre d'Etude de la Neige, Météo France  
Jean-Bruno.Brzoska@meteo.fr

Interprétation des images : loi de kelvin

$$P_{\text{H}_2\text{O}}(r) = P_0 e^{2\gamma V_m/rRT} = P_0 e^{\frac{\gamma V_m}{RT} \left( \frac{2}{r} \right)}$$

Une surface à géométrie complexe est caractérisée par 2 rayons de courbure,  $r_1$  et  $r_2$ , définis selon des directions orthogonales

$$P_{\text{H}_2\text{O}}(r) = P_0 e^{\frac{\gamma V_m}{RT} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)}$$

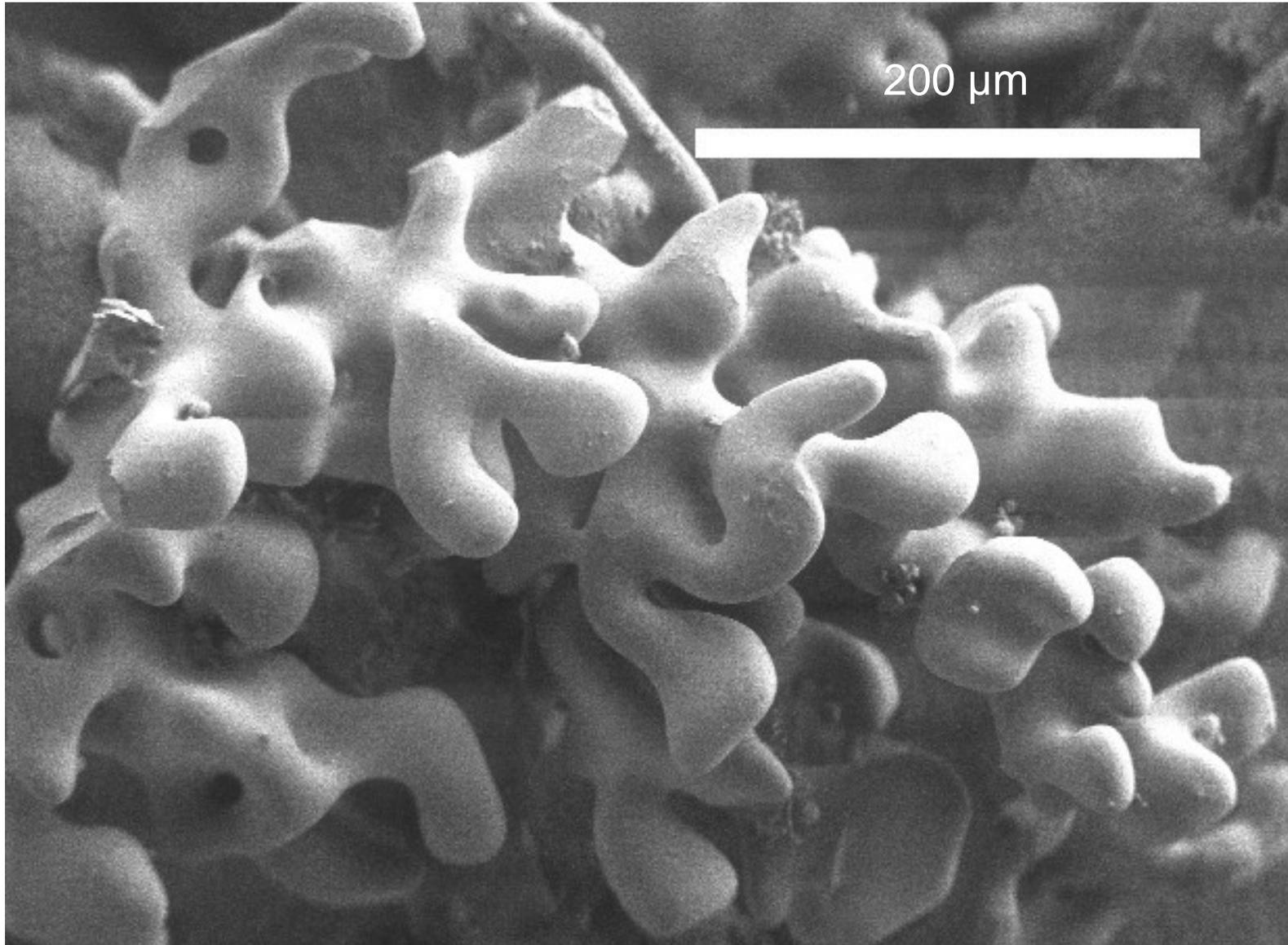
# Etudes du métamorphisme au laboratoire

Expériences en gradient de température en systèmes fermés

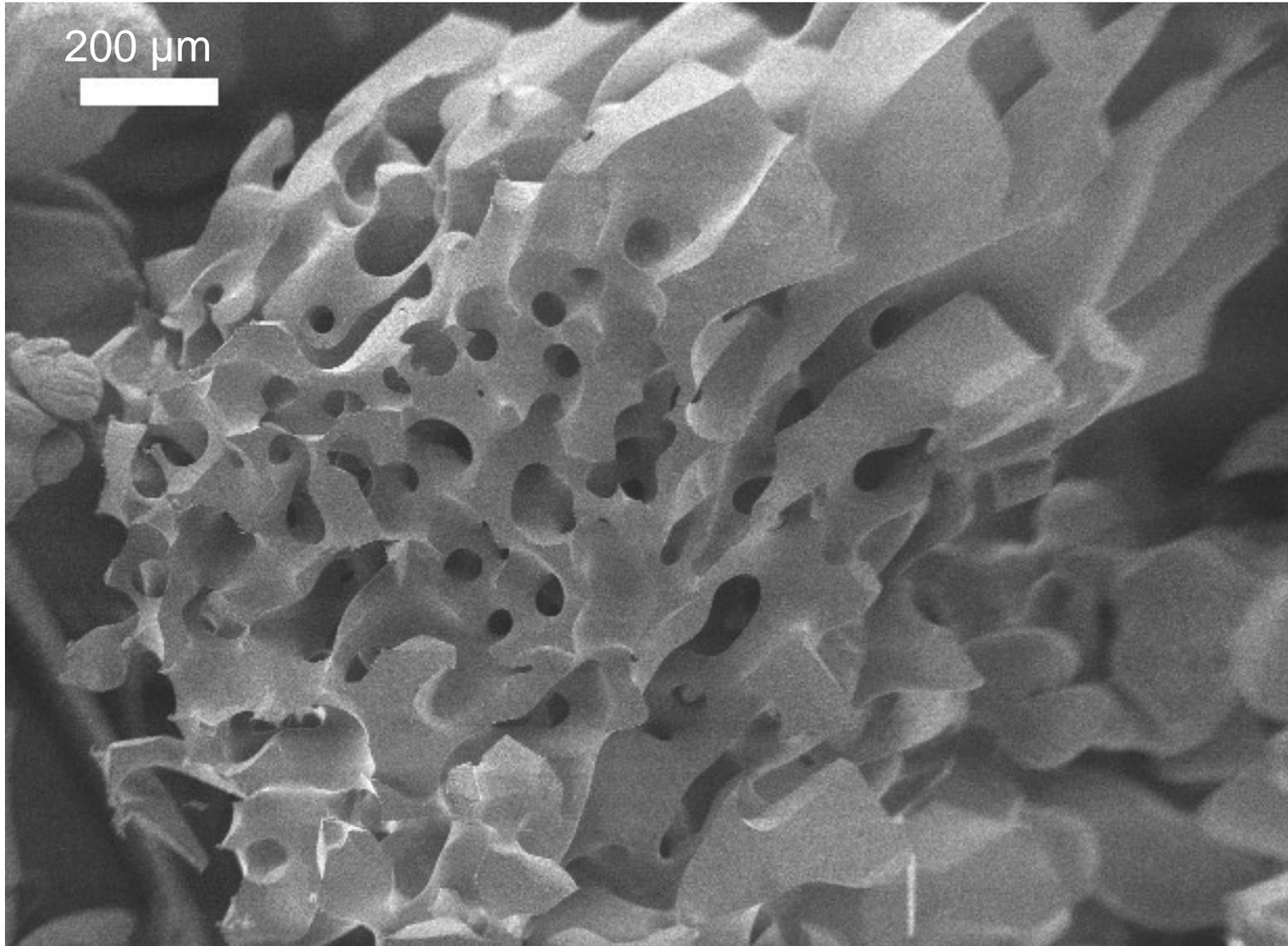
Gradient :  $30^{\circ}\text{C}/\text{m}$

Température de la neige : entre  $-15^{\circ}\text{C}$  et  $-5^{\circ}\text{C}$

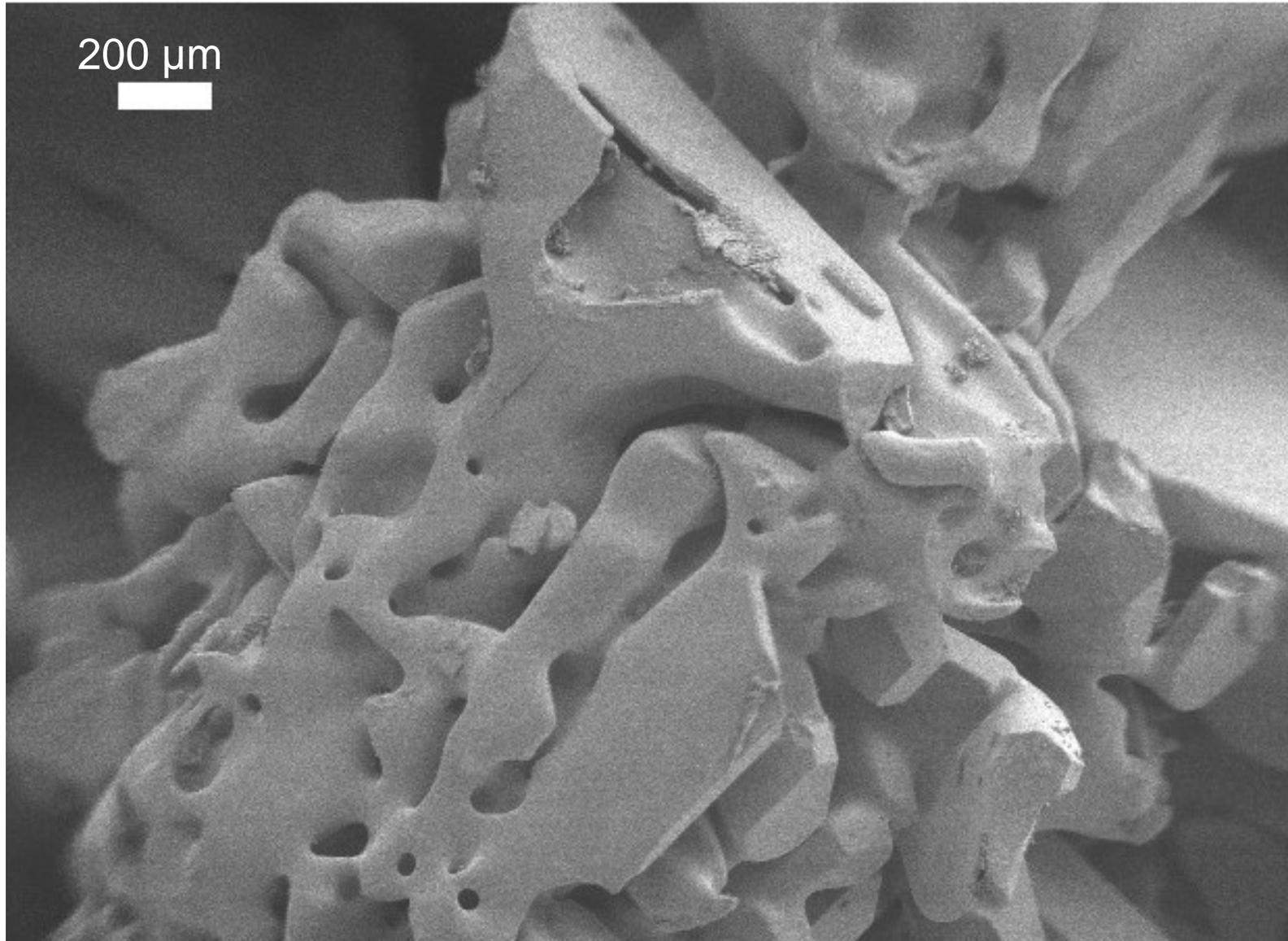
## Transformation de grésil sous gradient : 0 jour



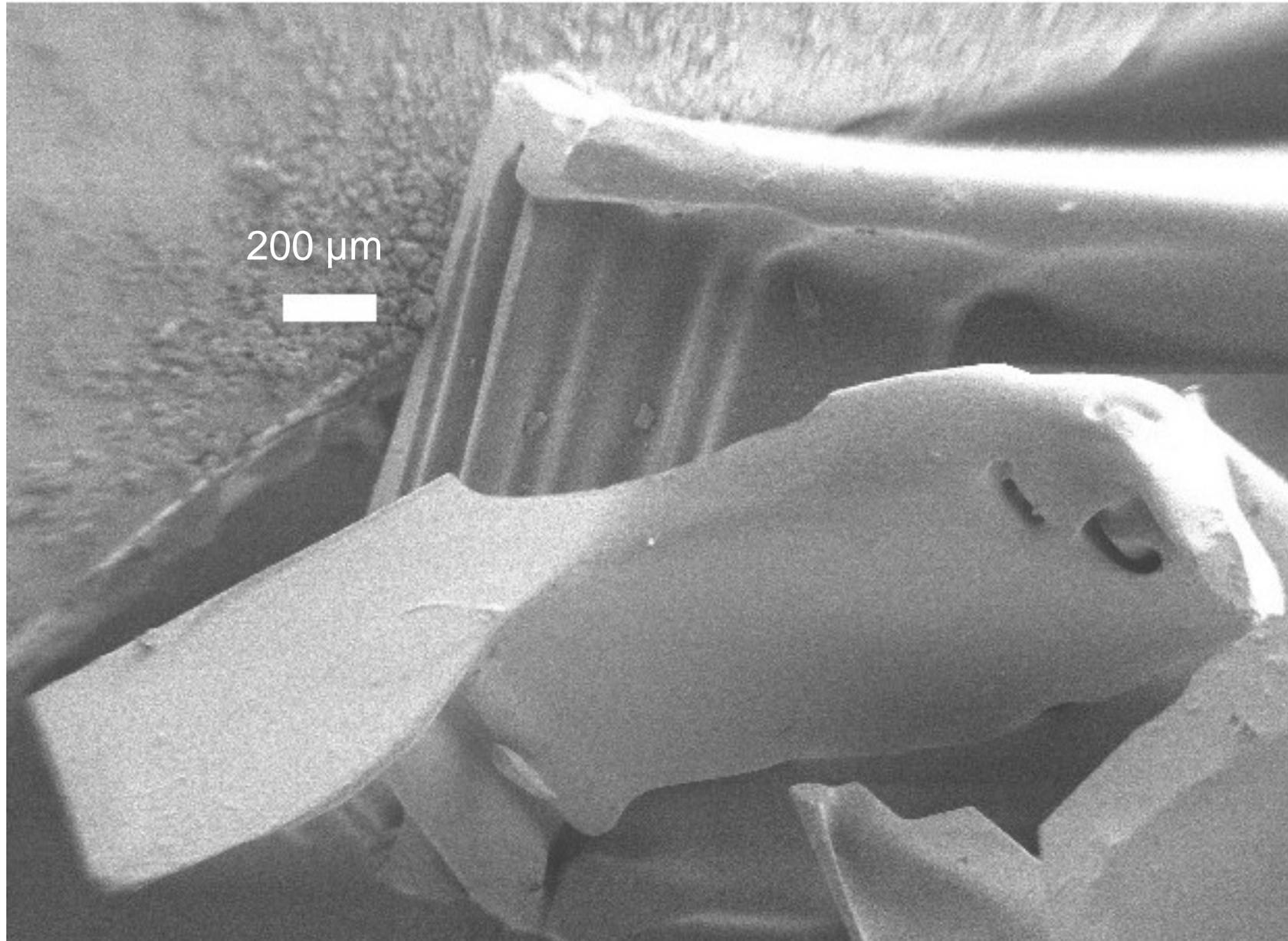
## Transformation de grésil sous gradient : 4 jours



## Transformation de grésil sous gradient : 12 jours



## Transformation de grésil sous gradient : 55 jours



# Etude de la neige en conditions naturelles

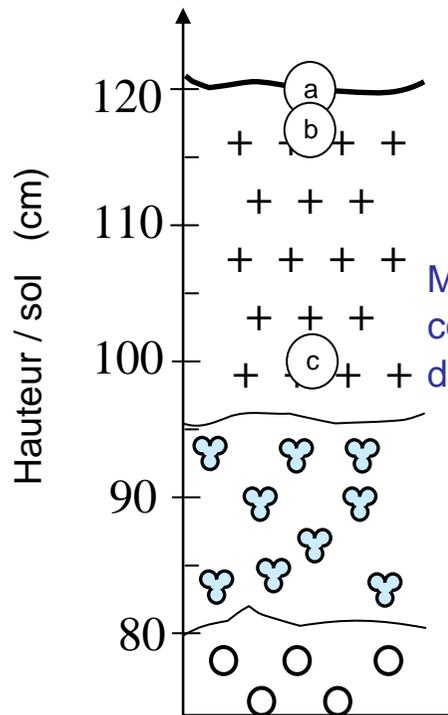
- + Neige fraîche
- ☞ Couche de regel
- Cristaux facettés
- Neige humide
- (b) Echantillonnage

Chute du 9 février 2001, col du Lautaret, 2058 m

$T_{\text{air}} = -0.3^{\circ}\text{C}$  à la fin de la chute

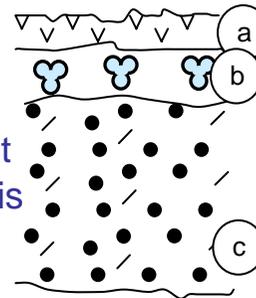
$T_{\text{neige}} = -2.5^{\circ}\text{C}$

Durée de la chute : environ 10 heures



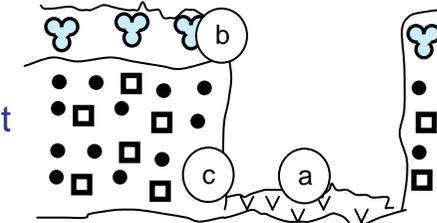
9-fev.

Météo : essentiellement couvert, jour et nuit, puis dégagé à partir du 12



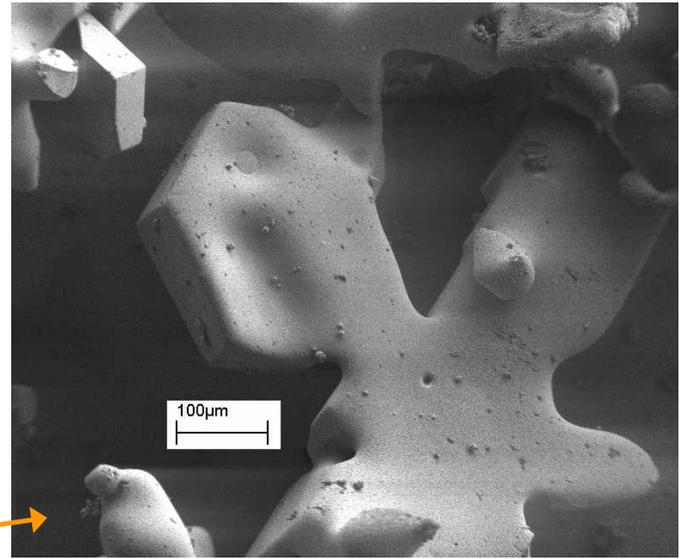
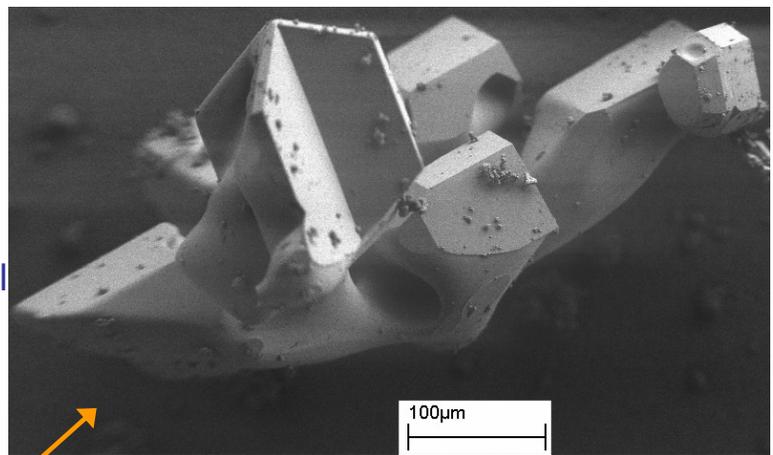
13 fev.

Météo : essentiellement dégagé, jour et nuit



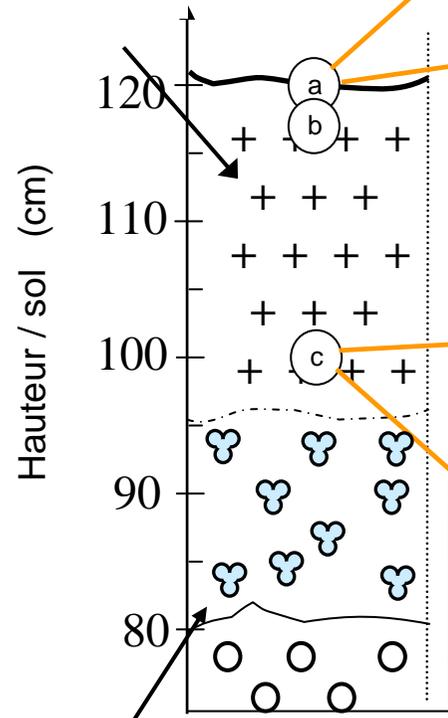
15 fev.

- + Neige fraiche
- ☞ Couche de regel
- Neige humide
- ⓑ Echantillonnage



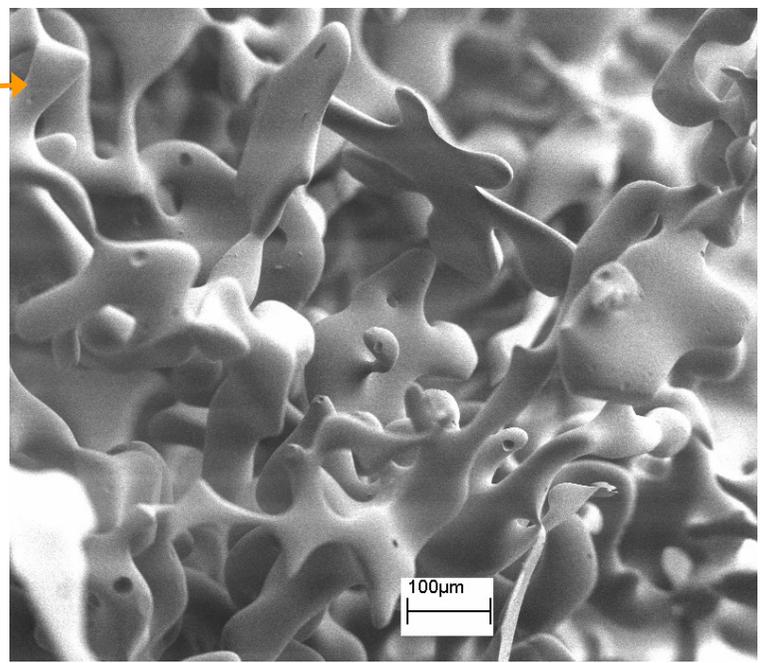
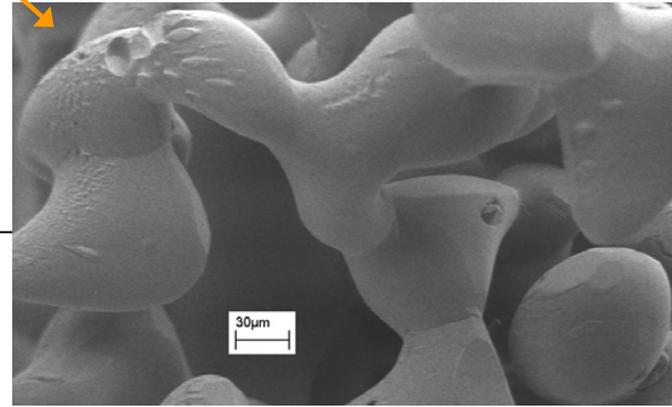
9 Fevrier

Neige fraiche



Couche de regel

9-fev



# Observation des changements verticaux le 9 février

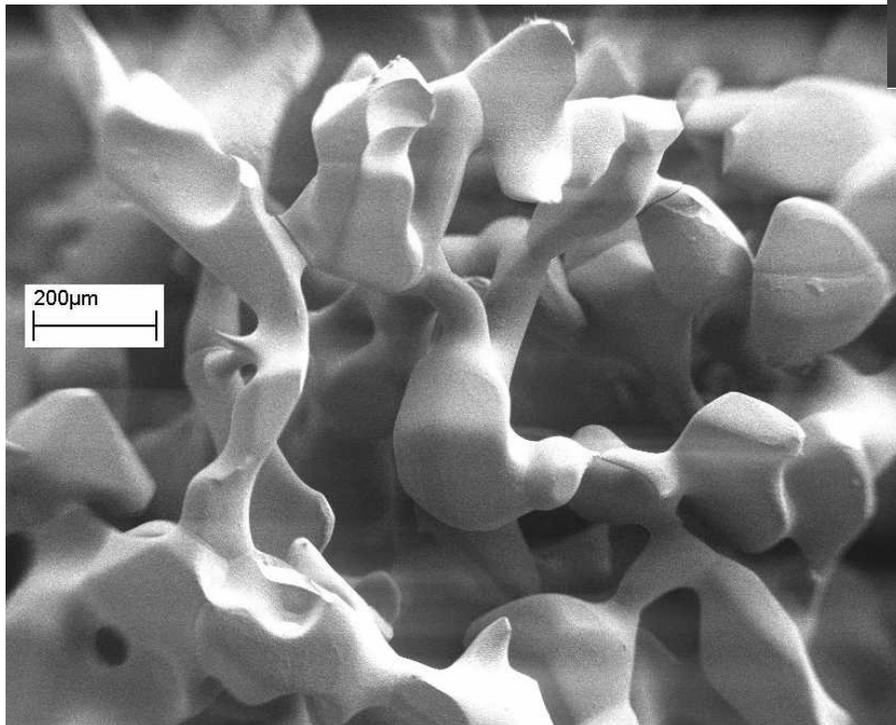
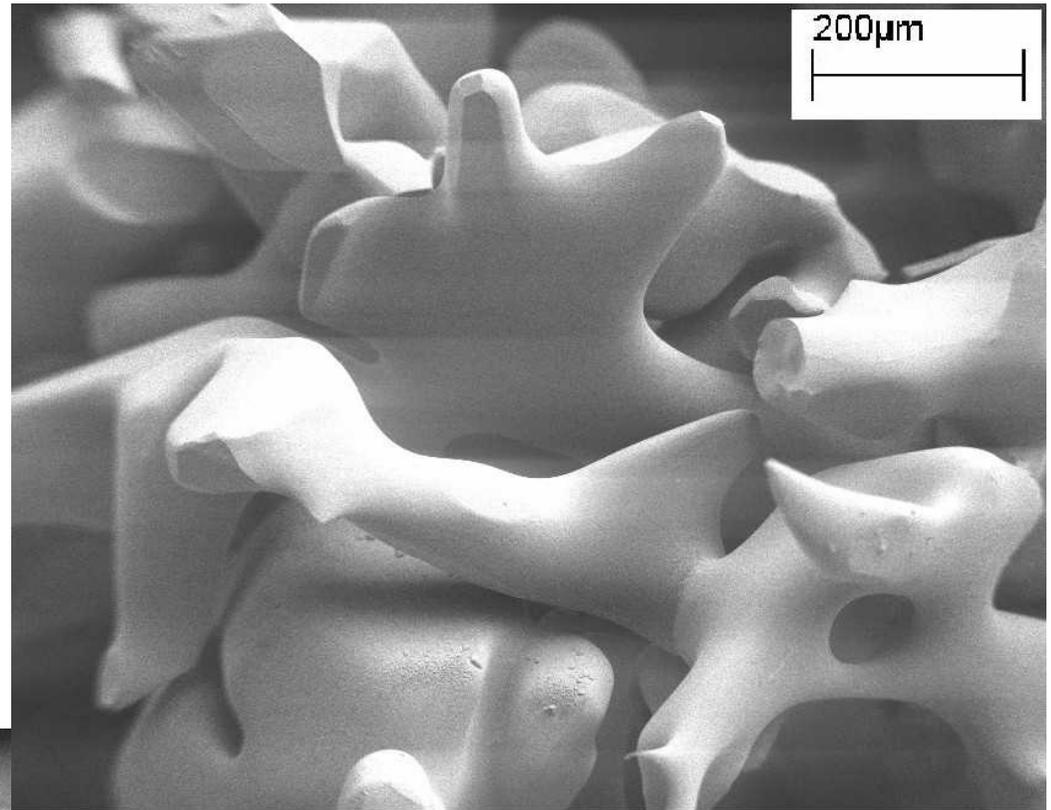
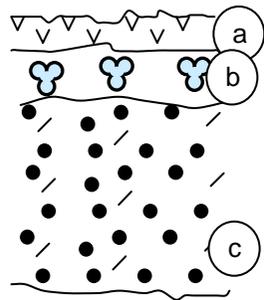
a- sous couche supérieure : arrondissement, et croissance rapide de givre de surface dû au refroidissement de la surface

c- sous couche inférieure : arrondissement important, dû au métamorphisme quasi-isotherme

13 Fevrier

$t_0 + 4$  jours

Sous couche c

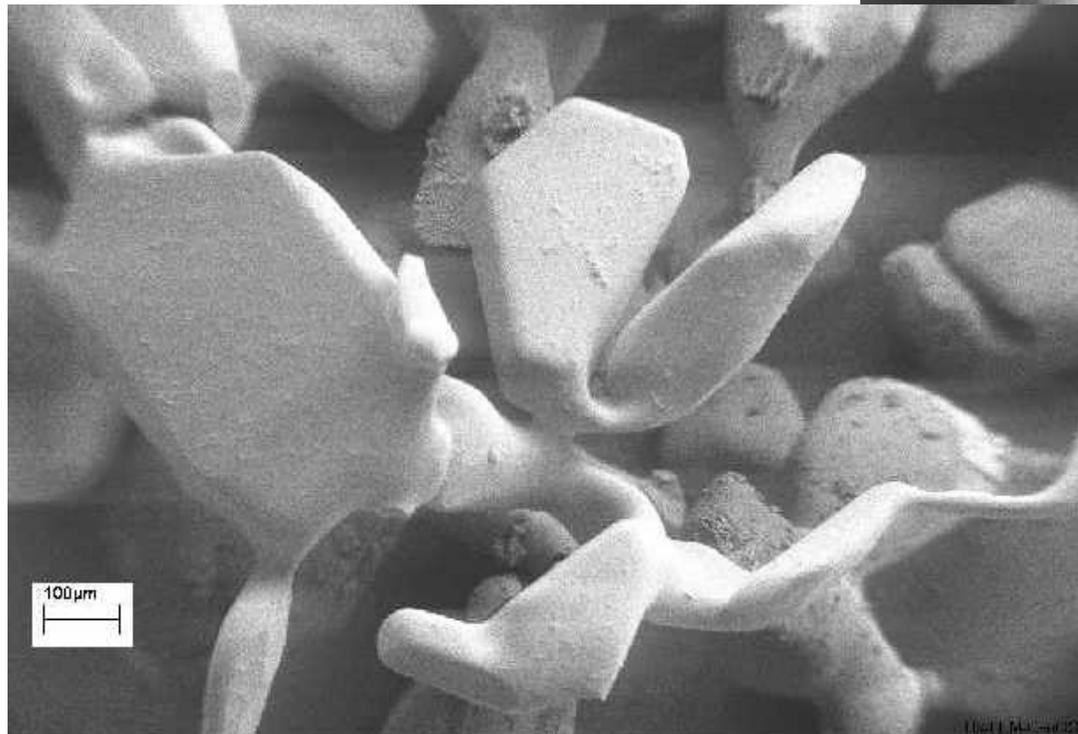
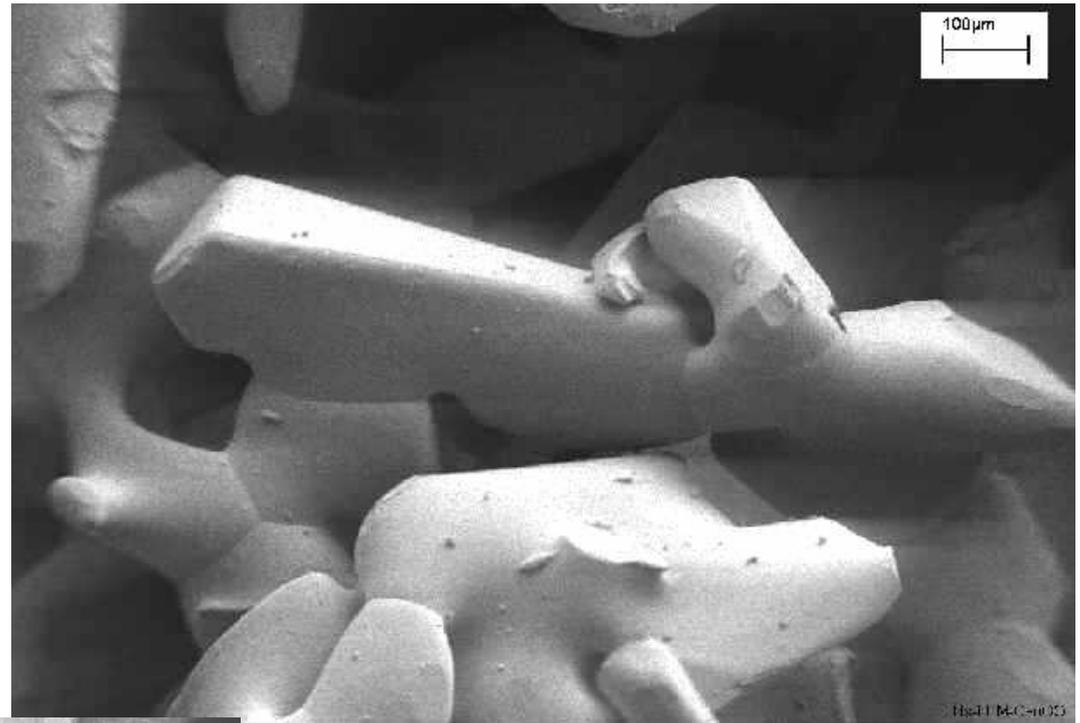
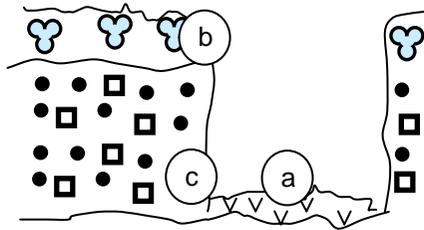


Formes arrondies  
prépondérantes, mais existence  
de quelques facettes

15 Fevrier

$t_0 + 6$  jours

Sous couche c



Taille des cristaux a  
fortement augmenté

Nombreuses faces  
planes avec angles  
arrondis

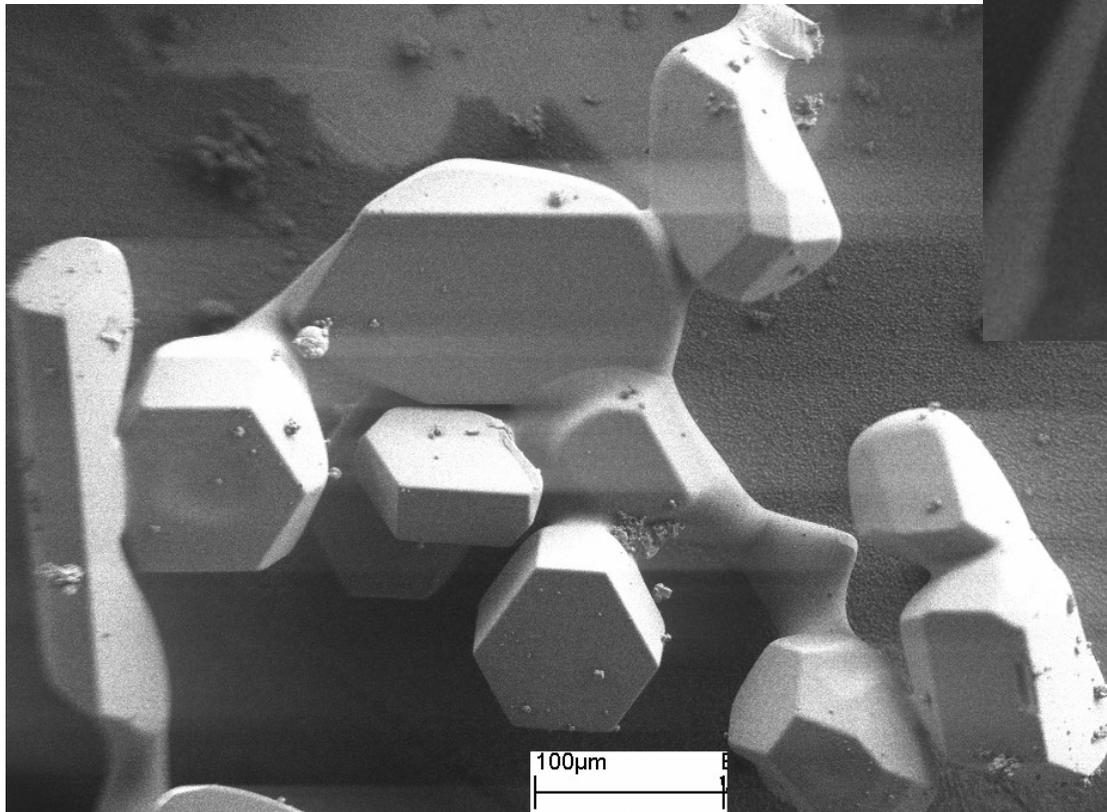
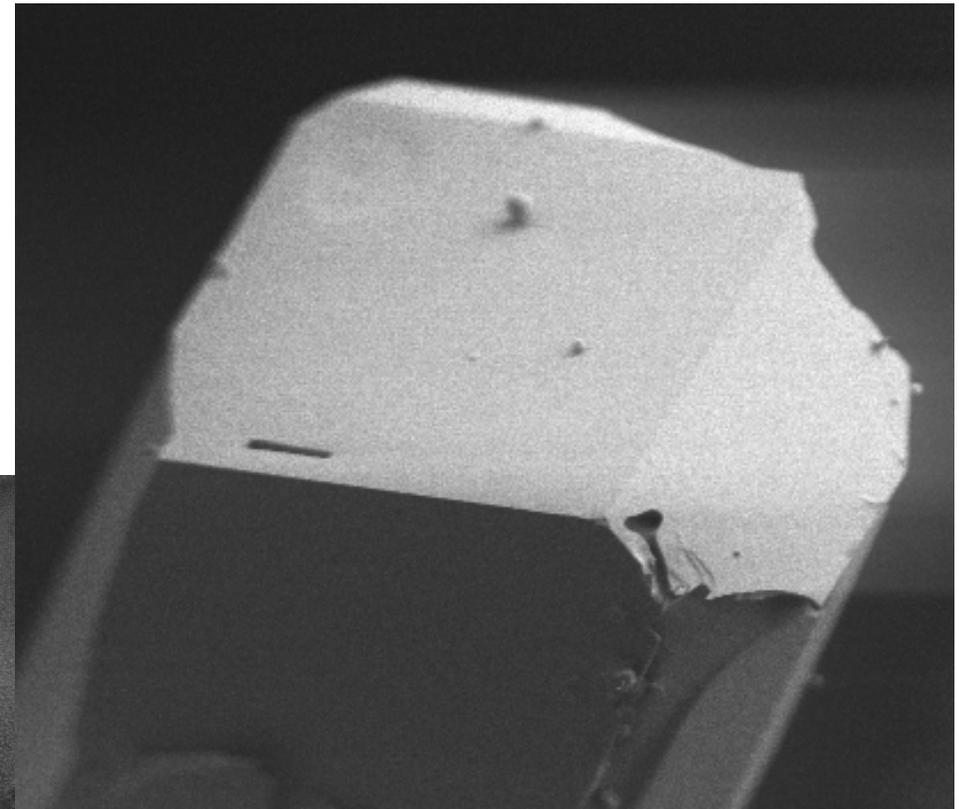
# Sous couche c : observation des changements

Initialement, l'arrondissement est le phénomène prédominant. Quelques facettes sont observées, sans doutes causées par des flux d'air hétérogènes dans le manteau neigeux

Puis, le cyclage thermique dû aux nuits fraîches induit une croissance cristalline à vitesse modérée, avec formation de faces planes bien développées ayant des bords arrondis

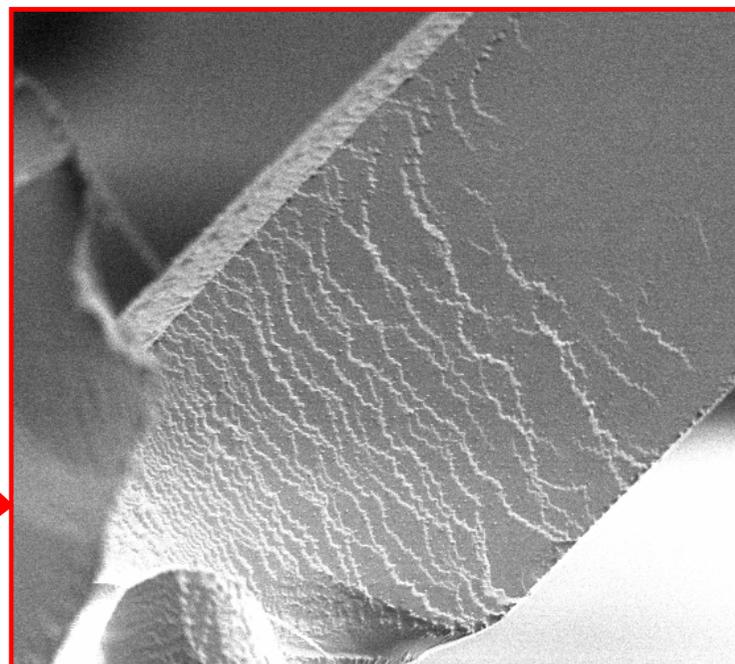
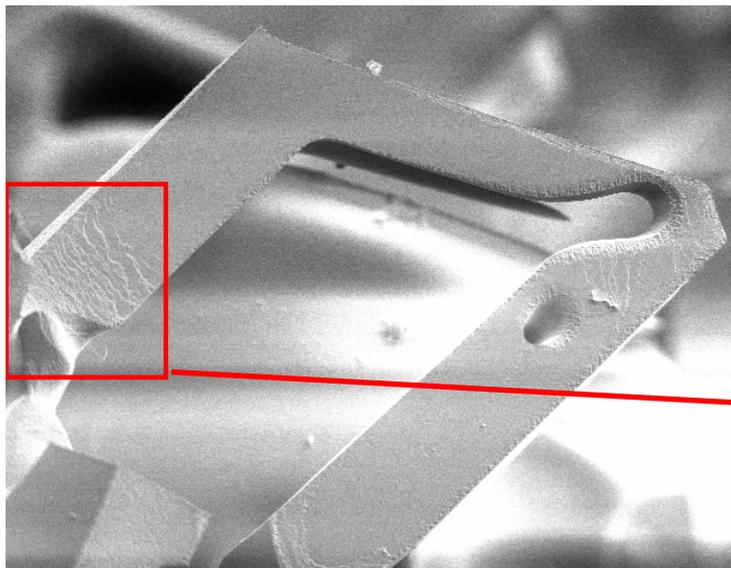
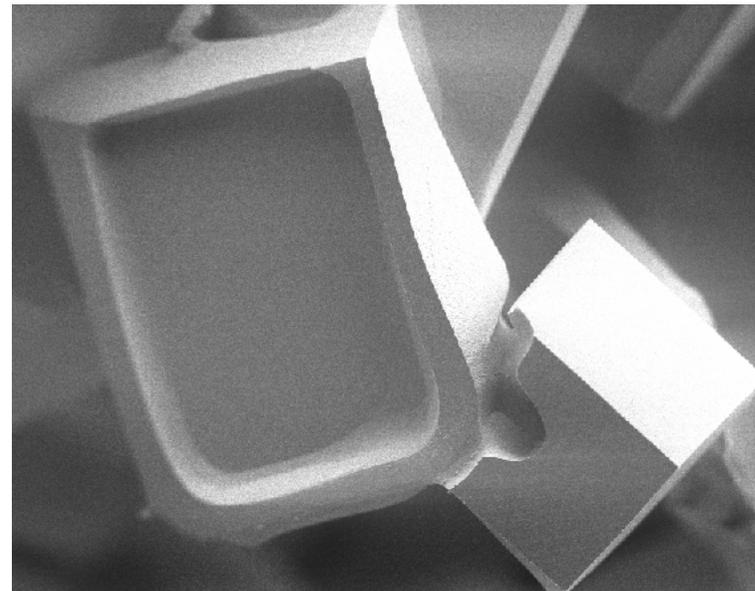
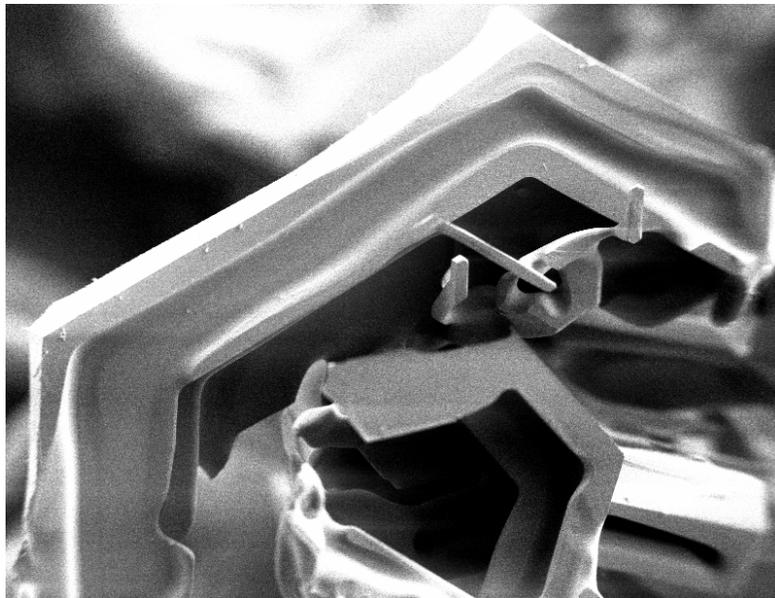
# Développement du givre de surface

Juste après la chute :  
Facettes bien développées  
avec des angles vifs



# Développement du givre de surface

4 jours après la chute : formes creuses



Marches de croissance ?

# Observations du givre de surface

La croissance rapide produit des faces planes avec des angles vifs.

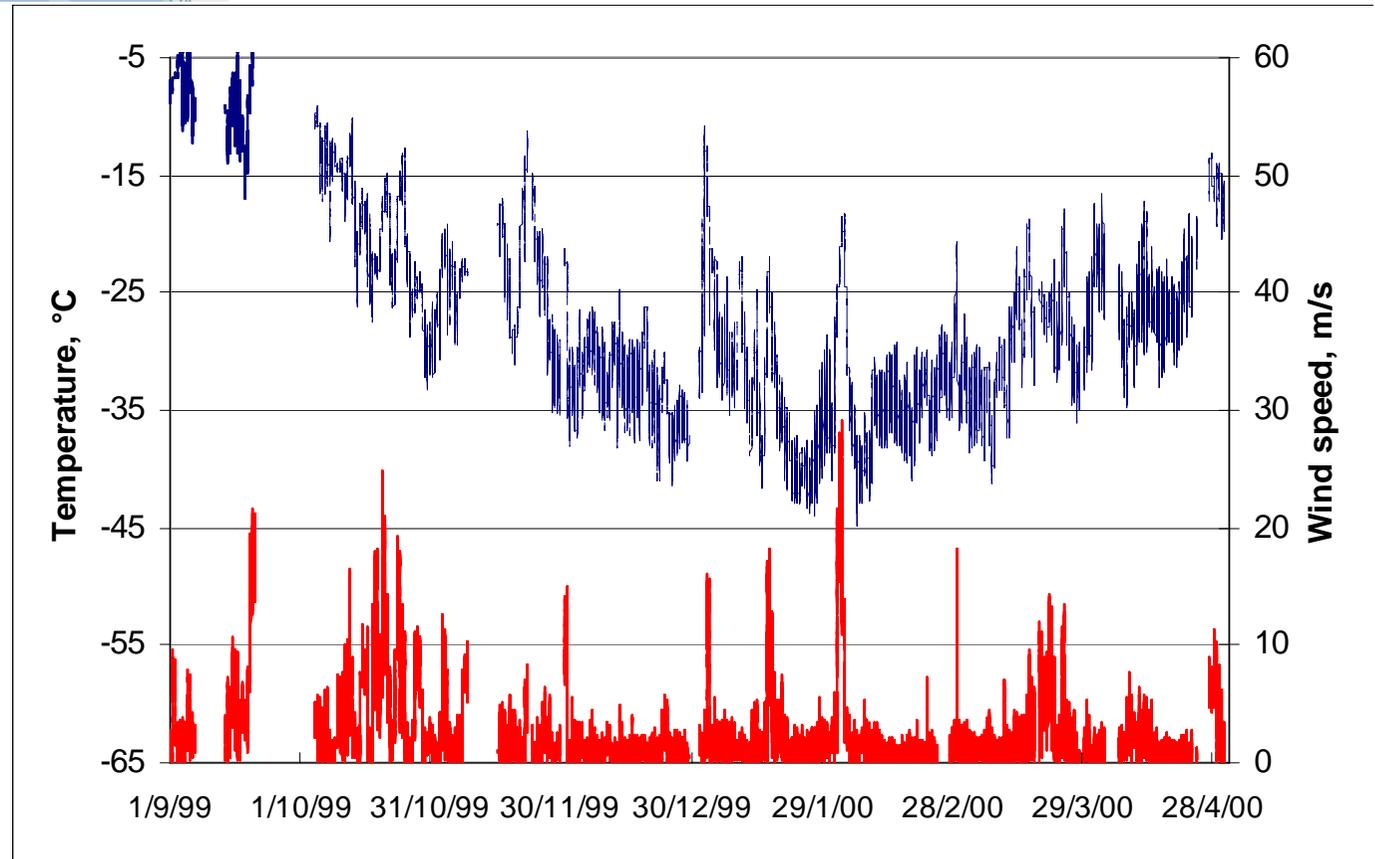
Alors que la taille des cristaux augmente, des formes creuses apparaissent.

Observation de croissance par nucléation et regroupement de marches ??

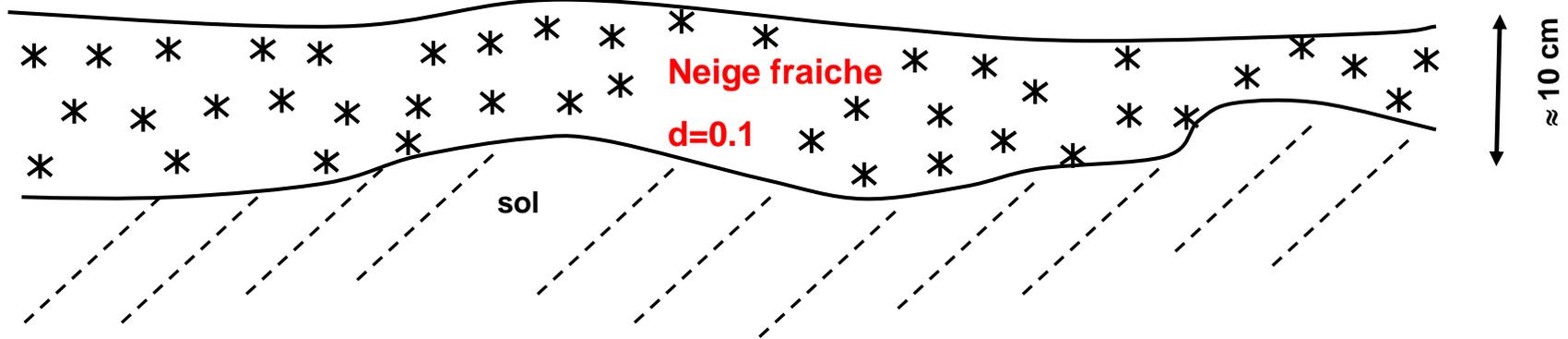


là

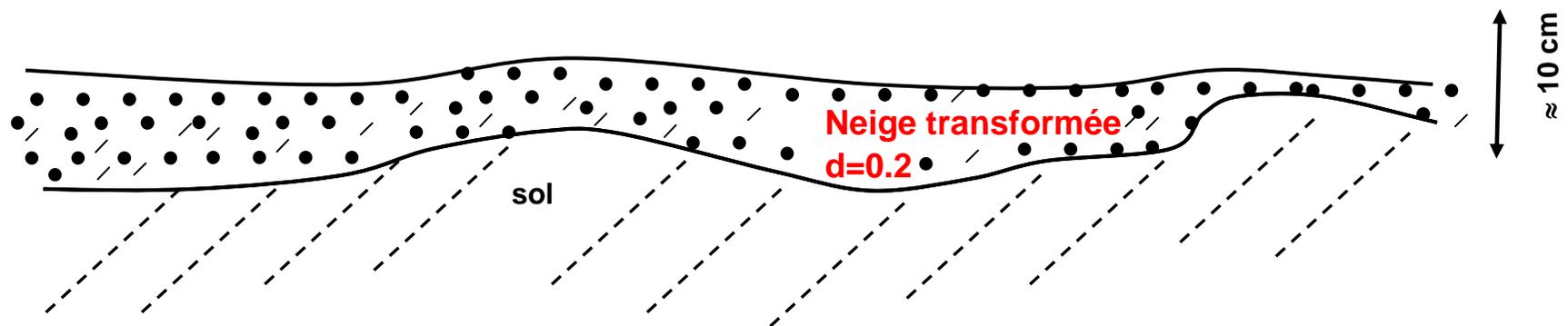
## Etude de cas : formation du manteau neigeux arctique



# Début octobre 1999: premières chutes de neige



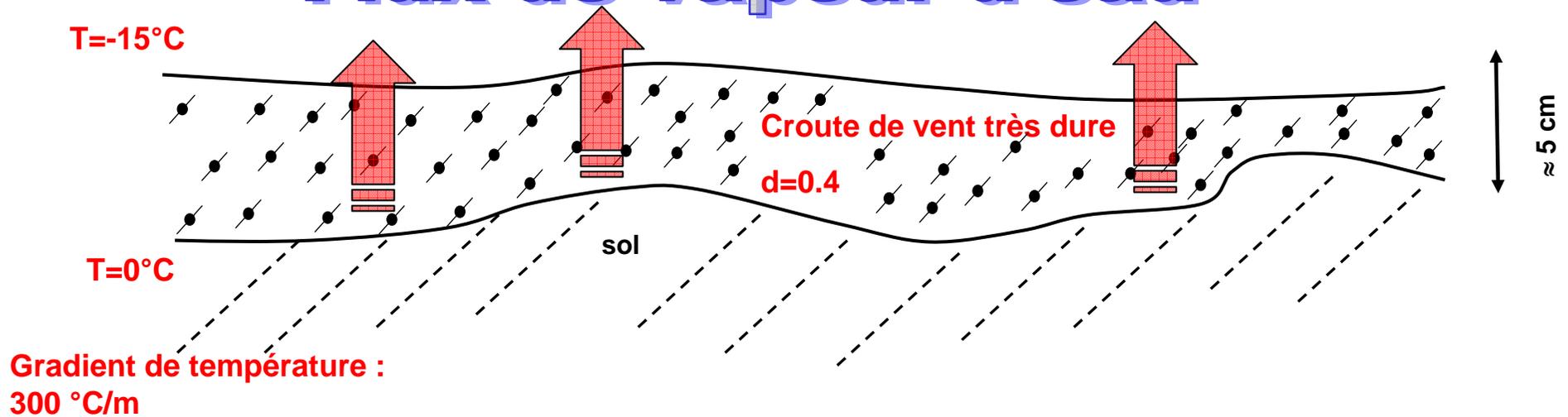
# Métamorphisme rapide



Mi-octobre 1999 : tempête de vent

## sublimation

### Flux de vapeur d'eau

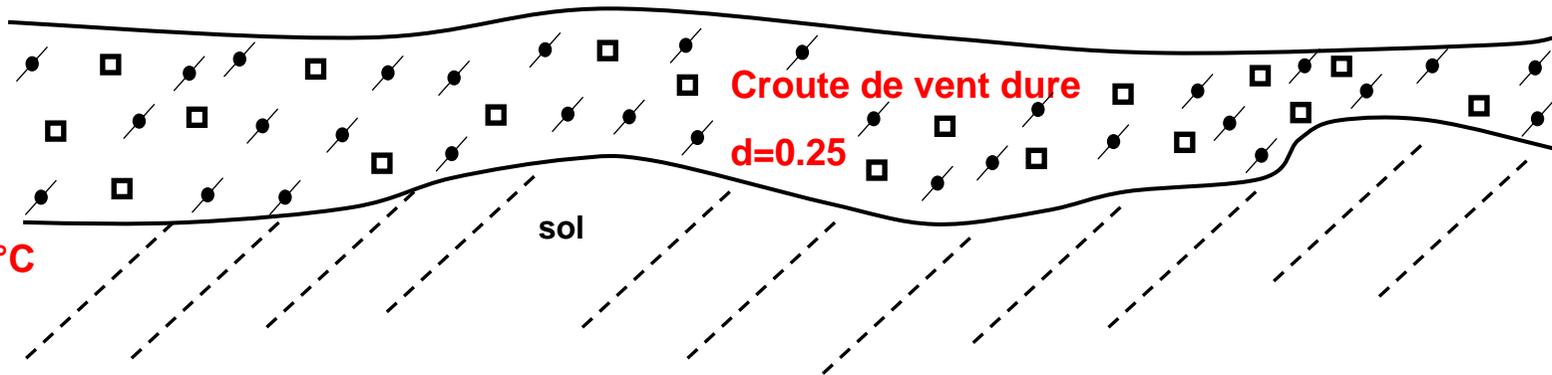


- ⇒ densité passe de 0,4 à 0,25
- ⇒ Perméabilité de la neige croit
- ⇒ Transport de vapeur d'eau plus rapide
- ⇒ Croissance cristalline rapide possible

# Fin octobre 1999 : sublimation et croissance des cristaux

$T = -20^{\circ}\text{C}$

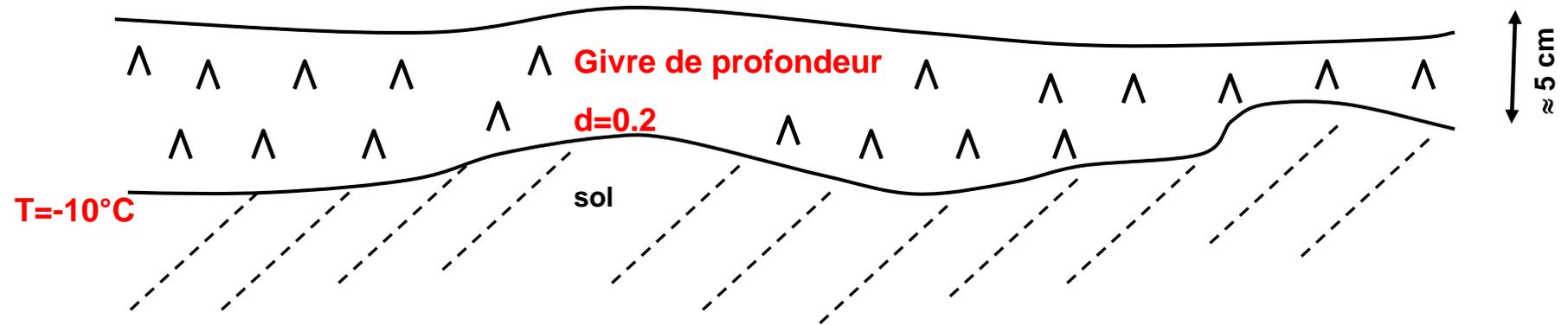
$T = -5^{\circ}\text{C}$



Gradient de température :  
 $300^{\circ}\text{C/m}$

# Début novembre 1999 : formation de givre de profondeur

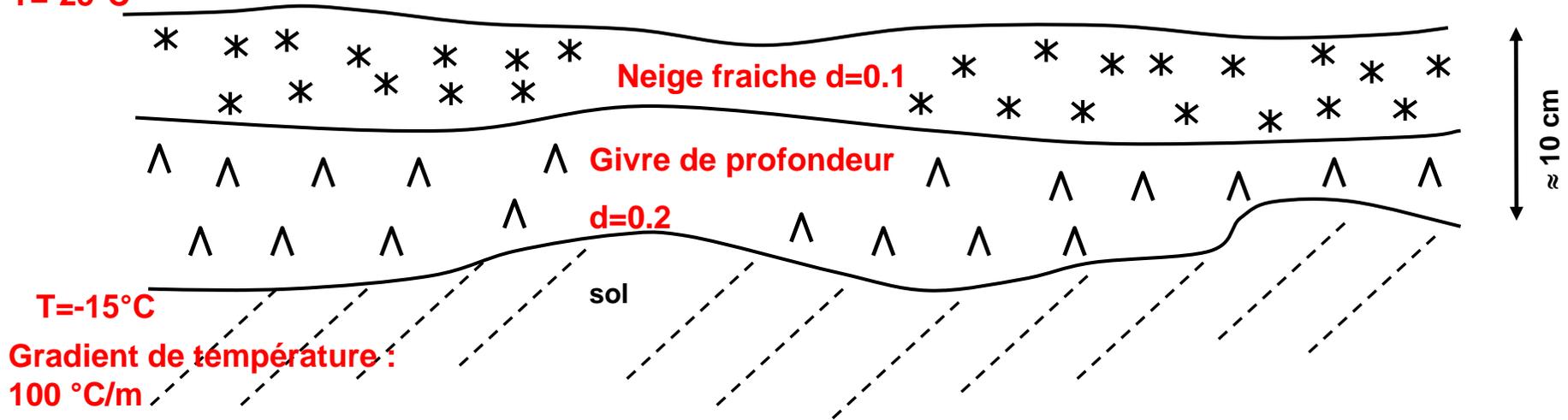
**T=-25°C**



**Gradient de température :  
300 °C/m**

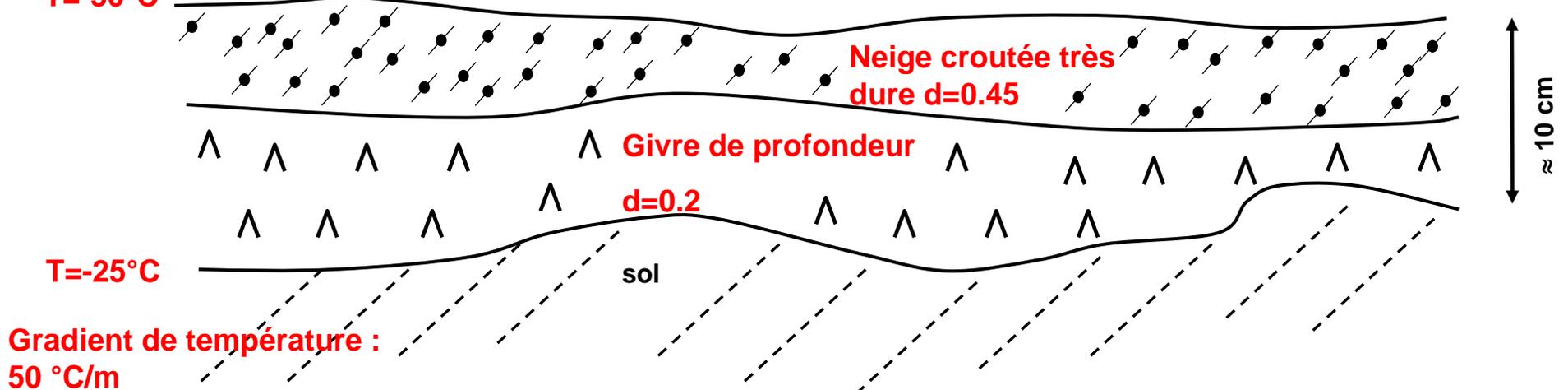
# Courant novembre: précipitations

T=-25°C

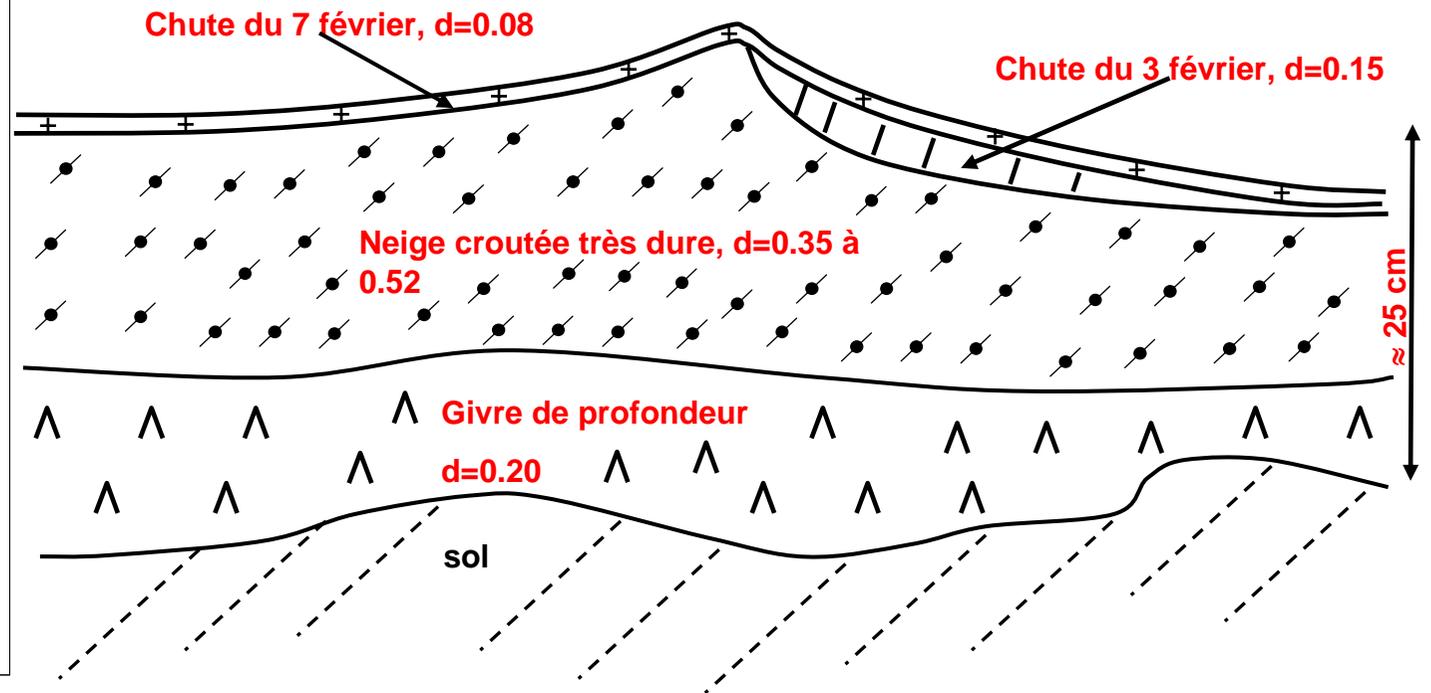
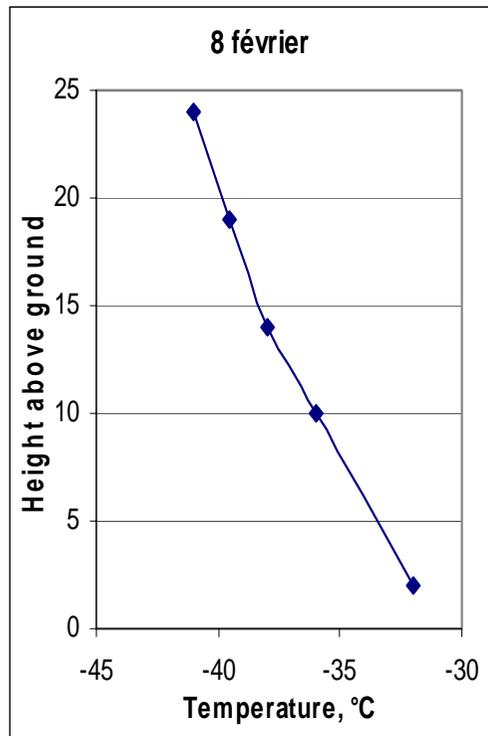


puis: métamorphisme, tempêtes de vent

T=-30°C

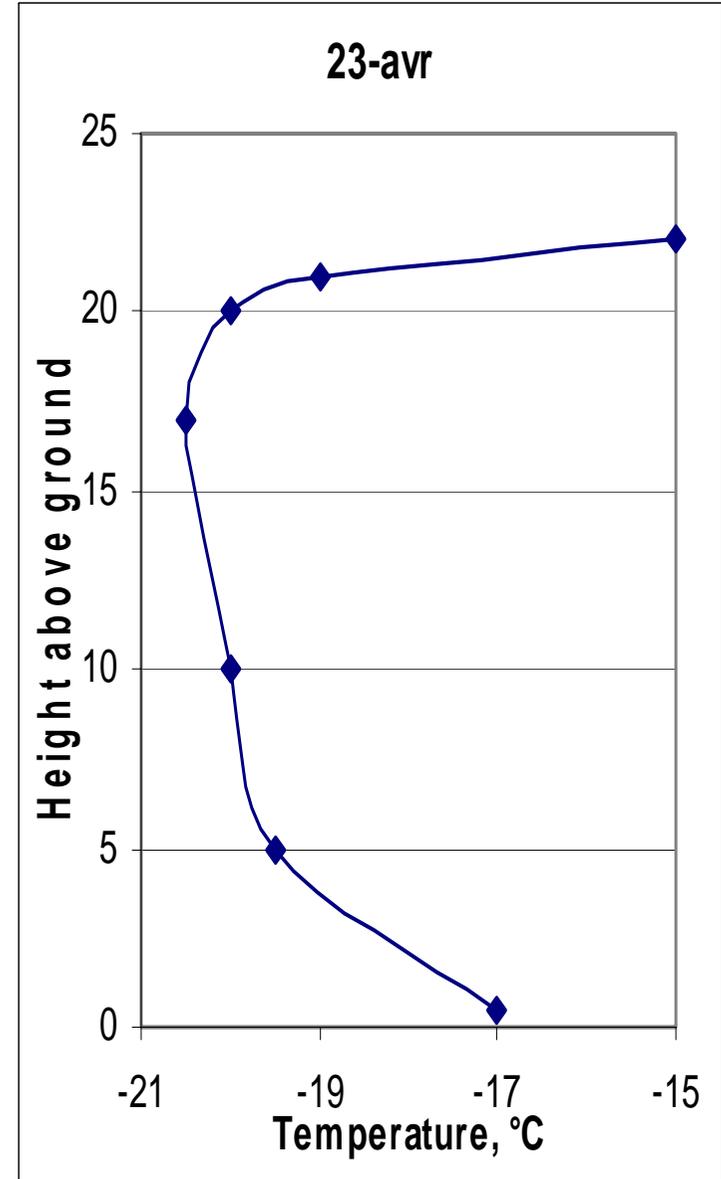
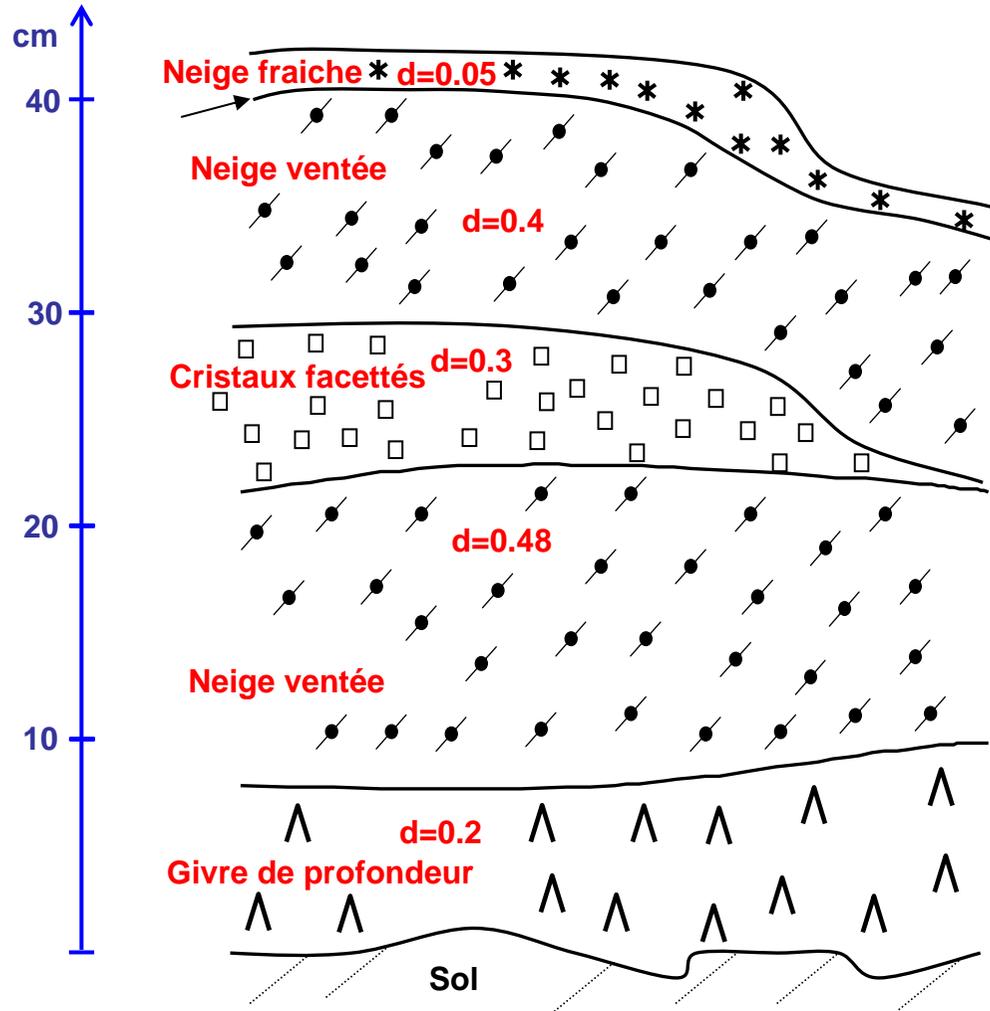


# Le 8 février 2000



Gradient de température:  
 $36$  °C/m

Le 28 avril 2000



# Domaines d'application du métamorphisme

Prévision des avalanches

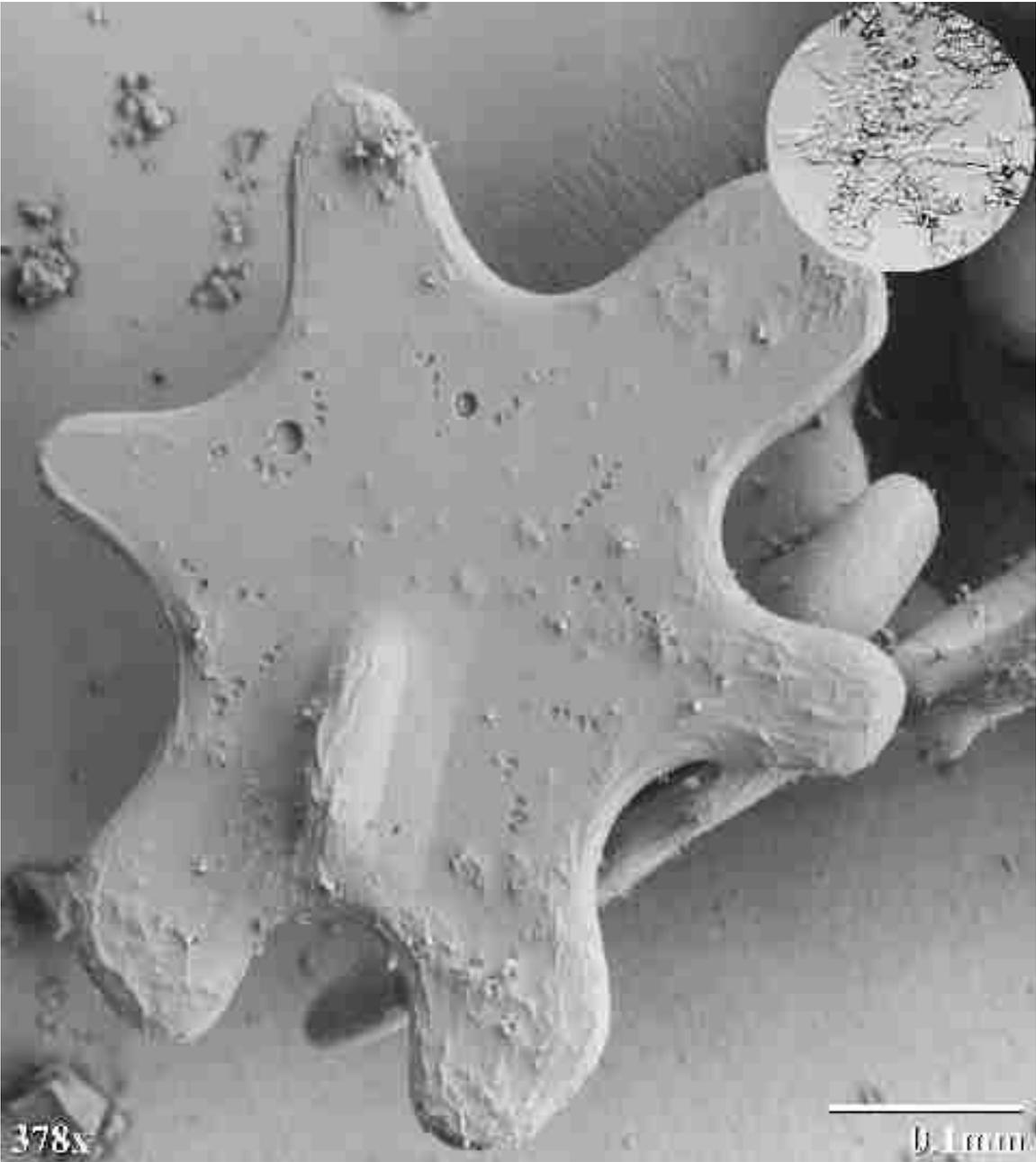
Bilan radiatif des surfaces enneigées : climat et structure de l'atmosphère

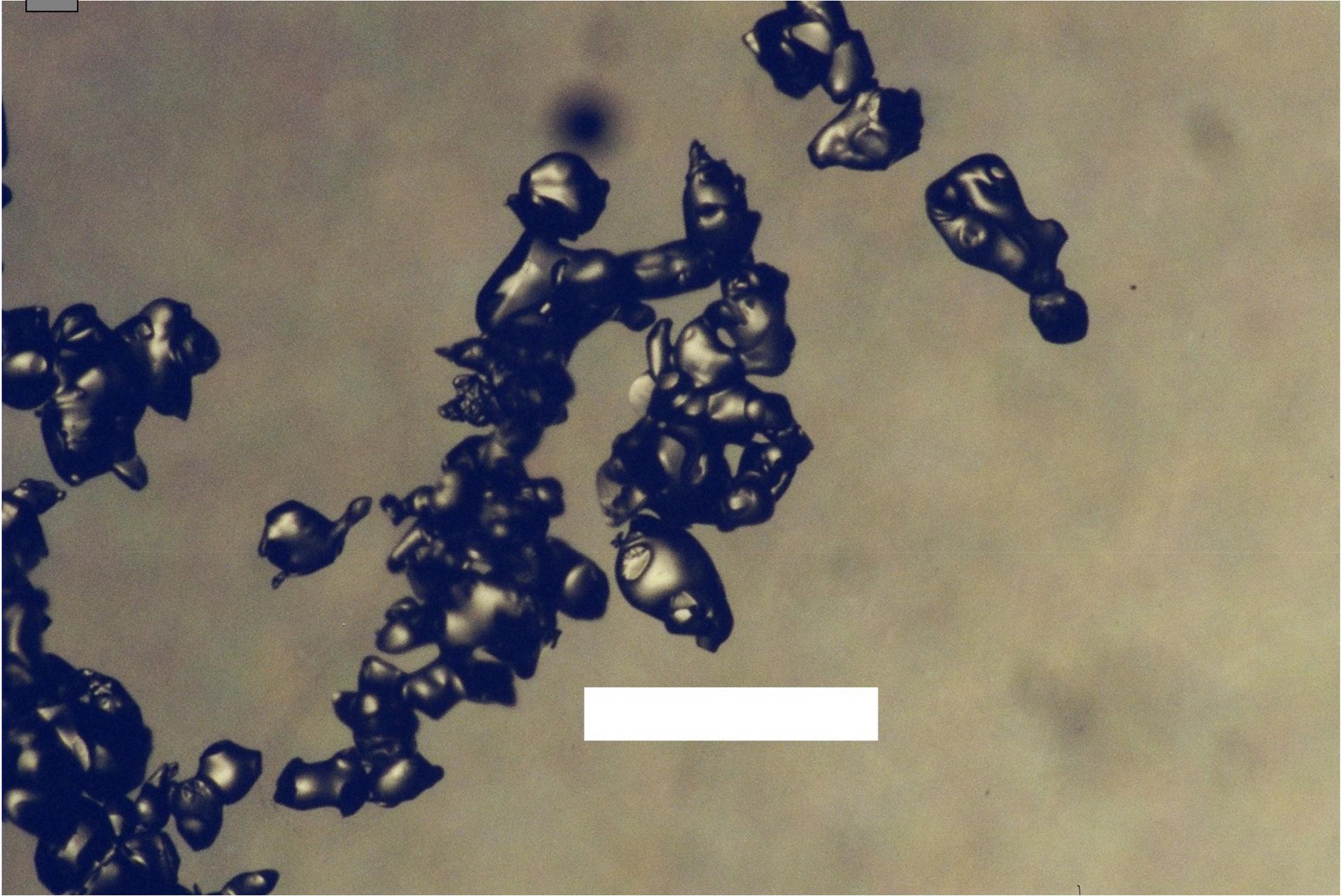
Interactions entre les sols et le manteau neigeux : gel des sols, pergélisol, croissance de la végétation, activité microbienne

Durée du manteau neigeux saisonnier, fonte, ressources en eaux

Ski, tourisme, économie, pognon

1

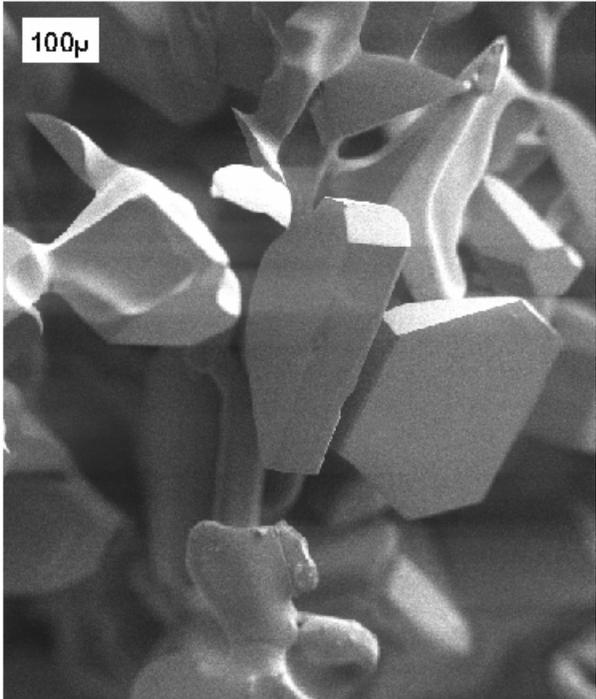
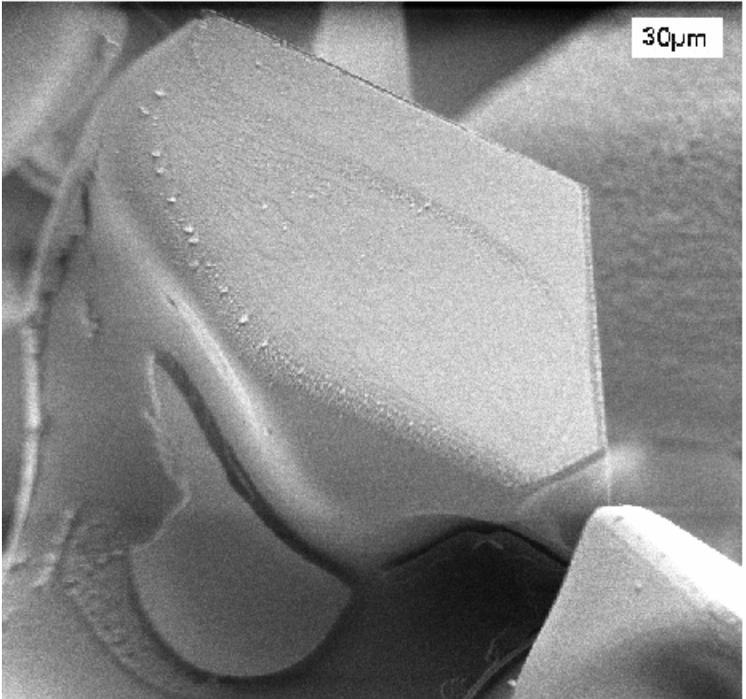
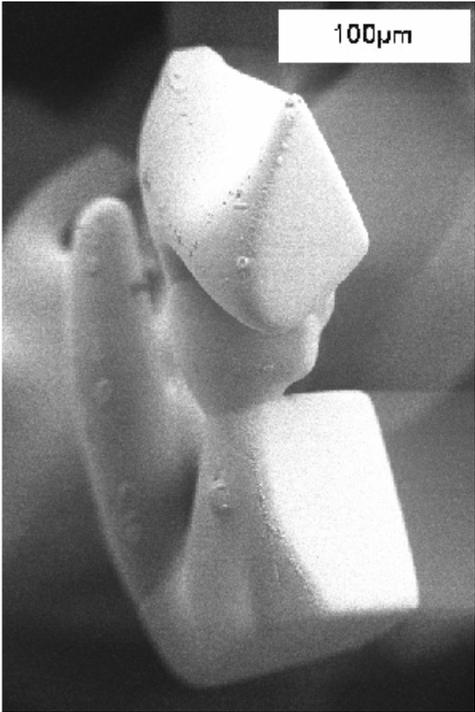
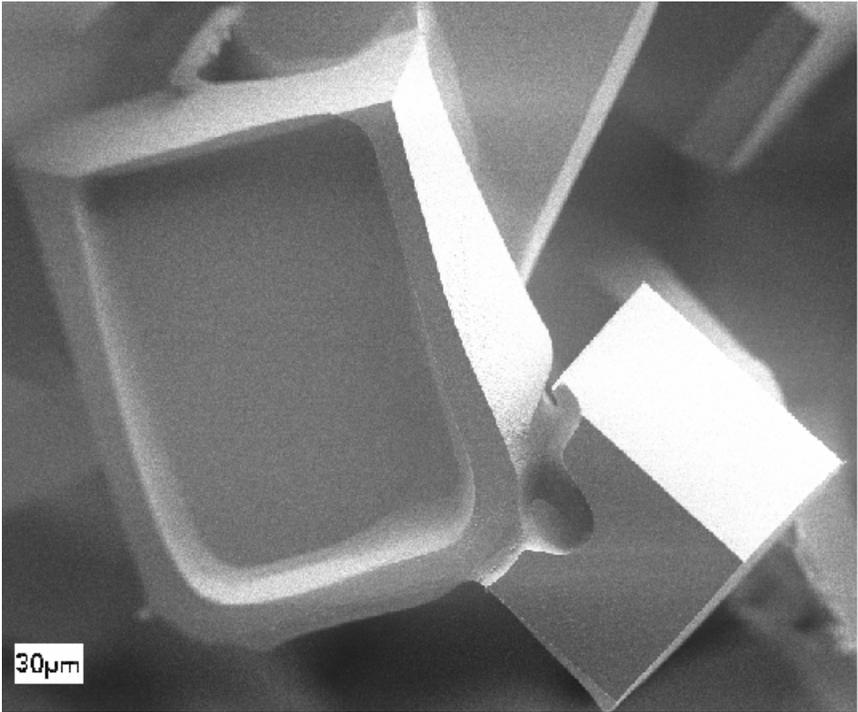




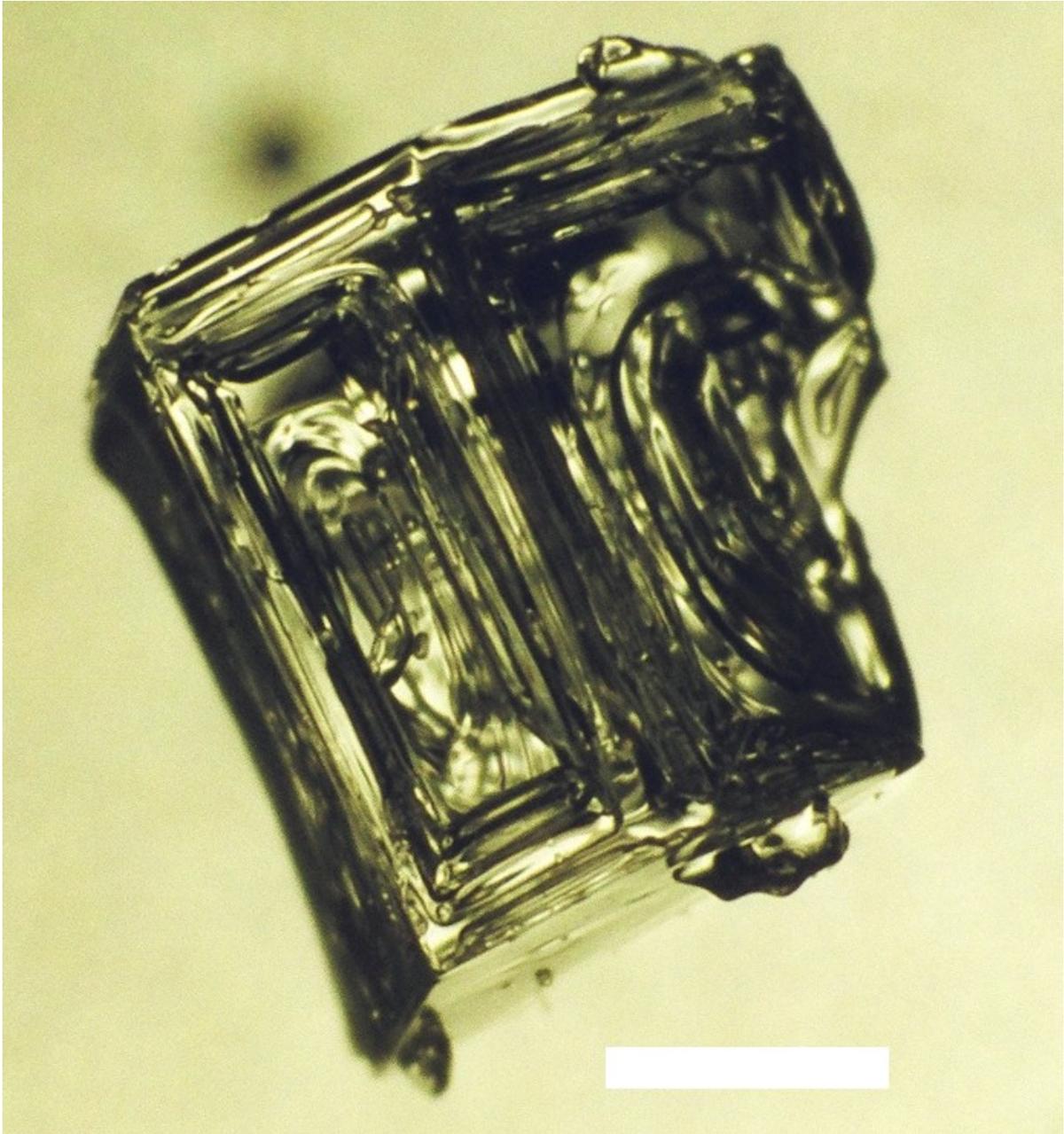
3



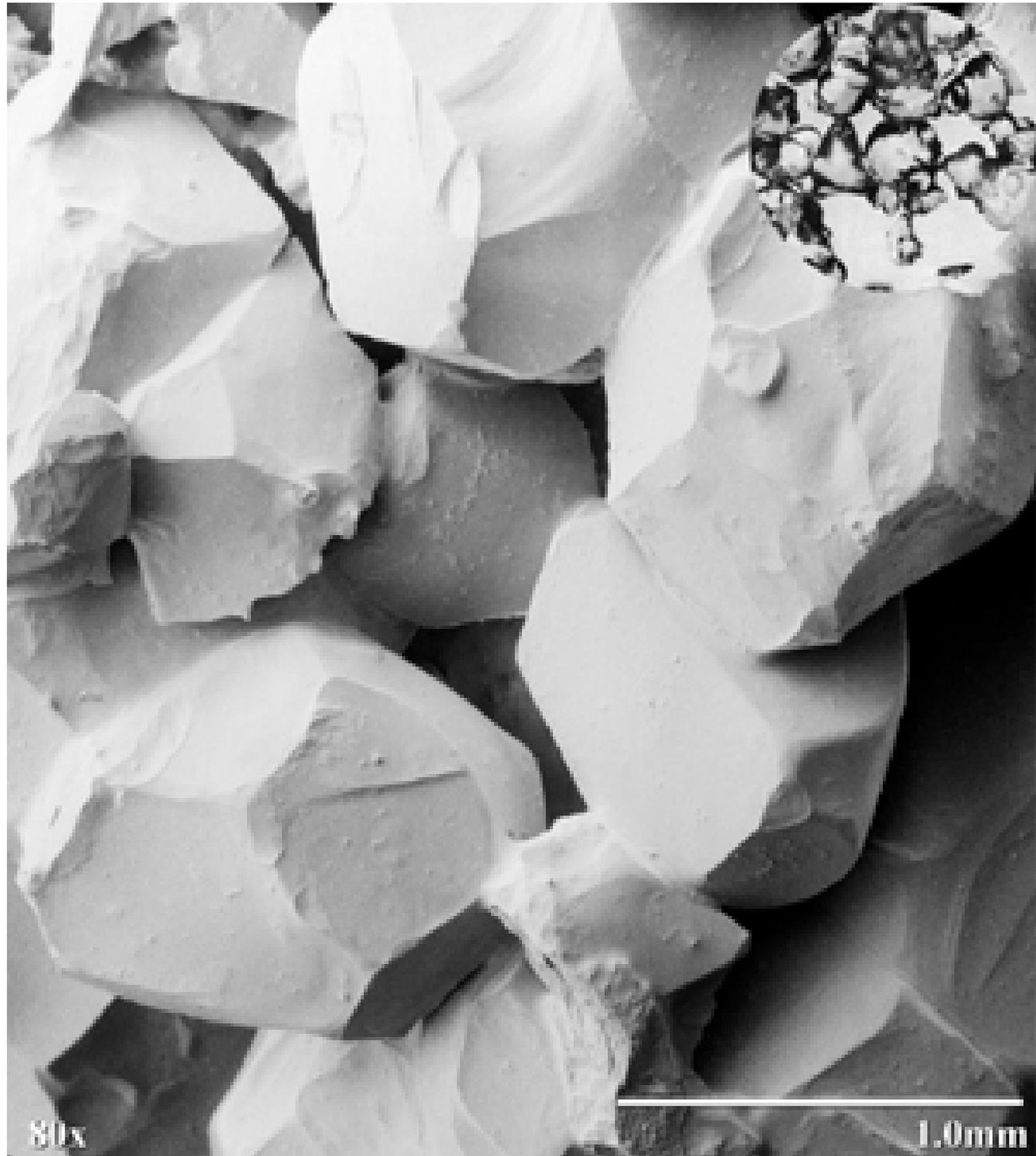
4

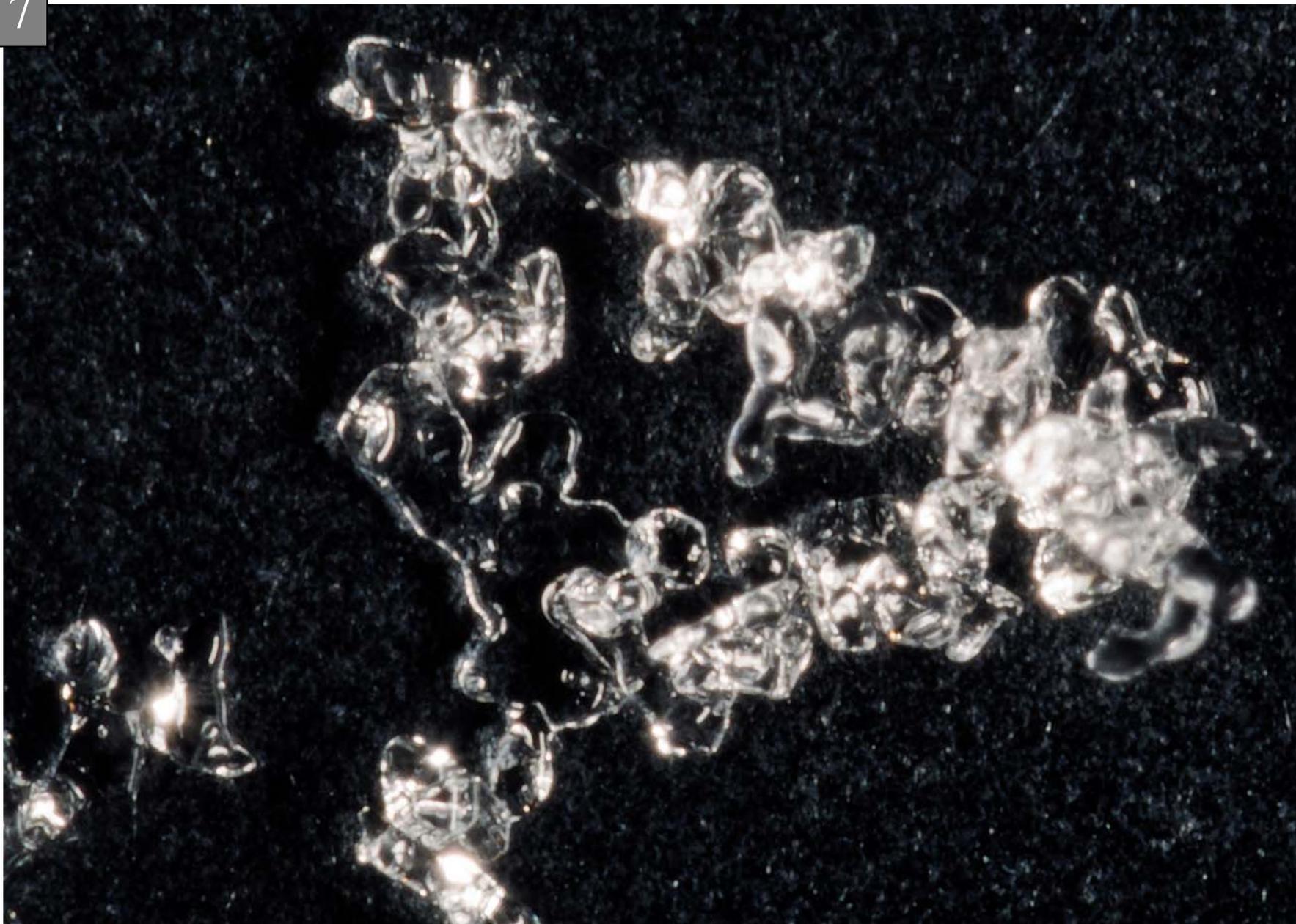


5

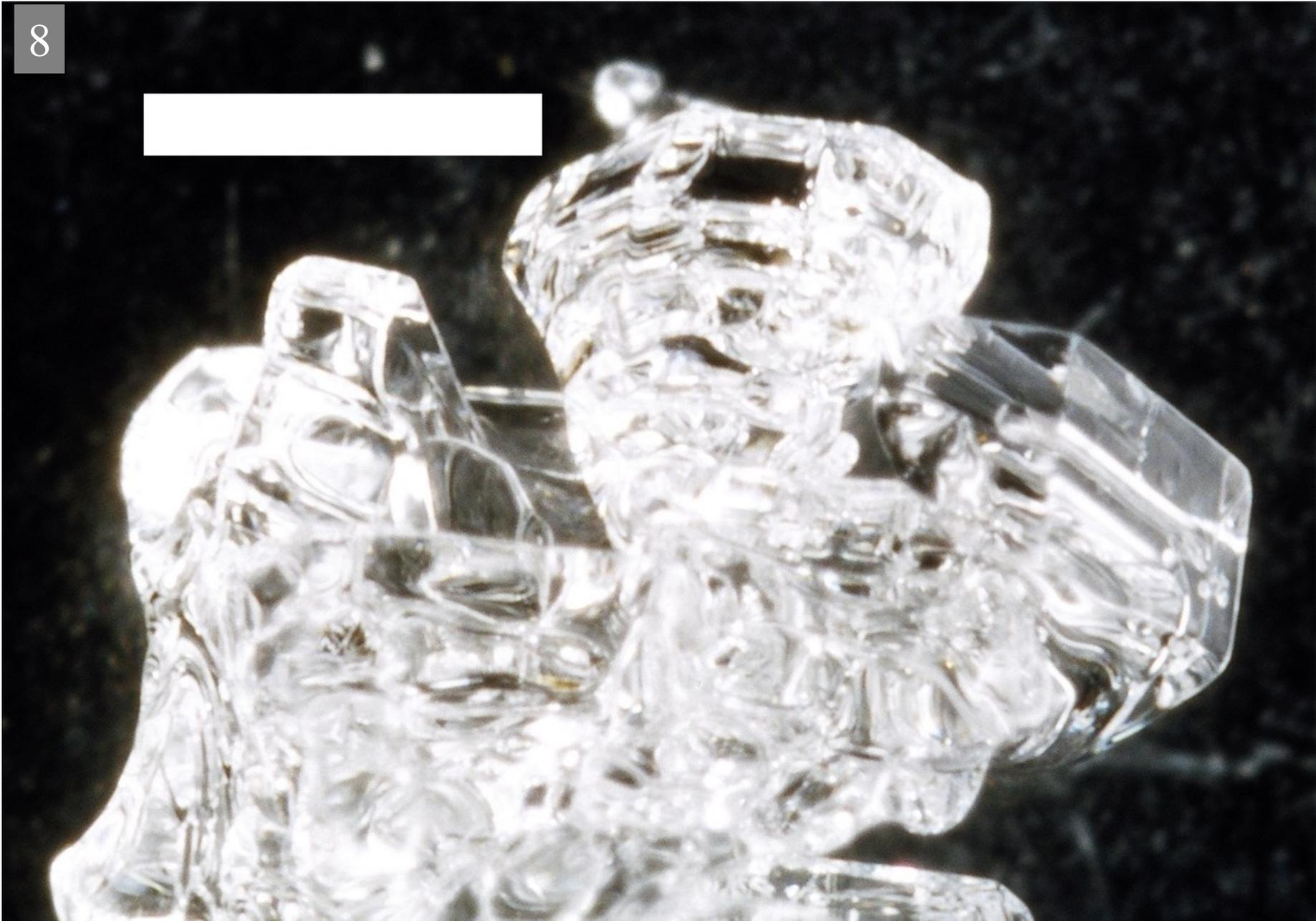


6

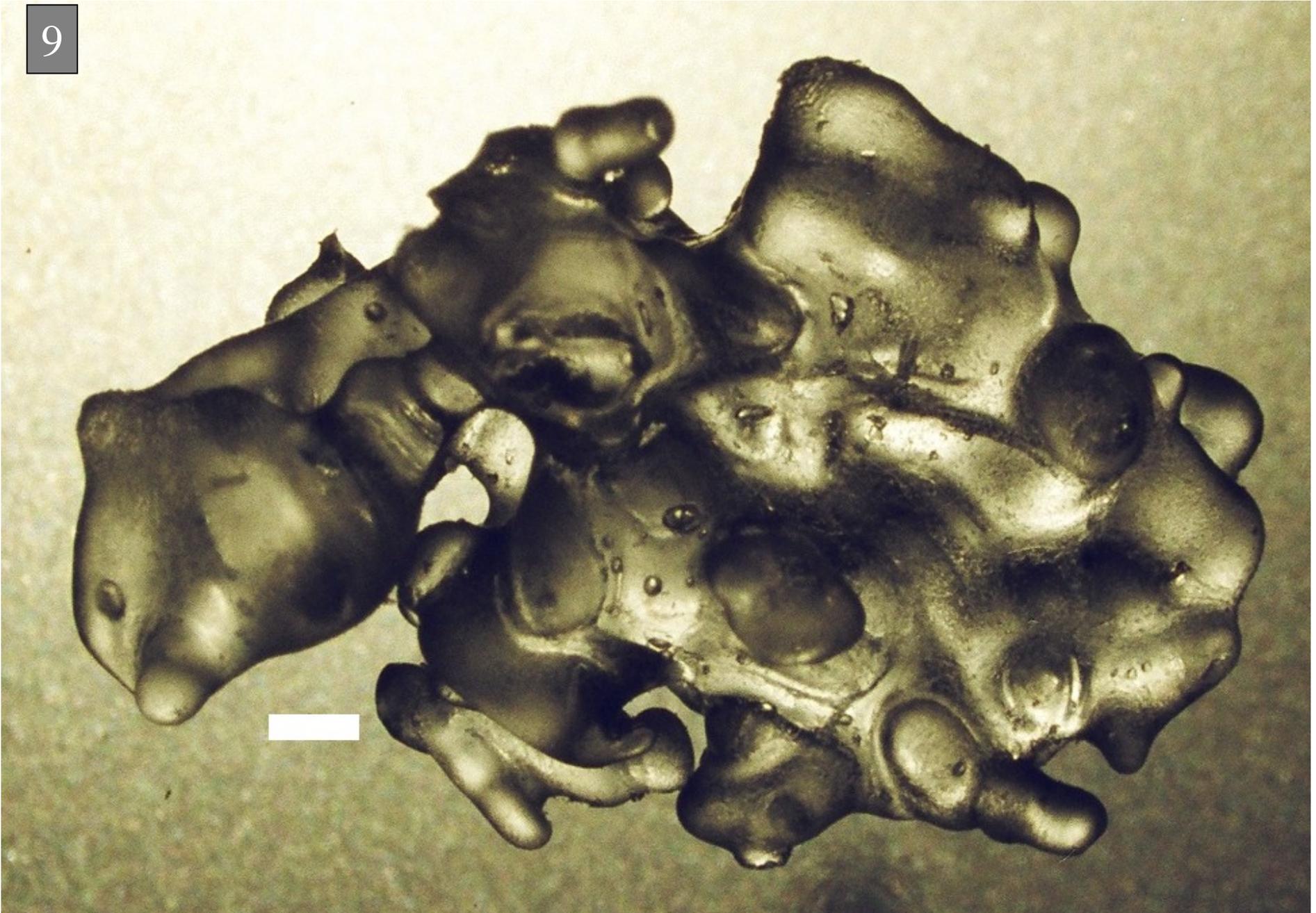


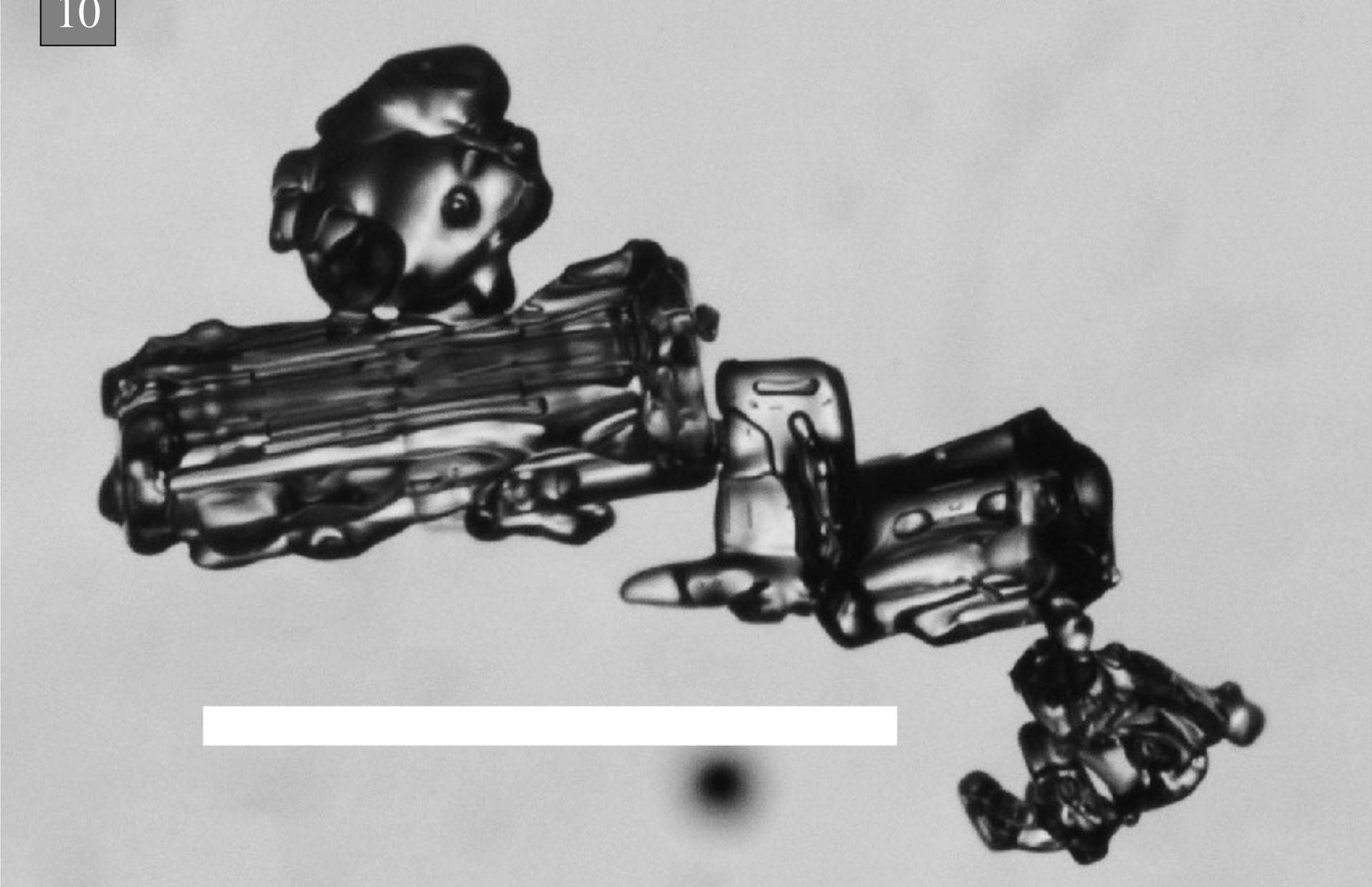


[Redacted]

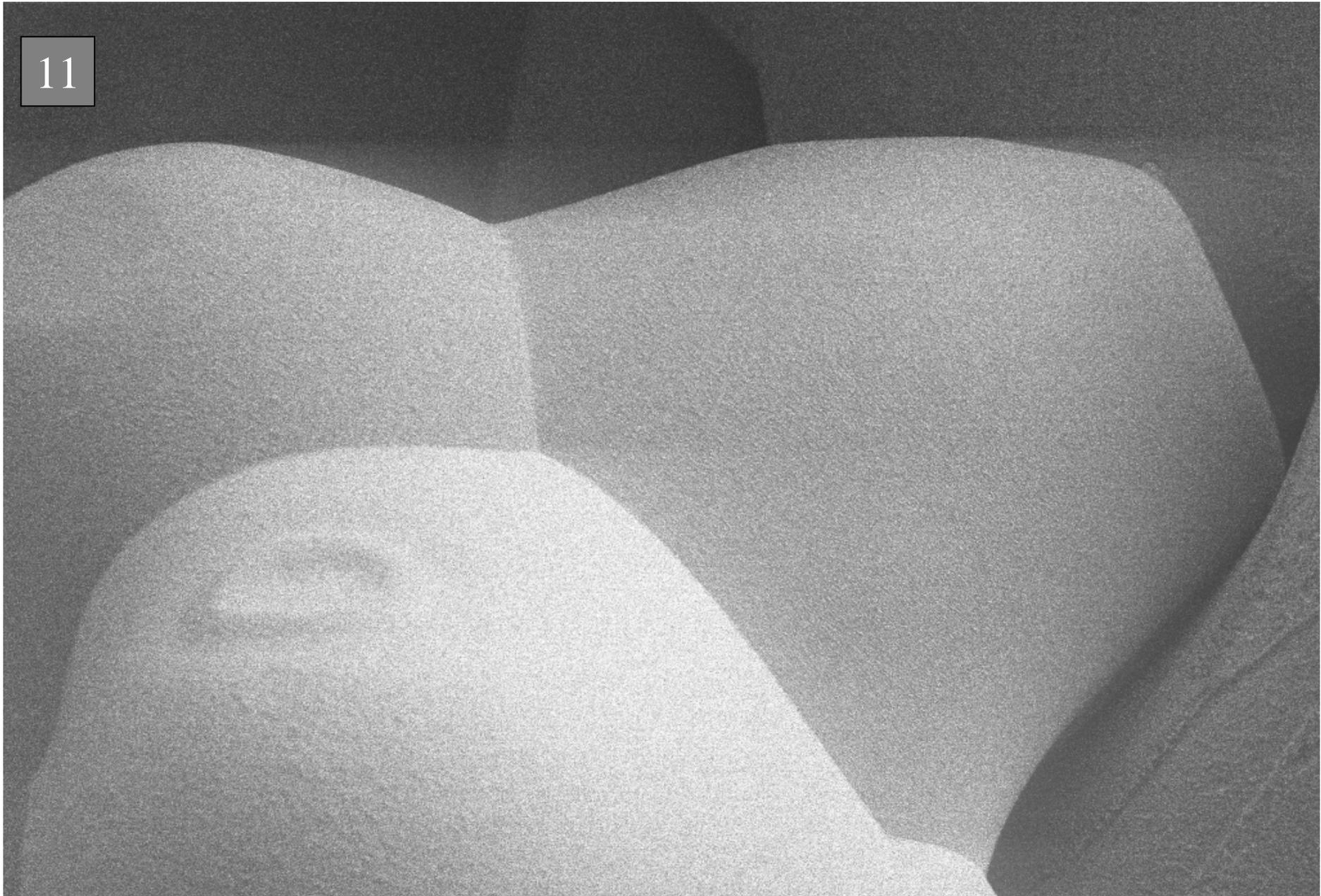


9





11

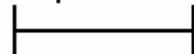


FE-REM Lab GeoZentrum-GÖ

**MAG = 870 X**

*File Name = Cham-4-13-19.tif*

30µm



EHT = 1.30 kV

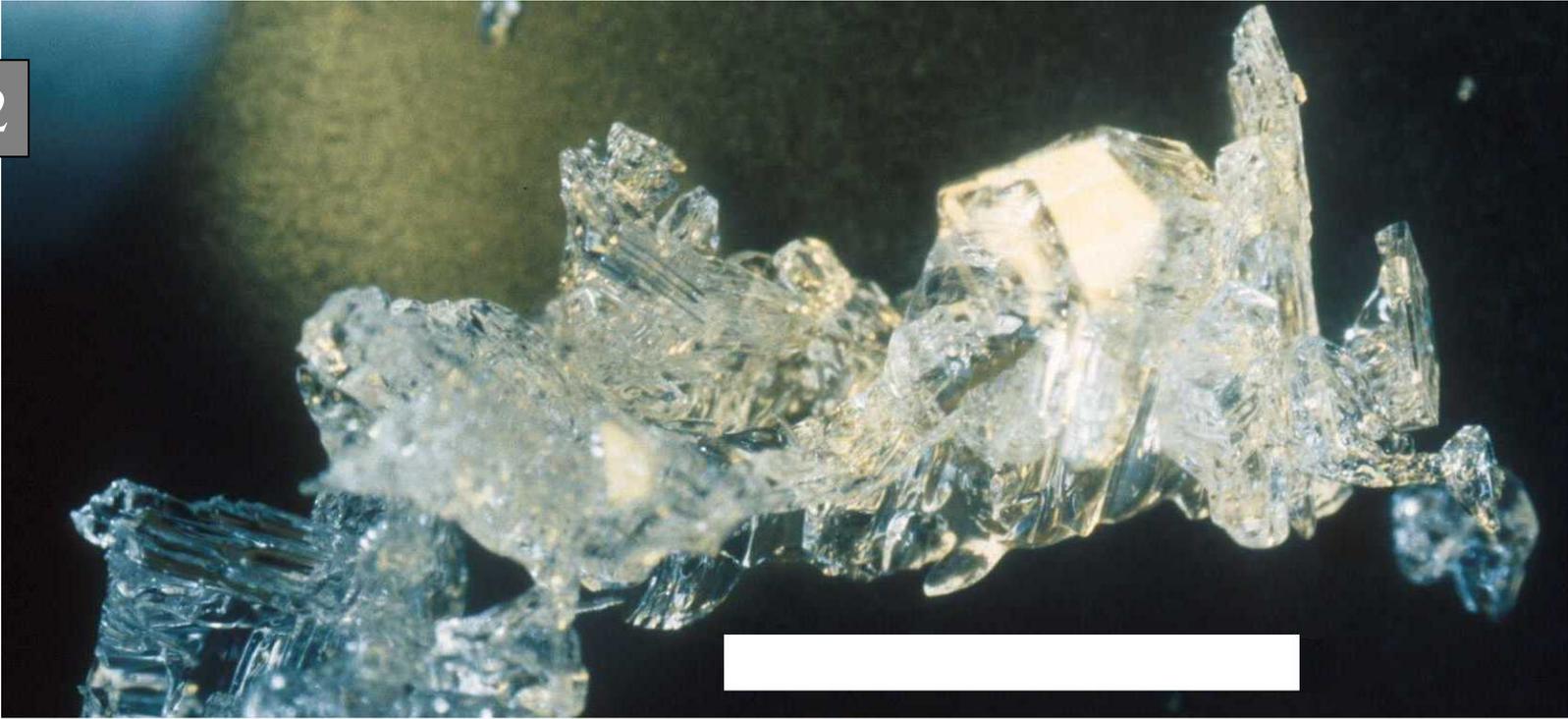
WD = 9 mm

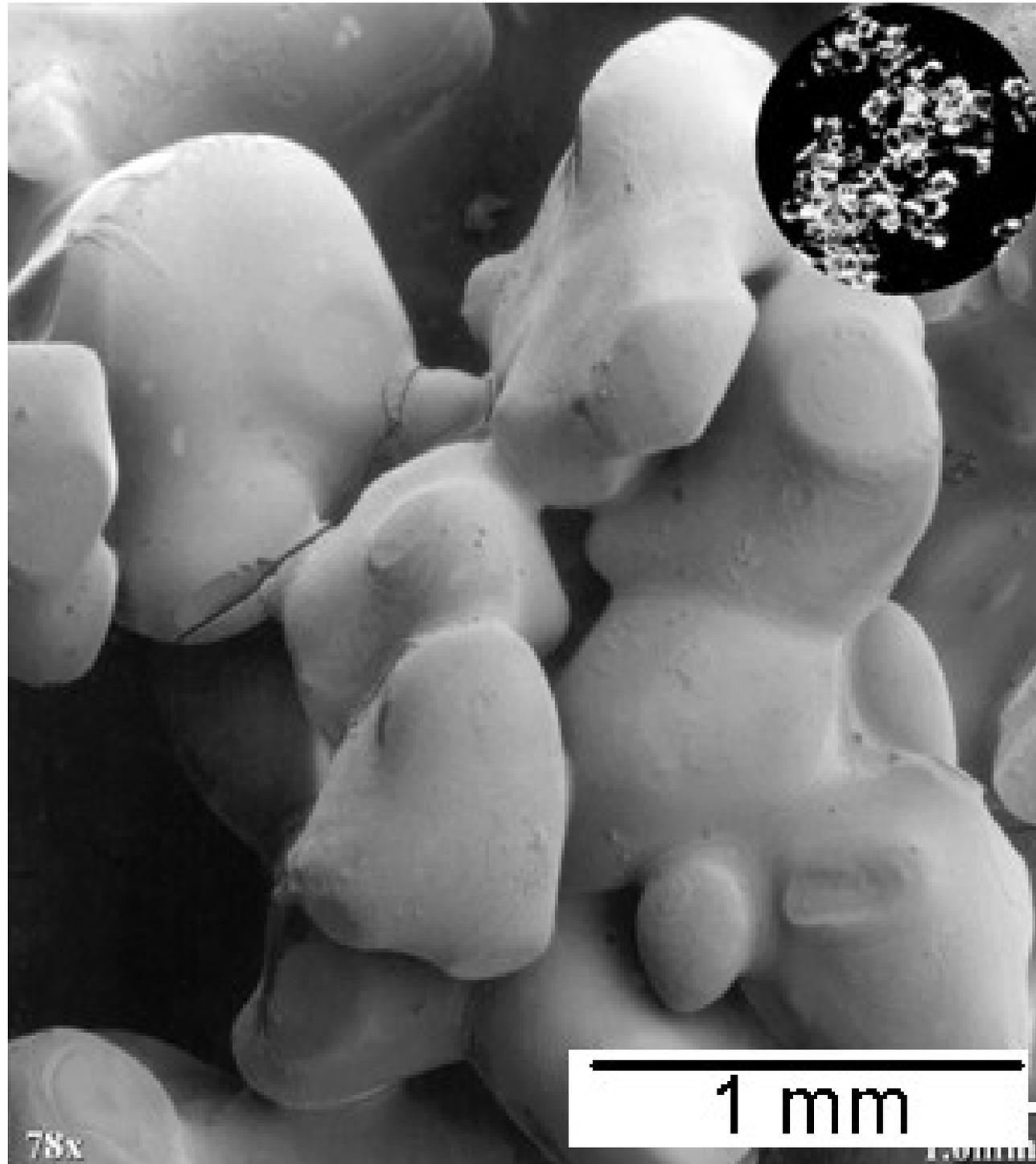
Signal A = SE2

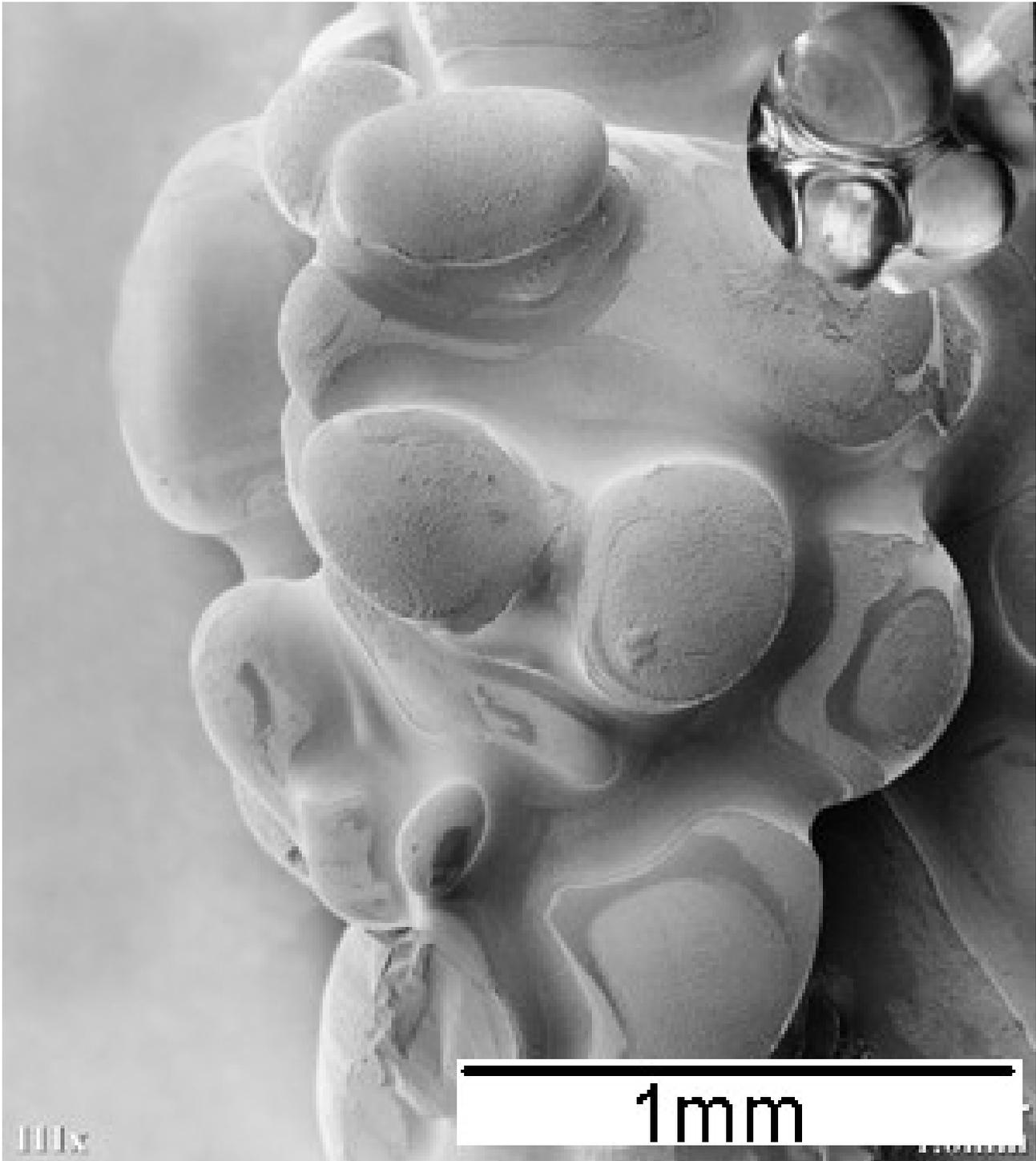
Photo No. = 1786

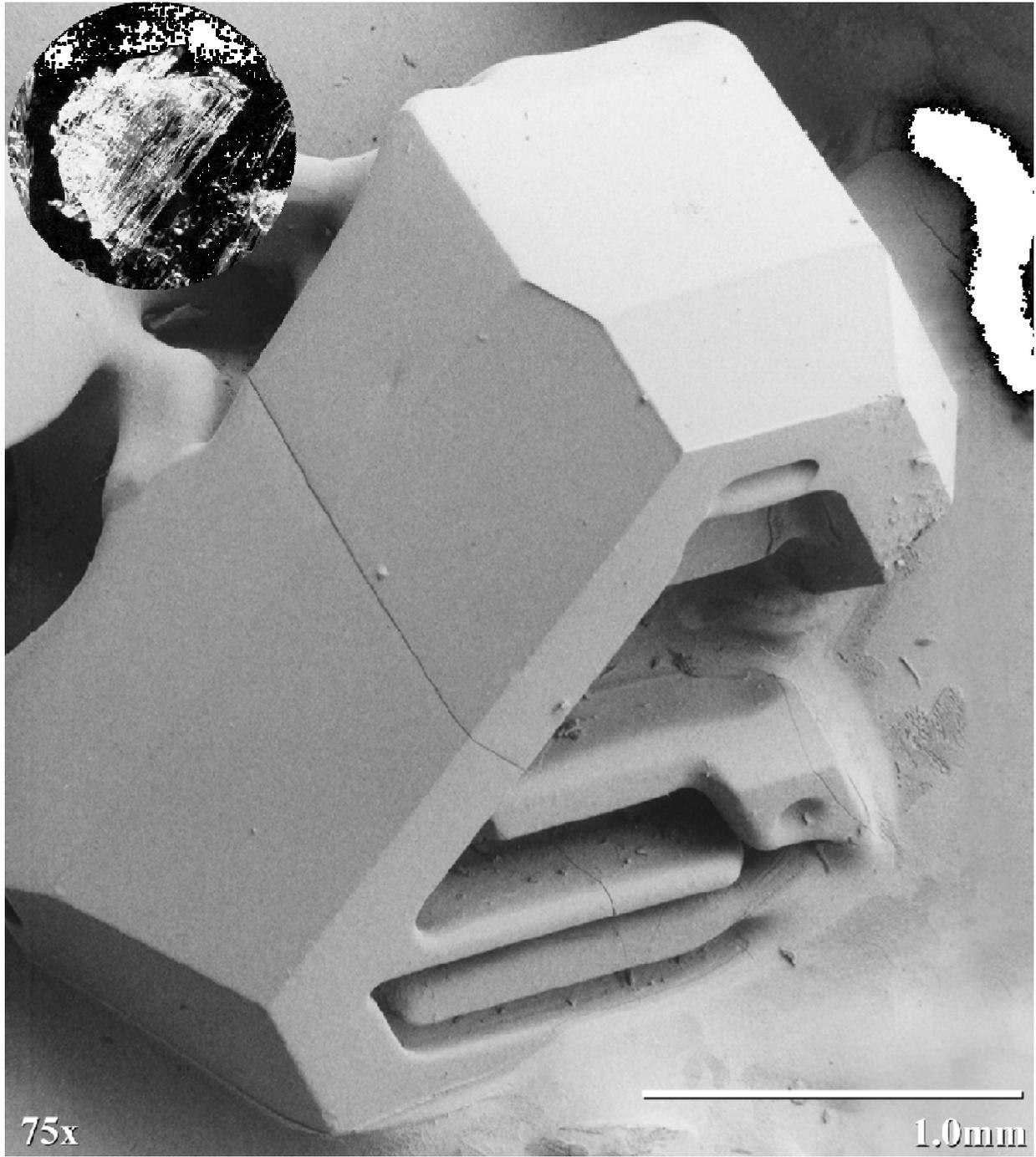
Date :15 Mar 2002

Time :12:09



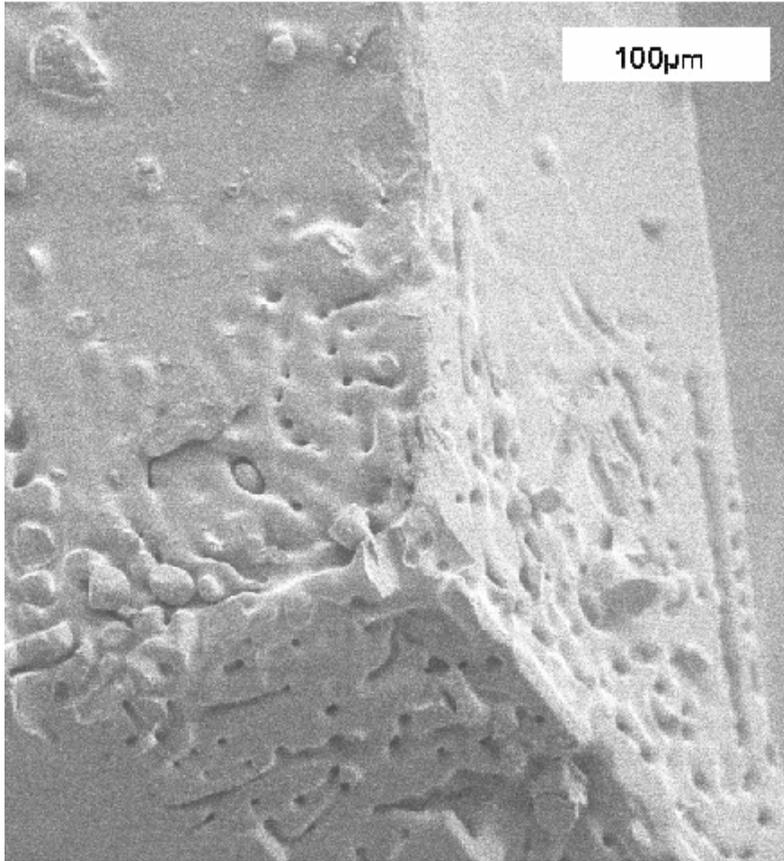




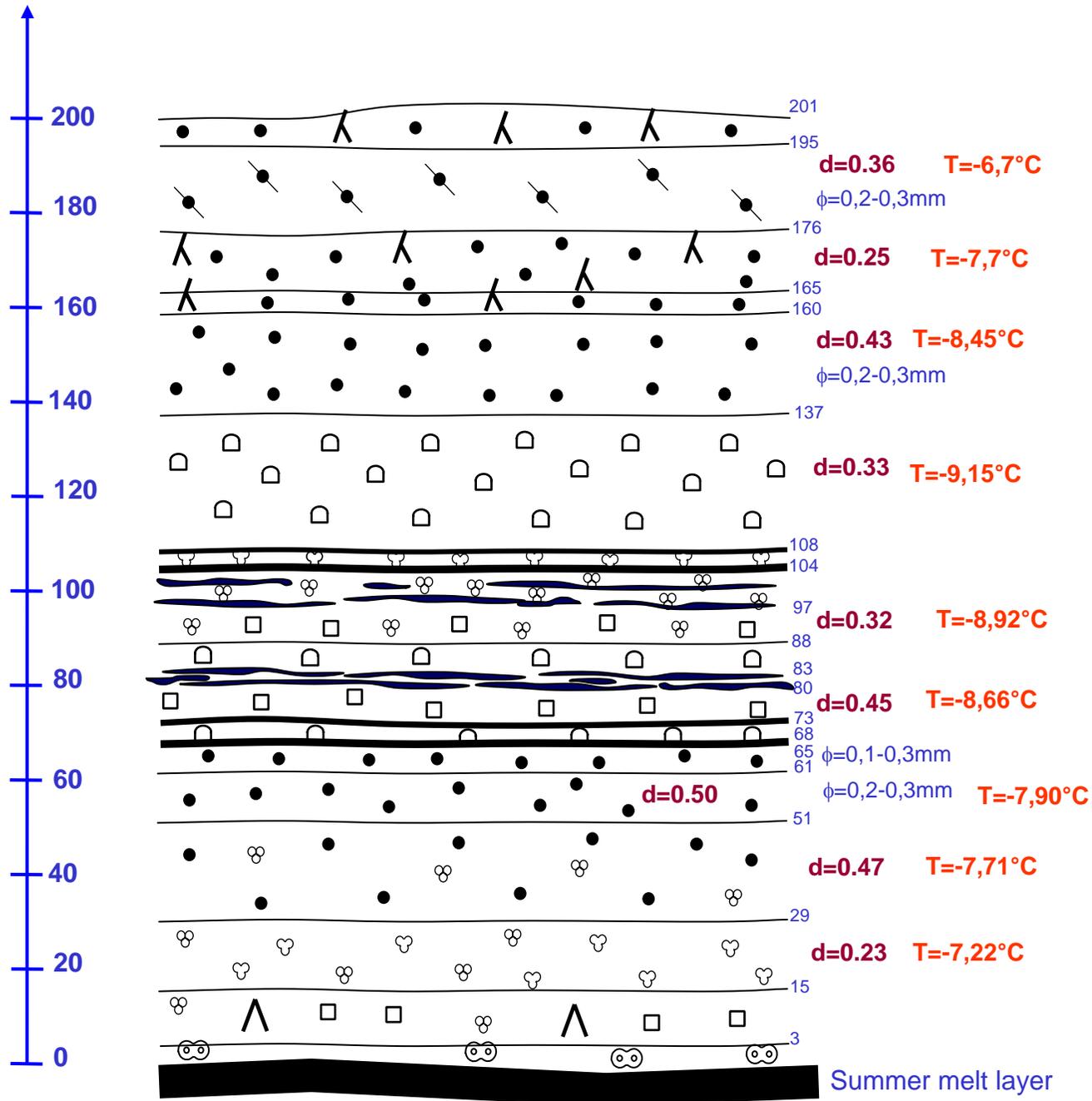


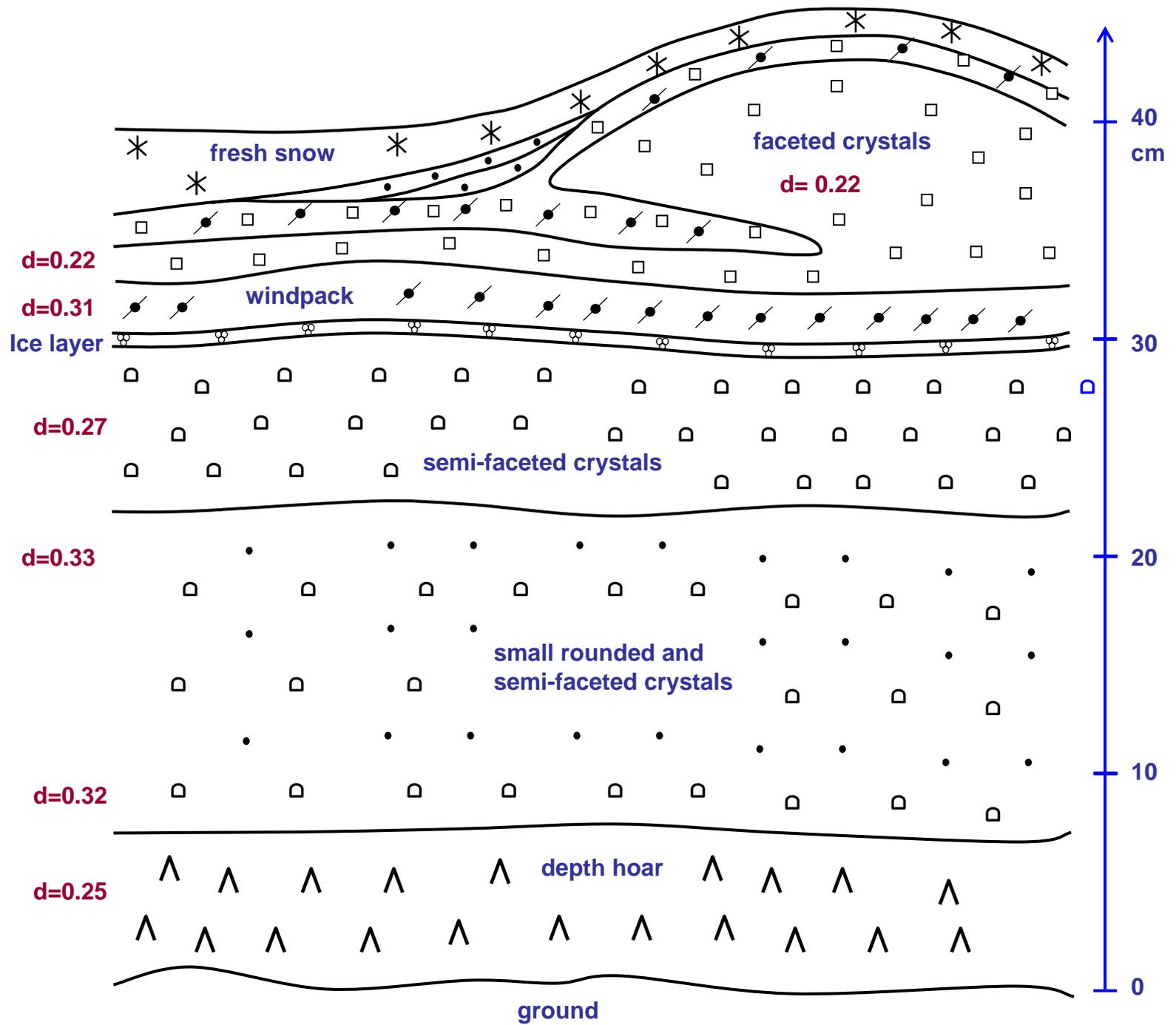
75x

1.0mm



h, cm





- 1- Rounding
- 2- Windpack
- 3- Windpack, AK North Slope
- 4- Lautaret surface hoar
- 5- Depth hoar
- 6- Deep firn, Cascade glacier.
- 7- Initial rounding
- 8- Depth Hoar, Fairbanks.
- 9- Meltfreeze crust
- 10- Windblown mixture, Barrow
- 11- Rounding-4°C.
- 12- Alert depth hoar.
- 13- Slight melting.
- 14- Extensive melting
- 15- Depth hoar
- 16- Secret