

Neige 5^{ème} partie

Evolution des propriétés physiques de la neige lors du métamorphisme

- Densité
- Taille des grains (surface spécifique)
- Propriétés optiques
- Conductivité thermique
- Perméabilité

Mesure des valeurs

Correlation avec le type de neige

Prédiction: bonne dose d'empirisme

Impact sur le climat (autre poly)

La densité de la neige

Variable physique la plus facile à mesurer

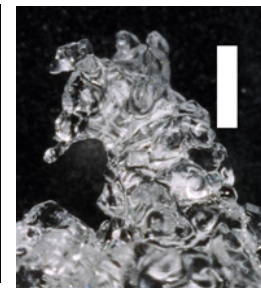
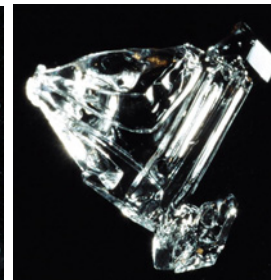
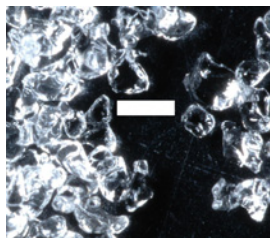
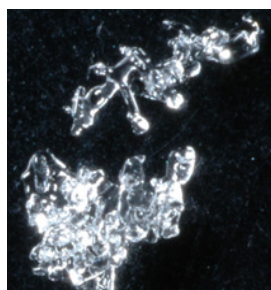
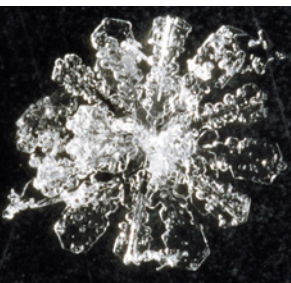
Usage universel, et tentatives de corrélérer les autres variables à la densité



Valeurs de densité mesurées

(+ autres variables physiques)

Variable	Fresh snow	Cristaux décomposés	Grains fins, ET metamorphisme	Grains fins, croûte vent	Cristaux facettés	Givre de profondeur	Croûte de regel
Densité, g cm ⁻³	0.01-0.2	0.06-0.25	0.15-0.35	0.3-0.6	0.13-0.3	0.15-0.30	0.15-0.4
Surface area, cm ² g ⁻¹	350-1600	150-900	110-300	150-380	80-450	70-220	20-50
Pénétration lumière, cm	3-10	2-10	5-15	3-10	10-25	15-30	20-40
Permeability, 10 ⁻¹⁰ m ²	10-50	10-90	10-80	5-30	50-200	100-600	1-20
Conductivité thermique, W m ⁻¹ K ⁻¹	0.03-0.12	0.06-0.2	0.08-0.3	0.2-0.6	0.08	0.03-0.15	0.1-0.5



Neige fraîche
0.01 à 0.20

Décomposés
0.06 à 0.25

Grains fins, ET
0.15 à 0.35

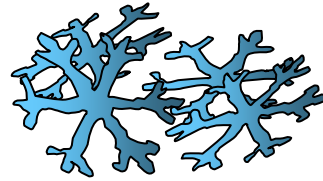
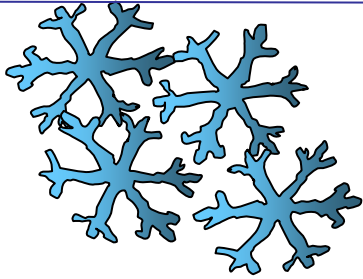
Croûte vent
0.30 à 0.60

Facettés
0.13 à 0.30

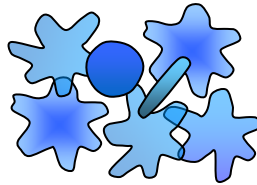
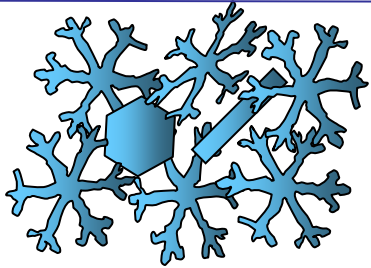
Gobelets
0.15 à 0.30

Croûte regel
0.15-0.4

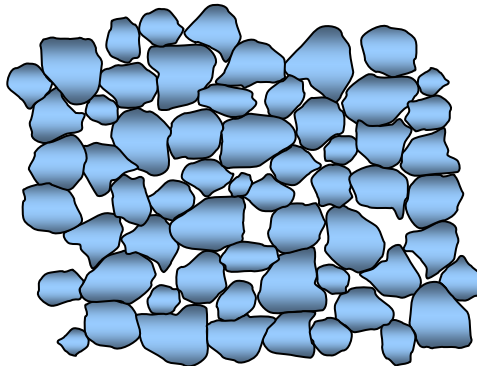
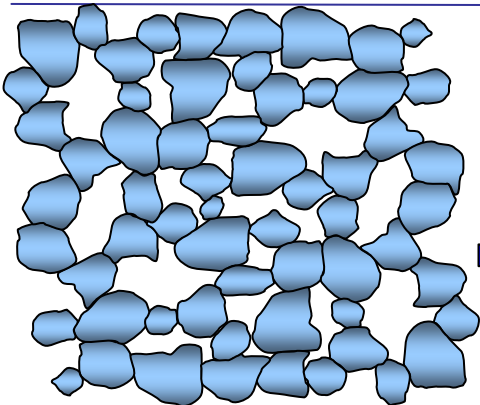
Densification : processus



Glissement, neige fraîche



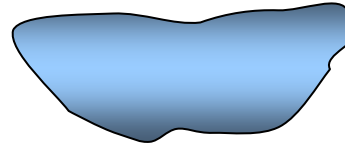
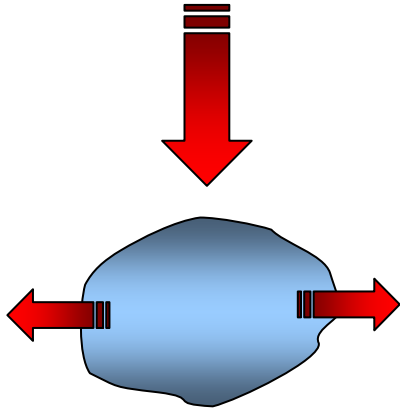
Métamorphisme destructif



Glissement, neige âgée

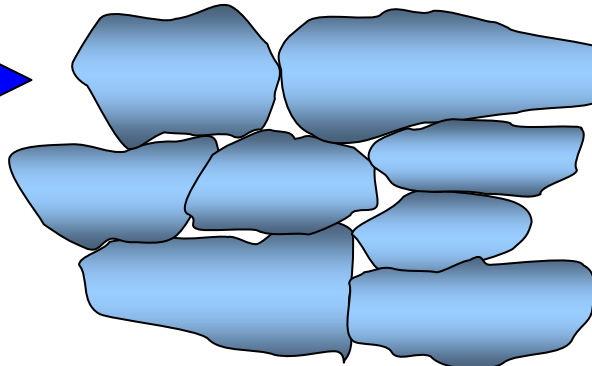
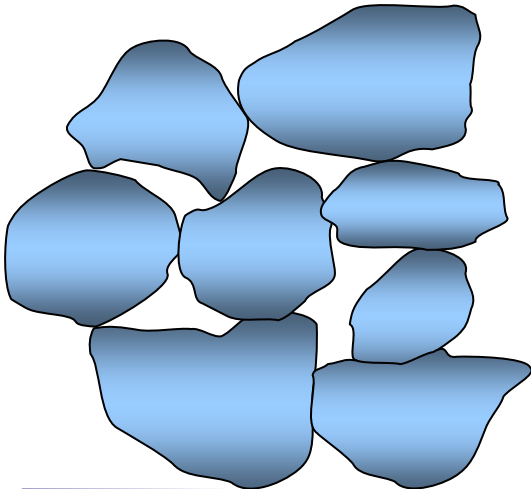
Densification : processus

Charge



Fluage

Applatissement des grains



Traitement physique de la densification

Relation vitesse de déformation-contrainte

$$\dot{\epsilon}_d = -\frac{\sigma}{\eta}$$

Dans le cas de la neige :

$$\frac{dh}{h} = -\frac{\sigma_s + \sigma_0}{\eta} dt$$

σ_0 = inclusion de l'effet du métamorphisme destructif initial

Paramétrisation empirique de σ_s , σ_0 et η dans le modèle SNTHERM

Pour $\rho_s \leq 150 \text{ kg m}^{-3}$

$$\sigma_0/\eta_s = 2.778 \cdot 10^{-6} e^{0.04T}$$

T en °C

Pour $\rho_s > 150 \text{ kg m}^{-3}$

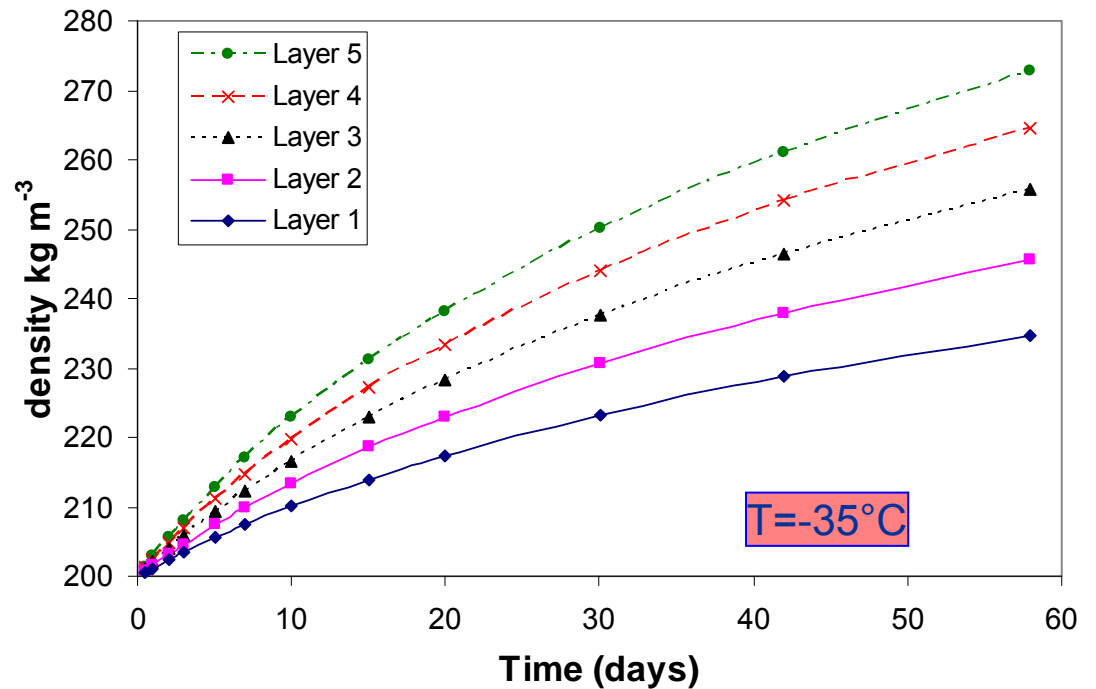
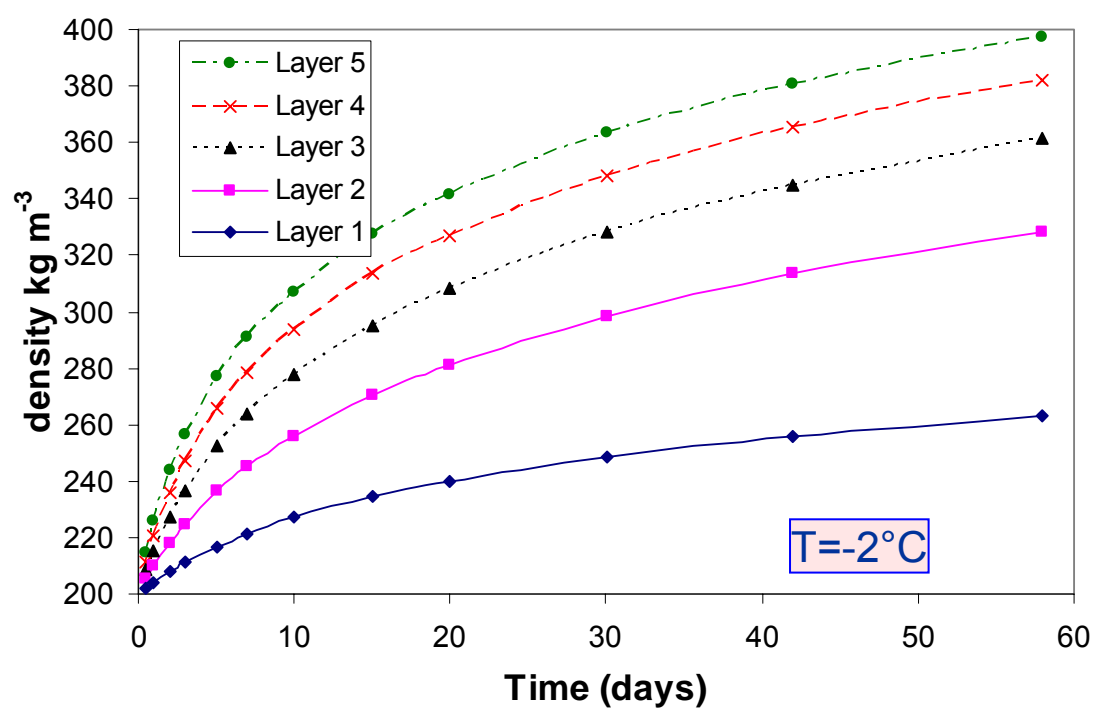
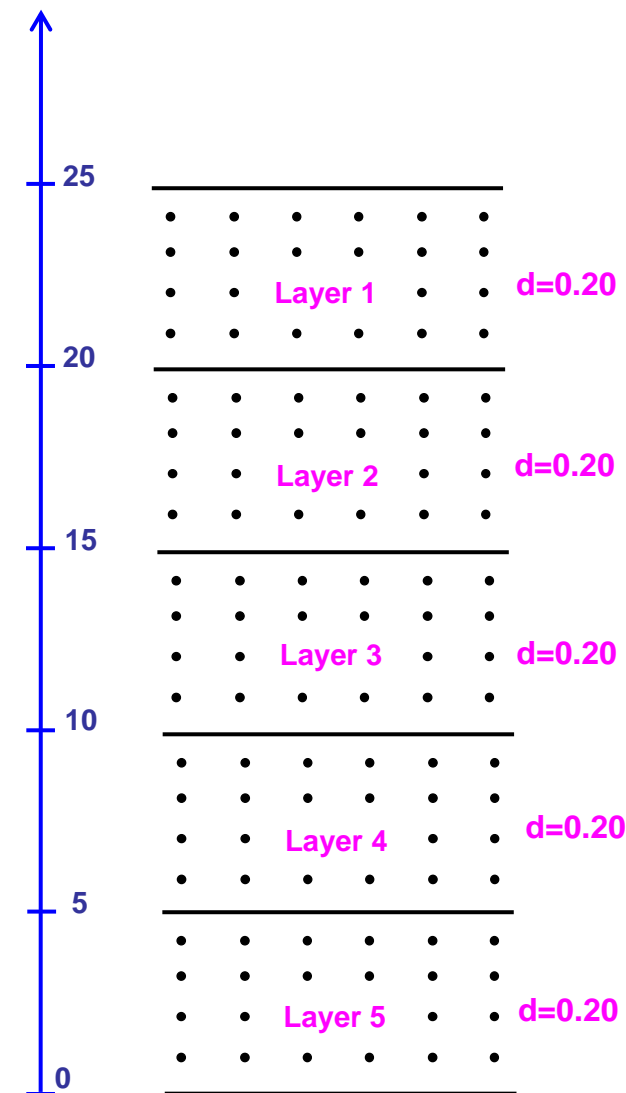
$$\sigma_0/\eta_s = 2.778 \cdot 10^{-6} e^{-0.046(\rho_s - 150)} e^{0.04T}$$

$$\sigma_s/\eta_s = \frac{\sum_i \rho_i h_i g}{3.6 \cdot 10^6 e^{-0.08T} e^{0.021\rho}}$$

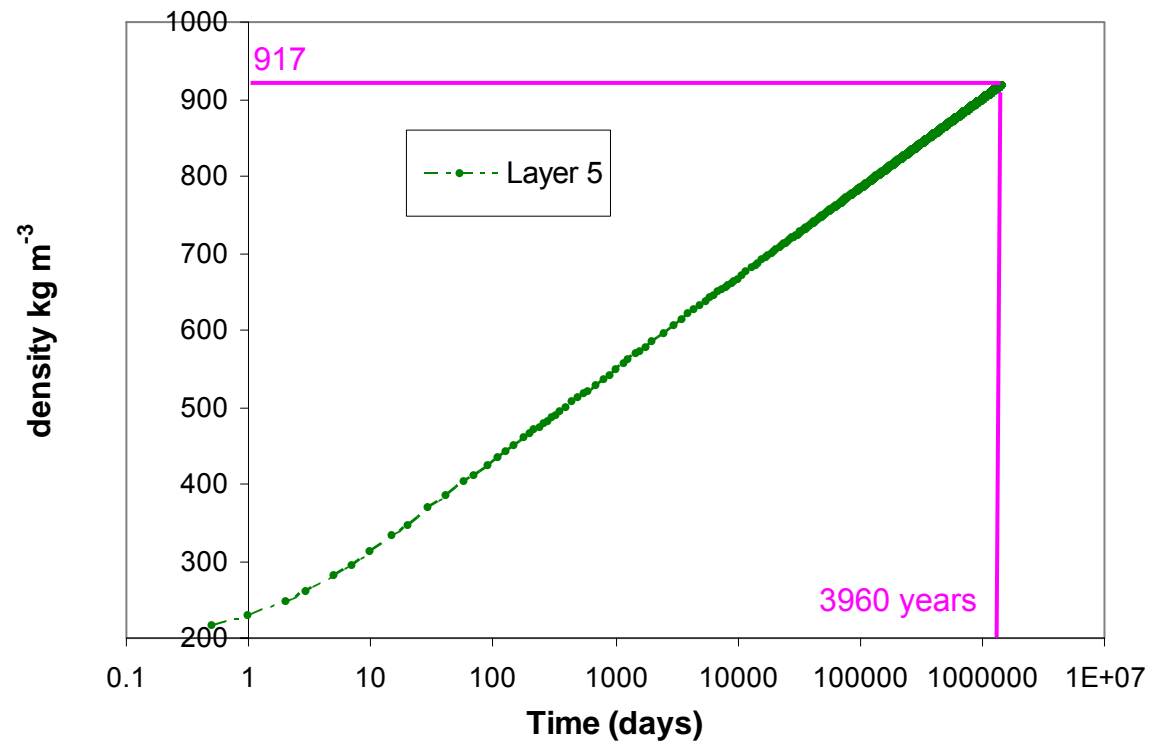
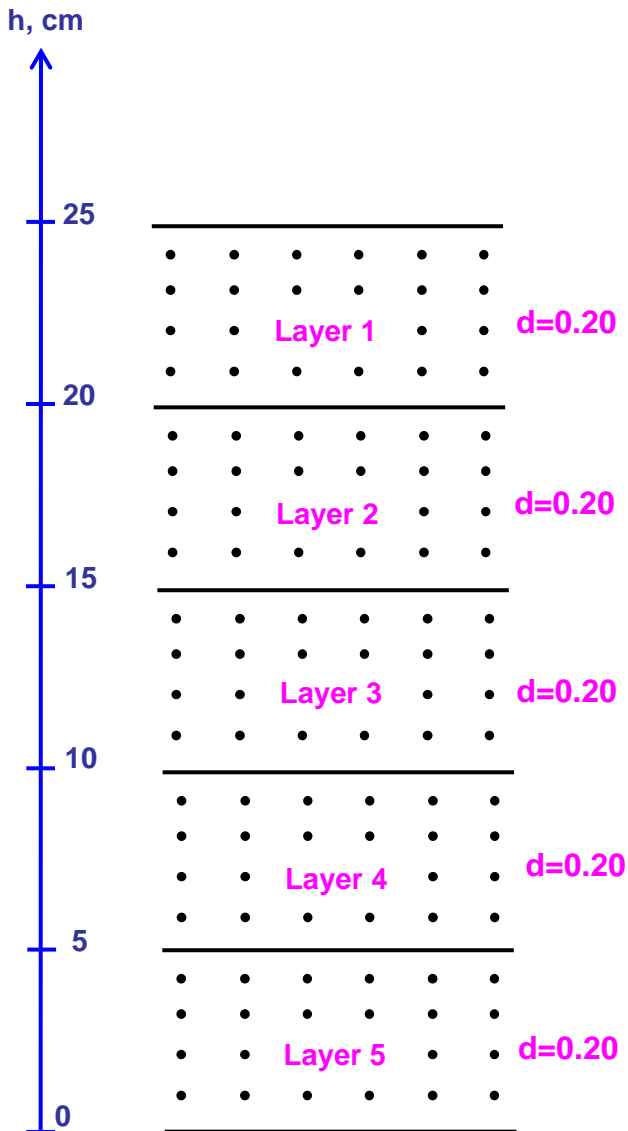
T en °C

Test de la paramétrisation de SNTHERM

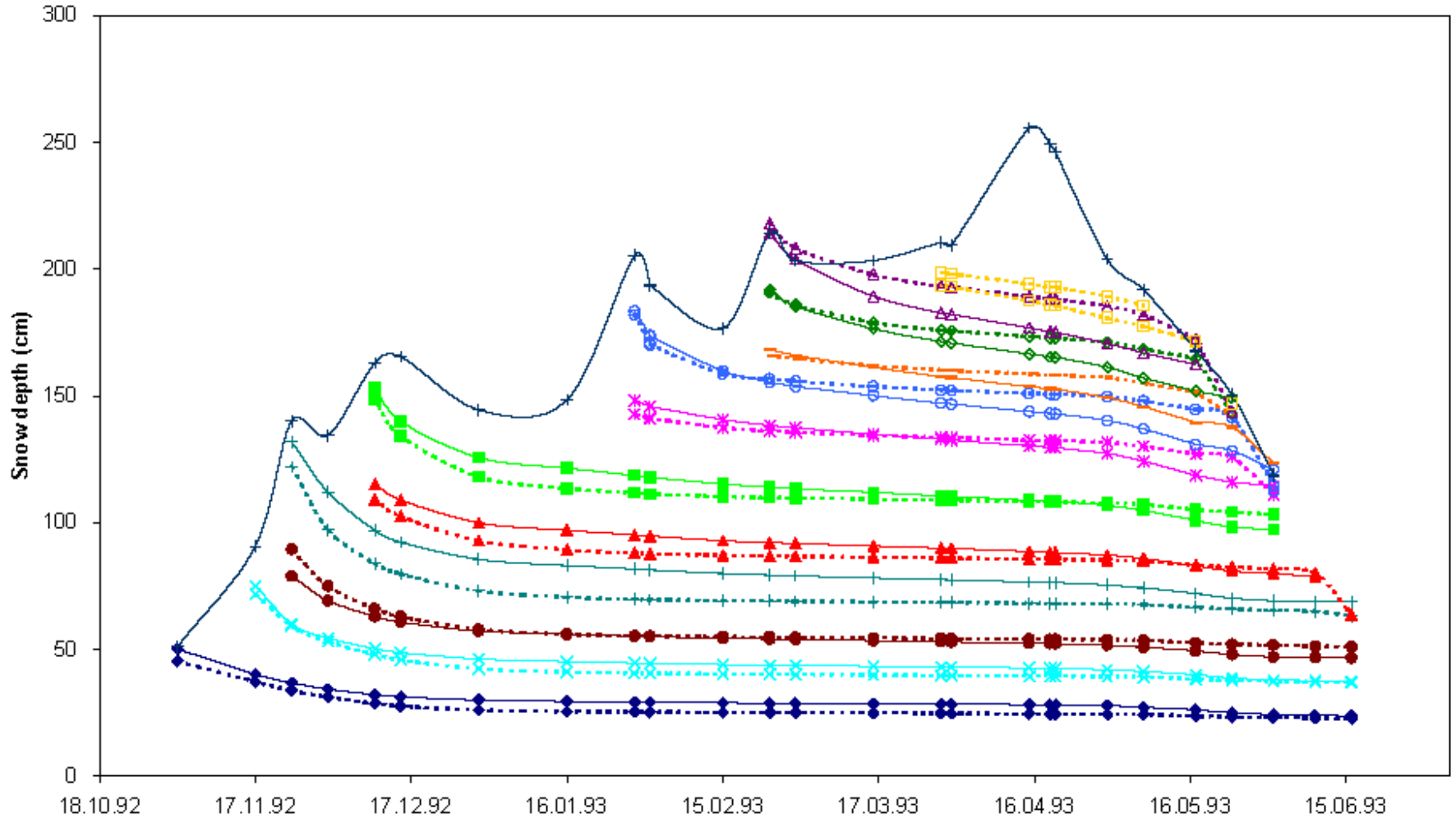
h, cm



Et à longue durée ?



Test du modèle SNOWPACK

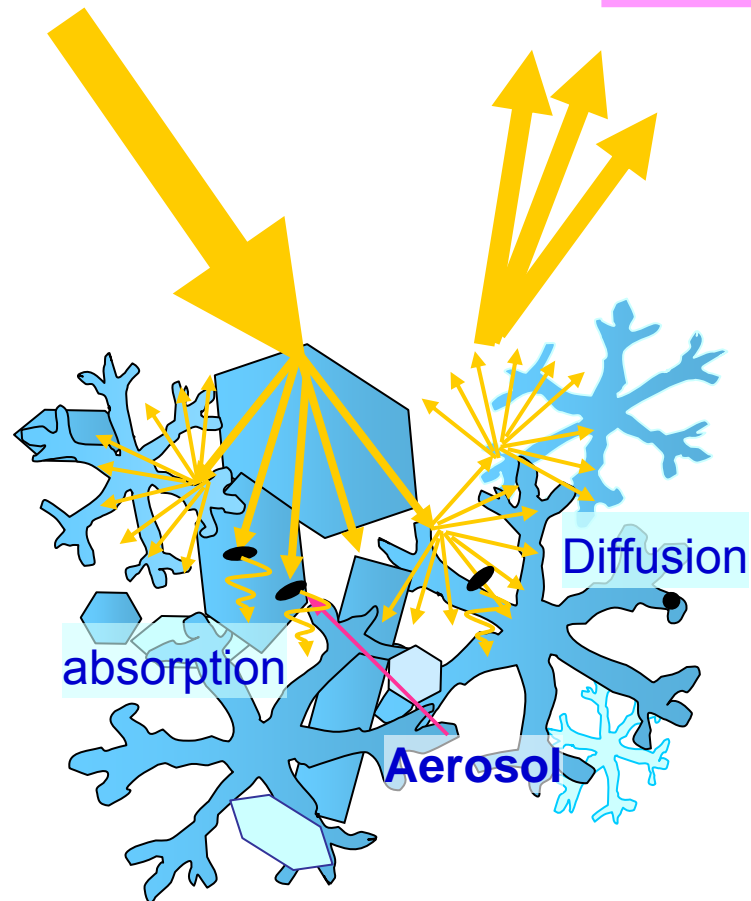


Measured and computed snow stratification at Weissfluhjoch, Davos, during the winter 92/93. The upper envelope represents the measured, total snow height. The lines representing the layers go by pairs. The solid lines show the heights above ground of 12 markers placed on the snow surface at different times of the winter and subsequently buried by precipitation. The dotted lines show the computed heights of the corresponding layer.

Taille des grains, surface spécifique, et albédo de la neige

Albédo déterminé par

- Diffusion : augmente quand la taille des grains diminue
- Absorption : augmente avec la teneur en impuretés



Calcul de la diffusion :

Utilise la taille de sphères équivalentes
= sphère du même rapport S / V

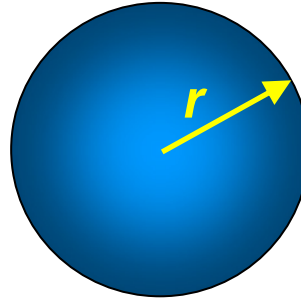
S / V relié à la Surface Spécifique =

Surface accessible aux gaz, in cm^2/g

$$SS = S / V\rho$$

Surface spécifique

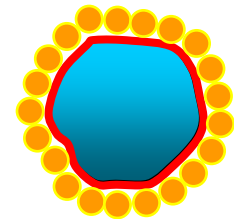
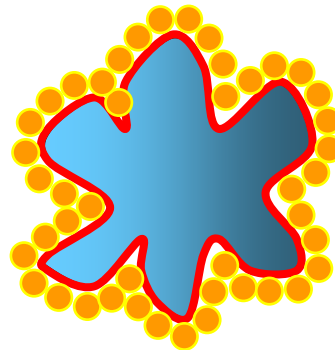
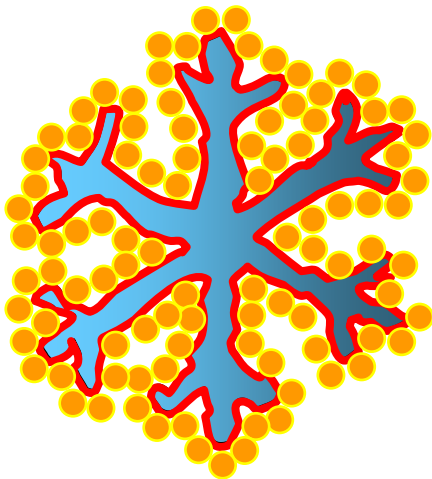
$$SS = \frac{S}{V\rho} = \frac{3}{r\rho}$$



$$\rho = 0.917 \text{ g cm}^{-3}$$

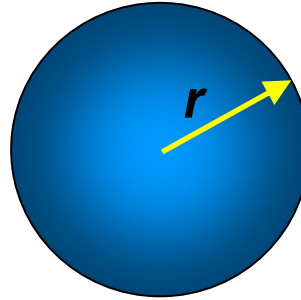
r (μm)	SSA cm ² /g
20	1636
50	654
100	327
200	164
500	65
1000	33

Mesure de SS : adsorption de CH₄ à 77 K



Surface spécifique

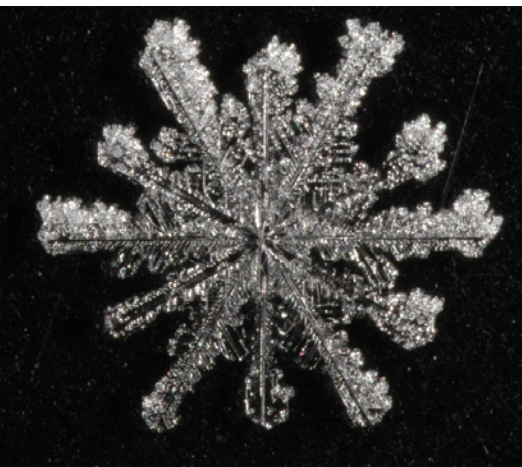
$$SS = \frac{S}{V\rho} = \frac{3}{r\rho}$$



$$\rho = 0.917 \text{ g cm}^{-3}$$

r (μm)	SSA cm ² /g
20	1636
50	654
100	327
200	164
500	65
1000	33

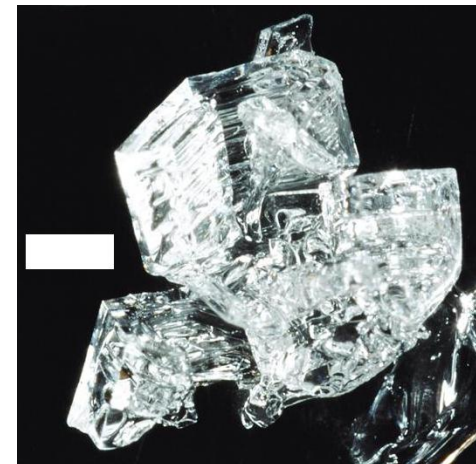
SSA= 1200 cm²/g



SSA= 200 cm²/g



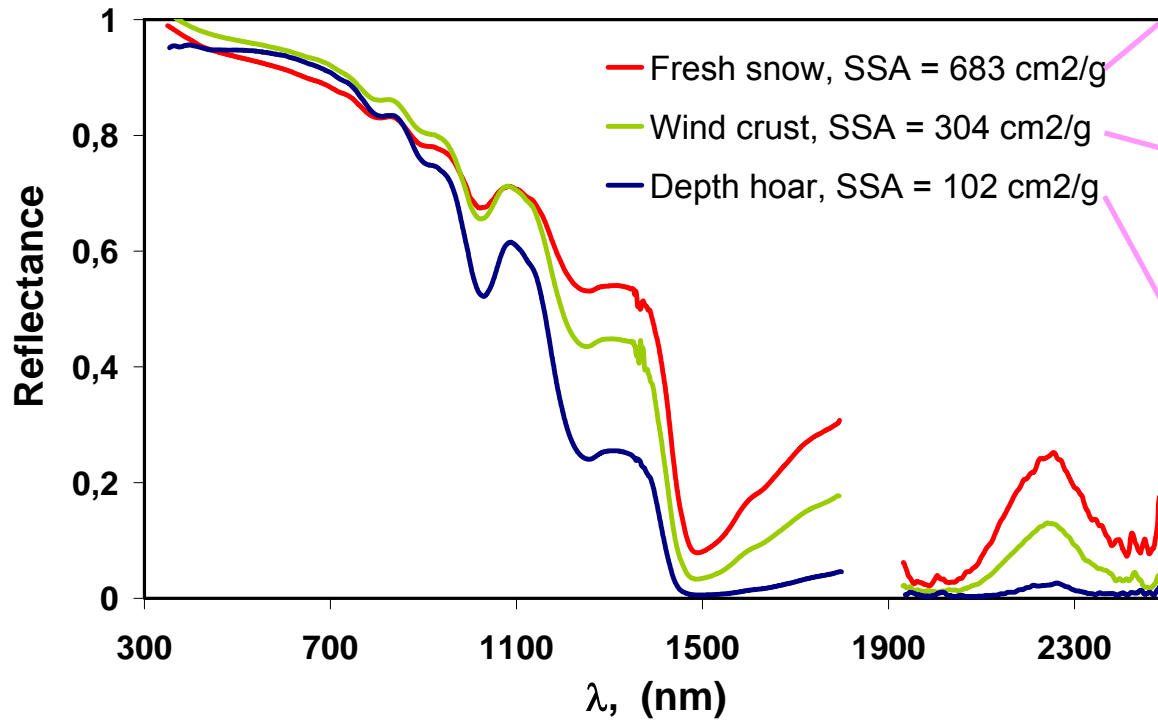
SSA= 80 cm²/g



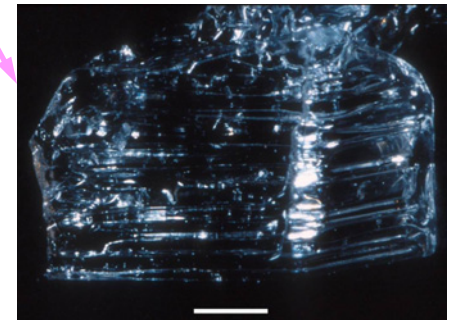
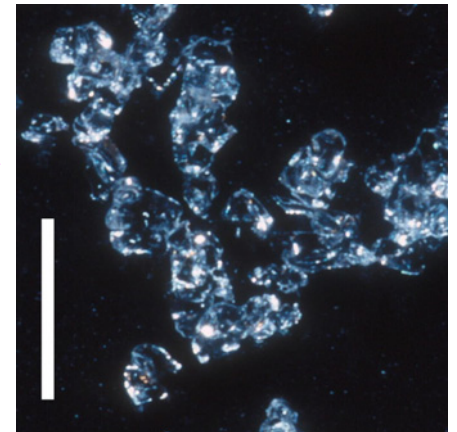
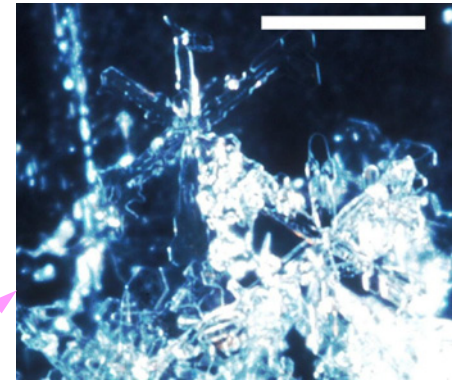
Relation albédo - surface spécifique

Visible :

Surtout sensible aux absorbeurs



IR : Surtout sensible à la taille des grains



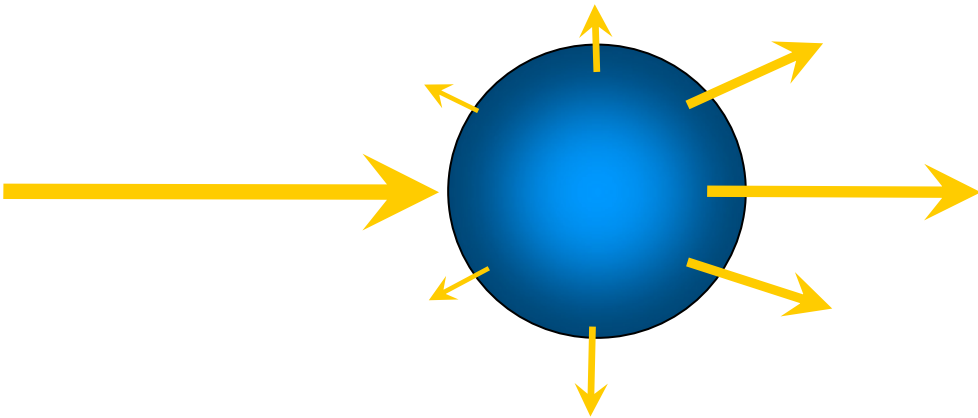
Albédo – Calculs neige pure

Probabilité de diffusion : K_{diff} (cm^{-1}) \propto SS

Probabilité d'absorption : K_{abs} (cm^{-1})

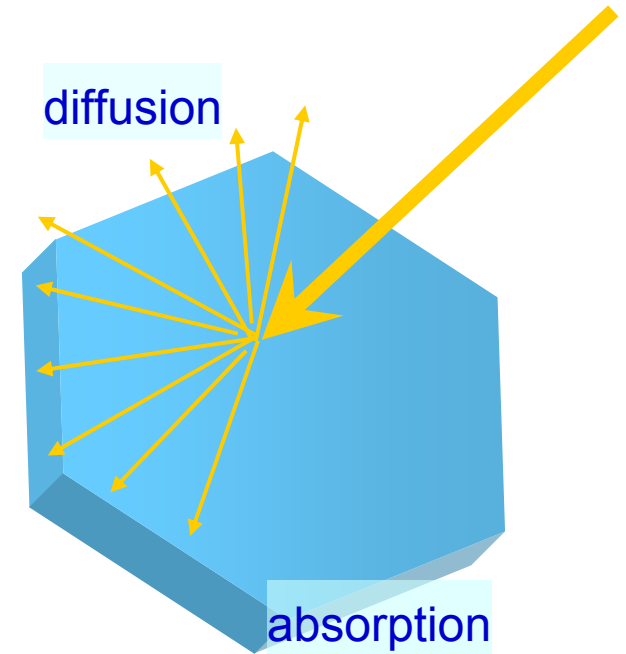
Probabilité totale d'extinction : $K_{\text{ext}} = K_{\text{diff}} + K_{\text{abs}}$

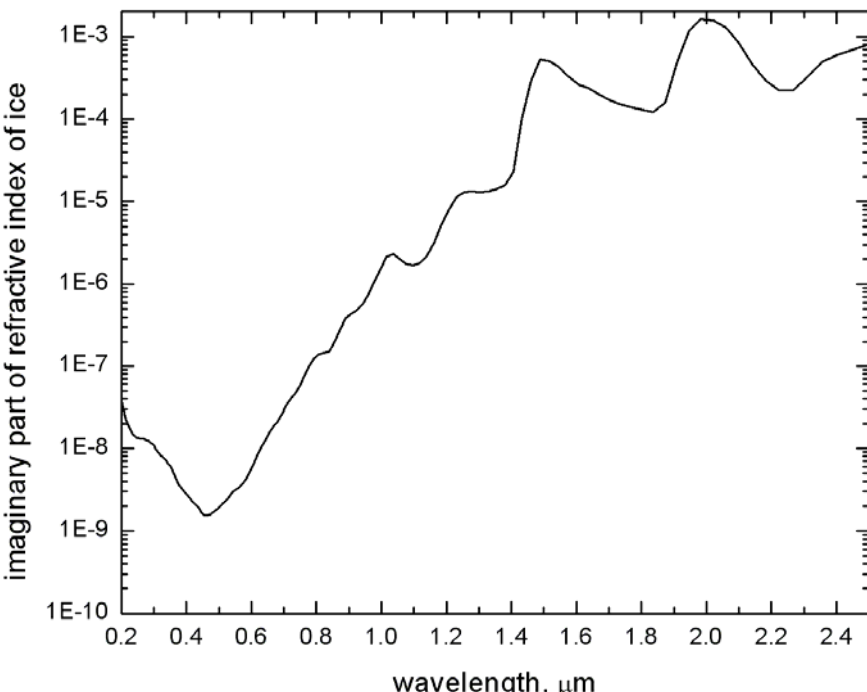
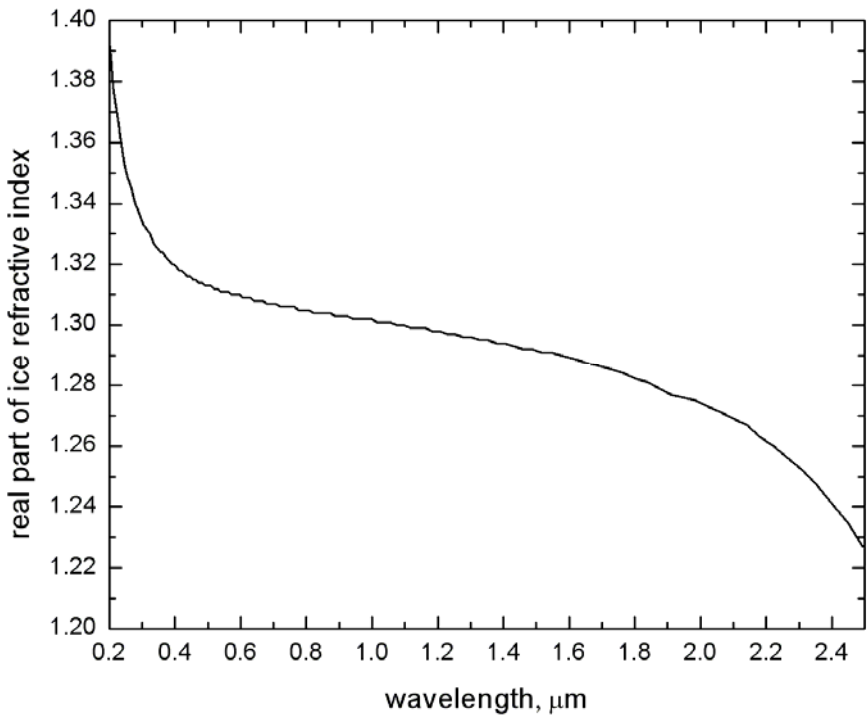
Longueurs d'ondes visibles $\Rightarrow K_{\text{diff}} \gg K_{\text{abs}} \Rightarrow$ couleur de la neige ?



Diffusion par une particule sphérique : théorie de Mie

Diffusion par une particule : asymétrique \Rightarrow facteur d'asymétrie g

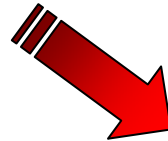




Théorie de la diffusion de Mie



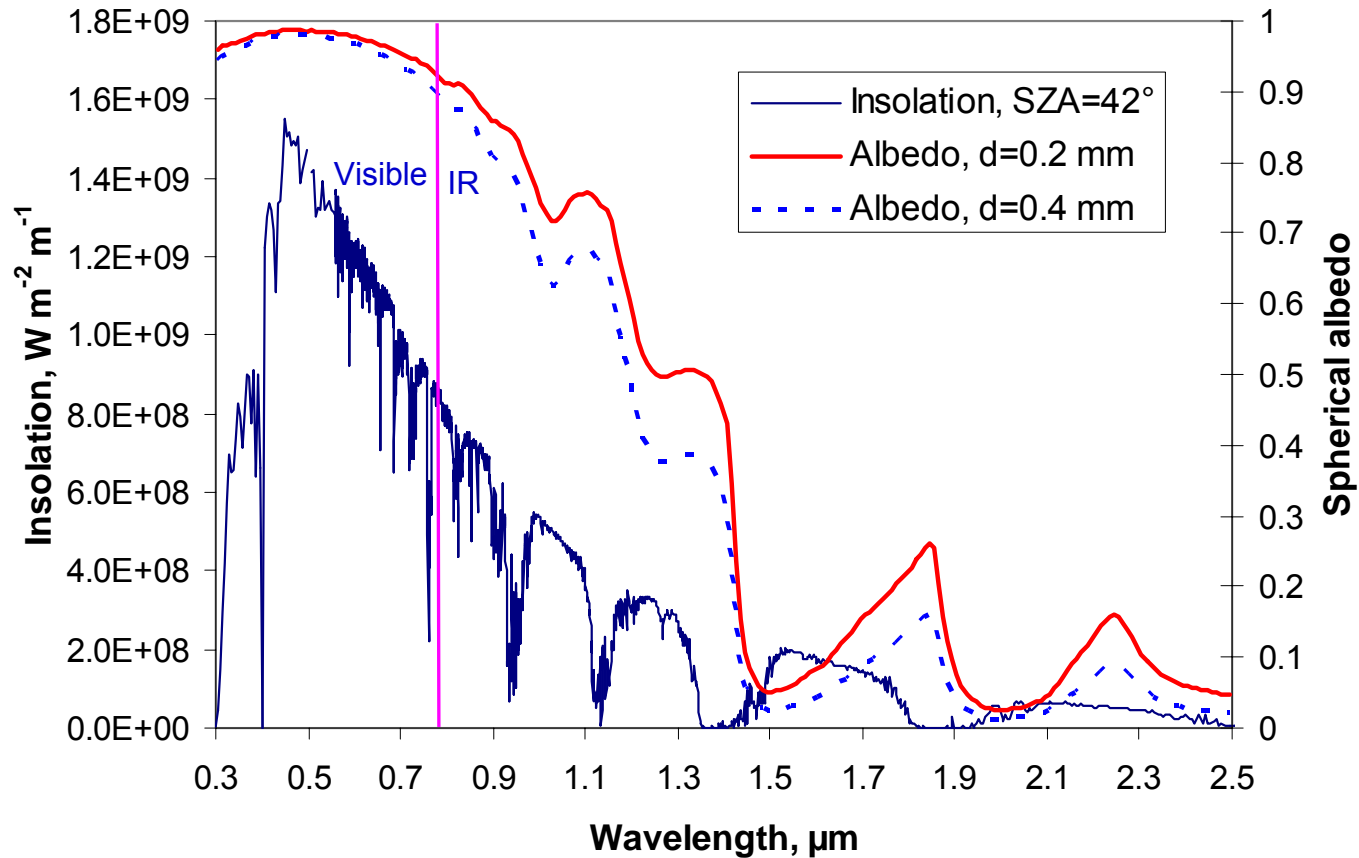
Calcul de K_{ext} , de l'albédo,
de la profondeur de pénétration, etc...



Taille des grains

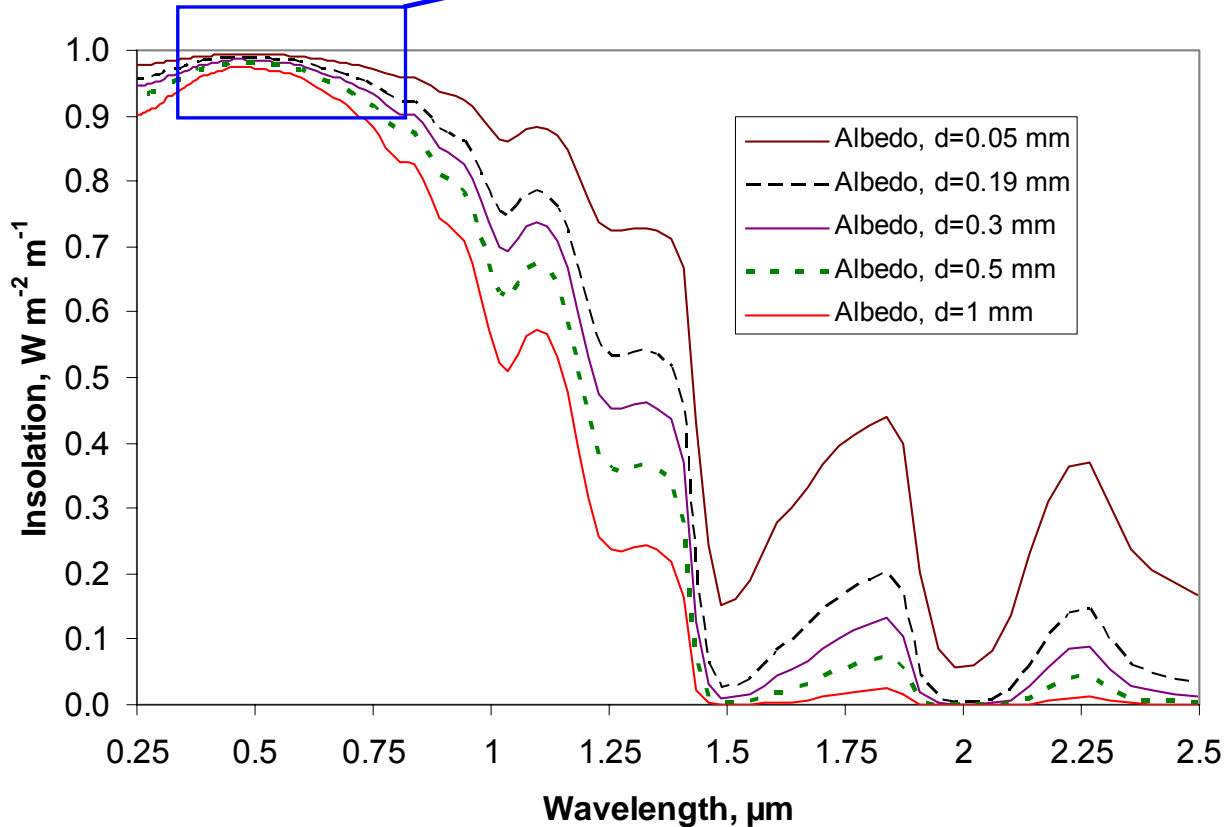
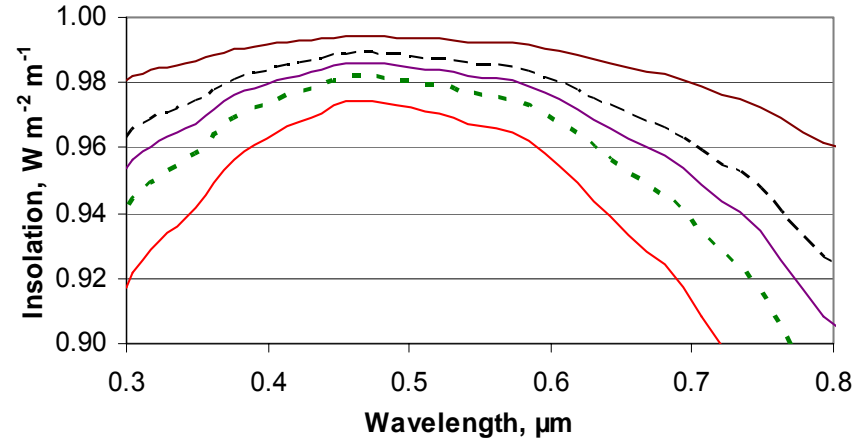
Albédo – Calculs neige pure

Spectre d'intérêt : 0.3 – 2.5 μm



Albédo – Calculs neige pure

Spectre d'intérêt : 0.3 – 2.5 μm

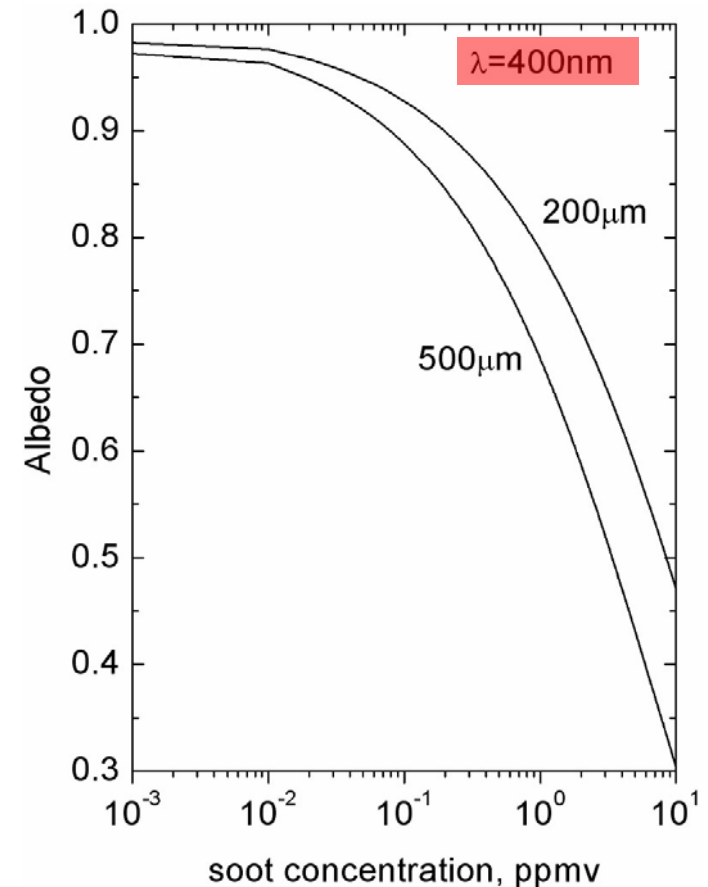
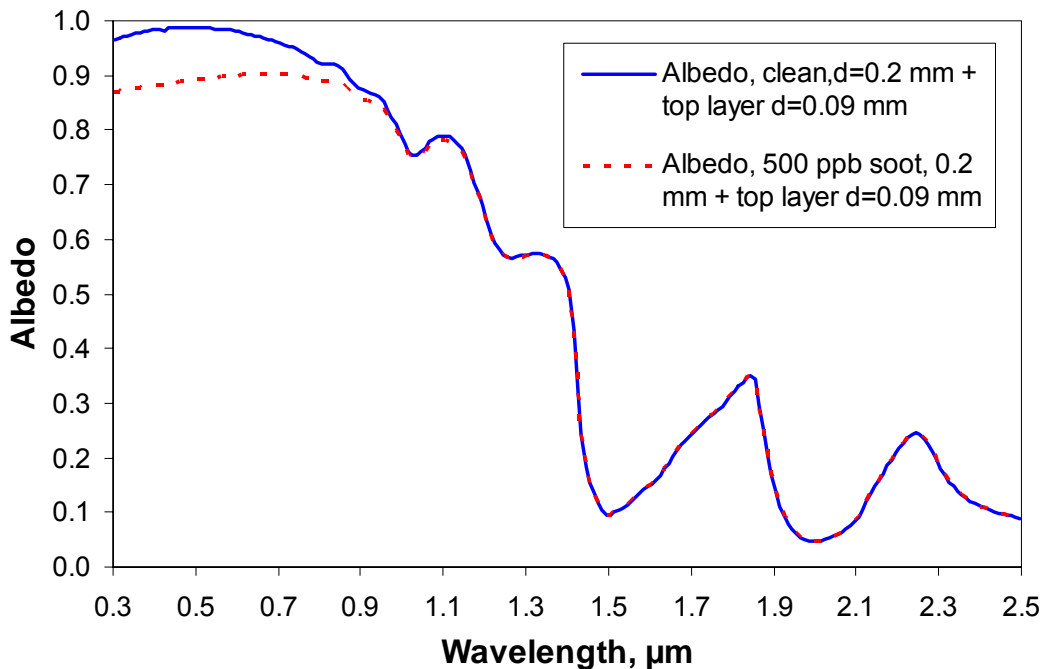
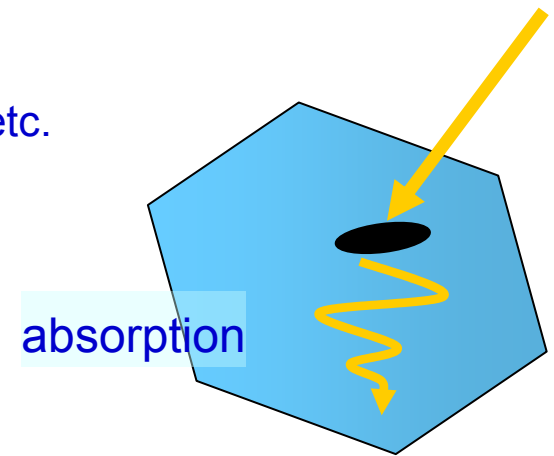


Albédo – Calculs neige + impuretés

Impuretés = poussières minérales, carbone suie, débris végétaux, etc.

Effet des impuretés : K_{diff} , K_{abs}

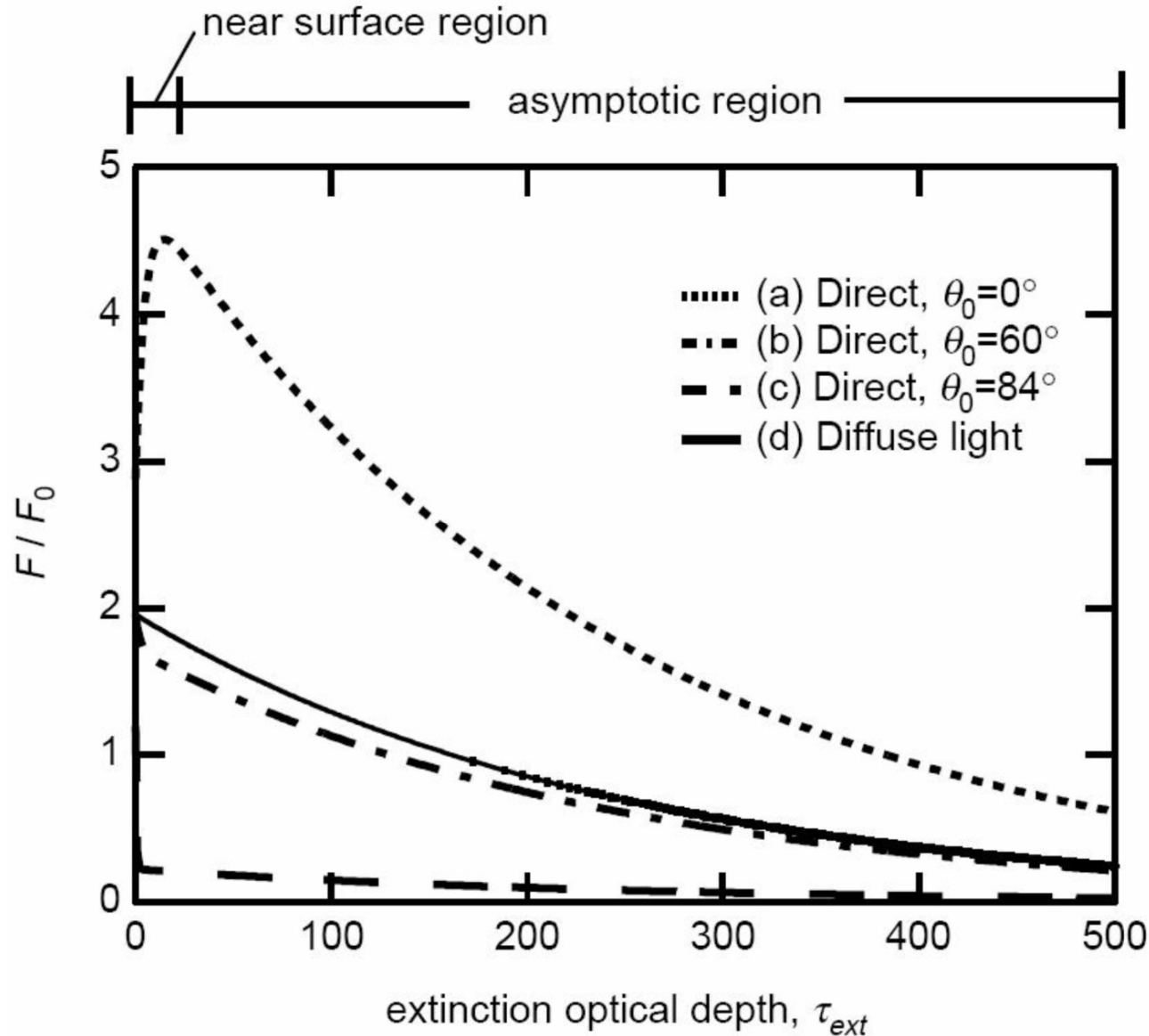
En général, K_{ext}



Profondeur de pénétration (e-folding depth)

$$I(z) = \propto e^{\alpha_0(\lambda)z}$$

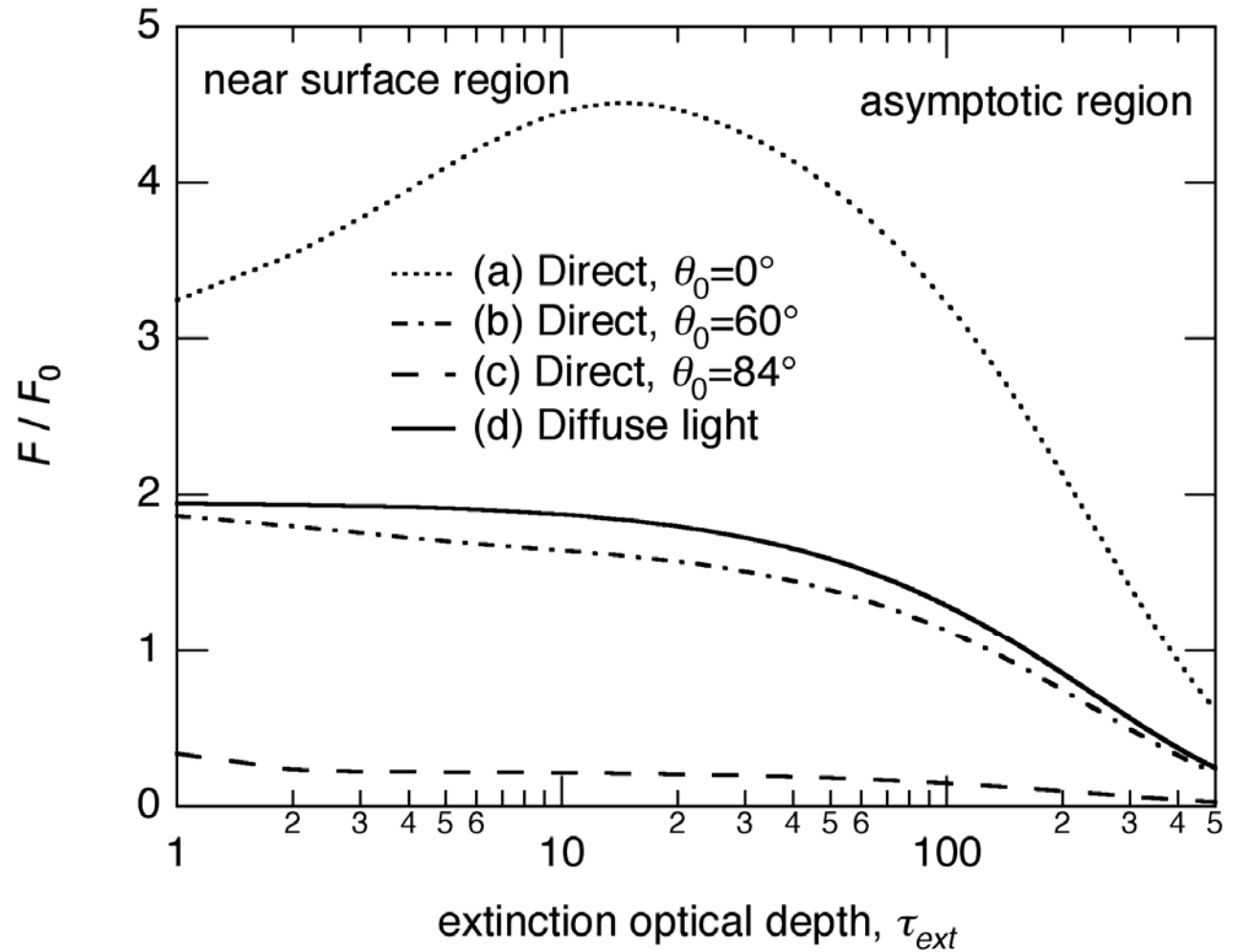
$$\varepsilon_p(\lambda) = \frac{1}{\alpha_0(\lambda)}$$



Profondeur de pénétration (e-folding depth)

$$I(z) = \propto e^{\alpha_0(\lambda)z}$$

$$\varepsilon_p(\lambda) = \frac{1}{\alpha_0(\lambda)}$$



Profondeur de pénétration (e-folding depth)

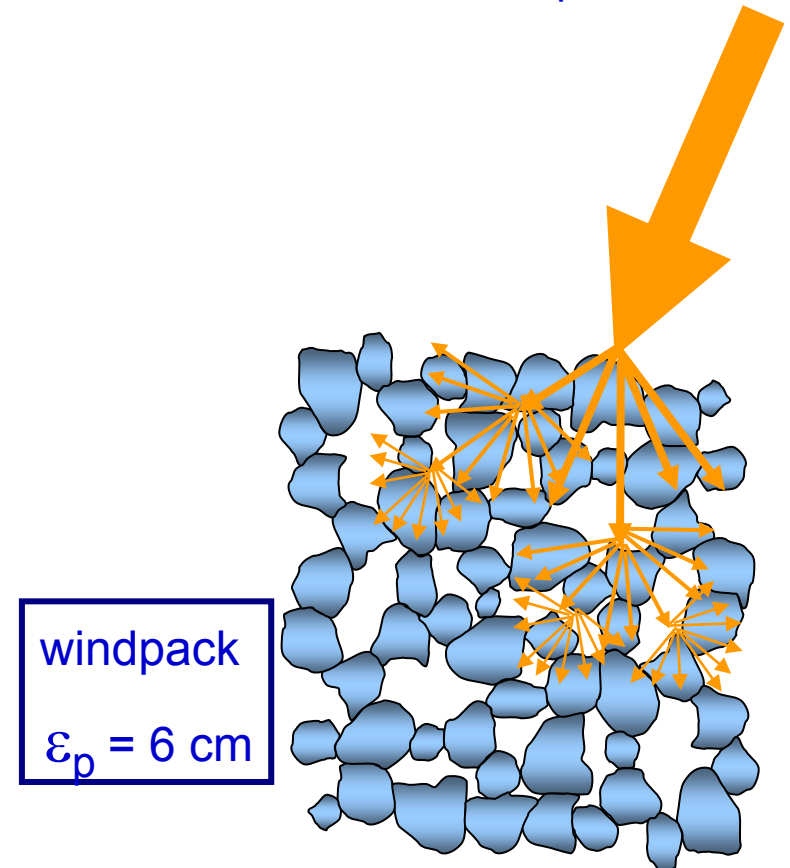
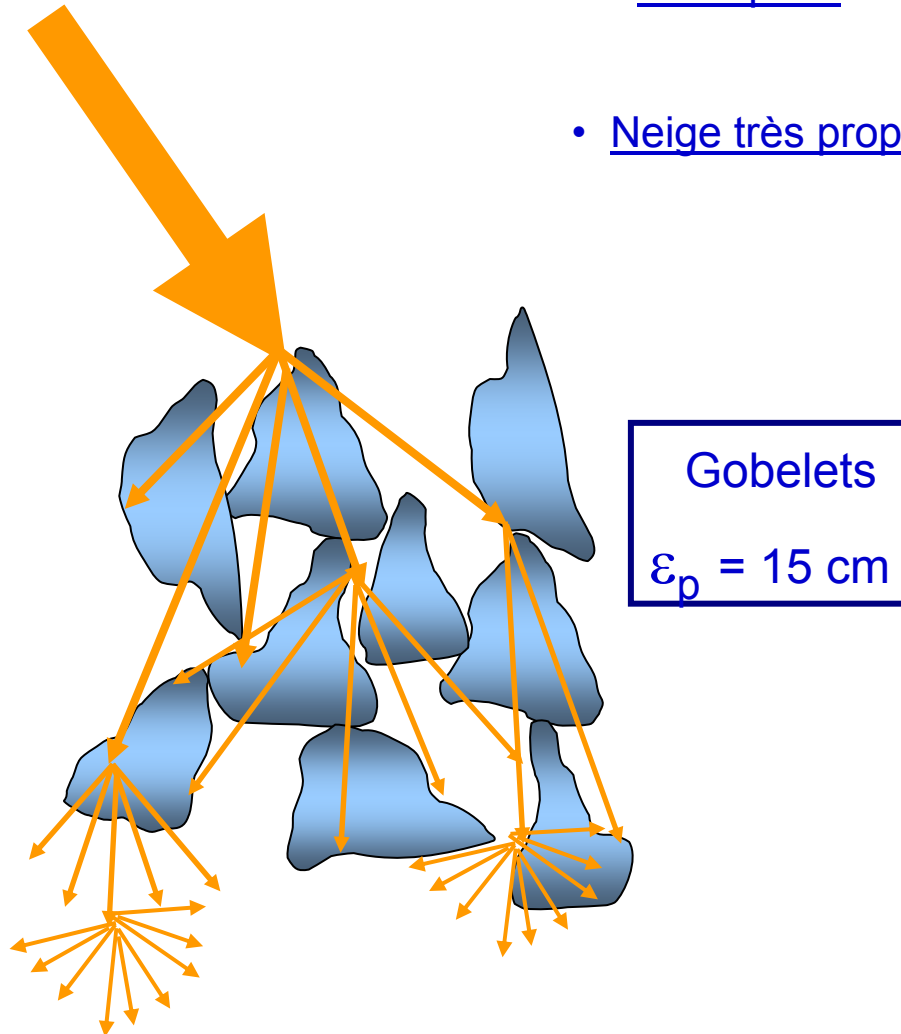
Profondeur de

pénétration déterminée par :

- Diffusion : augmente pour une taille de grains décroissante

- Absorption : augmente avec le contenu en impuretés

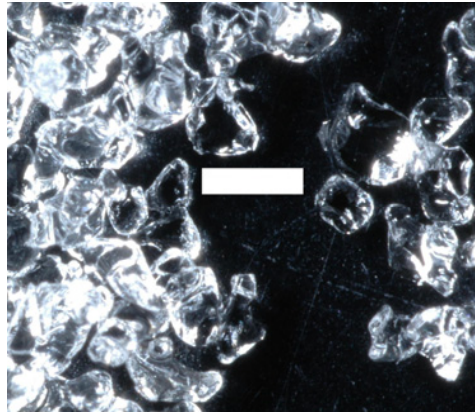
- Neige très propre à grains fins (Antarctique) : $\varepsilon_p > 1 \text{ m}$



Surface spécifique



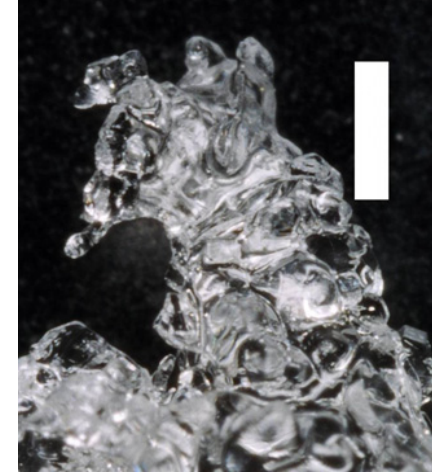
Neige fraiche
350-1600 cm²/g
 $\varepsilon_p = 3-10$ cm



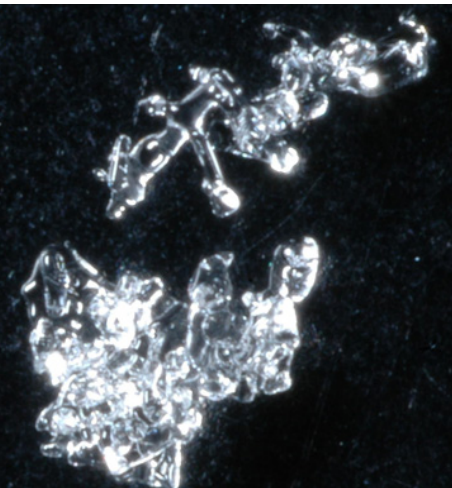
Grains fins, ET
110-300 cm²/g
 $\varepsilon_p = 5-15$ cm



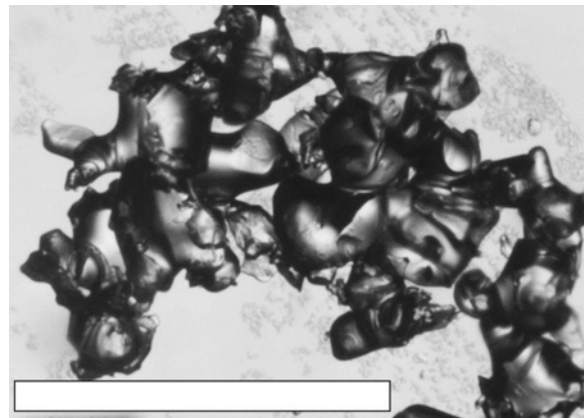
Facettés
80-450 cm²/g
 $\varepsilon_p = 10-25$ cm



Croûte regel
20-50 cm²/g
 $\varepsilon_p = 20-40$ cm



Décomposés
150-900 cm²/g
 $\varepsilon_p = 2-10$ cm



Croute vent
150-380 cm²/g
 $\varepsilon_p = 3-10$ cm



Gobelets
70-220 cm²/g
 $\varepsilon_p = 15-30$ cm

Evolution de la surface spécifique

SS décroît presque toujours avec le temps

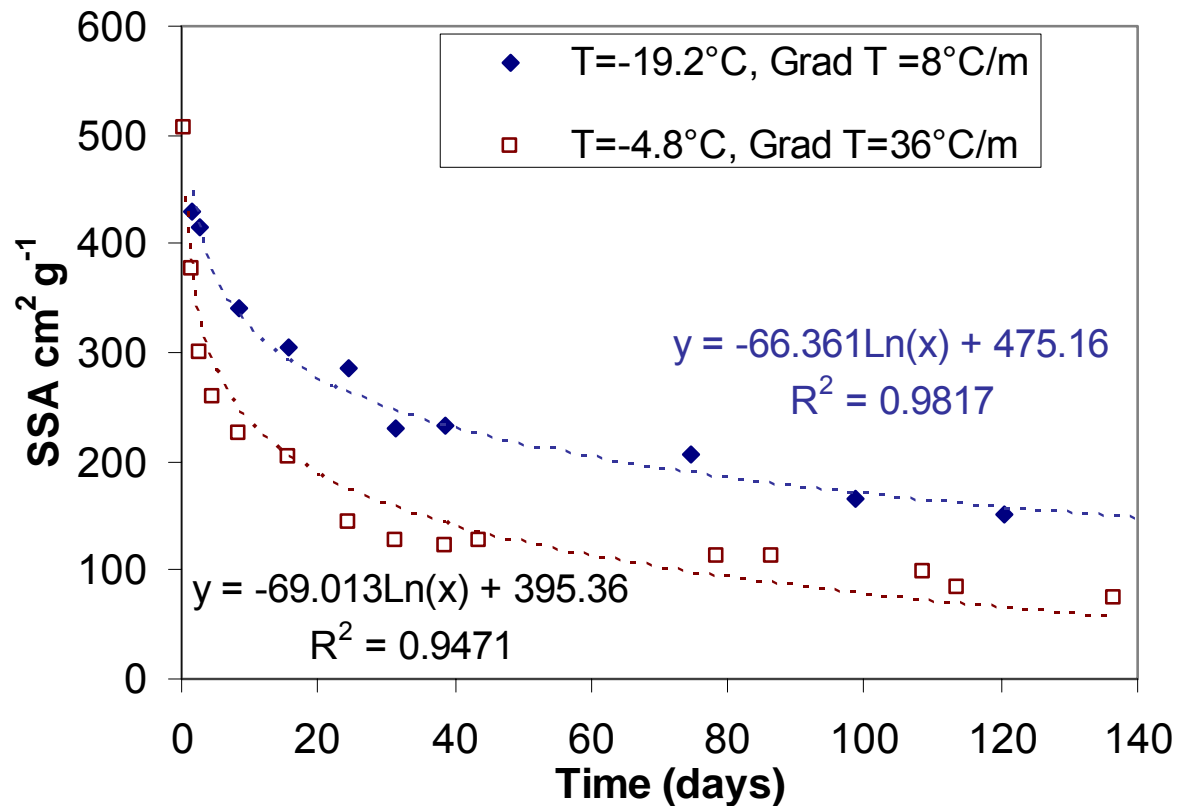
Antarctique (grains ronds) :

$$r^2 - r_0^2 = \alpha t e^{\beta/T}$$

Neige très humide : idem

Manteau neigeux saisonnier: (Taiga, Alaska)

$$SSA = B - A \ln(t + \Delta t)$$



Théorie du Murissement d'Ostwald

Distribution de particules sphériques

Force motrice: la loi de Kelvin

$$P_{sat}(T, R_C) = P_{sat}(T, \infty) \exp \left[-\frac{2\gamma V_m}{RT} \frac{1}{R_C} \right]$$

Sublimation - condensation

$$J = \alpha \times \frac{P_s - P_{sat}}{\sqrt{2 \times \pi \times R \times M \times T_s}} \quad \alpha \cong 1$$

La diffusion en phase vapeur

$$\Delta C = 0^* \quad \varphi_V = -D \cdot \nabla C$$

Evacuation de la chaleur latente

$$\nabla T = 0 \quad T = T_a$$

* voir page suivante

Note sur la diffusion en phase gazeuse

Flux de molécules :

$$\varphi_V = D \nabla C \quad \text{si } D = \text{cst}$$

En régime permanent :

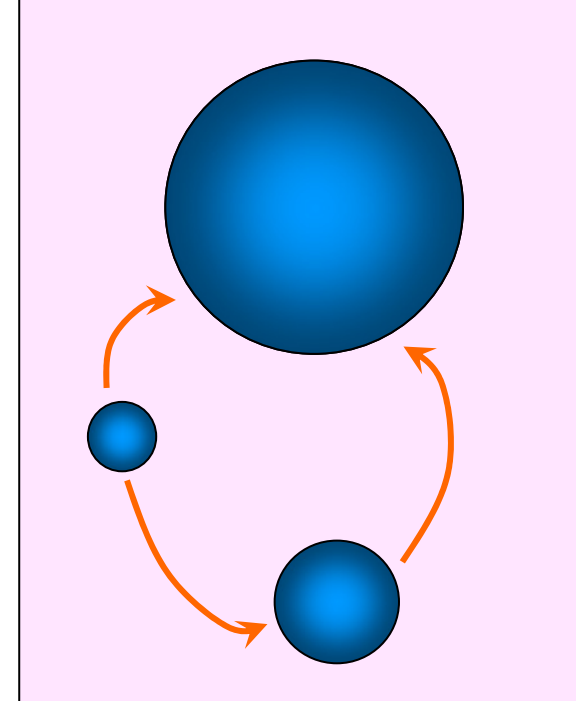
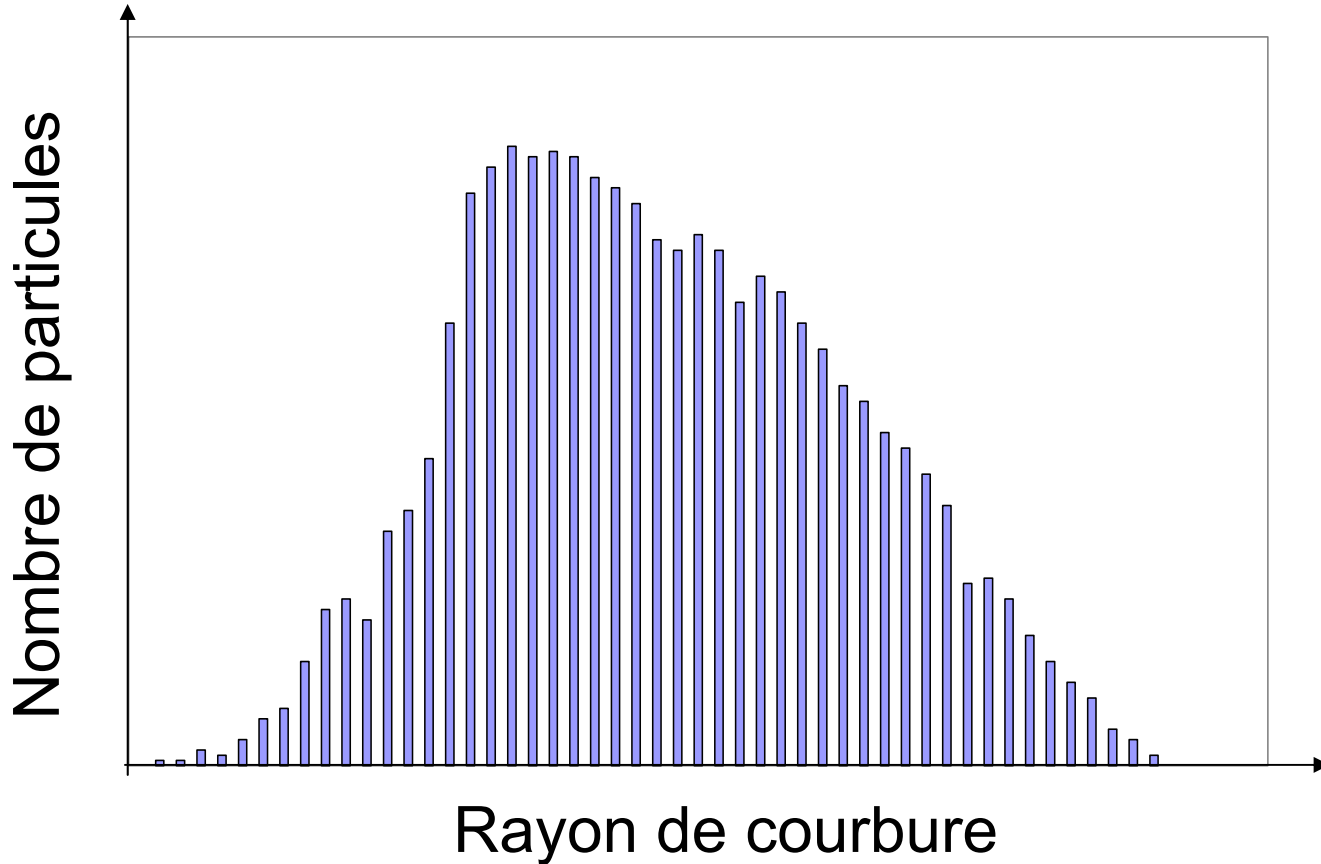
$$\text{div } \varphi_V = 0 \quad \Rightarrow \quad D \text{div } \nabla C = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta C = 0$$

car pas d'accumulation de molécules à un endroit

En régime non permanent :

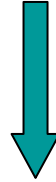
$$\text{div } \varphi_V = \frac{\partial C}{\partial t} \quad \Rightarrow \quad \Delta C \neq 0$$

Théorie du Murissement d'Ostwald



Théorie du Murissement d'Ostwald

Mûrissement d'Ostwald



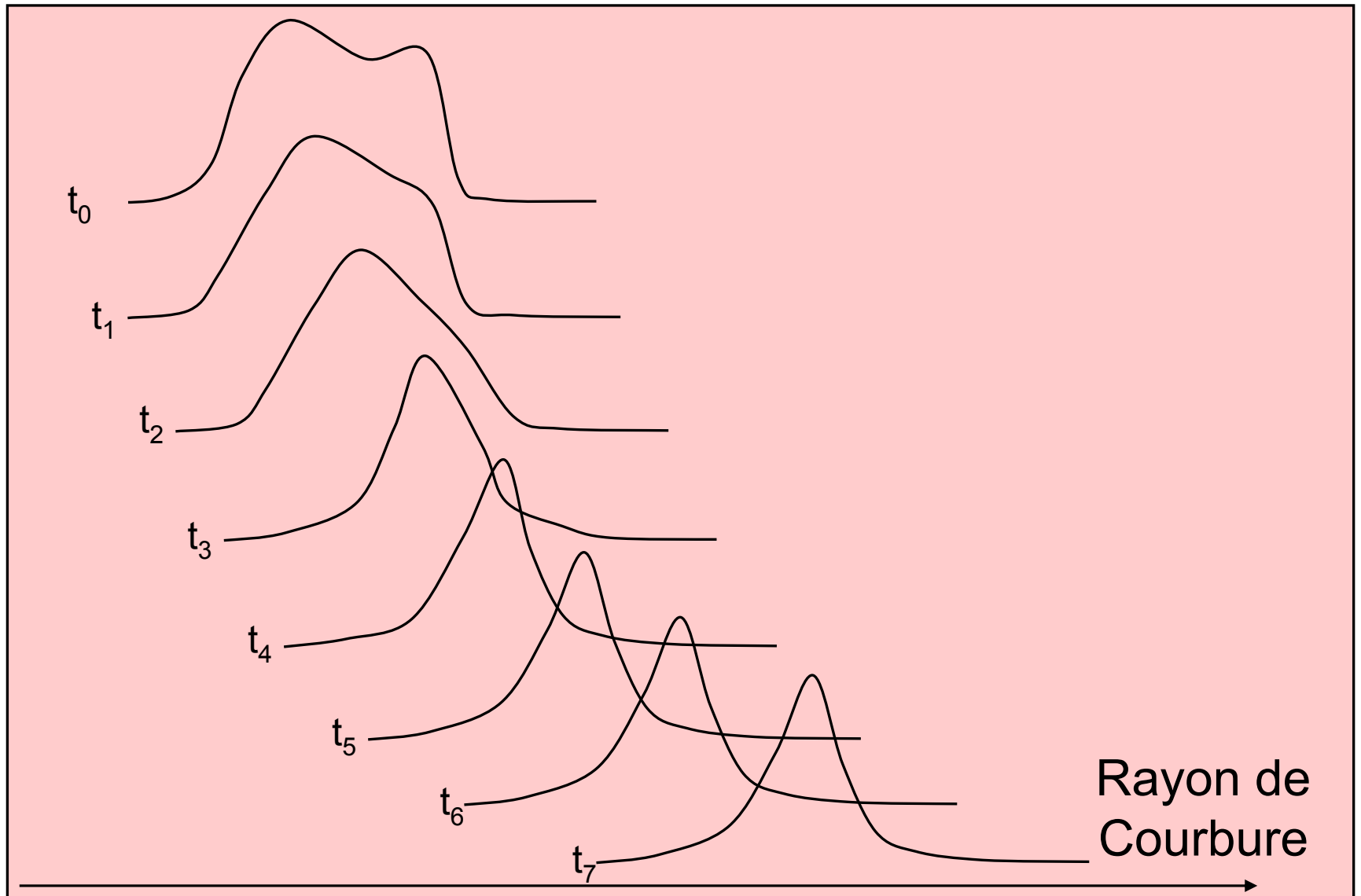
Régime transitoire



Régime permanent

$$R^n - R_0^n = K(T) \cdot t$$

Théorie du Murissement d'Ostwald



Théorie du Murissement d'Ostwald

$$R^n - R_0^n = K(T) \cdot t$$

SPHERES



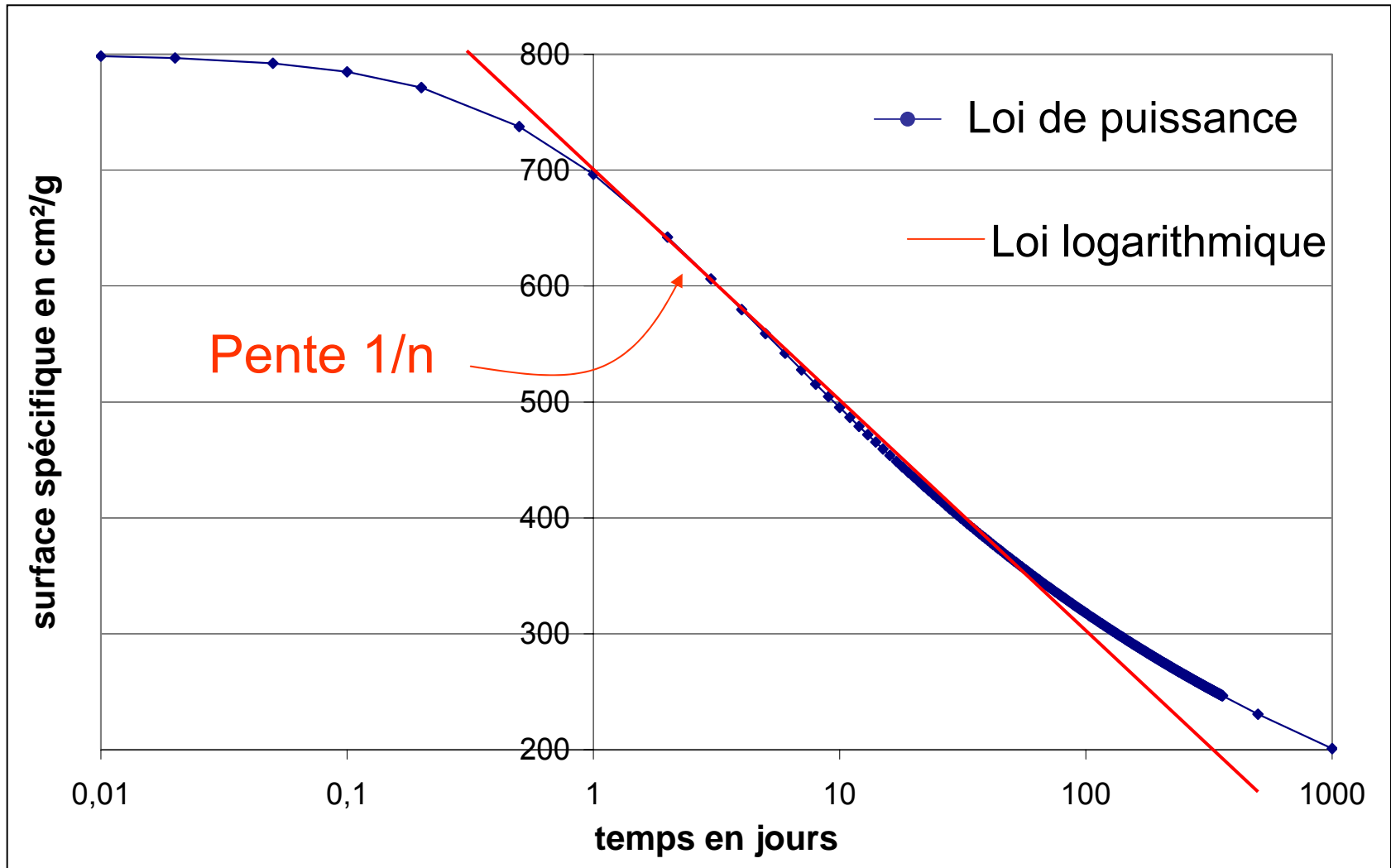
$$\frac{1}{SS^n} - \frac{1}{SS_0^n} = K'(T) \cdot t$$

$$SS = SS_0 \times \left(\frac{\tau}{t + \tau} \right)^{\frac{1}{n}}$$

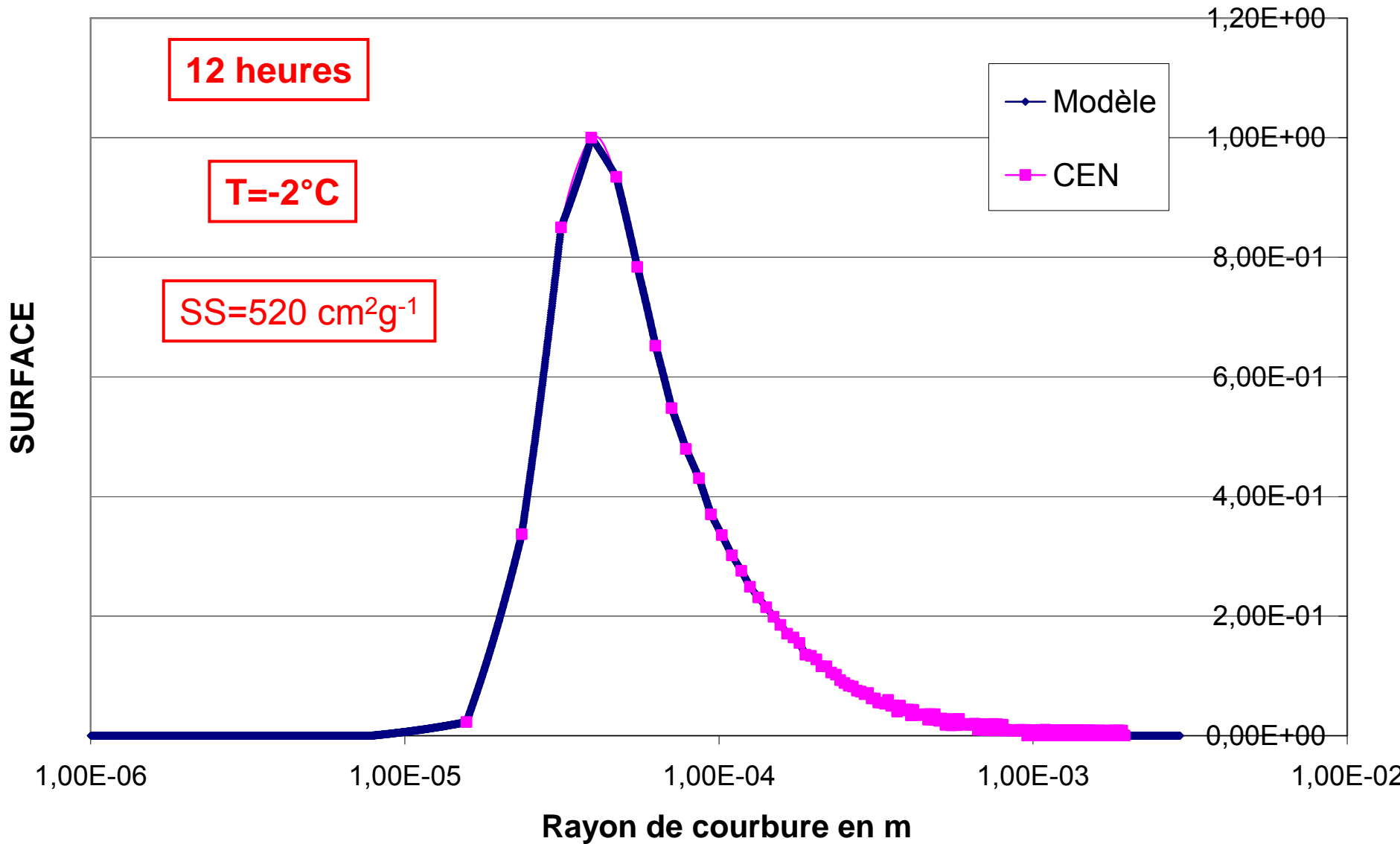
avec

$$\tau = \frac{1}{SS_0^n} \times \frac{1}{K'(T)}$$

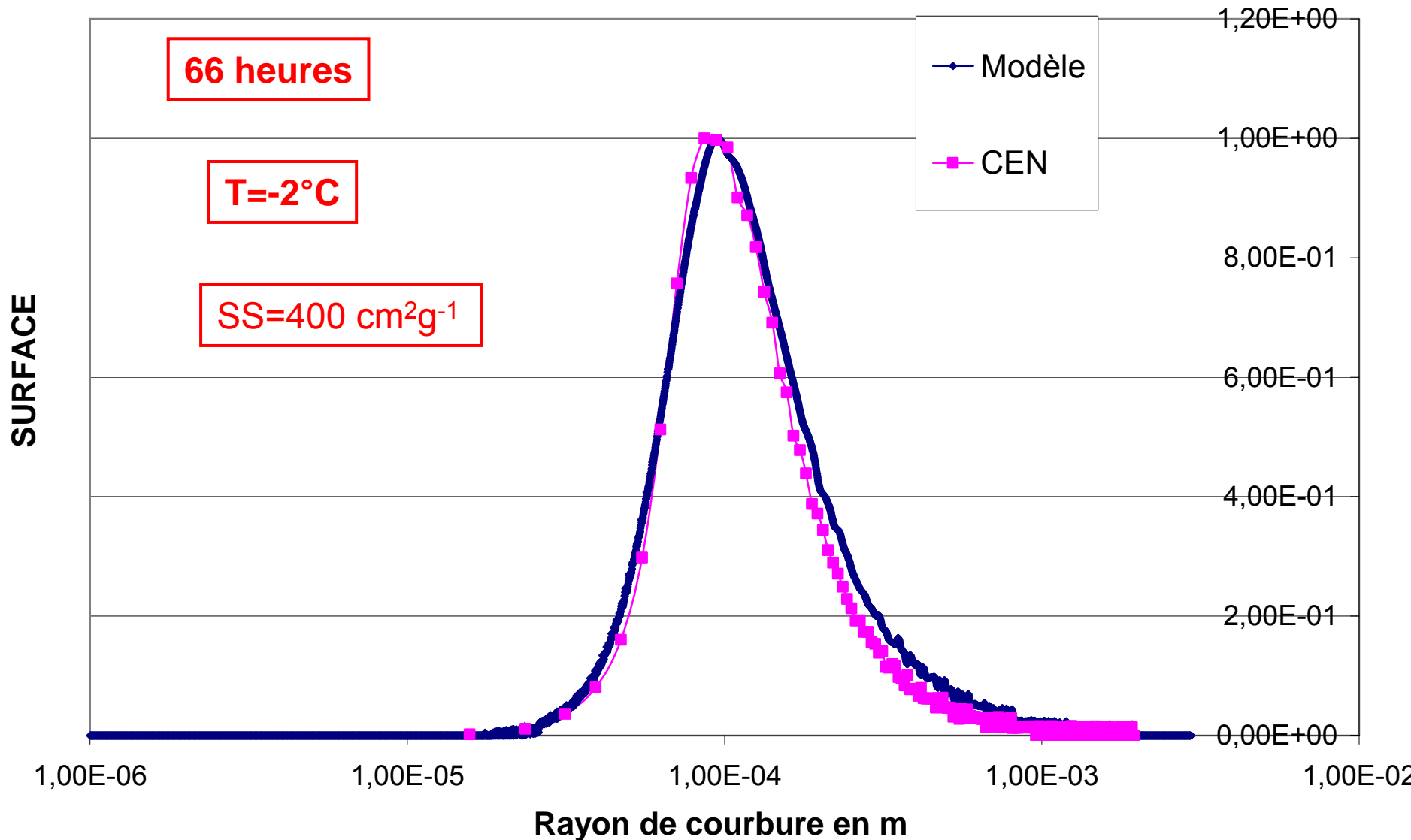
Théorie du Murissement d'Ostwald



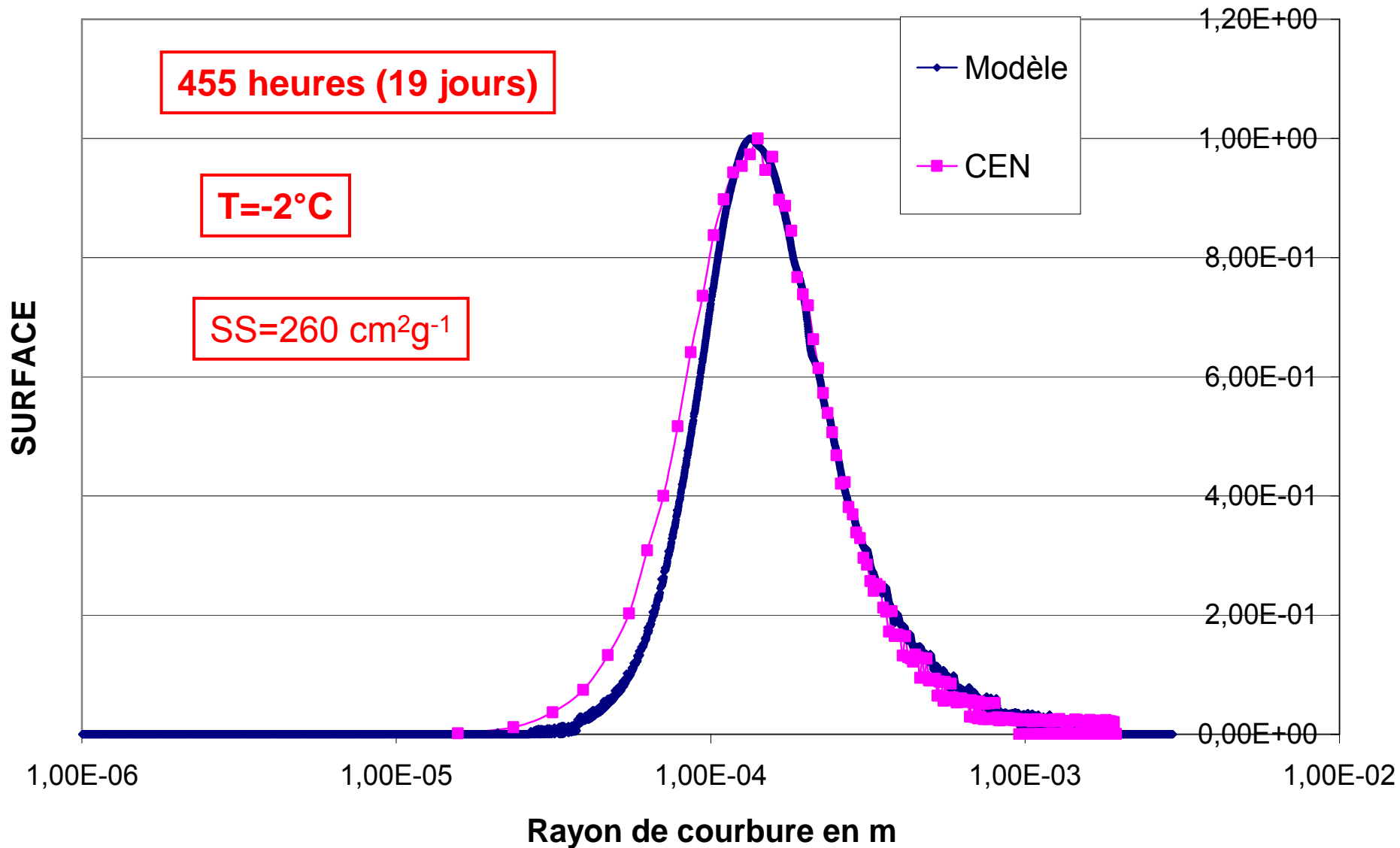
Théorie du Murissement d'Ostwald : modélisation



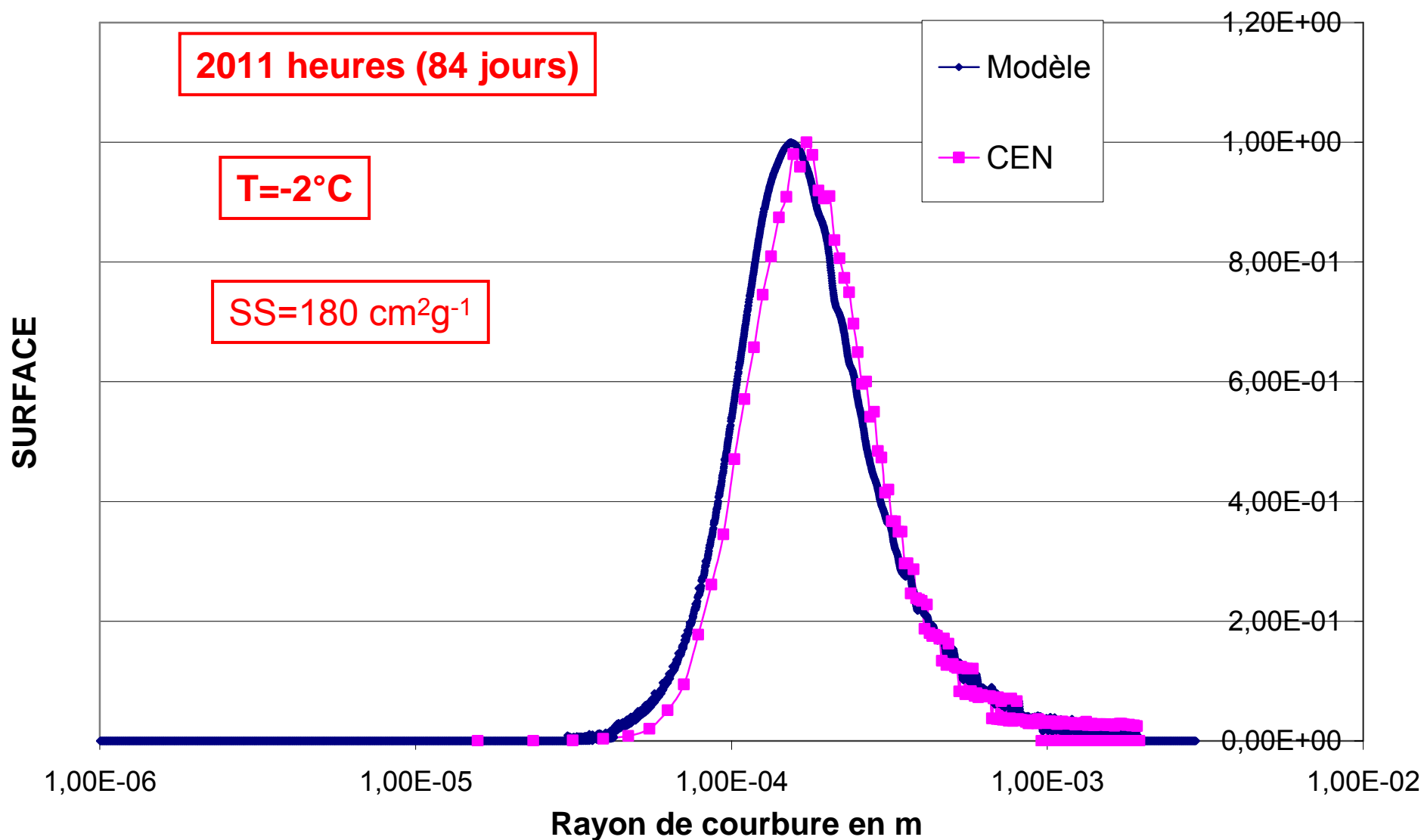
Théorie du Murissement d'Ostwald : modélisation



Théorie du Murissement d'Ostwald : modélisation



Théorie du Murissement d'Ostwald : modélisation



Théorie du Murissement d'Ostwald : conclusion

La neige saisonnière n'a pas atteint l'état stationnaire.

L'utilisation des équations de la théorie du murissement d'Ostwald est impossible

Pour l'instant, la prédiction de la décroissance de la SS doit se faire de manière empirique

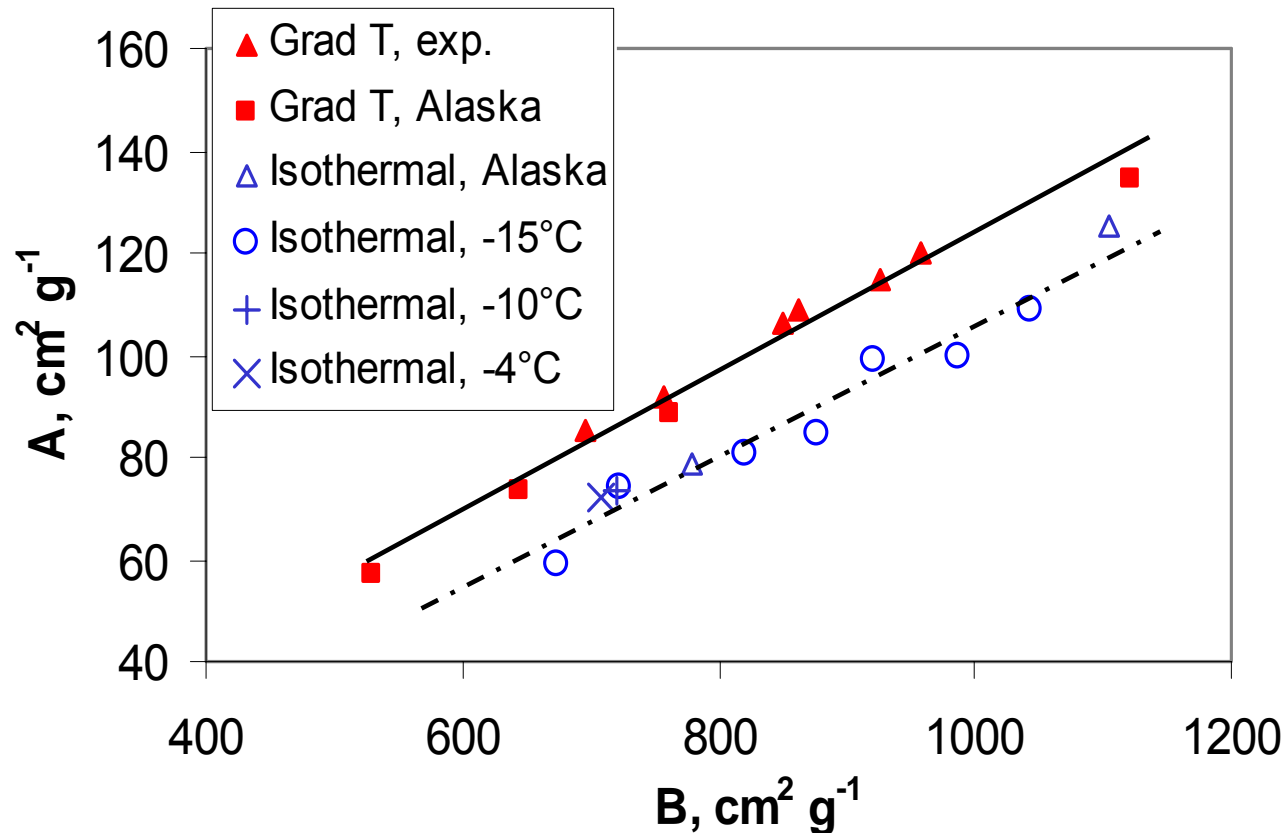
$$SS = B - A \ln(t + \Delta t)$$

∃ Une corrélation entre A et B

2 régimes :

1-Régime TG ($>20^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

2-Régime ET ($<10^{\circ}\text{C}/\text{m}$)



Paramétrisation de l'évolution de la surface spécifique

$$SS = B - A \ln (t+\Delta t)$$

1-Régime TG (>20°C/m)

$$A_g = 0.0961 SS_0 - 3.44 (T_m + 1.90)$$

$$B_g = 0.659 SS_0 - 27.2 (T_m - 2.03)$$

$$\Delta t_g = \exp \left[\frac{-0.341 SS_0 - 27.2 (T_m - 2.03)}{0.0961 SS_0 - 3.44 (T_m + 1.90)} \right]$$

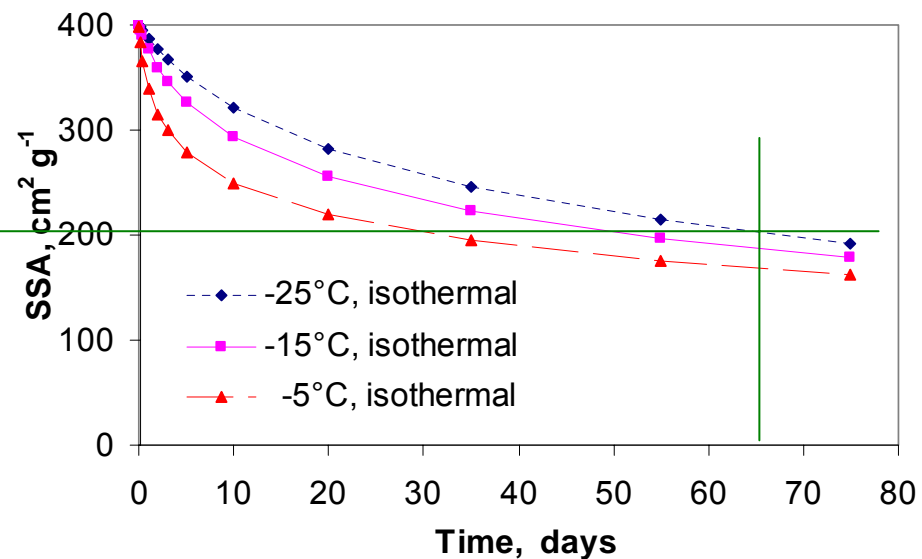
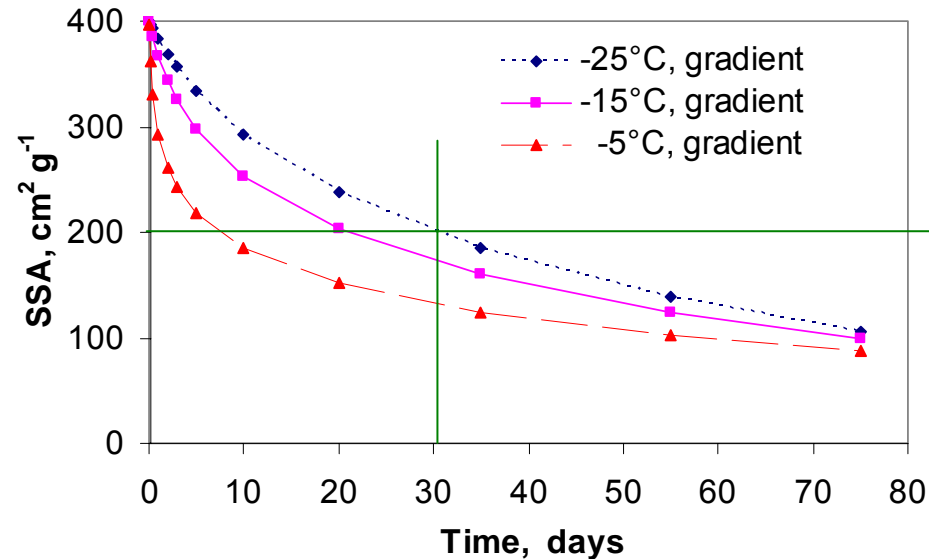
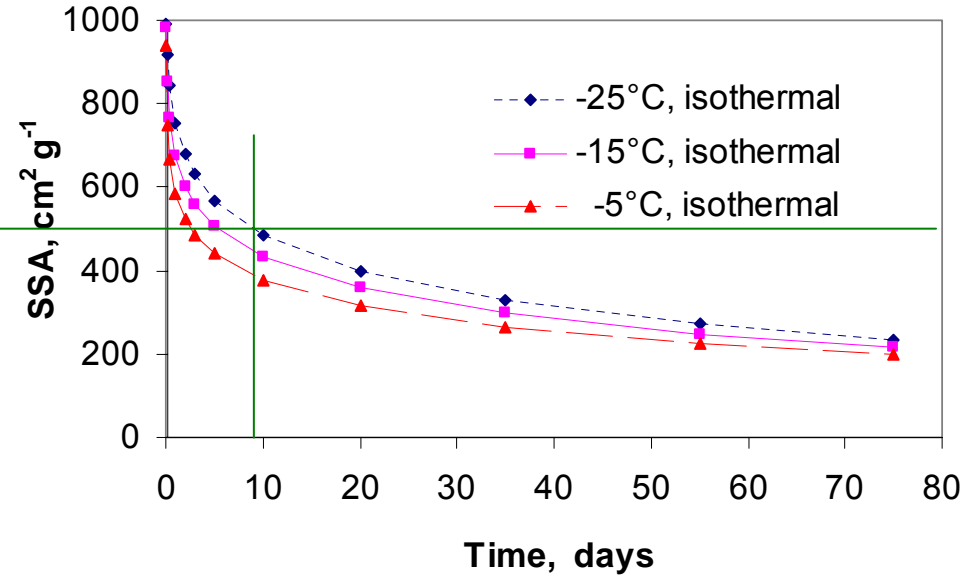
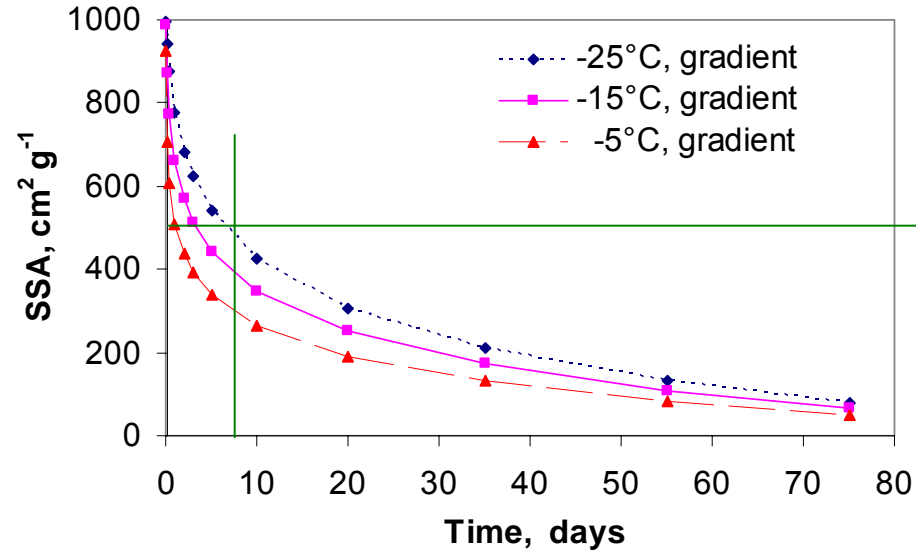
2-Régime ET (<10°C/m)

$$A_i = 0.0760 SS_0 - 1.76 (T_m - 2.96)$$

$$B_i = 0.629 SS_0 - 15.0 (T_m - 11.2)$$

$$\Delta t_i = \exp \left[\frac{-0.371 SS_0 - 15.0 (T_m - 11.2)}{0.0760 SS_0 - 1.76 (T_m - 2.96)} \right]$$

Vitesse d'évolution de la surface spécifique



Conductivité thermique

Matériau	$k_T \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Air	0.023
Bois	0.04 – 0.4
Eau	0.6
Verre	1.1
Calcaire	0.5
Glace	2.3
Acier inox	15
Aluminium	237
Cuivre	401
Diamant	1000

$$F = -k_T \frac{\partial T}{\partial z}$$

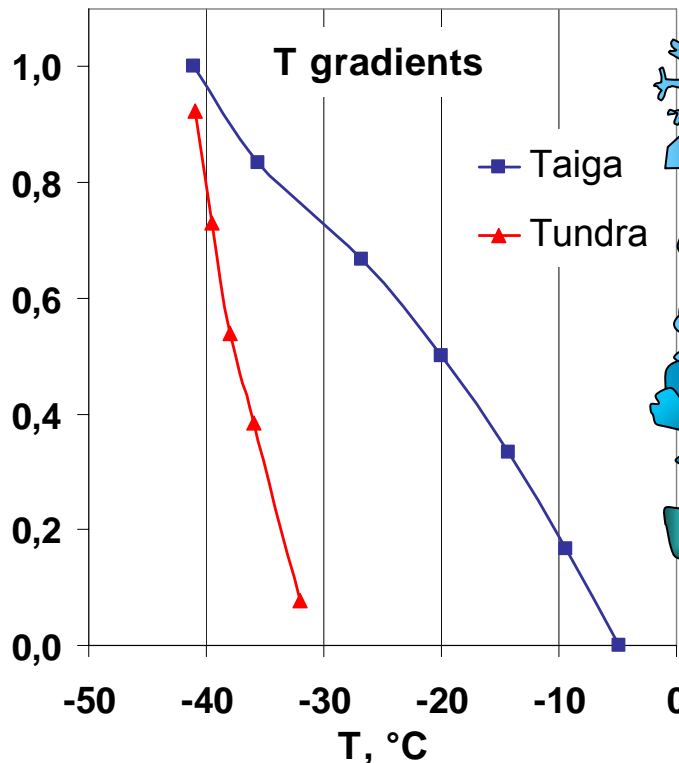
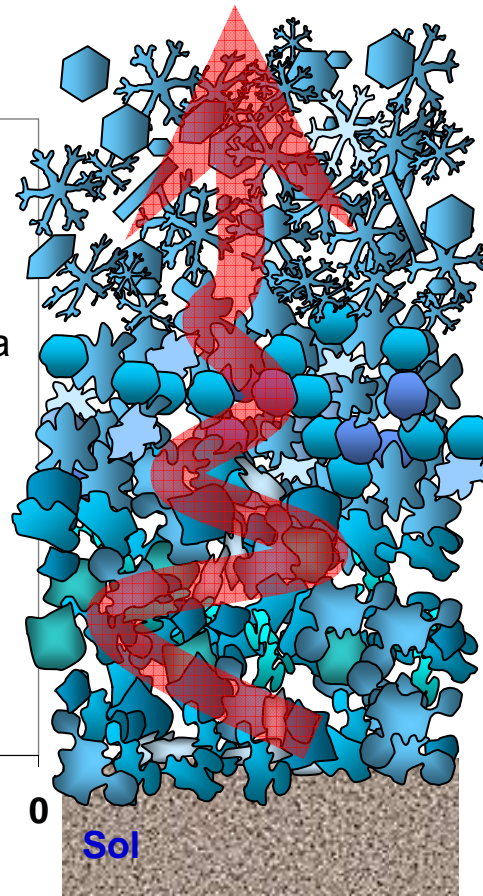
Conductivité thermique

$$F = -k_T \frac{\partial T}{\partial z}$$

Determine :

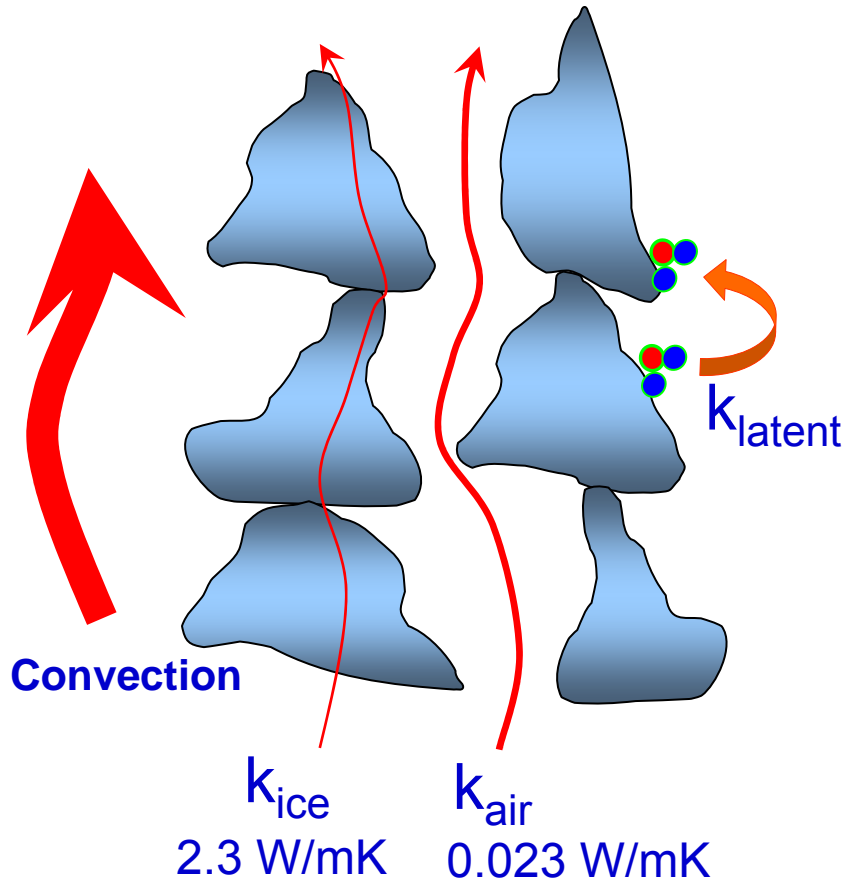
- Refroidissement du sol
- Activité microbienne
- Emission de GES
- Croissance glace de mer

Flux



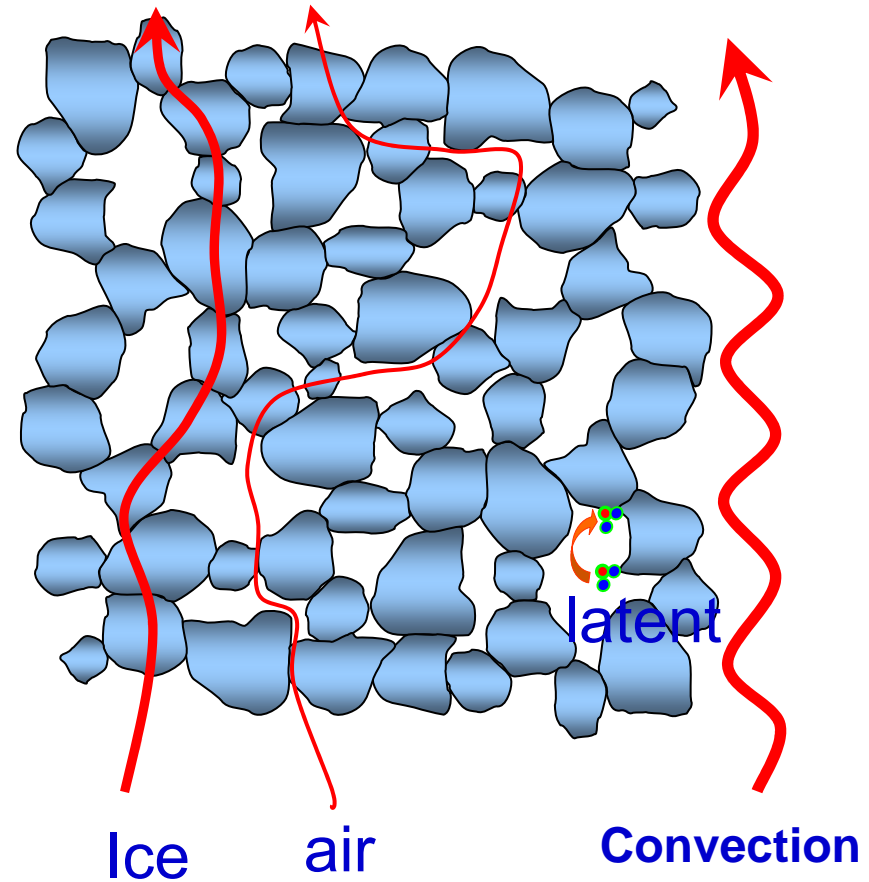
Matériau	k_T Wm ⁻¹ K ⁻¹
Air	0.023
Bois	0.04 – 0.4
Eau	0.6
Verre	1.1
Calcaire	0.5
Glace	2.3
Acier inox	15
Aluminium	237
Cuivre	401
Diamant	1000

TG
Gobelets



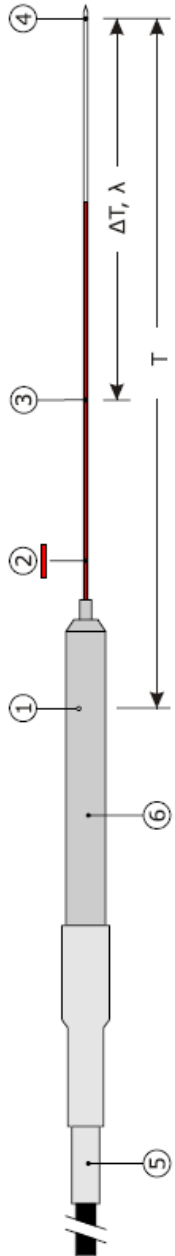
$$k_T = 0.10 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

ET
Grains fins

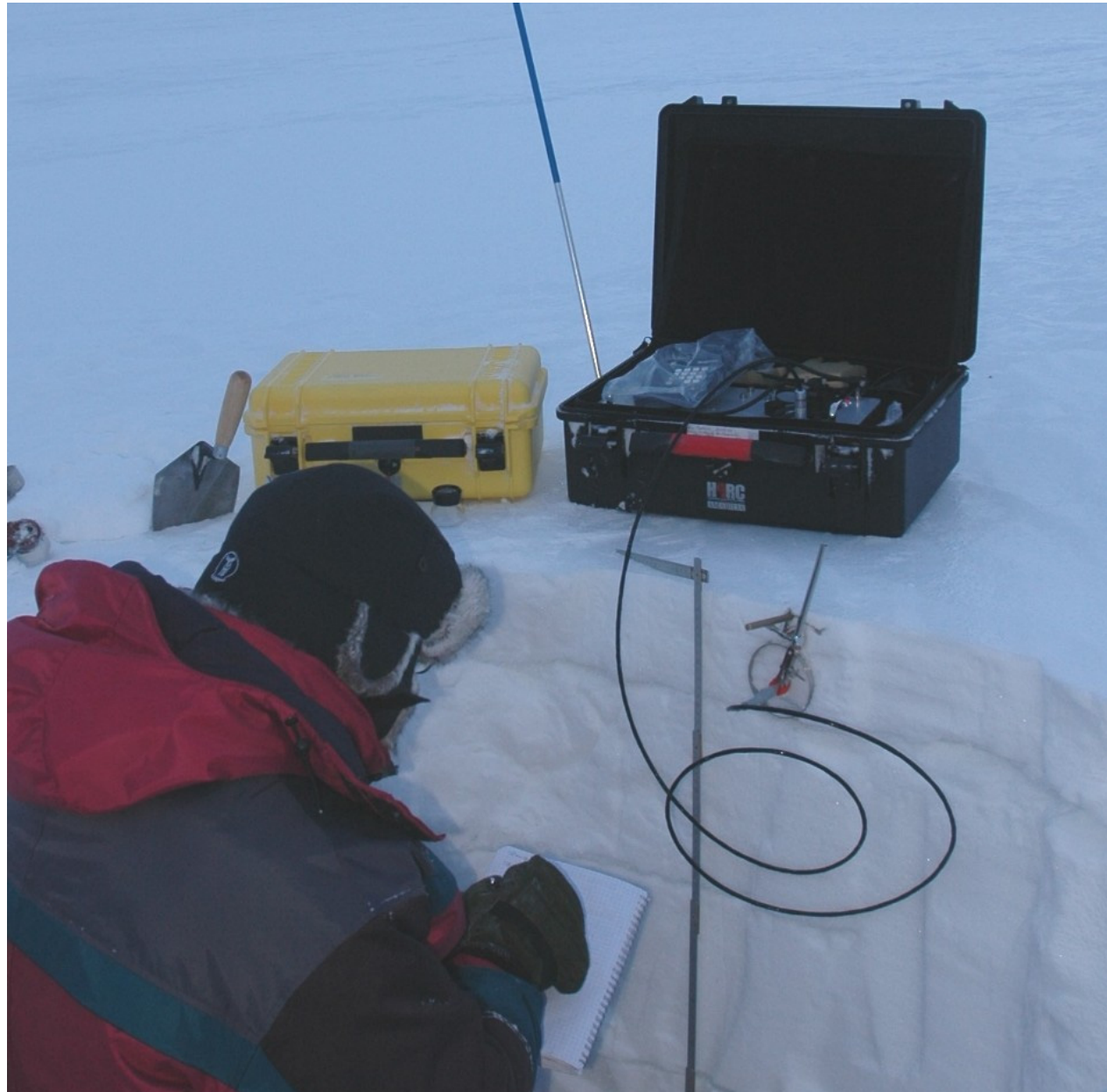


$$k_T = 0.30 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

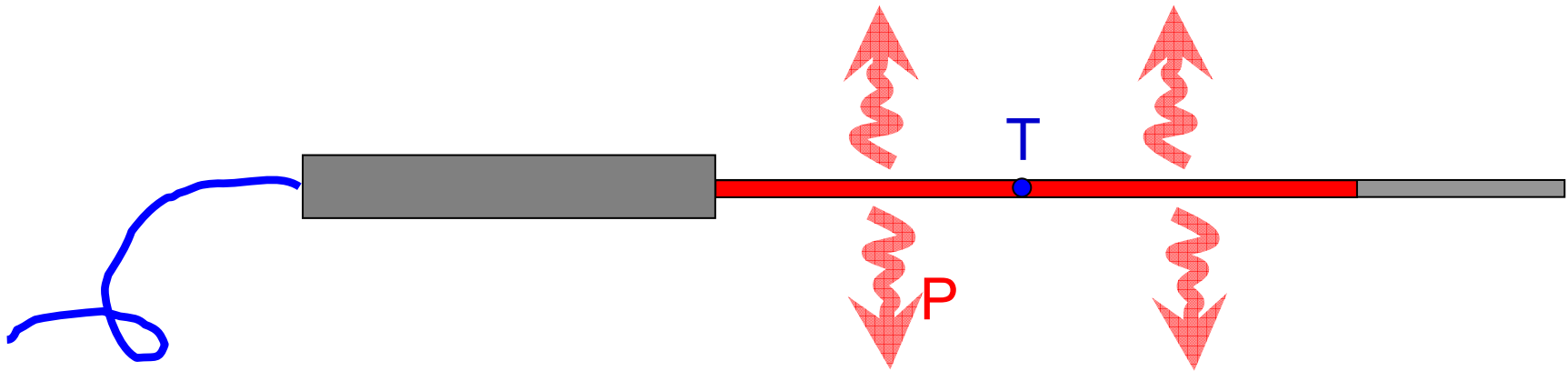
Mesure de la conductivité thermique



Hukseflux TP02



Mesure de la conductivité thermique



$$F = -k^* \frac{\partial T}{\partial r} - fD_0L_0 \frac{\partial \rho_v}{\partial r}$$

$$F = - \underbrace{\left(k^* + fD_0L_0 \frac{\partial \rho_v}{\partial T} \right)}_{=k_{\text{eff}}} \frac{\partial T}{\partial r}$$

F : Flux de chaleur

k^* : conductivité thermique par le solide et l'air

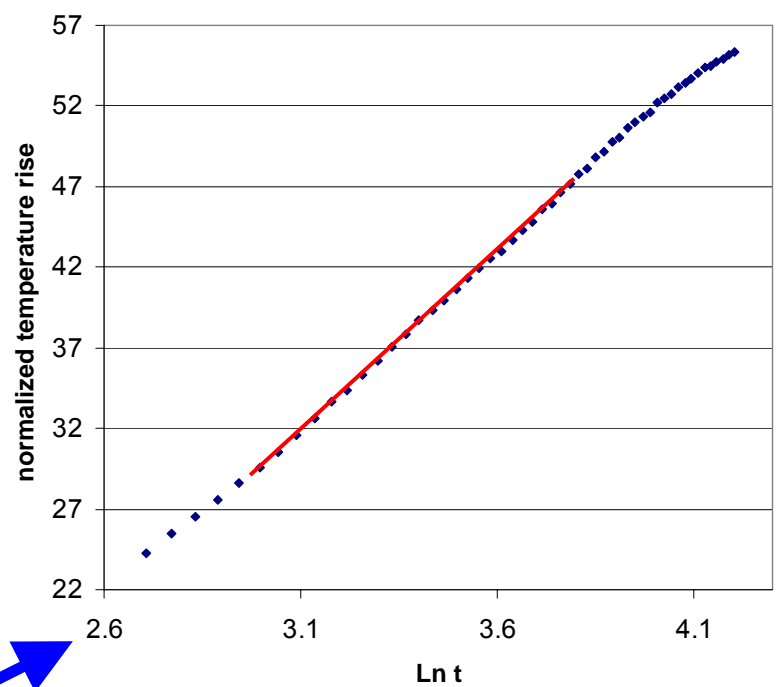
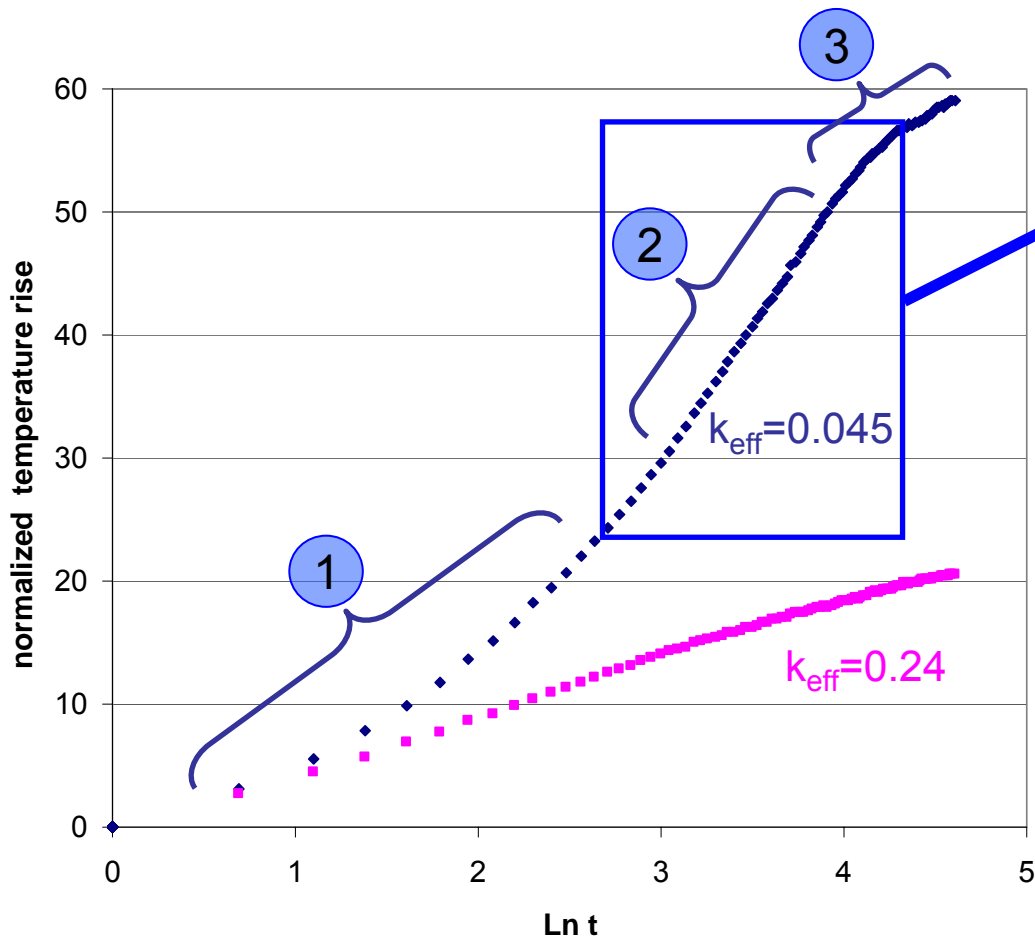
D_0 : coeff de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air

f : facteur correctif pour la tortuosité et l'augmentation des gradients de T dus à la géométrie des grains

L_0 : chaleur latente de sublimation de la glace

$$\Delta T = \frac{F}{4 \pi k_{\text{eff}}} \text{Ln} \left(\frac{t_2}{t_1} \right)$$

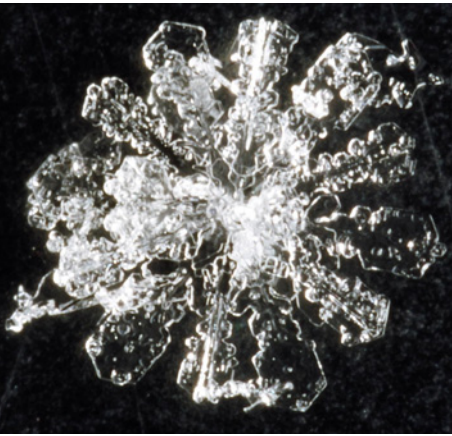
$$\Delta T = \frac{F}{4 \pi k_{\text{eff}}} \text{Ln} \left(\frac{t_2}{t_1} \right)$$



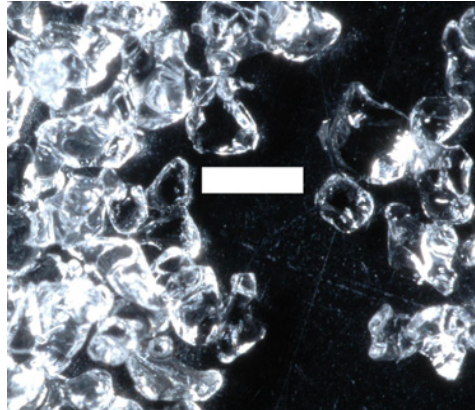
Neige récente, particules reconnaissables $\rho = 0.133$

Neige 7-10 jours, traces de fusion $\rho = 0.322$

Valeurs de la conductivité thermique



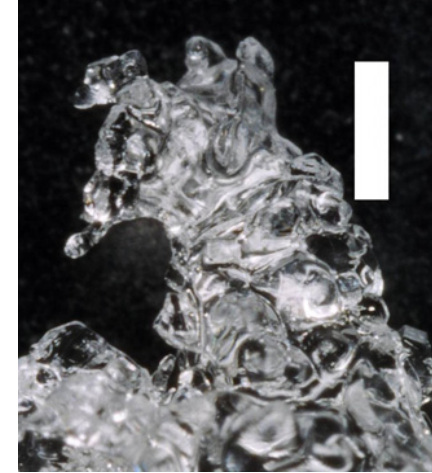
Neige fraiche
 $0.03 - 0.12 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$



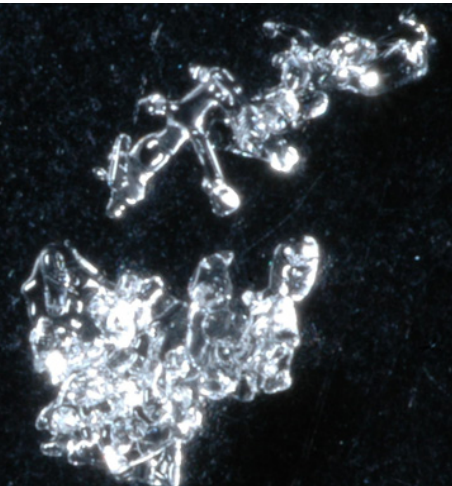
Grains fins, ET
 $0.08 - 0.3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$



Facettés
 $0.08 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

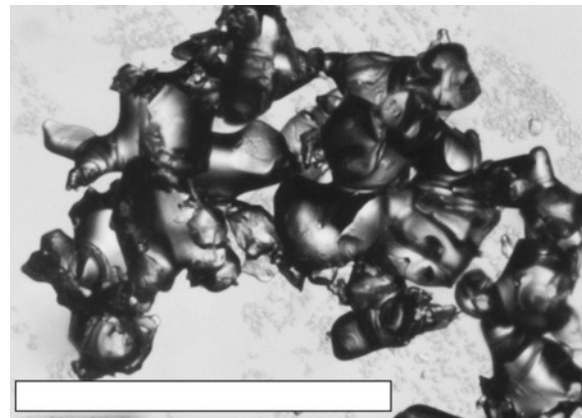


Croûte regel
 $0.1 - 0.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$



Décomposés
 $0.06 - 0.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

Pourquoi ces valeurs ?

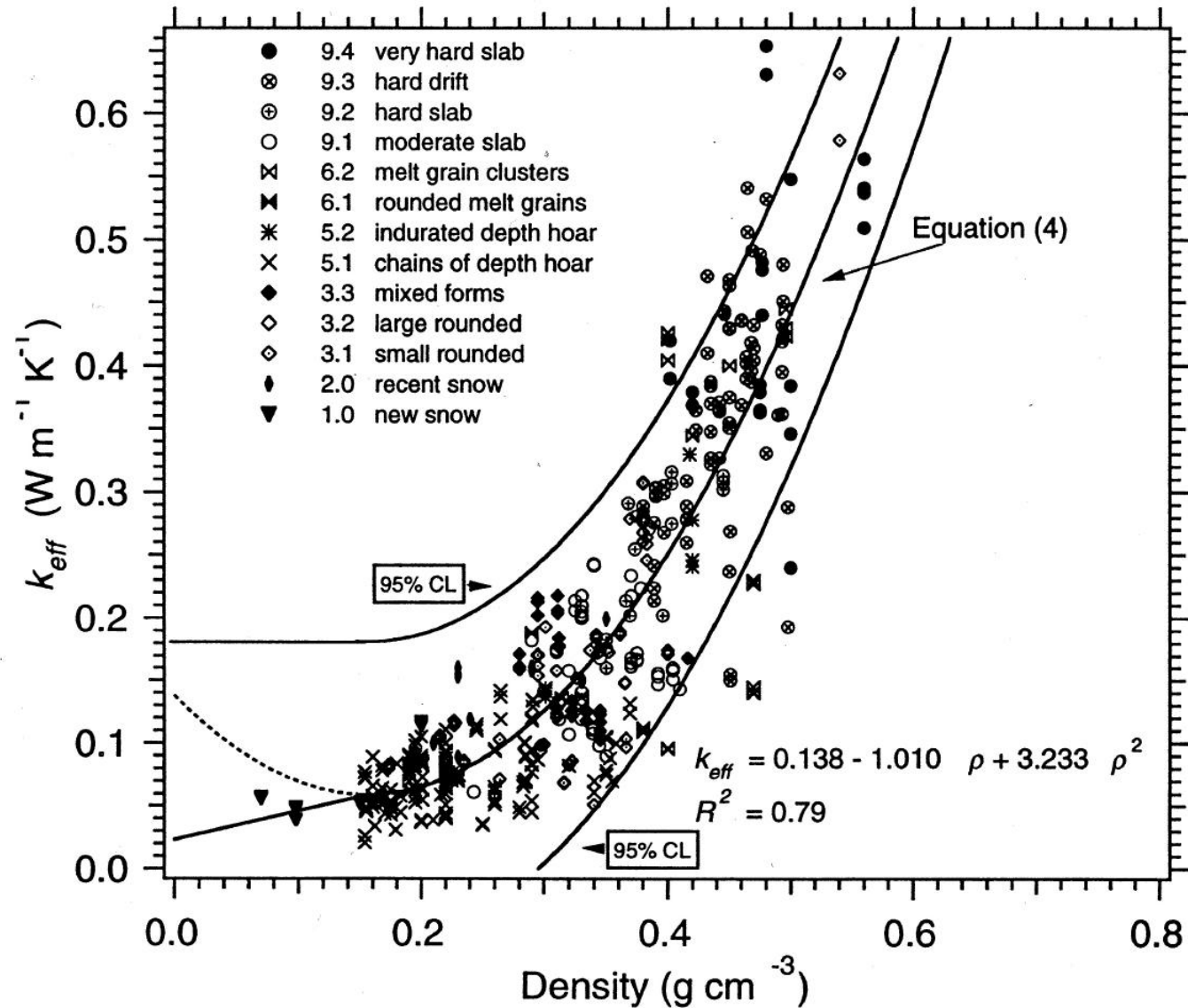


Croute vent
 $0.2 - 0.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$



Gobelets
 $0.03 - 0.15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

Valeurs de la conductivité thermique



Neige sèche :

$$k_T = 0.025 - 0.65 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Flux de chaleur à travers la neige et croissance de la banquise

Etat stationnaire : $F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F$

$$F_i = -k_i \frac{T_i - T_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} = -k_i \frac{T_i - T_{i-1}}{h_i}$$

$$\frac{F_i h_i}{k_i} = -(T_i - T_{i-1})$$

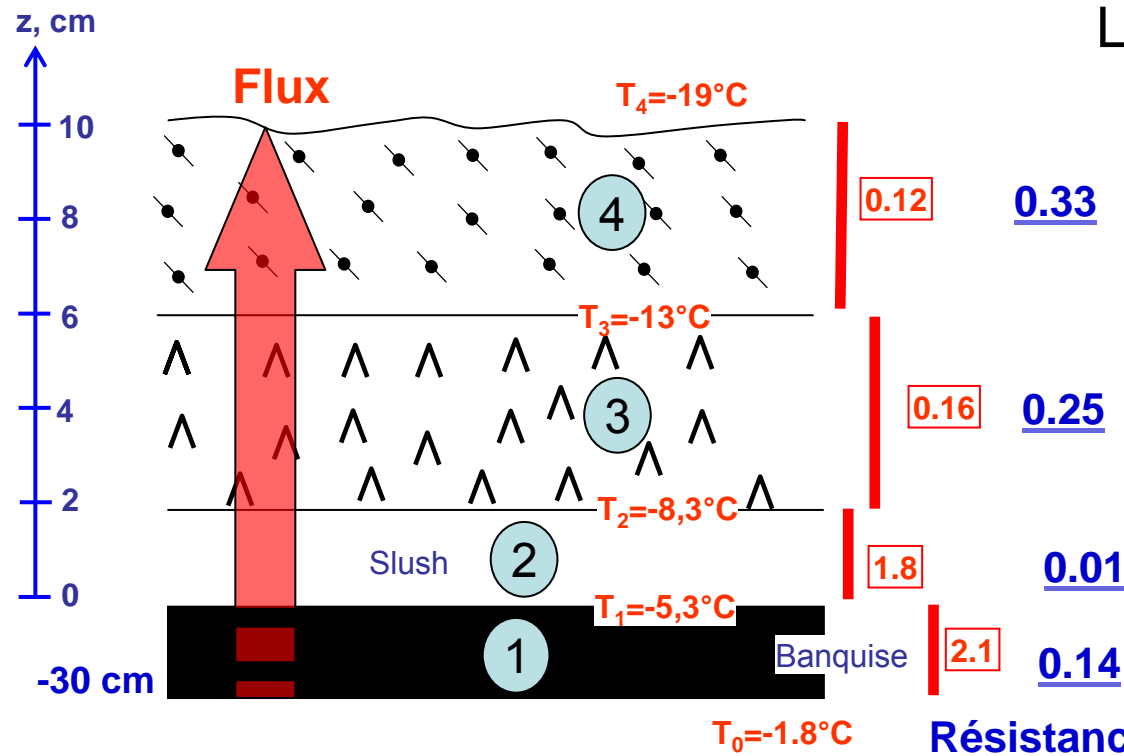
$$F = - \frac{T_n - T_0}{\sum \frac{h_i}{k_i}}$$

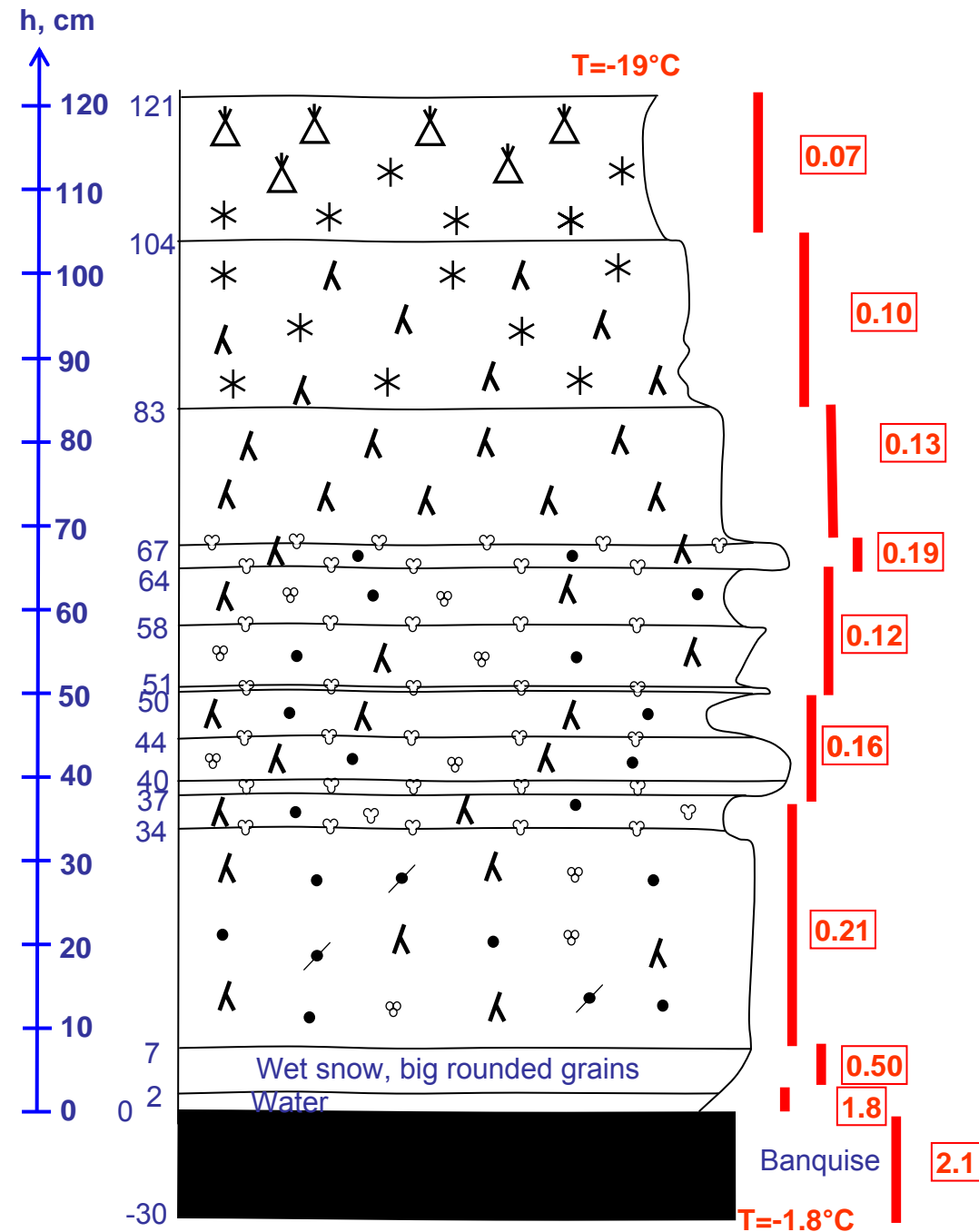
$$V_{\text{croissance}} = \frac{F}{L}$$

$$L = 330\,000 \text{ J kg}^{-1} = 3.3 \cdot 10^8 \text{ J m}^{-3}$$

$$V_{\text{croissance}} = 7,1 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$$

$h = + 18 \text{ cm en 1 mois}$



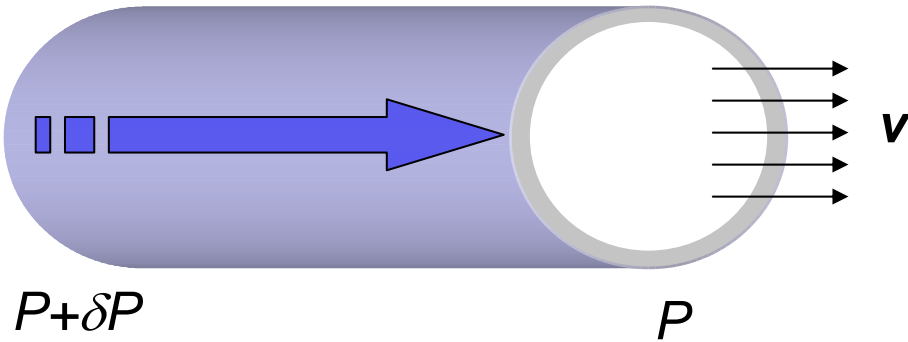


Calculer $V_{\text{croissance}}$ pour ce manteau neigeux

Calculer $V_{\text{croissance}}$ dans le cas précédent, mais sans neige

Conclusion sur l'effet de la neige sur la croissance de la glace de mer ?

Perméabilité



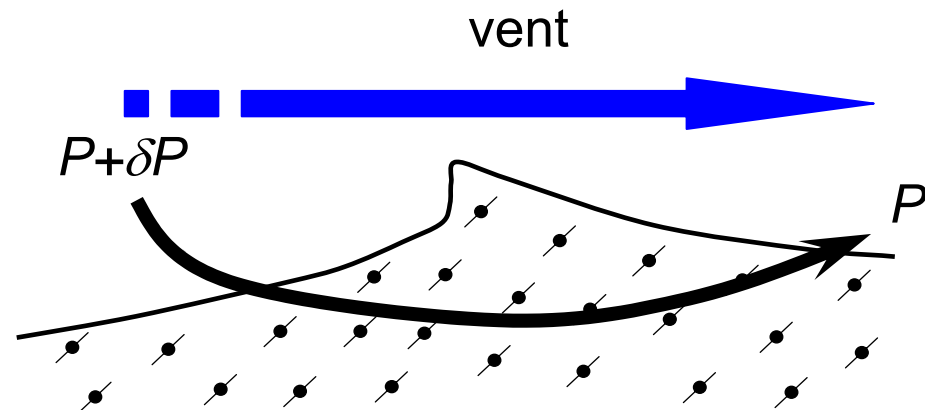
Loi de Darcy

$$v = - \frac{K}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x}$$

K : perméabilité (m^2)

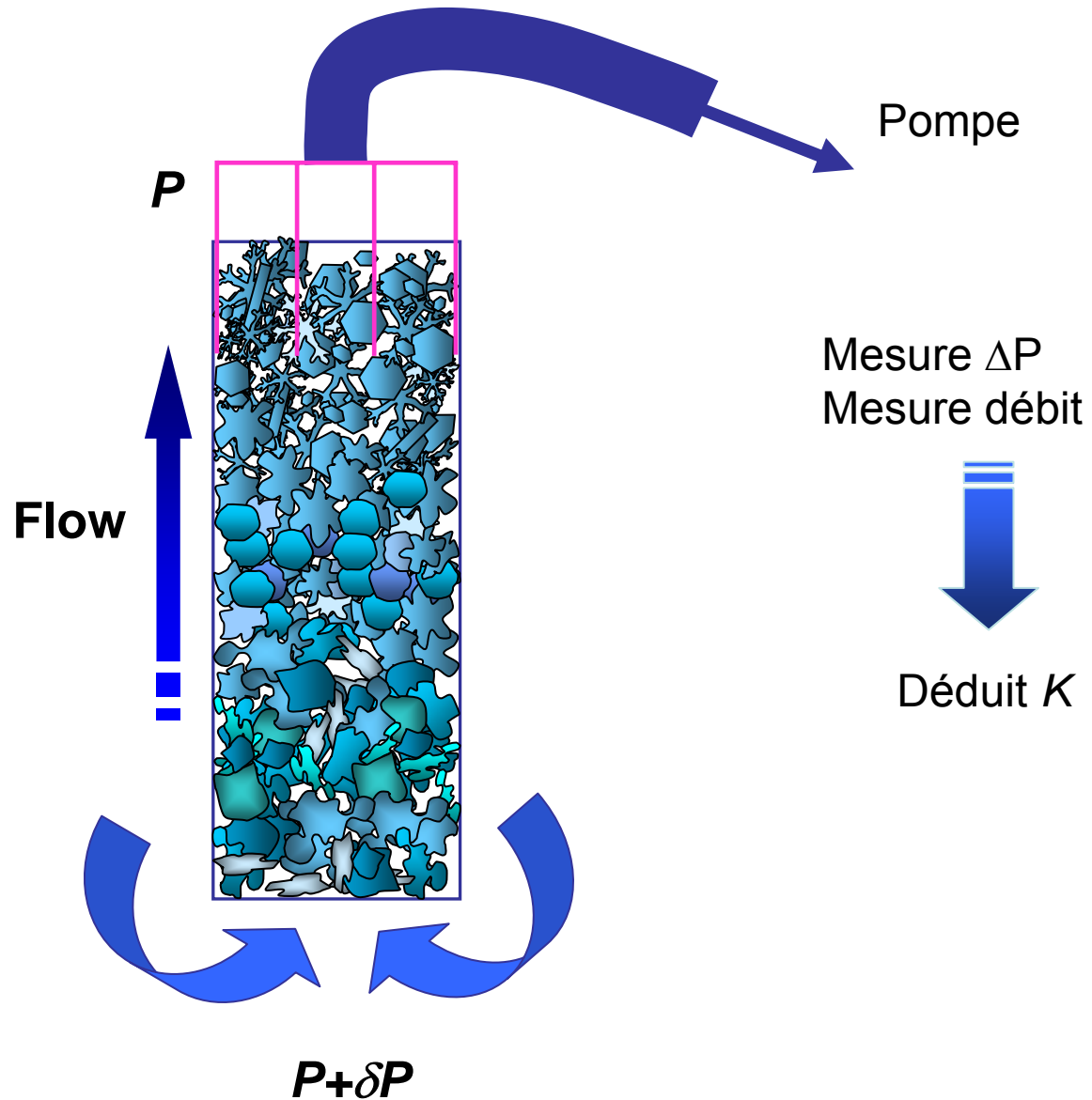
v : vitesse d'écoulement

η : viscosité



Advection d'air dans la neige

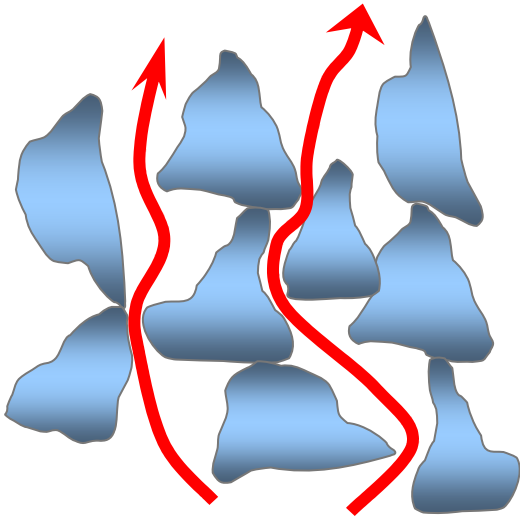
Perméabilité : méthode de mesure



Perméabilité : méthode de mesure

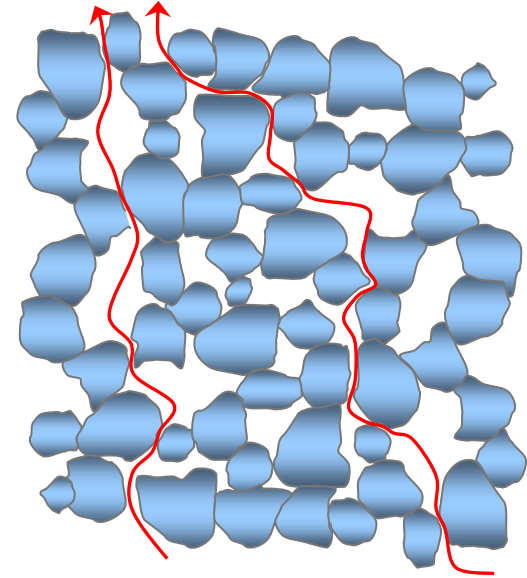


TG
Gobelets



$$K_p = 500 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$$

ET
Grains fins

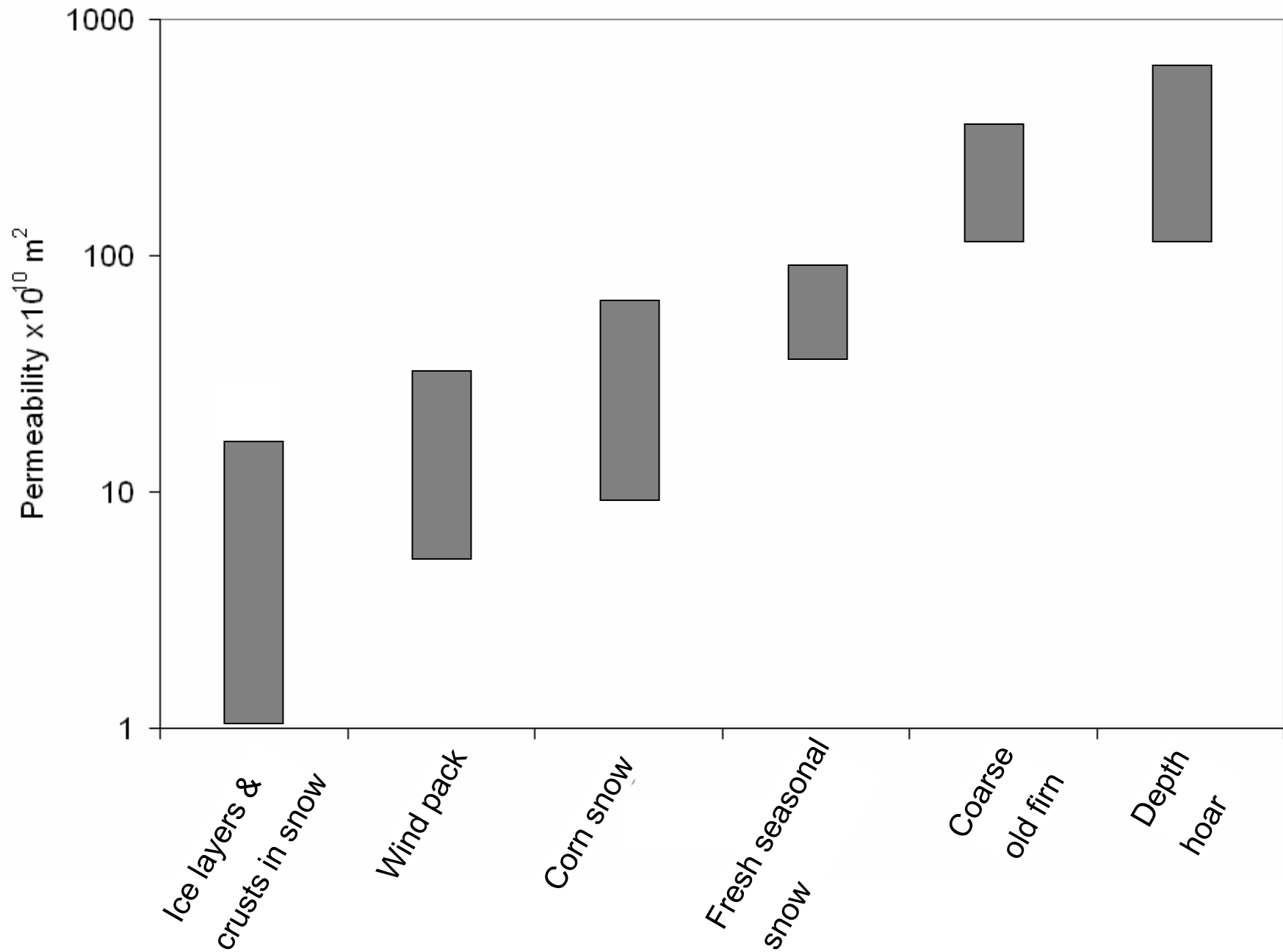


$$K_p = 40 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$$

$$K = 0.077 e^{-0.0078 \rho_s} D^2$$

ρ_s = densité

D = diamètre des grains

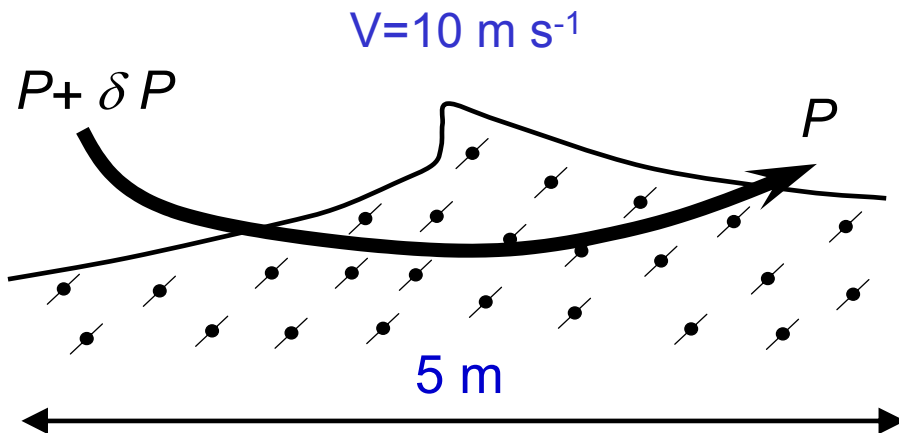


Vitesse d'écoulement dans la neige

Type neige	Perméabilité (10^{-10} m^2)	Vitesse d'écoulement
Croute de regel	2	?
Croute de vent	20	?
Neige fraiche	50	?
Gobelets	600	?

$$v = - \frac{K}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$\eta @ 258 \text{ K} = 1.6 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$$



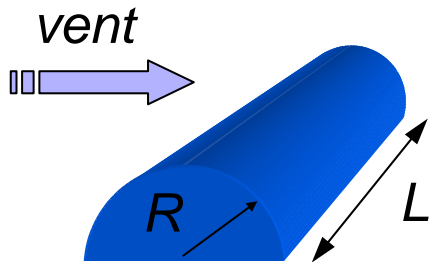
Valeur de δP ?

Valeur de δP ?



$$v = - \frac{K}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$\eta @ 258 \text{ K} = 1.6 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$$



$$\text{Force} \approx \frac{1}{2} \rho V^2 2 \pi R L \Rightarrow \delta P \approx \pi \rho V^2$$

Evolution des propriétés physiques de la neige lors du métamorphisme

Récapitulatif

- La densité croit toujours (presque)
- La surface spécifique décroît toujours (presque)
- L'albédo ?
- La conductivité thermique ?
- La perméabilité ?