

Plan du cours

- Différentes formes de glace sur Terre
 - glace météorique (glaciers)
 - gel sur place de l'eau (permafrost, glace de mer)
 - Quelques données chiffrées
- Fonctionnement d'un glacier (sens large)
 - Zone d'accu, zone d'ablation
 - Notion de bilan de masse
 - équilibre gravitaire
- Conditions d'occurrence des glaciers sur terre
 - confinement/ non confinement
 - calottes (géométrie, taille, conséquences)
 - glacier de montagne (rôle du relief sur les différentes morphologies)
 - Objets intermédiaires (systèmes émissaires)
 - synthèse chiffrée
- Notion de déformation de la glace
 - aspect macro
 - aspect micro
 - notions de tenseurs de contraintes et taux de déformation
 - paramétrisation de la loi de comportement
- Champ de vitesse dans les glaciers, densification, nature des surfaces et rôle du glissement basal
- Structures illustrant la dynamique glaciaire
 - Bandes de Forbes, crevasses
- Distribution de température dans les calottes et glaciers

Relation Glacier-climat

- glaciers éléments du système climatique
- glaciers témoins des changements climatiques
 - bilan de masse (ind. Direct)
 - fluctuations (ind. + complexe)

Effet d'un changement climatique sur un glacier (bilan de masse et fluctuations géométriques)

Mesure du bilan de masse sur un glacier

Interprétation des variations de bilan en termes climatiques (modèle de bilan d'énergie)

Mesures des fluctuations glaciaires

Interprétation (complexe) en termes climatique
→ nécessité d'un modèle d'écoulement glaciaire

Exemples de simulations de l'évolution d'un glacier (St Sorlin) en réponse à des scénari climatiques

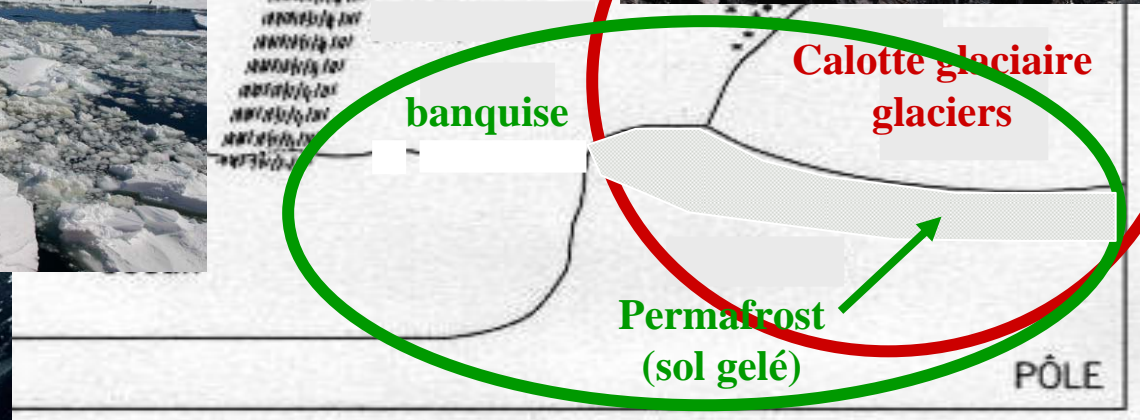
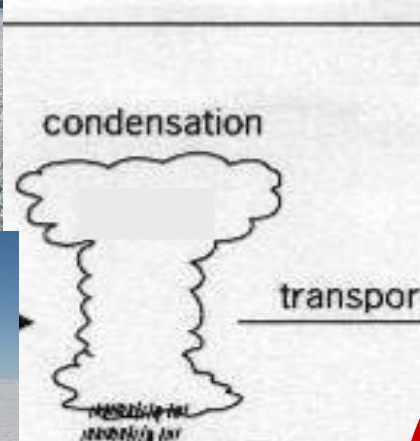
Les différentes formes de glace sur Terre

- Glace **météorique** (accumulation de précipitations solides)

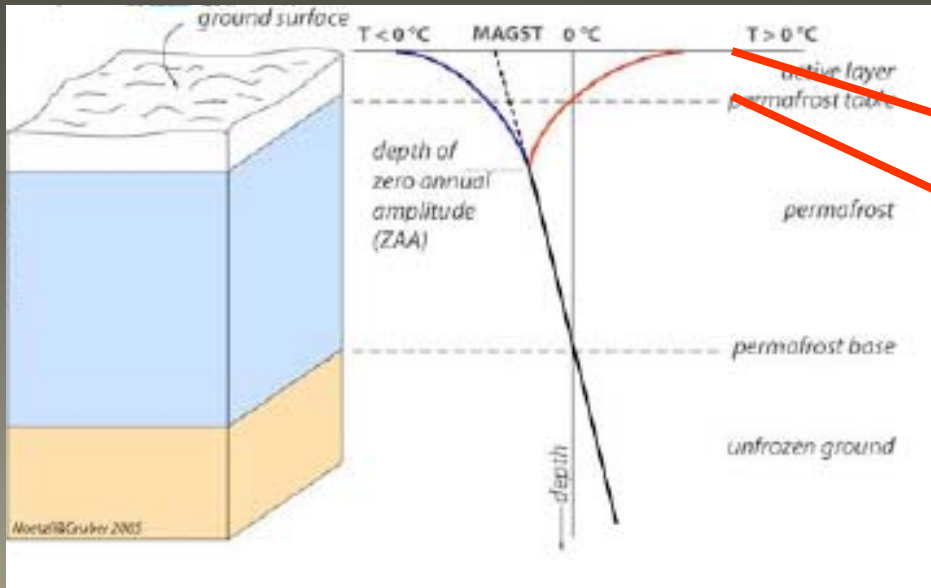
-> **calottes glaciaires, glaciers**

- Glace provenant du **gel d'eau liquide** (mer, eau interstitielle du sol, lacs, rivières...)

-> **banquise, permafrost**



Permafrost (pergélisol)



Température moyenne annuelle :

- < -1°C => en général, pergélisol fractionné
- < -7°C => en général, pergélisol continu

Sibérie : -15°C -> 600 m
Spitzberg : -8°C -< 100 – 300 m

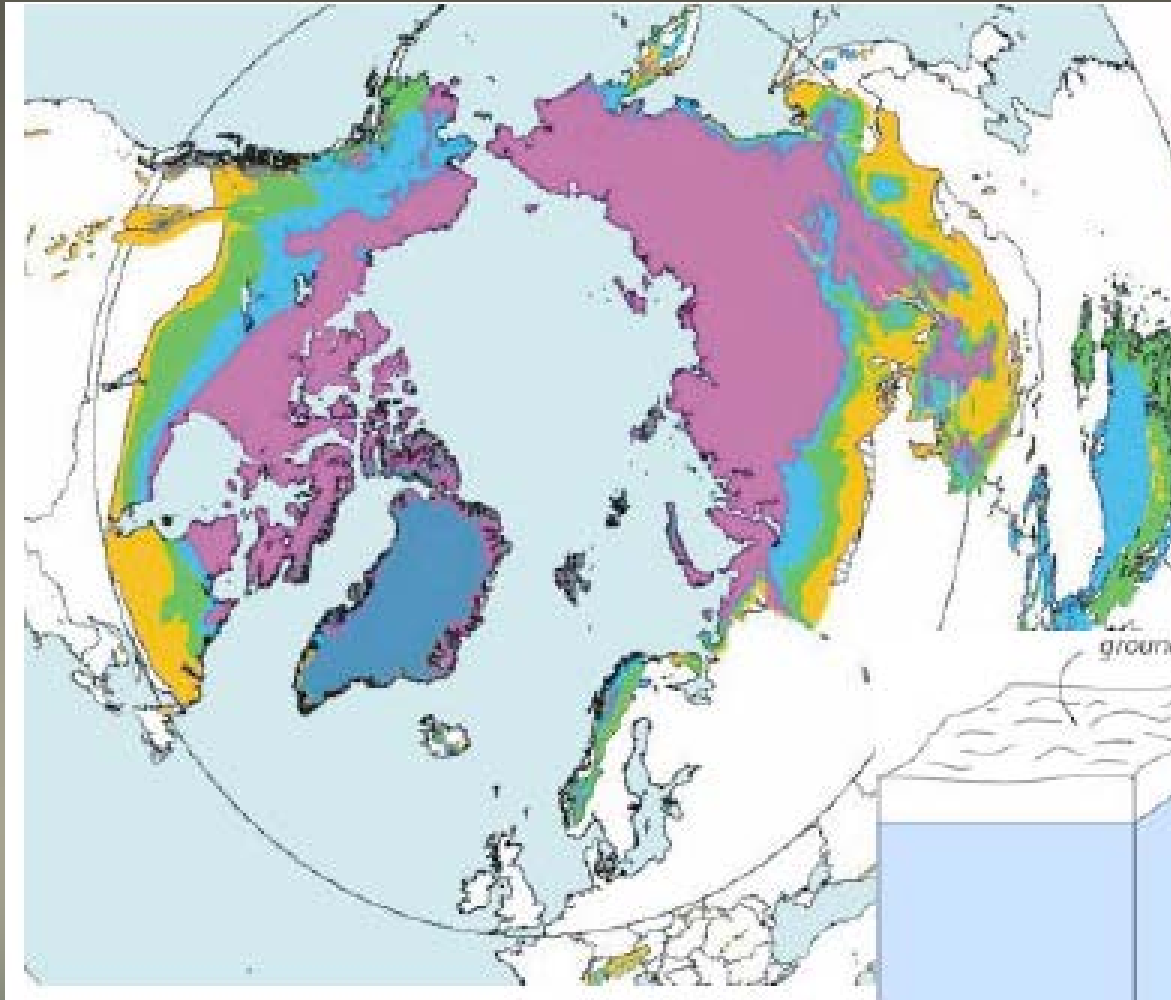
Rôle de l'enneigement / flux géothermique

H. N. : 22 millions de km²

Composante fossile du
Dernier Maximum Glaciaire

Rôle climatique ? (méthane ?)

Couverture Hémisphère Nord



Rôle de l'enneigement sur l'Ouest de l'Eurasie ?

Rôle du permafrost sur le climat ?

Relargage de CH₄ et CO₂

Glace de mer

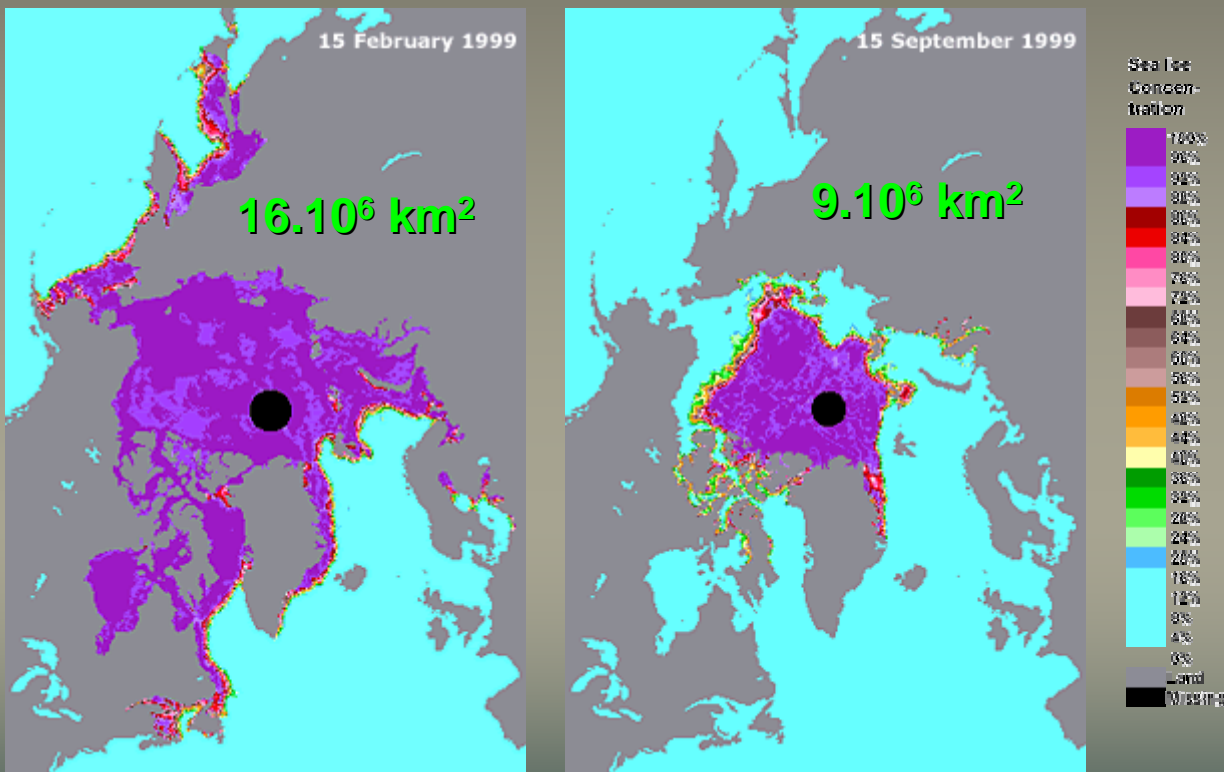


Glace de Mer

Épaisseur oscillant de **0 à 4 ou 5 m** (continue - discontinue)

-> Peu importante en volume malgré des **surfaces considérables**

-> **Rôle climatique très important** (albédo, flux turbulents)



Faible variabilité en Arctique (prisonnière)

Bien que **très mobile !**

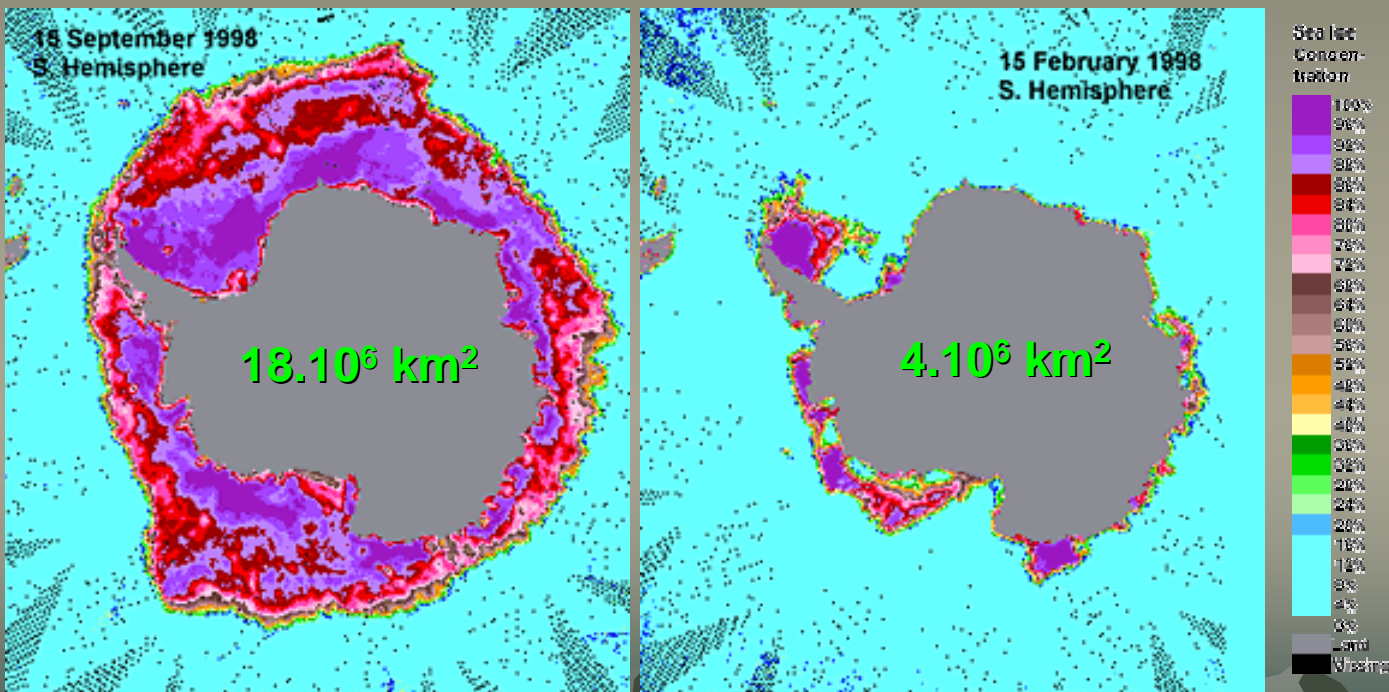
- vents , courants
- ordre du **km/jour**

Glace de Mer

Épaisseur oscillant de 0 à 4 ou 5 m (continue - discontinue)

-> Peu importante en volume malgré des **surfaces considérables**

-> **Rôle climatique très important** (albédo, flux turbulents)



**Forte variabilité
en Antarctique
(Non confinement
+ courants)**

L'eau sur terre

Volume : $1.34 \times 10^9 \text{ km}^3$

97 % eau salée $1.3 \times 10^9 \text{ km}^3$

3 % eau douce $0.04 \times 10^9 \text{ km}^3$

0.ε % eau saumâtre

22 % eaux surface et souterraines :

0 - 800m 10 %

800 m - 4 km 12 %

77 % glaciers : Antarctique 71 %

Groenland 6 %

Autres 0.2 %

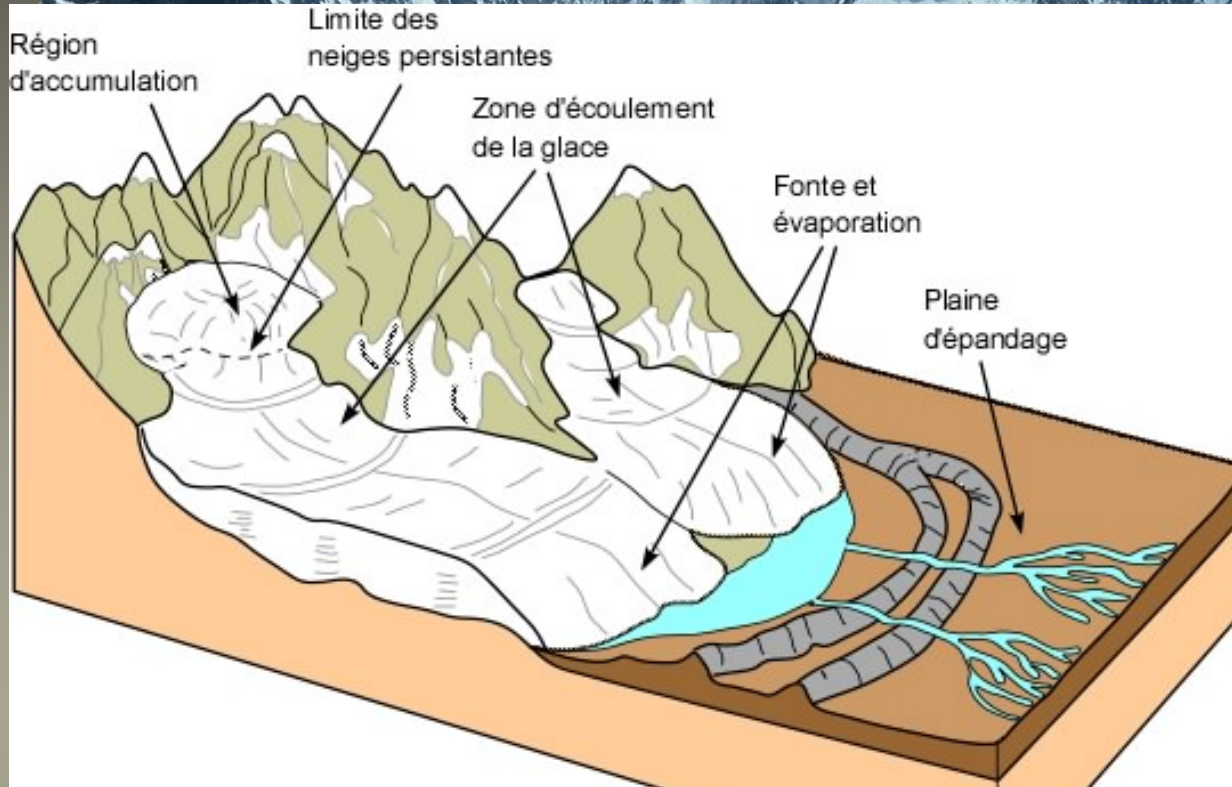
Composante de la cryosphère	Surface, millions km ²	Volume, millions km ³	Equivalent niveau des mers, m
Neige HN (min/max moyen annuel)	3.9 / 46.5	<0.002	négligeable
Neige HS	0.07 / 0.85	négligeable	négligeable
Glace de mer HN	6 / 14	<0.05	sans objet
Glace de mer HS	2 / 15	<0.02	sans objet
Pergélisol continu	11	0.01 – 0.025 ?	0.02 – 0.06 ?
Pergélisol sporadique	12	<0.01 ?	<0.03 ?
Glaciers / calottes mineures	0.68	0.18	0.5
Antarctique de l'Est	10.1	22.7	56.8
Antarctique de l'Ouest	2.3	3.0	7.5
Groenland	1.8	2.6	6.6
« Shelves »	1.5	0.66	sans objet

Glacier : Définition Fonctionnement

Stock pérenne de glace (à l'échelle de la vie humaine) :

- 'glace' météorique (neige, névé, glace)
- notion de mobilité (renouvellement) de la glace

A body of ice formed on land that exhibits motion



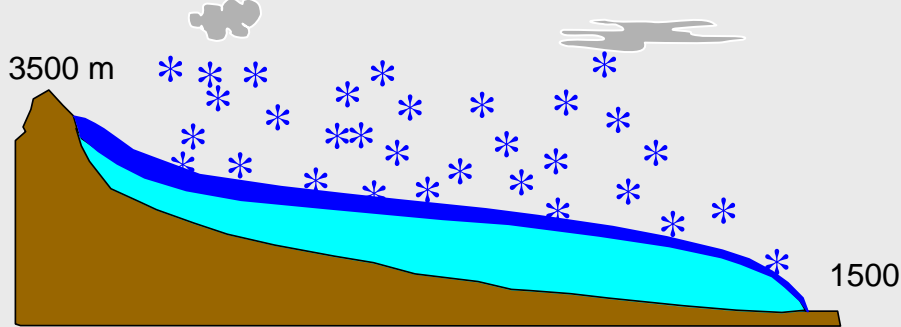
Conditions de température :

- persistance d'une partie de la neige (éternelle)
- Accumulation chronique -> empilement (zone d'accu)
- Transformation en glace

Notion de bilan de masse

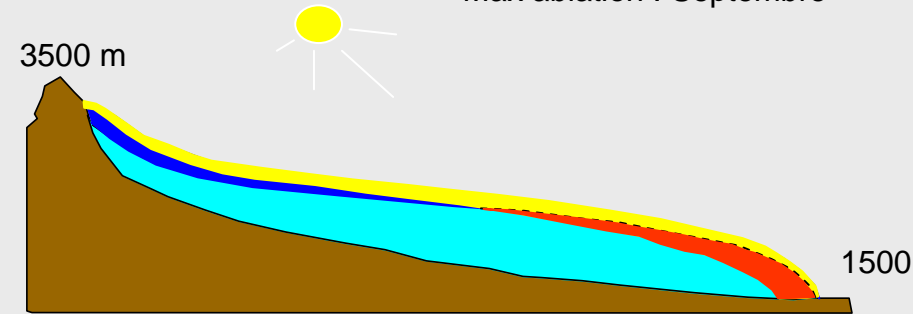
Accumulation hivernale

Max nivale : Avril-Mai

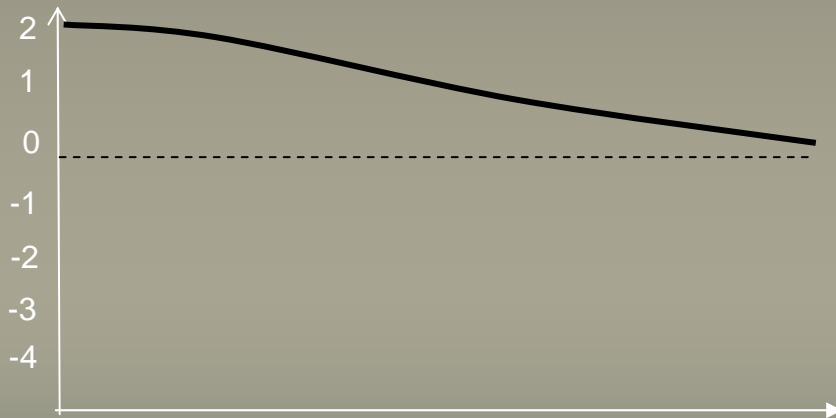


Ablation estivale

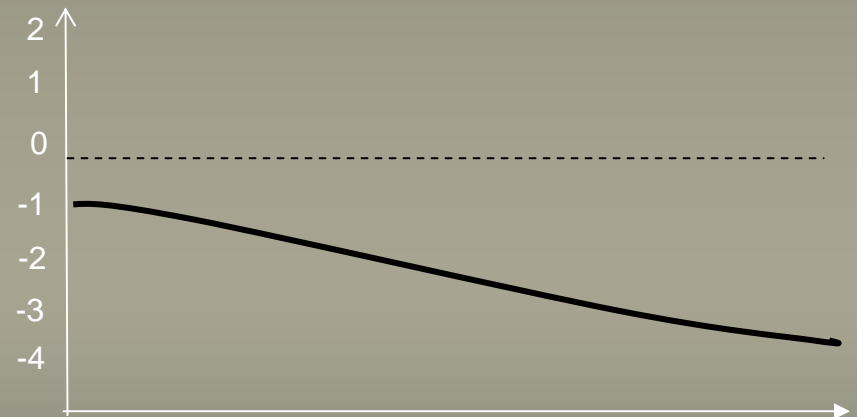
Max ablation : Septembre



Bilan de masse (m.w.e.)



Bilan de masse (m.w.e.)



Notion de bilan de masse

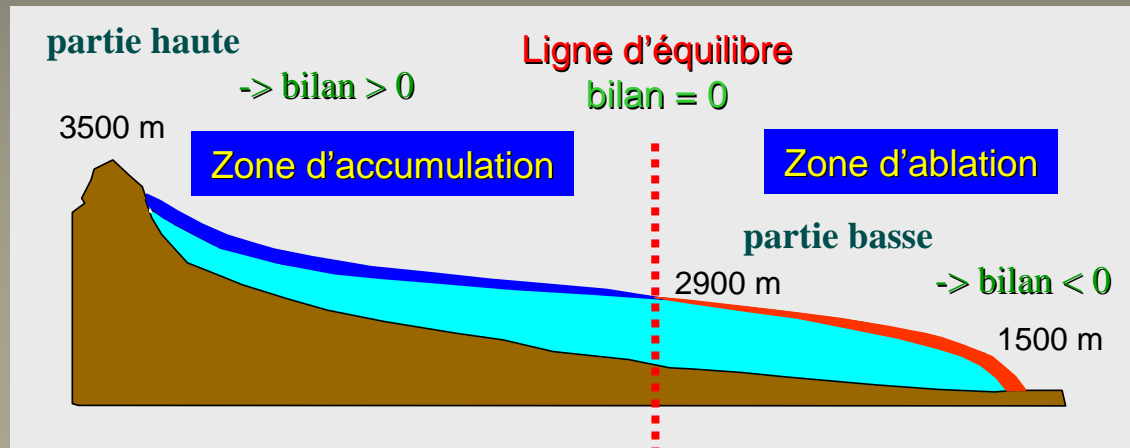
Bilan de masse annuel :

Somme algébrique des bilans hivernal et estival

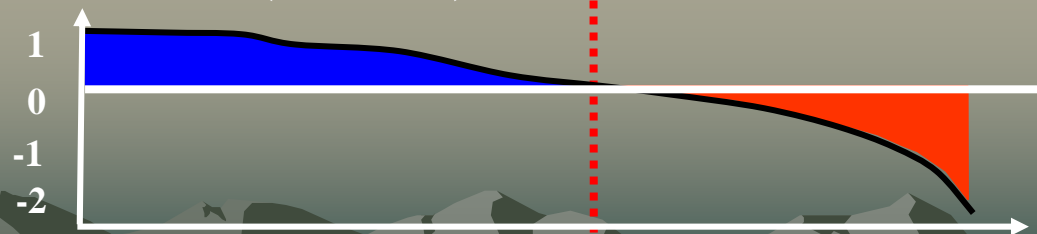
> 0 : partie supérieure \rightarrow Zone d'accumulation

< 0 : partie inférieure \rightarrow Zone d'ablation

$= 0$: Ligne d'équilibre



Bilan de masse (m. w. e / an)



Mobilité glaciaire

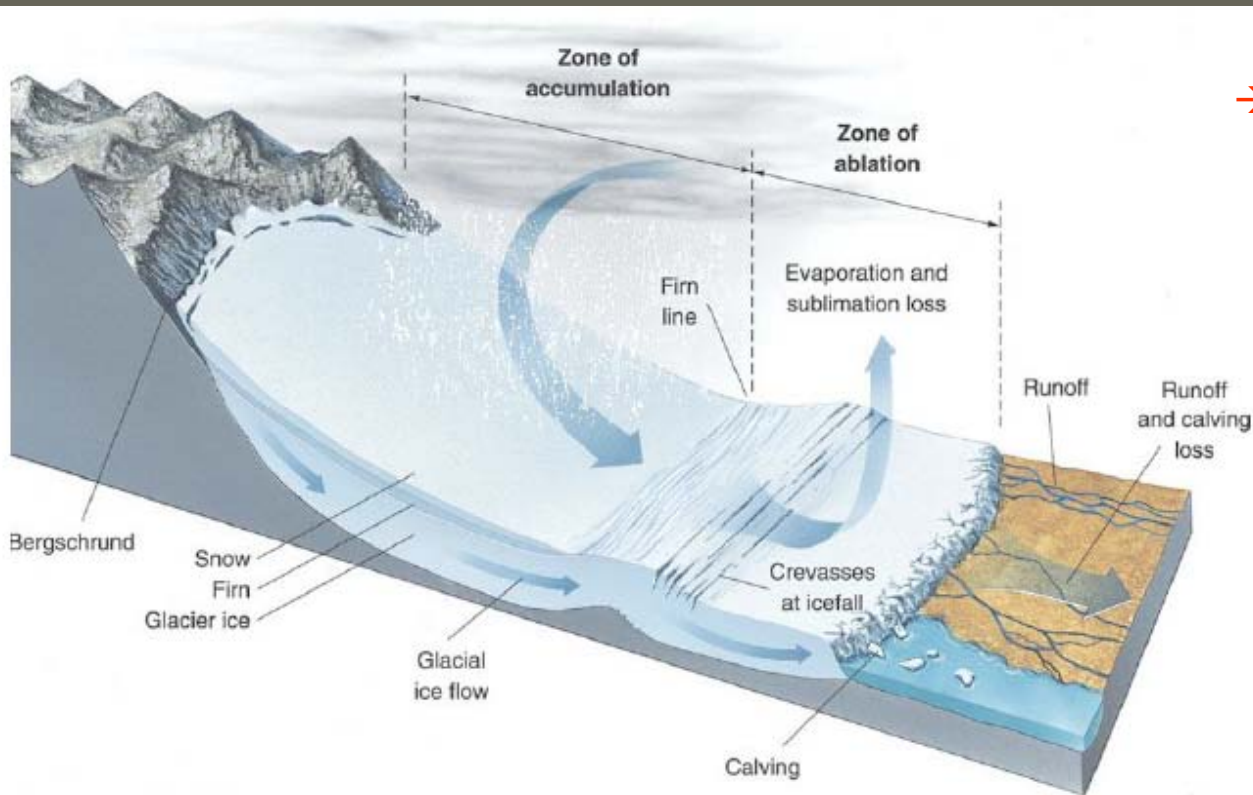
> 0 : partie supérieure → Zone d'accumulation

< 0 : partie inférieure → Zone d'ablation

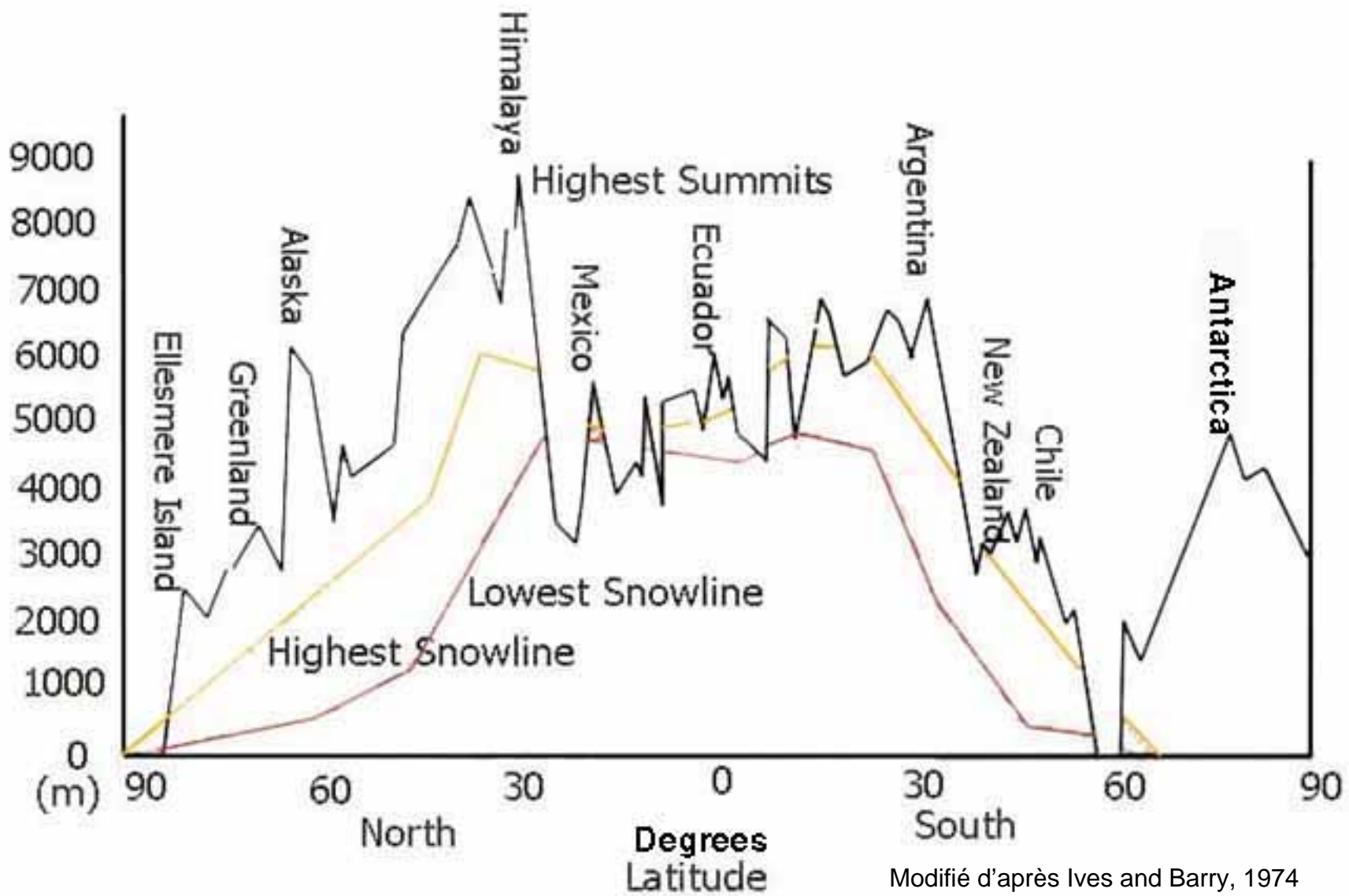
Stationnarité du glacier :

→ 'Equilibration' par fluage gravitaire

Glace : fluide visqueux



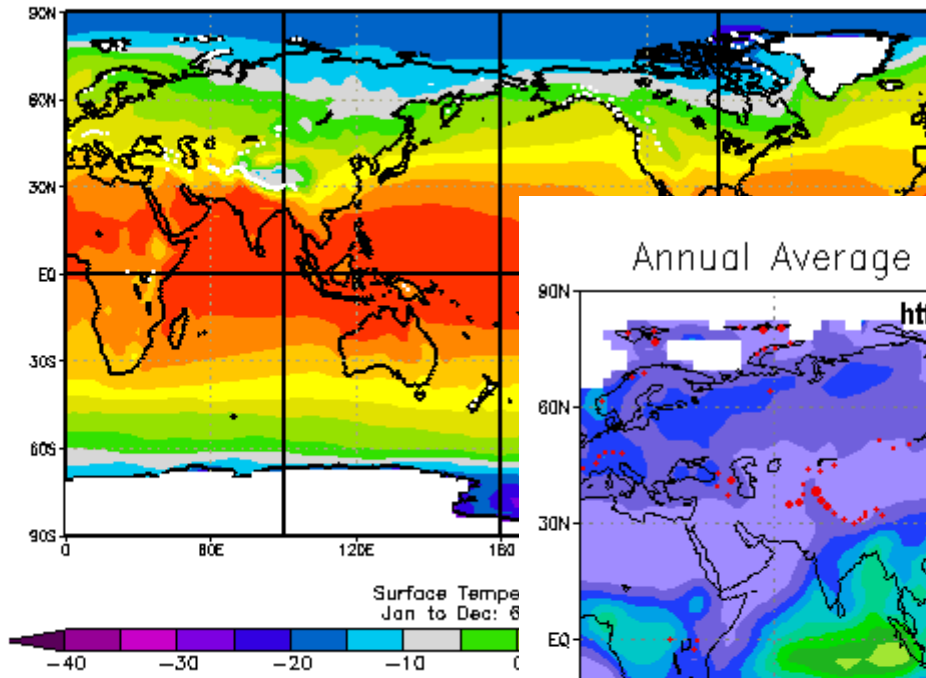
Distribution géographique des glaciers



Modifié d'après Ives and Barry, 1974

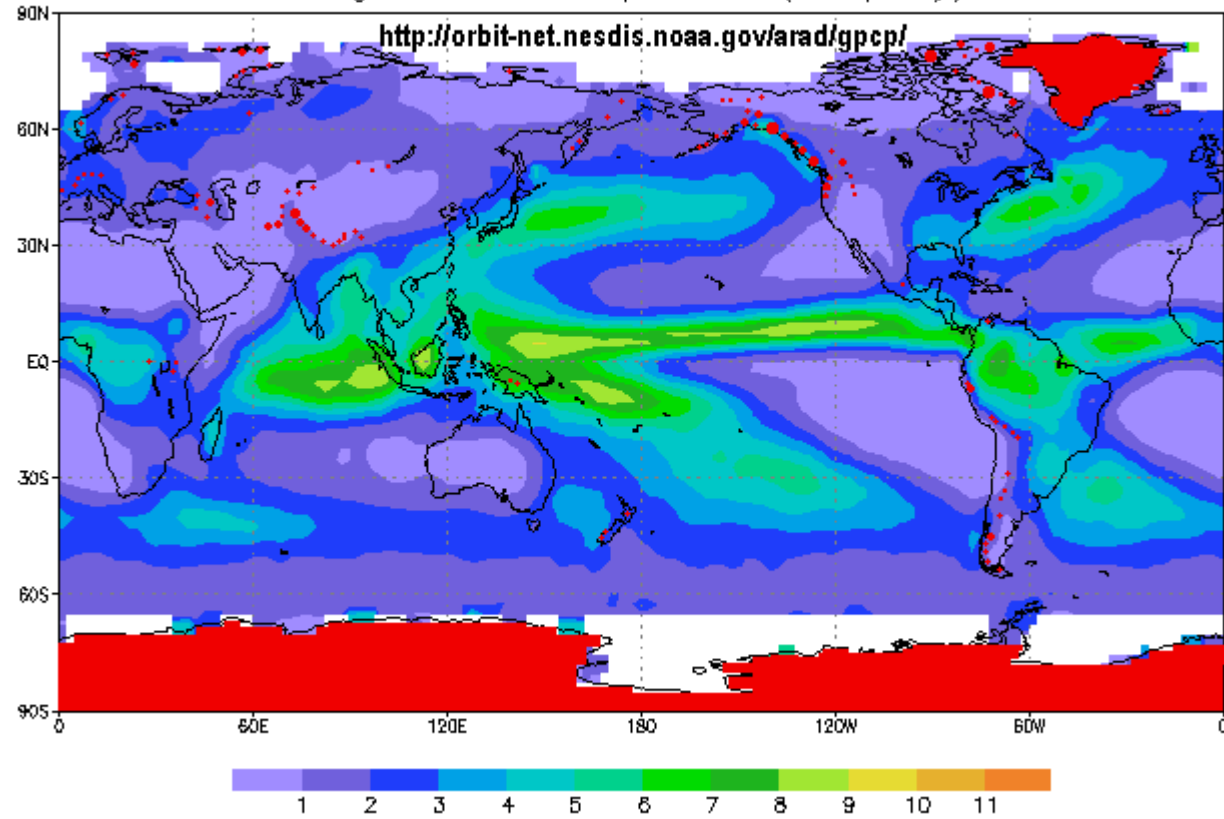
<http://www.pmel.noaa.gov/toga-tao/el-nino/climatology.html>

NCEP/NCAR Reanalysis



Annual Average GPCP Precipitation (mm/day): 1988–96

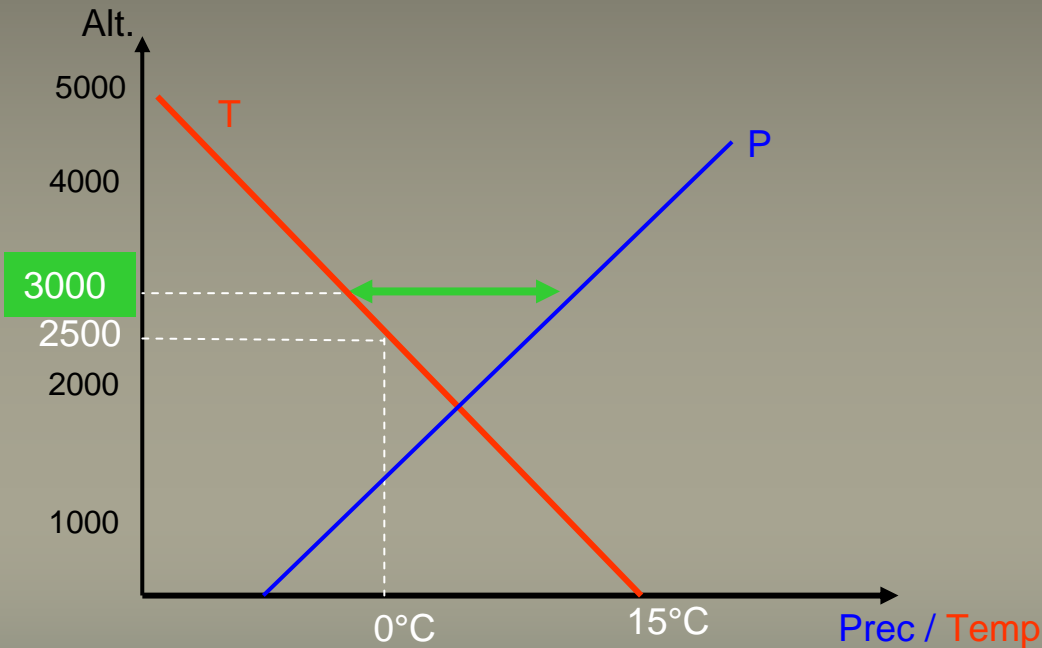
<http://orbit-net.nesdis.noaa.gov/arad/gpcp/>



Rôles conjoints de l'altitude et de la latitude

Conditions de 'pérennisation' de la neige

Zone tempérée (Alpes)

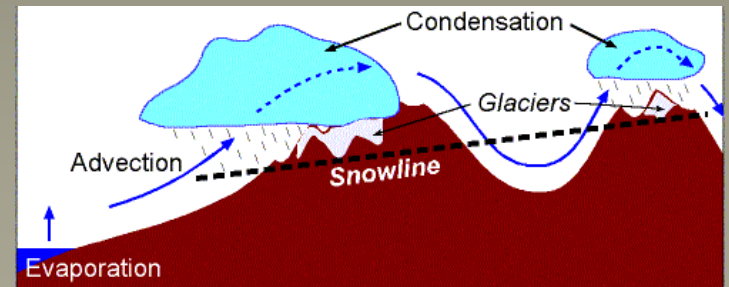


Température

Gradient de 6°C/km

Précipitations

Augmentation des précipitations avec l'altitude (effet orographique, détente adiabatique)



Zone tempérée (Alpes) :

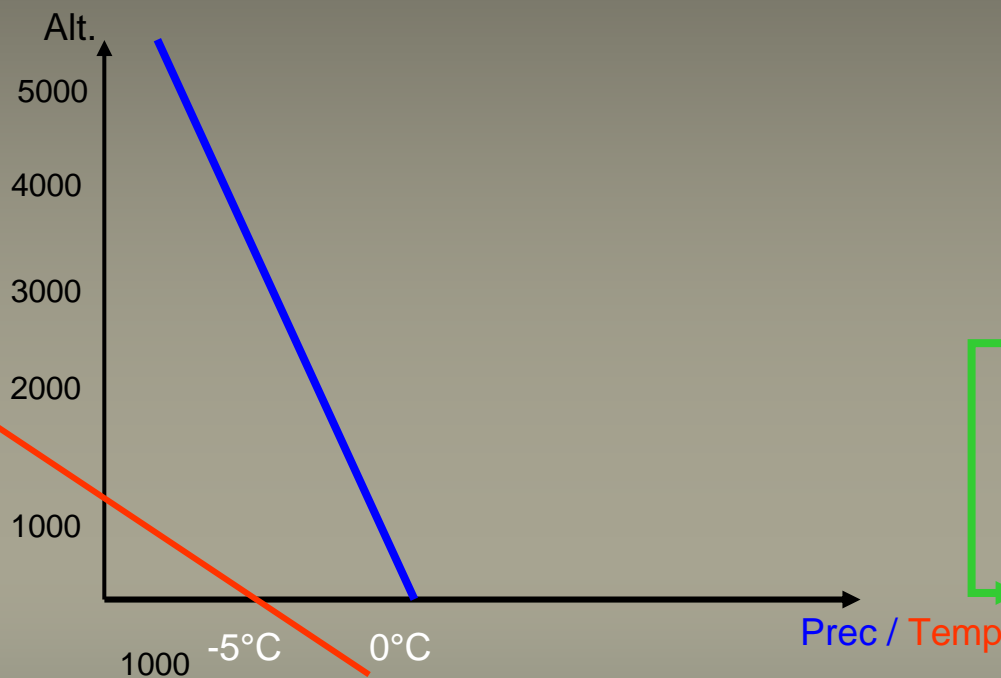
Zones d'accu à partir de 3000 m (variable selon le contexte)

→ Glaciers confinés

Rôles conjoints de l'altitude et de la latitude

Conditions de 'pérennisation' de la neige

Hautes latitudes (zones polaires)



Températures :

-> Persistance de la neige
garantie partout
(indep. de la précip.)

Précipitations

Dépendance de la quantité
d'accumulation à l'altitude
(indexée sur la précip.)
Ex. de l'Antarctique

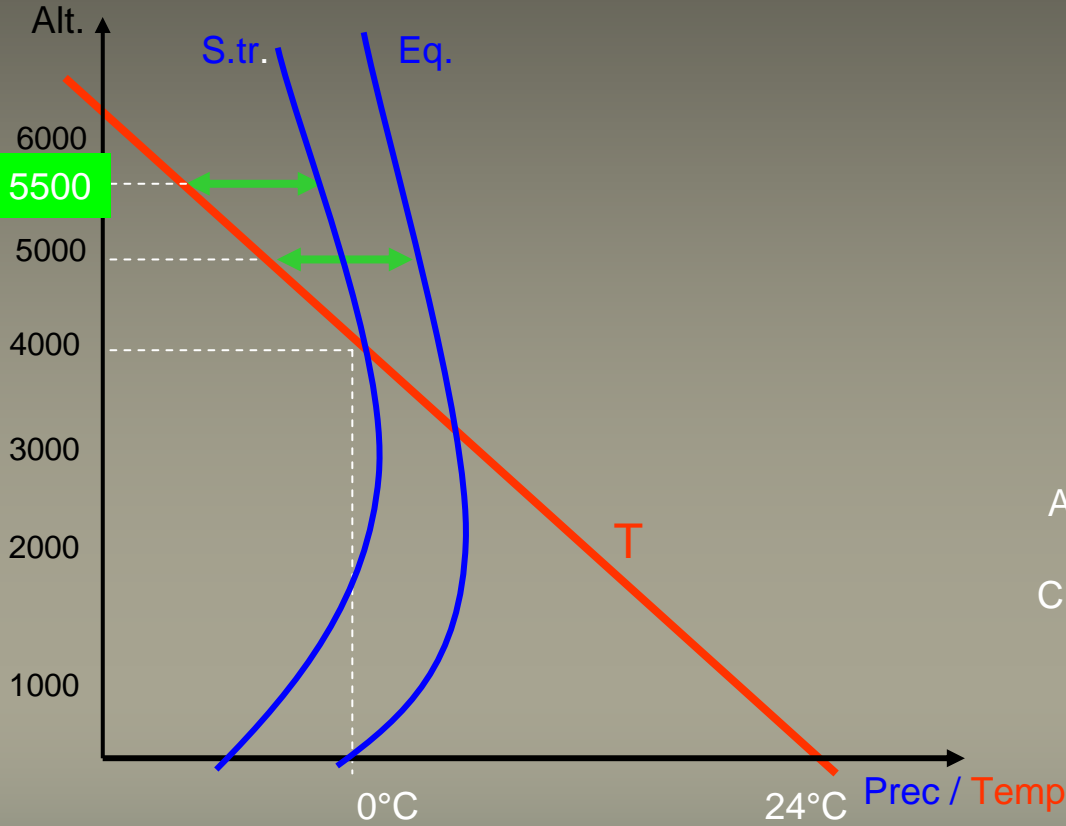
Développement glaciaire
sur toutes les parties émergées

→ Glaciers non confinés

Rôles conjoints de l'altitude et de la latitude

Conditions de 'pérennisation' de la neige

Basses latitudes (zone inter tropicale)



Températures (6°C/km)

Précipitations : 2 régimes

1/ Sub tropical : HP → Sec

2/ Equatorial : BP → Humide

Antizana (0° S) → ELA : 5000 m

Chacaltaya (Bolivie, 17° S) → ELA : 5500 m

Glaciers confinés

Cas des calottes glaciaires

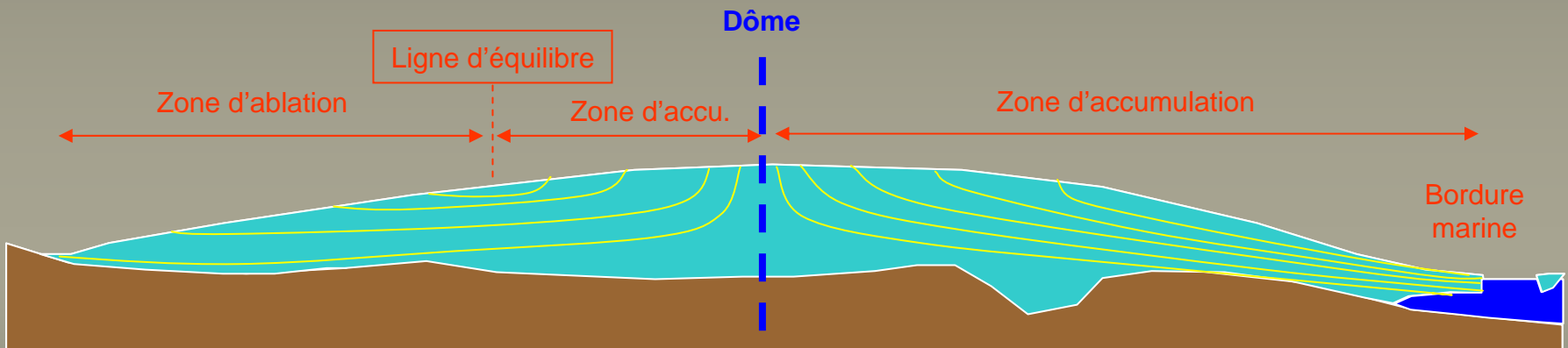
Si conds clim plus clémentes, la fonte peut venir à bout de la glace avant la mer
→ essentiel du Groenland

Une calotte peut ne pas avoir de zone d'ablation
→ essentiel de l'Antarctique

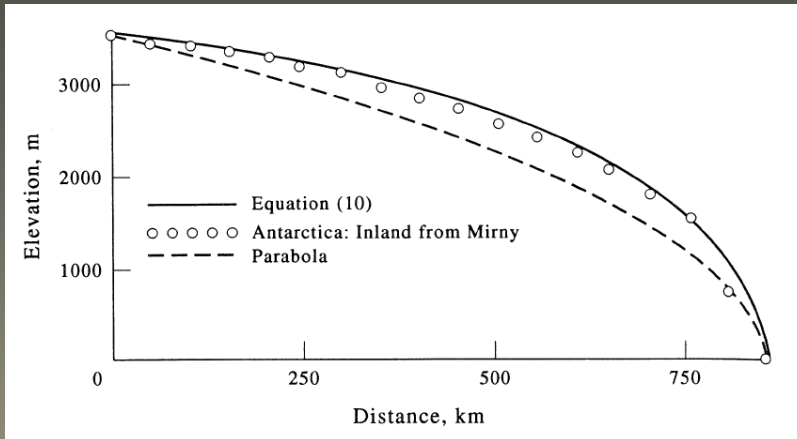
Zone d'accumulation (parie centrale) + zone d'ablation (partie distale) séparées par une ligne d'équilibre

Accumule des dômes à sa bordure (forcément marine)
Ablation : vêlage d'icebergs

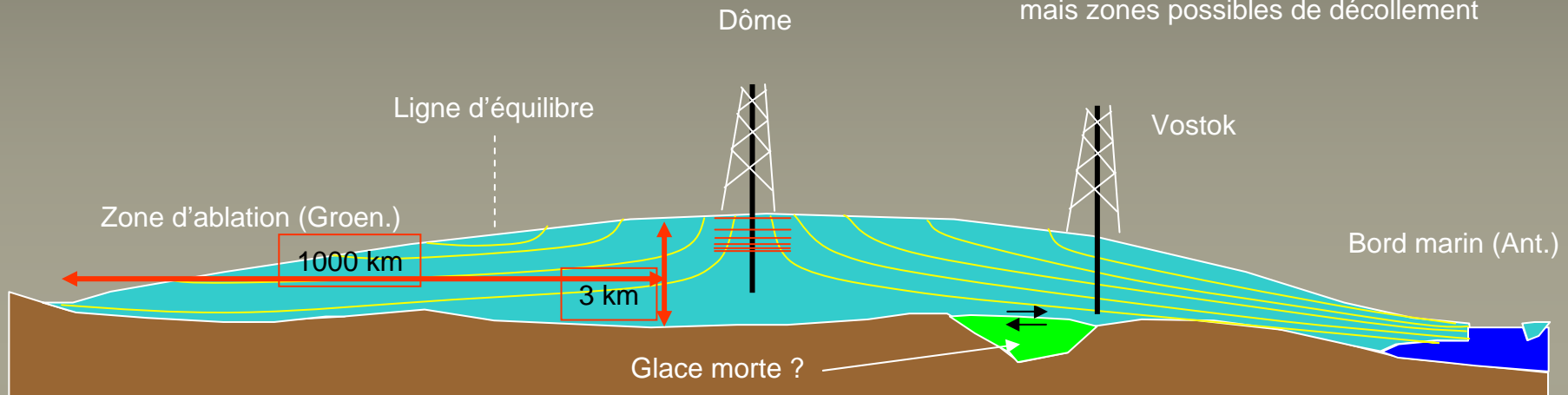
**Bordure marine : développement des ice shelves
→ interactions avec l'océan**



Glaciers non confinés : calottes



- Pas de limitation dans leur extension (si ce n'est l'océan) → surfaces conséquentes (continentales)
- Mécanique simpliste → profil parabolique → 1000 km hor. ↔ 3 km d'épaisseur → **volumes considérables**
- rapport d'aspect de l'ordre de 10^{-3} (plaque de verglas)
- Ecoulement régulier sauf évent. proximités reliefs mais zones possibles de décollement



Forages : bonnes capacités d'archivage :
1/ Dômes idéaux, 2/ ridges possible aussi

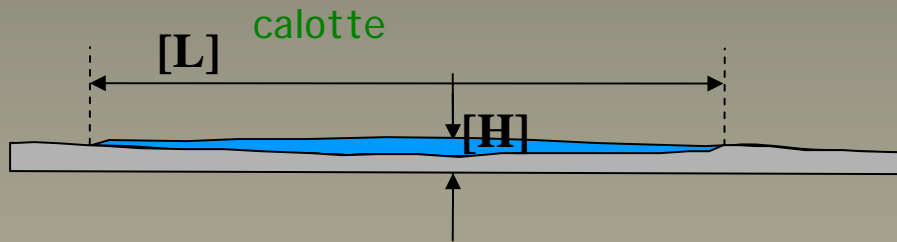
Taille (surface, volume) → impact sur syst. Climatique et plus généralement sur l'Environnement

Confinement / non confinement

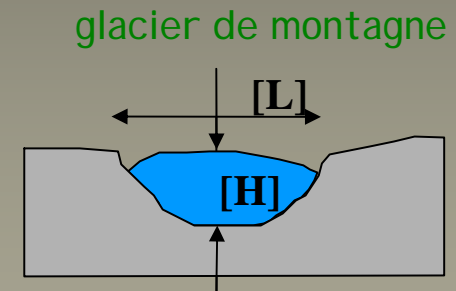
Géométrie caractéristique des corps glacés

→ illustré par le rapport d'aspect (importance en modélisation)

Les 2 extrémités du spectre

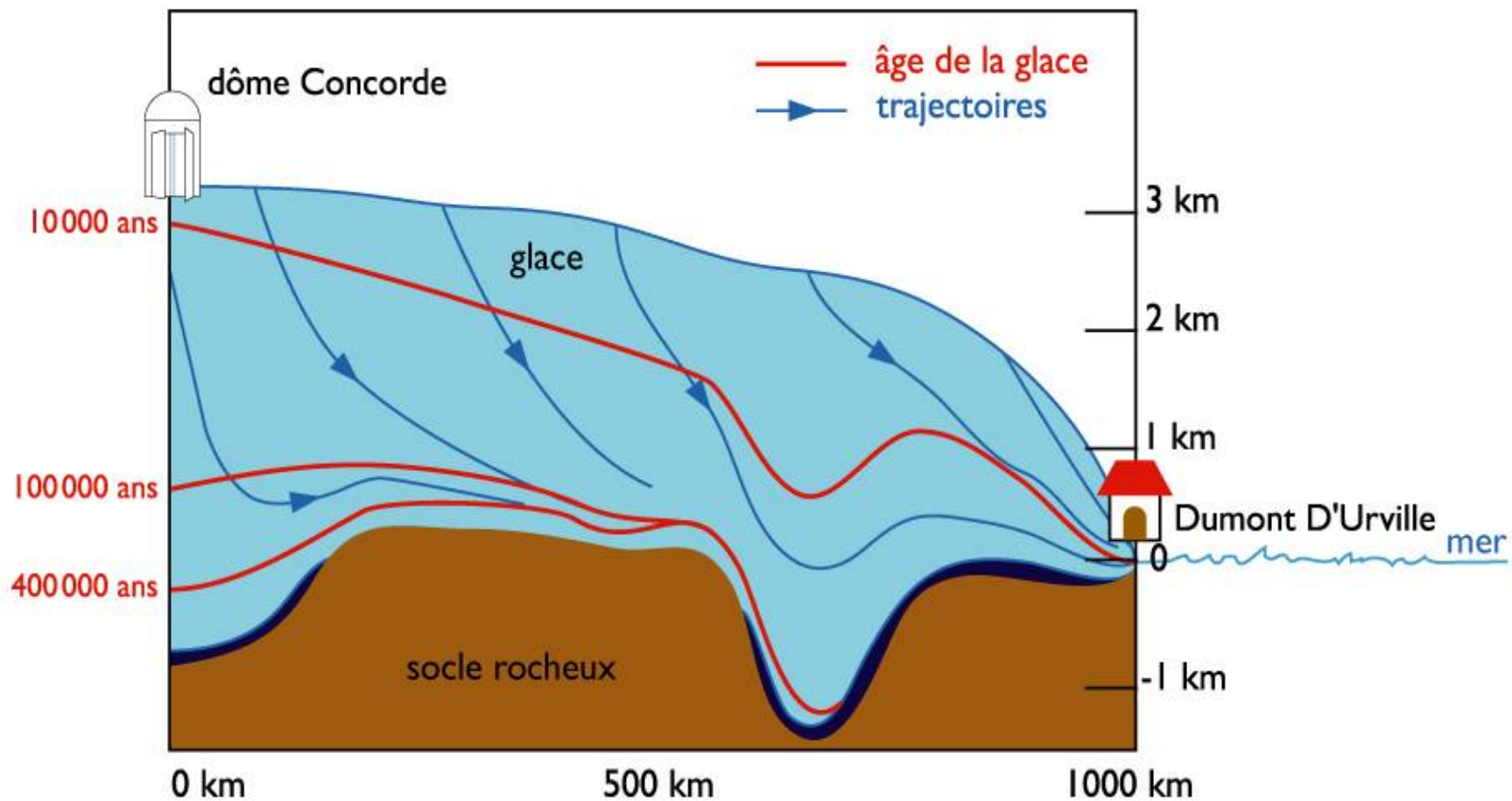


$$\varepsilon = 10^{-2} - 10^{-3}$$



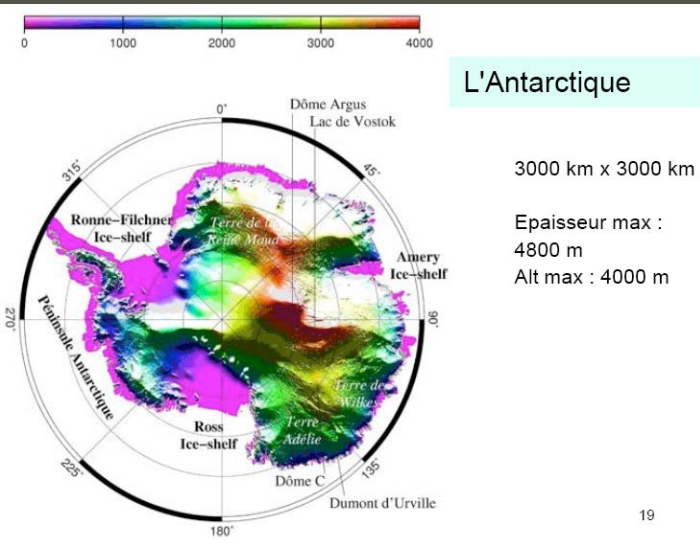
$$\varepsilon = 10^0 - 5 \cdot 10^{-2}$$

.... avec tous les intermédiaires possibles



Antarctique

La platitude des calottes polaires

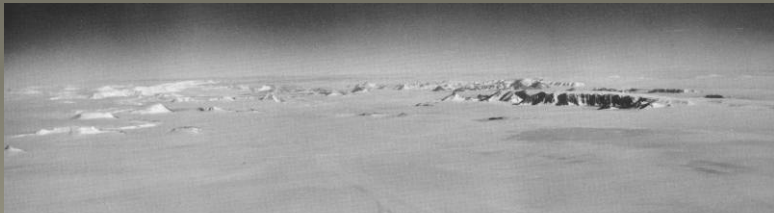


Quelques exceptions au caractère non confiné

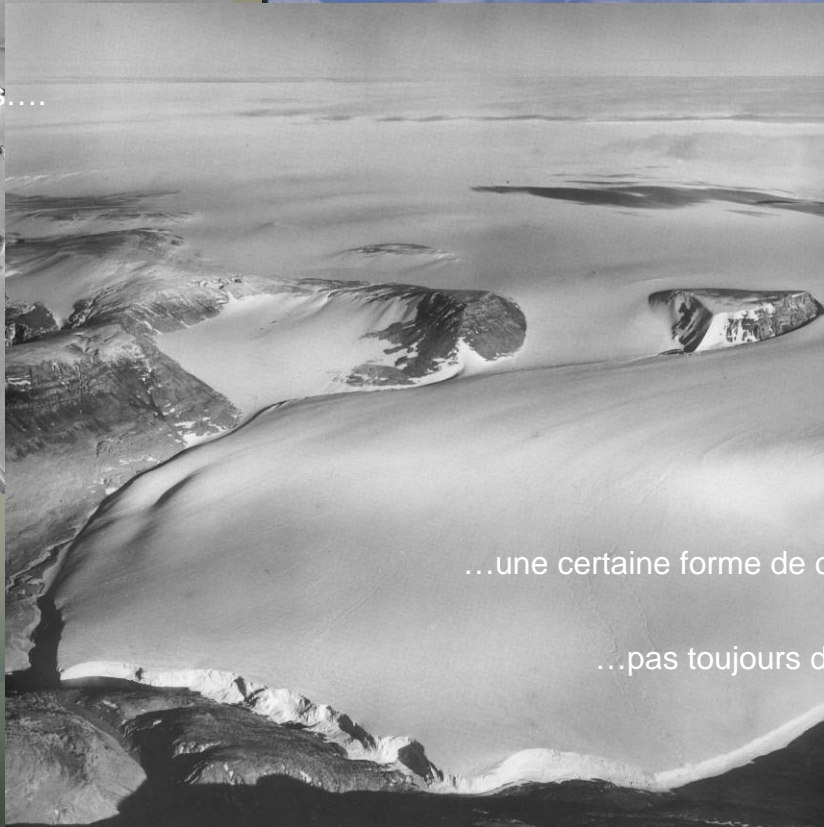
1/ Perturbation de l'écoulement si gros reliefs

Nunataks

Grosse chaîne de montagnes (5 000 m)



2/ Ca se complique sur les bords....



...une certaine forme de confinement apparaît...

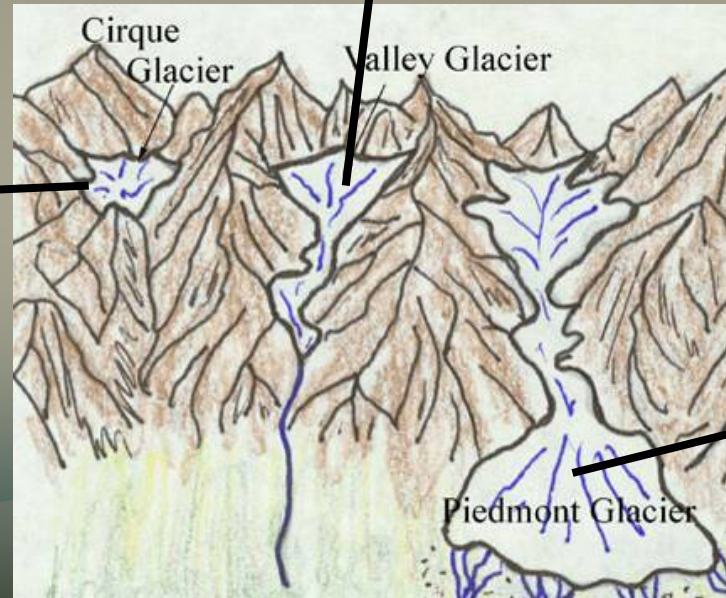
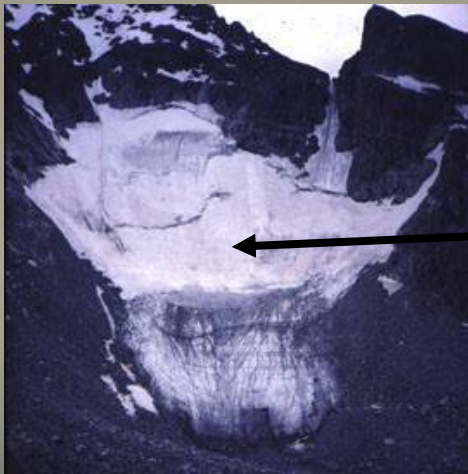
...pas toujours dictée par la présence de reliefs

Glaciers confinés : glaciers de montagne

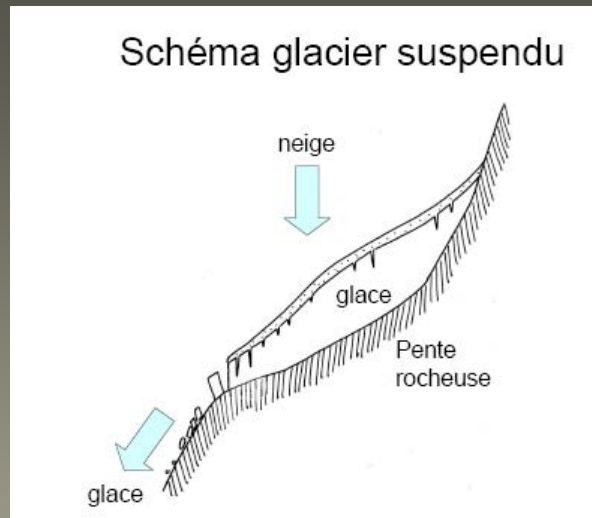
1/ Zones où les conditions d'existence des glaciers requièrent une certaine altitude
→ glaciers cantonnés aux reliefs → **limitation en taille**



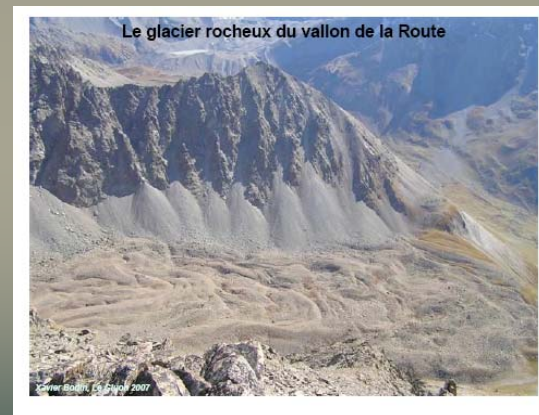
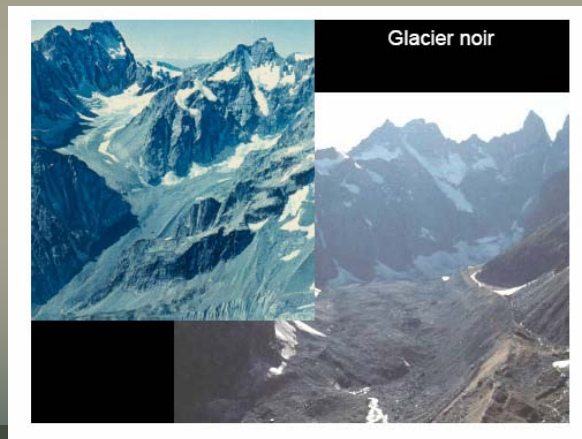
2/ La forme du relief (notamment au niveau de la zone d'accu)
→ influe sur la **morphologie**



Exemple de fort contrôle topo : **Glaciers suspendus**



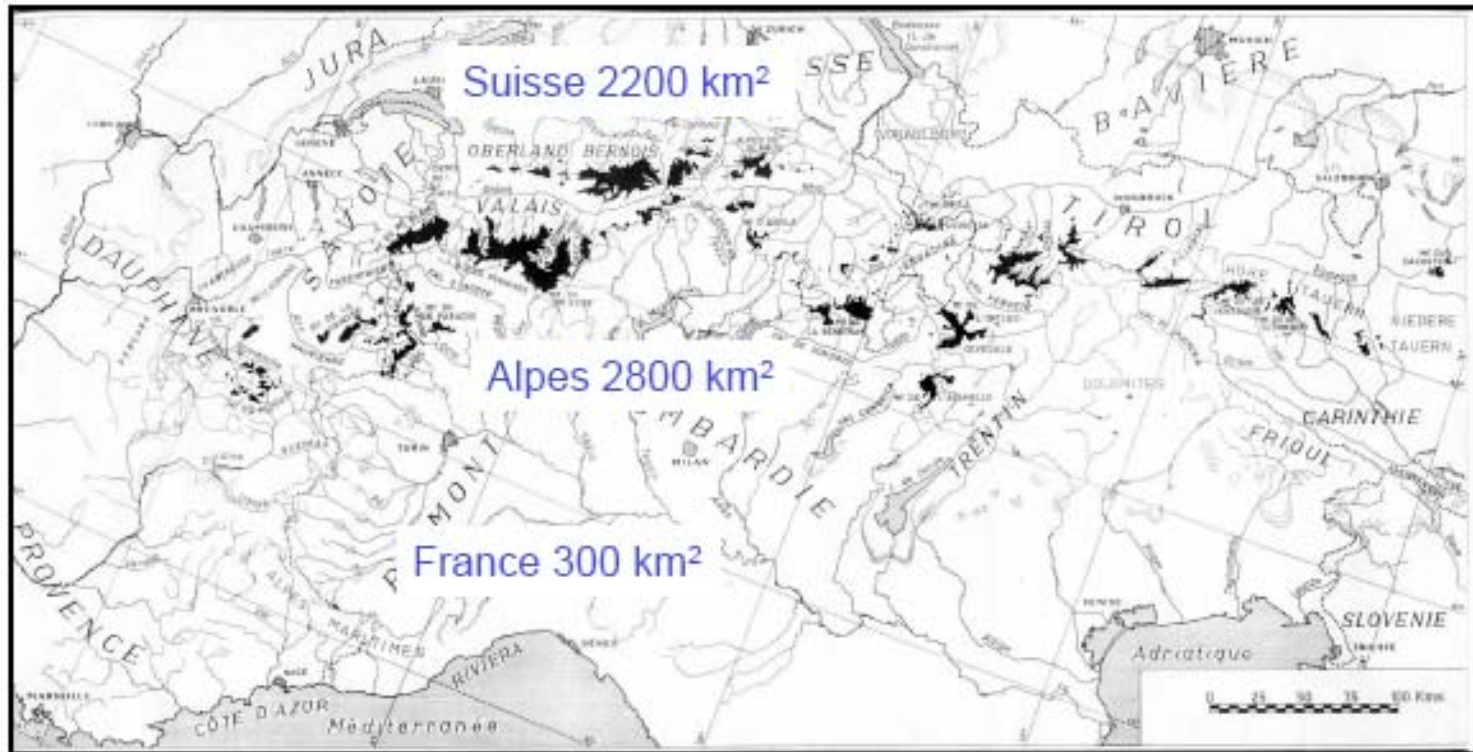
Cas des **glaciers couverts** voire **rocheux** (rôle de l'érosion, de la topographie encore)



Glaciers régénérés



Les glaciers des Alpes

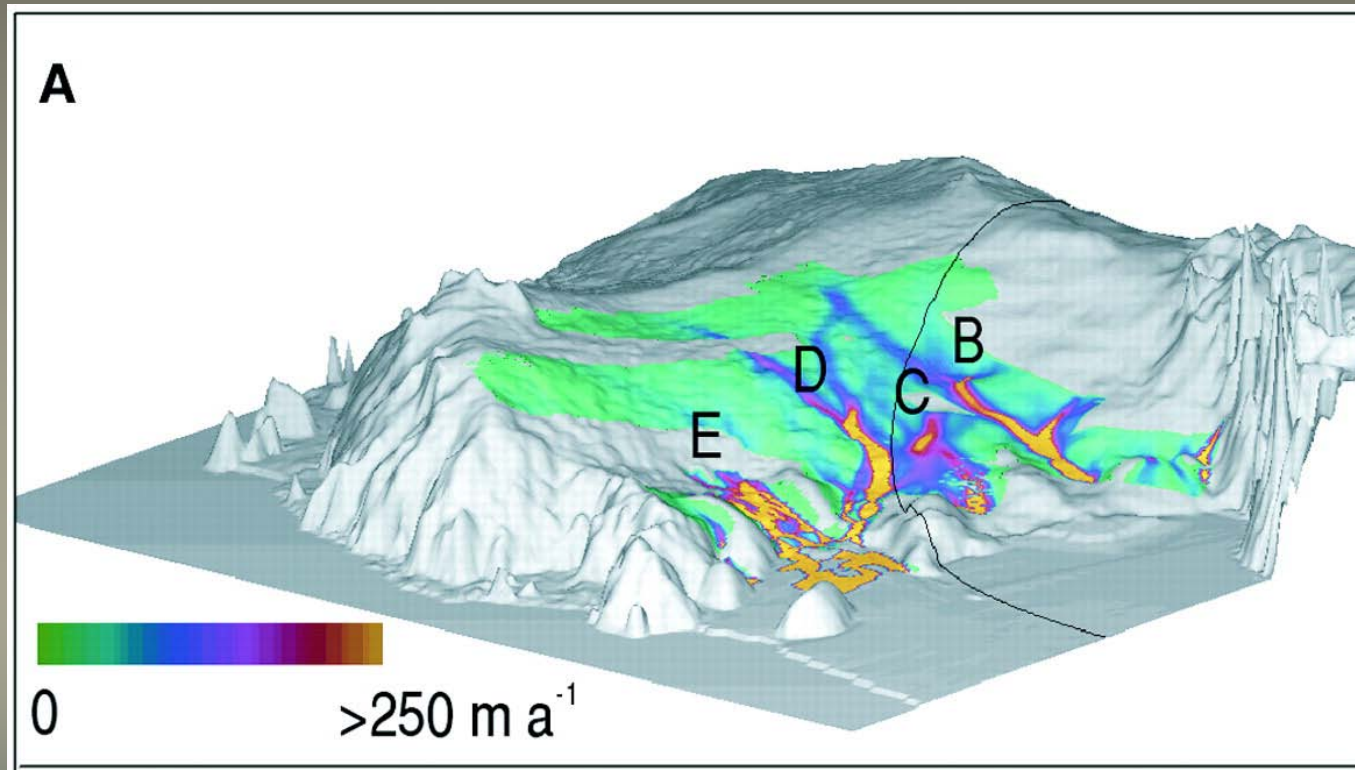


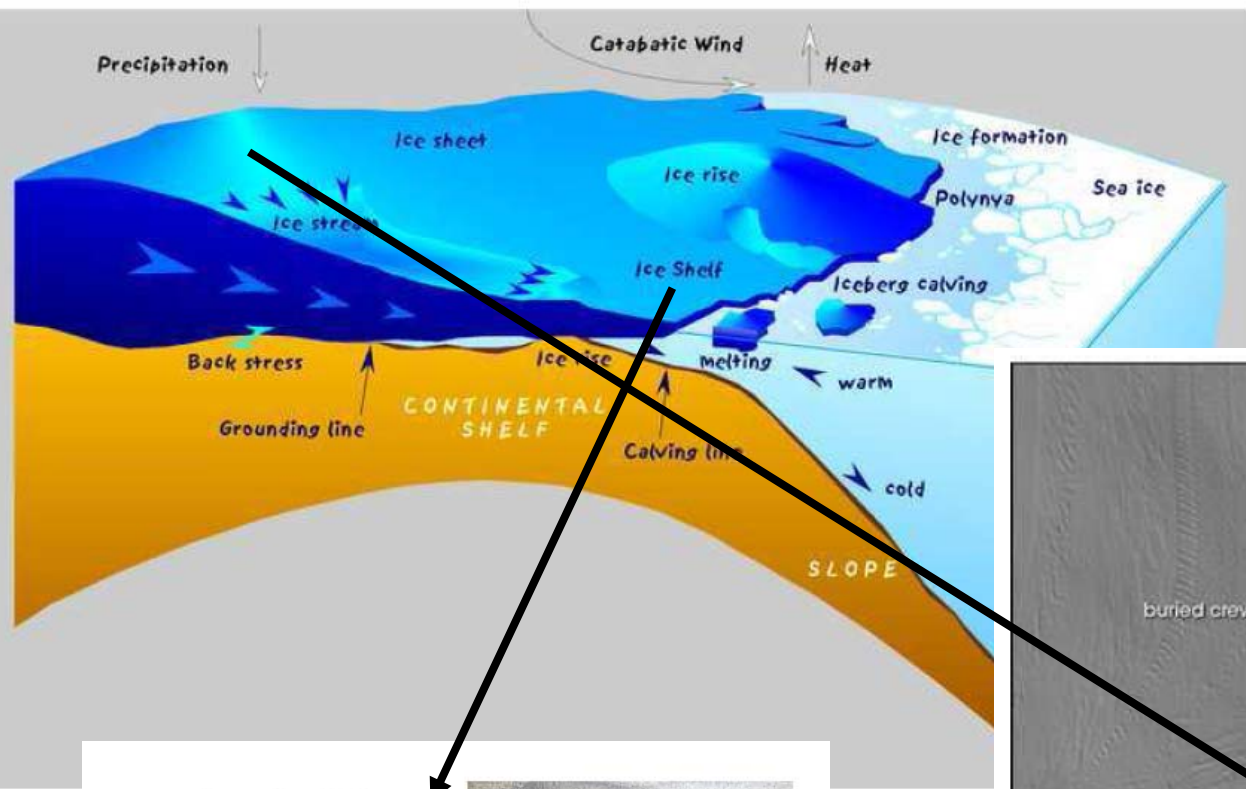
Liboutry, *Traité de glaciologie t. II*, 1954, Fig. 13.1

Cas particulier des bords de calottes

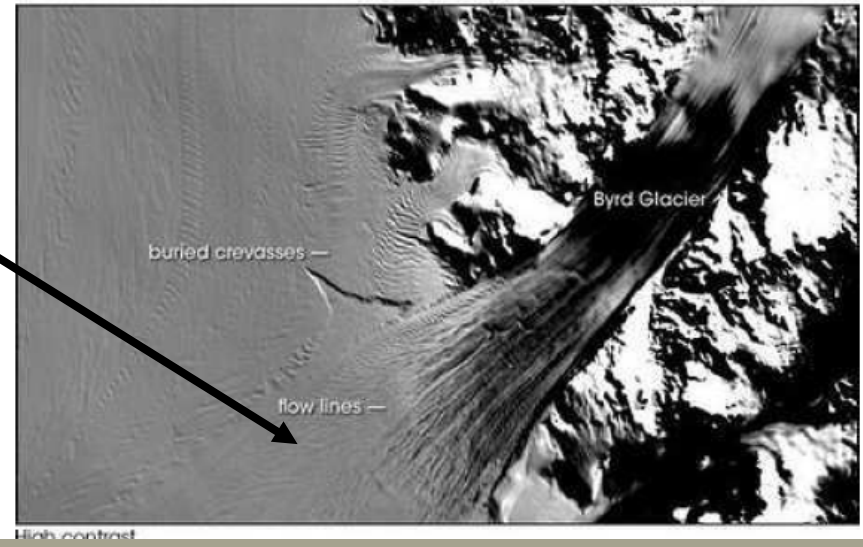
Constat à partir des vitesses d'écoulement :

→ au fur et à mesure de son cheminement, la glace est canalisée dans des structures de plus en plus individualisées et de plus en plus rapides : **Ice streams** et **glaciers émissaires**



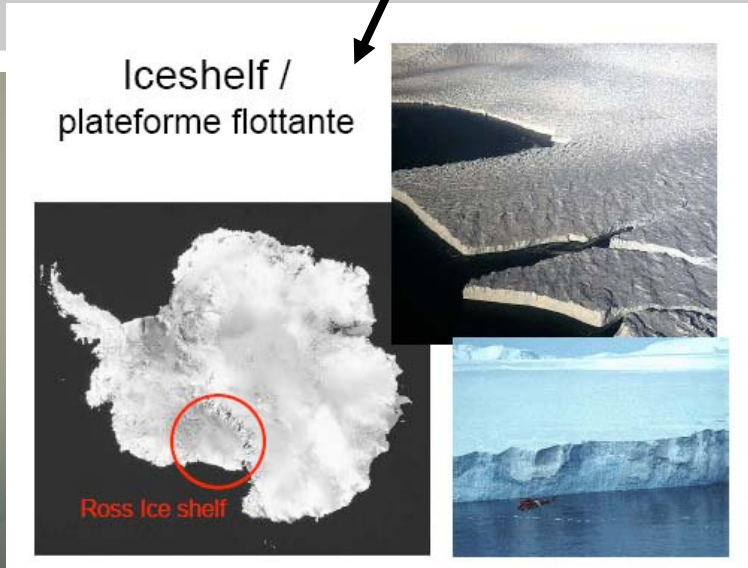


Rôle des conditions basales
 → conditions de glissement

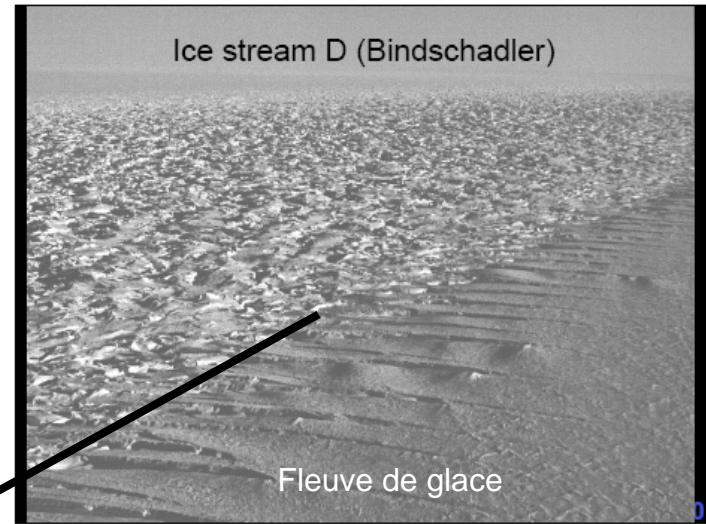


Glaciers émissaires et ice streams : **régulateurs de débit pour Une bonne part de la calotte**

Ice shelves : **rôle mécanique** (buttressing)
 + rôle dans les **échanges avec l'océan**

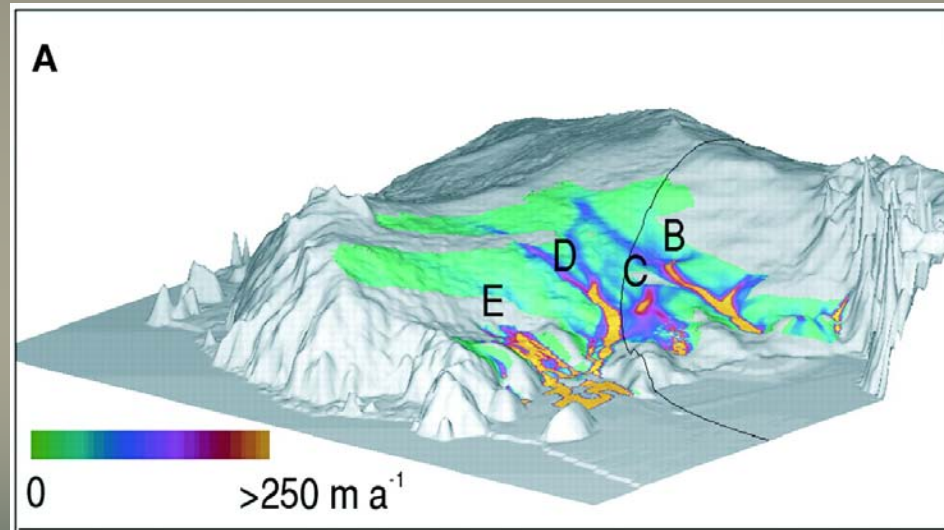
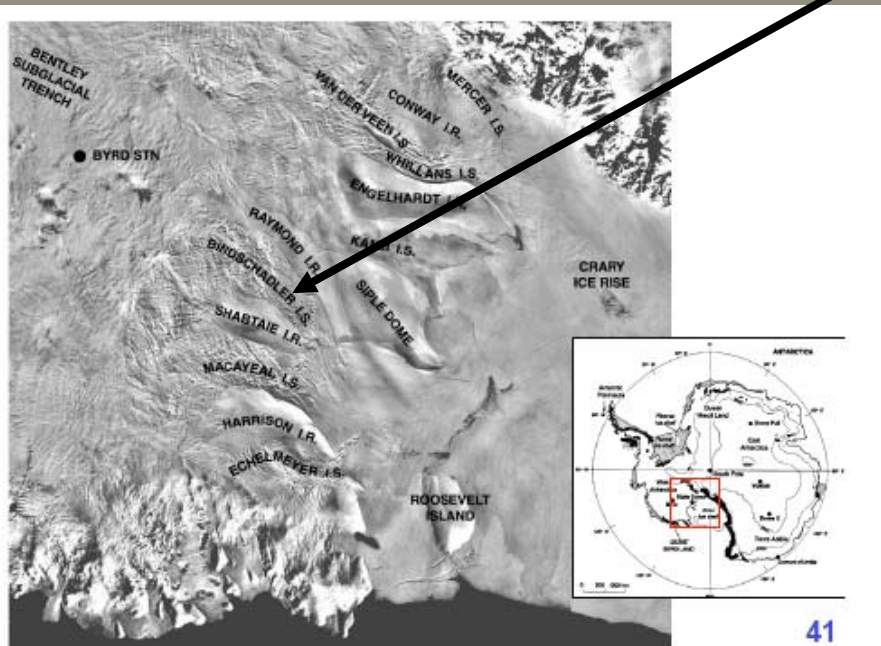


Ice stream D (Bindschadler)

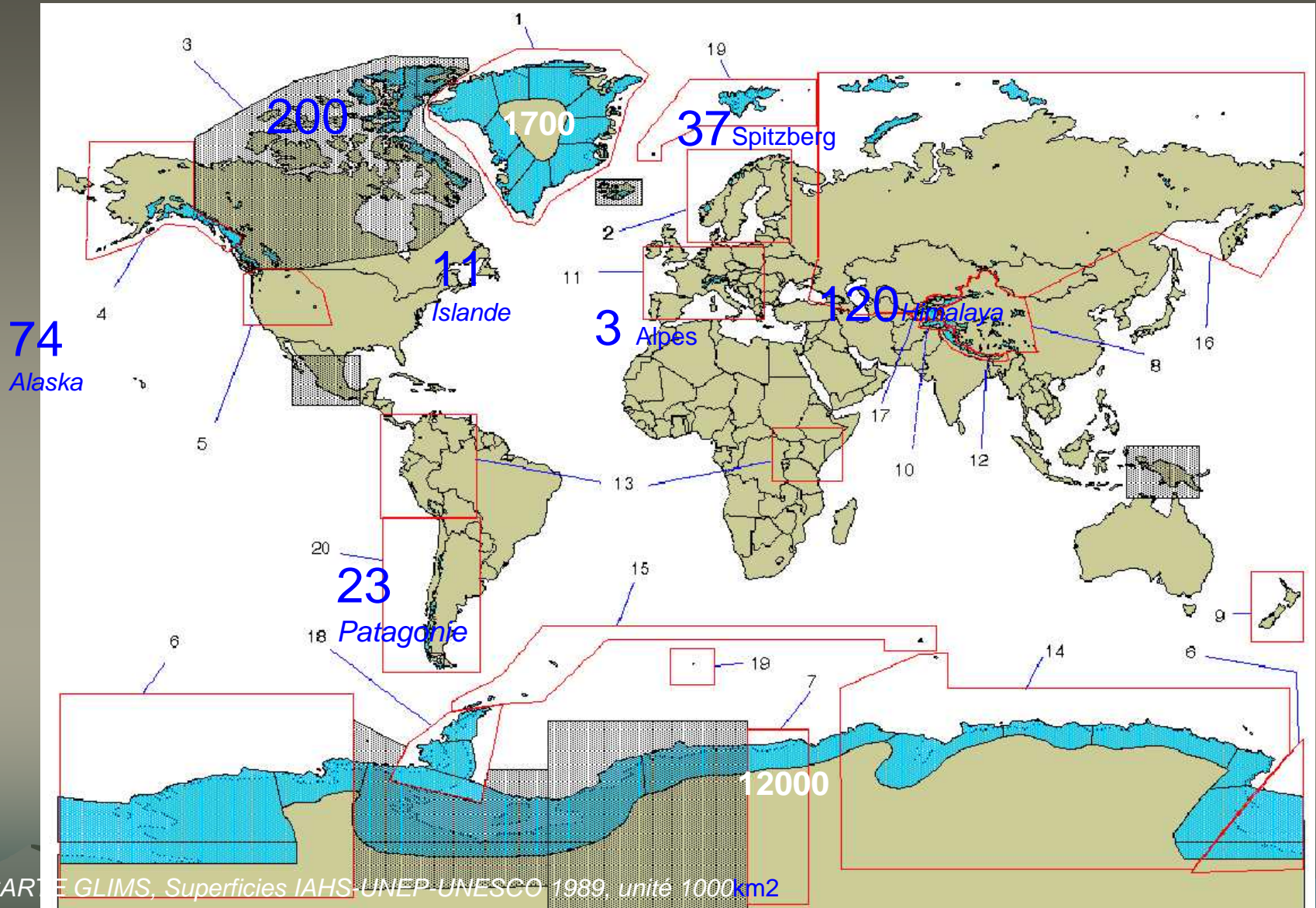


Fleuve de glace

Fleuves de glace et glaciers émissaires se jetant dans la plateforme de Ross



Répartition (surfacique) des glaciers sur Terre

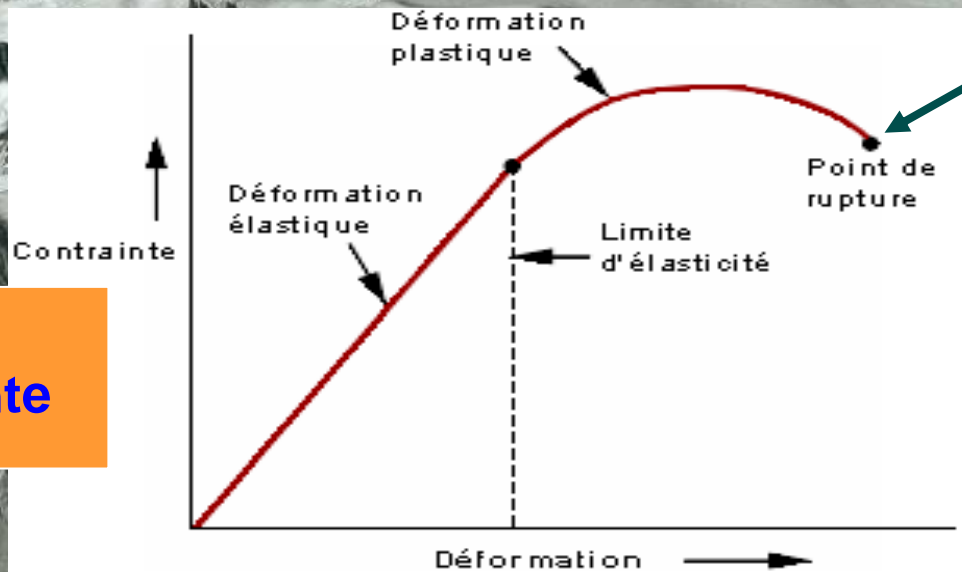


CARTE GLIMS, Superficies IAHS-UNEP-UNESCO 1989, unité 1000km²

Écoulement de la glace

Différents comportements suivant l'intensité et la nature de la sollicitation mécanique

Crac !



σ
Contrainte

ε DEFORMATION

Déformation de la glace

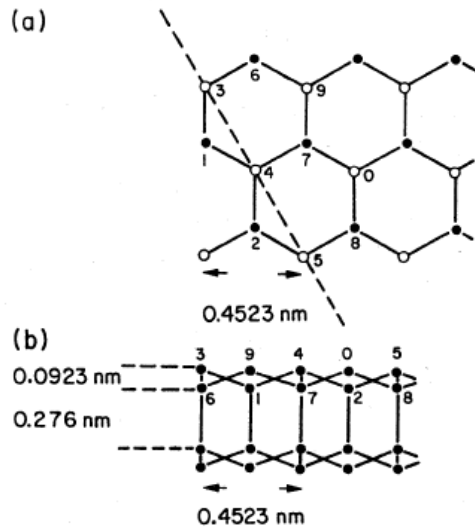
Déformation de la glace polycristalline :

1/ déformation du mono cristal

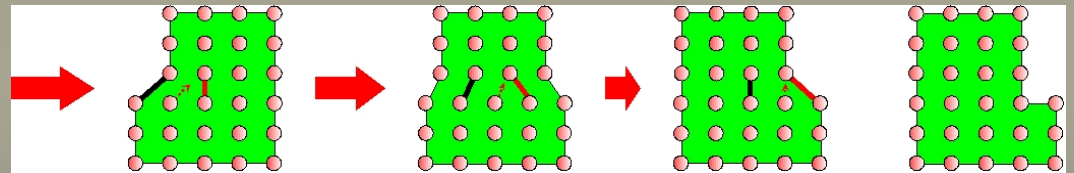
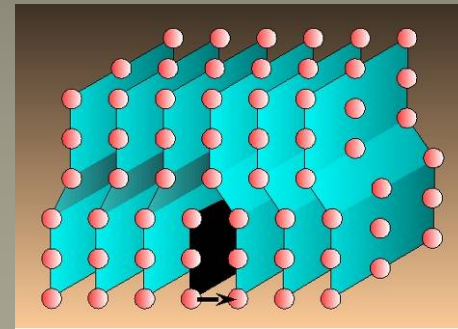
2/ mvt des cristaux les uns par rapport aux autres

Déformation du monocristal : forte anisotropie lié à sa structure :

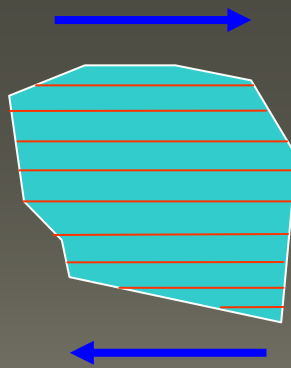
Structure du mono cristal de glace



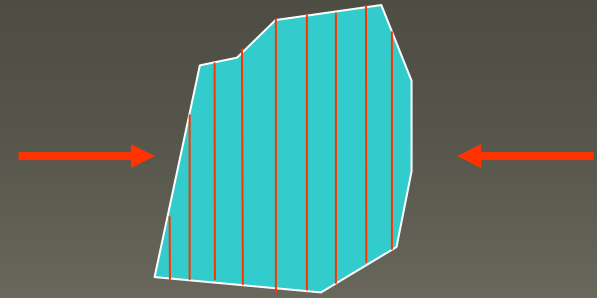
Processus essentiel de déformation : glissement de dislocation



Macroscopiquement :



Cisaillement dans le sens des plans basaux



Compression orth. aux plans basaux

→ Très forte anisotropie ! (facteur 100 dans les taux de déformation)

Déformation de la glace polycristalline



Orientation aléatoire

Déformation intra cristalline limitée

- Glissement aux joints de grains (eau)
- Migration des joints de grains
- Recristallisation dynamique sous contrainte

Cas particulier des fabriques

Fort régime de contraintes :

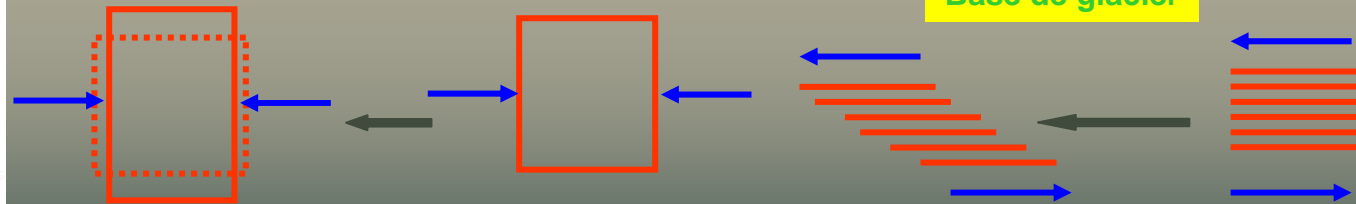
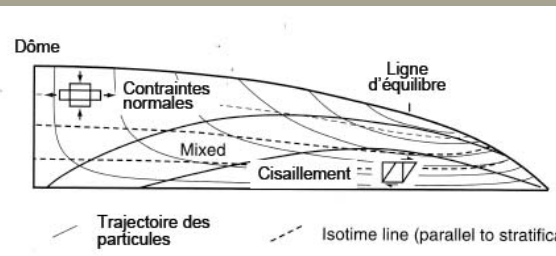
- réorientation des cristaux
- recristallisation dyn.

→ Déformation accrue

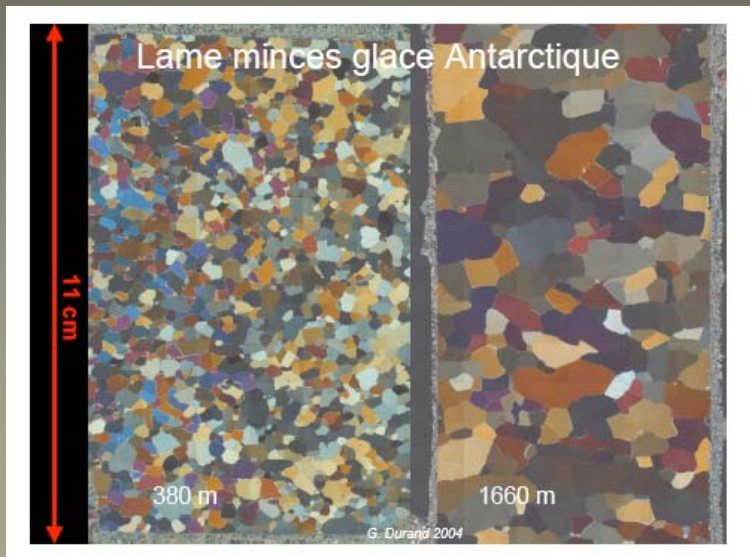
- concentration de la déformation :
 - fond des calottes
 - fond des glaciers
 - cisaillement dominant

Sommet de glacier

Base de glacier

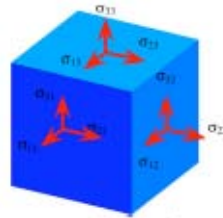


Développement d'une fabrique le long d'une carotte profonde



Tenseurs des contraintes et ds taux de déformation

Tenseur des contraintes



$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{pmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{xx}-p & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy}-p & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz}-p \end{pmatrix}$$

Contraintes
sphériques
ou isotropes

déviateur des contraintes

$$\underline{\underline{S}} = \underline{\underline{\sigma}} - \frac{1}{3} \text{tr}(\underline{\underline{\sigma}}) \underline{\underline{I}}$$

$$p = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3}$$

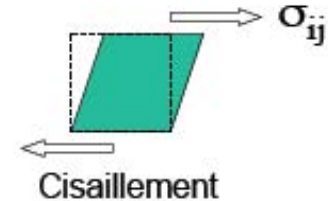
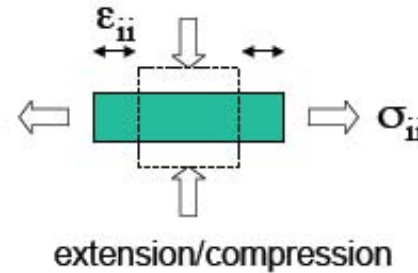
18

Tenseur des vitesses de déformations

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} = \begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_{xx} & \dot{\epsilon}_{xy} & \dot{\epsilon}_{xz} \\ \dot{\epsilon}_{xy} & \dot{\epsilon}_{yy} & \dot{\epsilon}_{yz} \\ \dot{\epsilon}_{xz} & \dot{\epsilon}_{yz} & \dot{\epsilon}_{zz} \end{pmatrix}$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{u}}{dt}$$



Loi de déformation de la glace

Phénoménologique et macroscopique (← exp. macro de labo et de terrain)

Valeurs typiques de contraintes : 50 à 200 kPa
 (! Déviatoriques ≠ pression (300 bars en base de calotte)

Loi puissance (type Norton Hoff)

$$\dot{\epsilon}_{xy} = A \tau^{n-1} \tau_{xy}$$

Loi de Glen

τ_{xy} : Tenseur des contraintes déviatoriques

τ : second invariant

$\dot{\epsilon}_{xy}$: Tenseur des taux de déformation

n : exposant de Glen ; $1.5 < n < 4.2$

→ Cas le plus fréquent : $n = 3$ → forte non linéarité

$n = 1$: Cas linéaire, fluide visqueux (faibles contraintes, partie supérieure des glaciers; $A = \text{inverse viscosité}$)

n infini : Cas du plastique parfait

τ_0 seuil de plasticité (1 bar) ; $A = C/(\tau_0)^n$

$$\dot{\epsilon}_{xy} = C \left(\frac{\tau_{xy}}{\tau_0} \right)^n$$

$\tau < \tau_0 \Rightarrow \dot{\epsilon}_{xy} \rightarrow 0$ pas de déformation

$\tau > \tau_0 \Rightarrow \dot{\epsilon}_{xy}$ très important

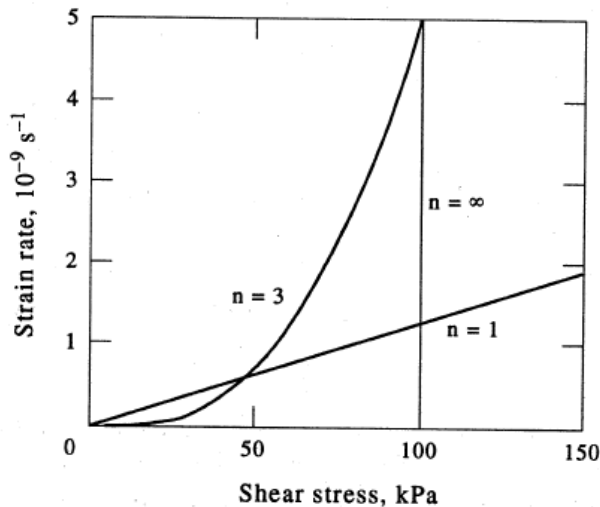
$A = F(\text{temp.}, \text{impuretés}, \text{contenu en eau...})$

Temp
 $A \text{ (s}^{-1} \text{ (kPa)}^{-3}\text{)}$

Temp	0°C	-10°C	-25°C	-40°C	-50°C
$A \text{ (s}^{-1} \text{ (kPa)}^{-3}\text{)}$	$6.8 \cdot 10^{-15}$	$4.9 \cdot 10^{-16}$	$9.4 \cdot 10^{-17}$	$1.4 \cdot 10^{-17}$	$3.6 \cdot 10^{-18}$

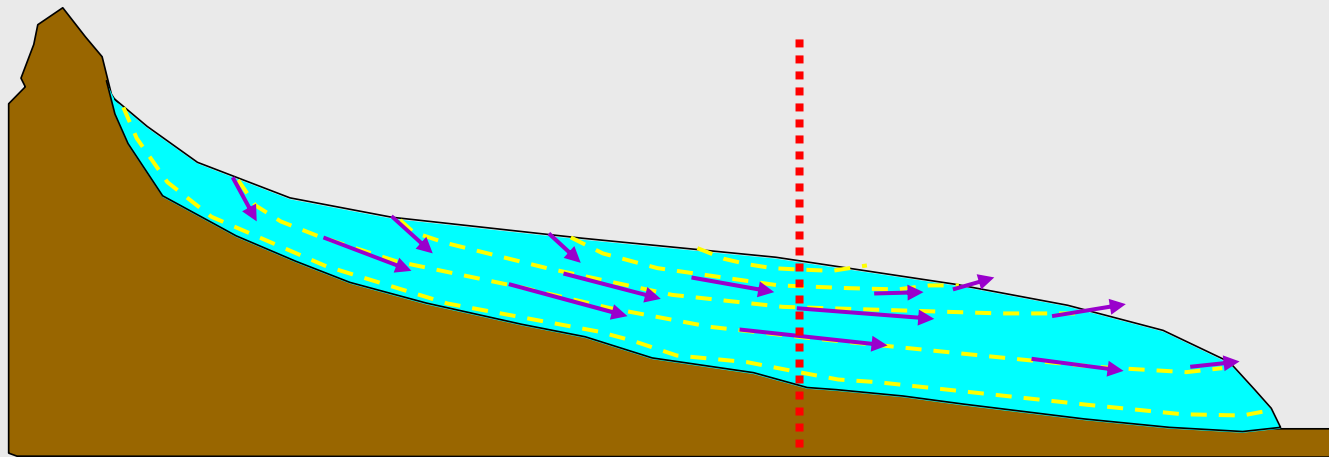
X 2000

→ Rôle de la température sur la déformation !



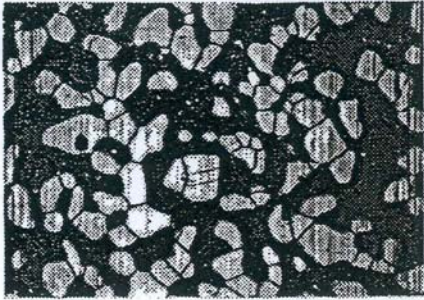
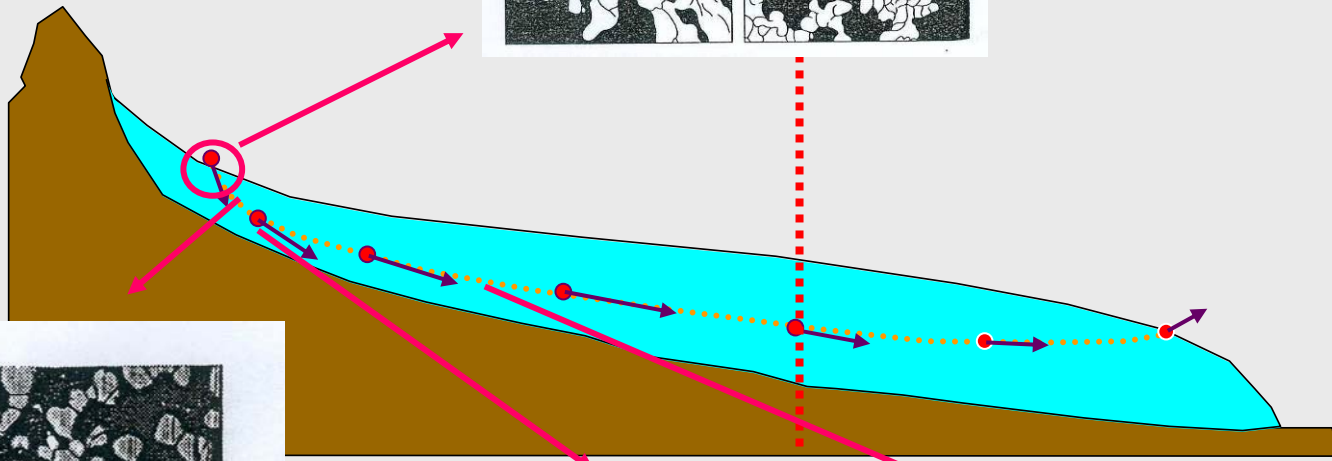
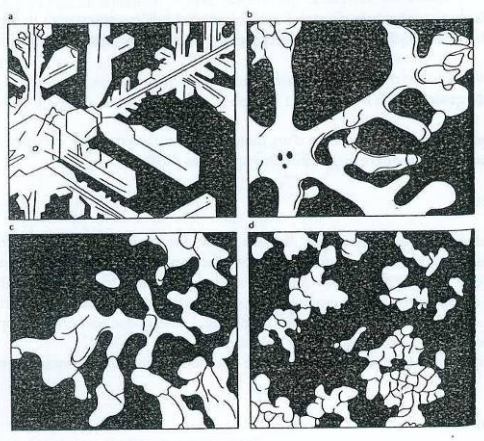
Champ de vitesses et trajectoires

Ligne
d'équilibre



Vitesse maximale au niveau de la ligne d'équilibre

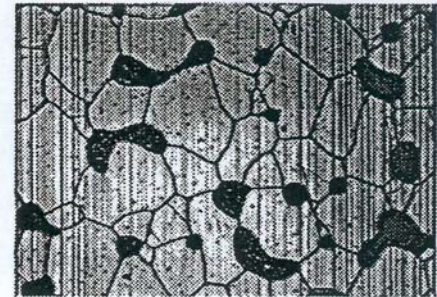
Temps caractéristiques : quelques centaines d'années au plus pour un glacier de montagne



Profondeur : 5 m
Densité : 0.52



Profondeur : 20 m
Densité : 0.61

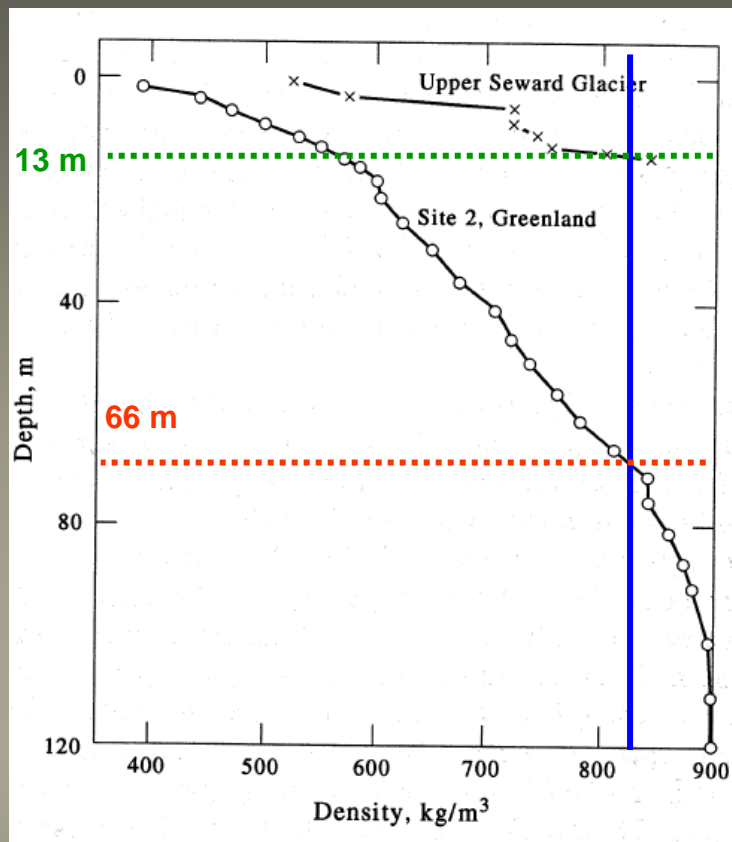


Profondeur : 61 m
Densité : 0.82

Densification du névé et transformation en glace

Effet de la compaction (**pression**).....

... mais aussi de la **température**



Paterson, 1994, p.13

Upper Seward (Yukon) : tempéré

Site 2 : froid

Close off à la densité de $830 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Taux d'accumulation (calotte/glacier)

→ Seward : 3 à 5 ans (3m neige/an)

→ Site 2 : 100 ans (0.7m neige/an)

Vallée blanche : 13 ans \leftrightarrow 30 m (+ de 2m neige/an)

Quelques accumulations :

DC : 3.6 cm d'eau

Vostok : 2.2 cm d'eau

Glacier alpin typique : 2m

Glacier maritime (Vancouver) : 6 à 7 m

Densité des différents états de l'eau

Type de neige	Densité
Neige fraîche	0.05 – 0.20
Neige fraîche mouillée	0.10 – 0.20
Neige tassée	0.20 – 0.30
Neige compactée par le vent	0.35 – 0.40
Névé	0.50 – 0.83
Glace de glacier	0.83 – 0.917
Eau liquide	1

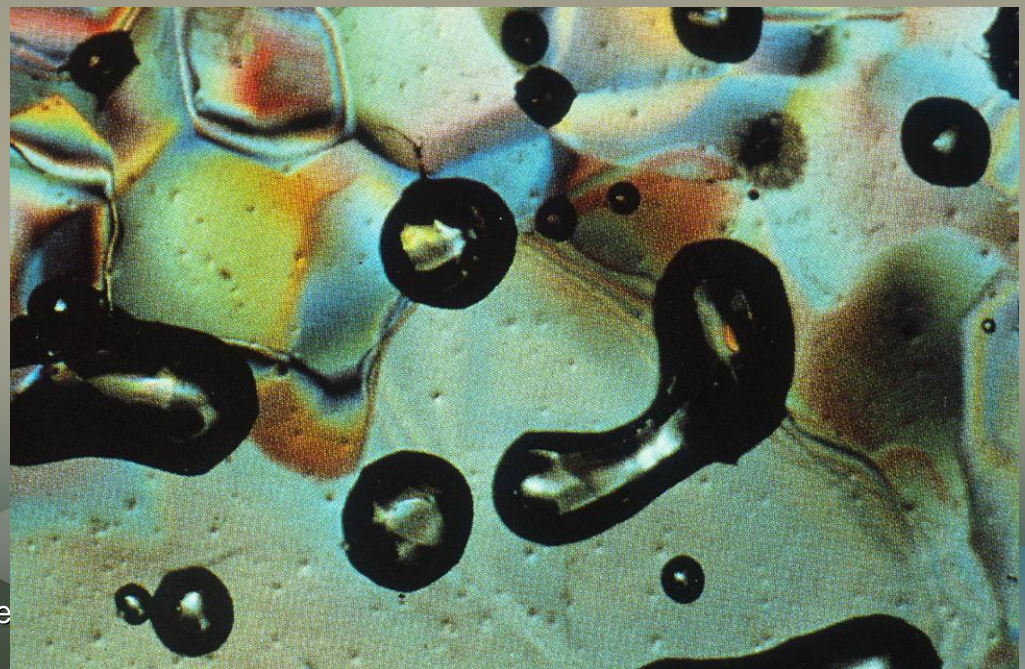
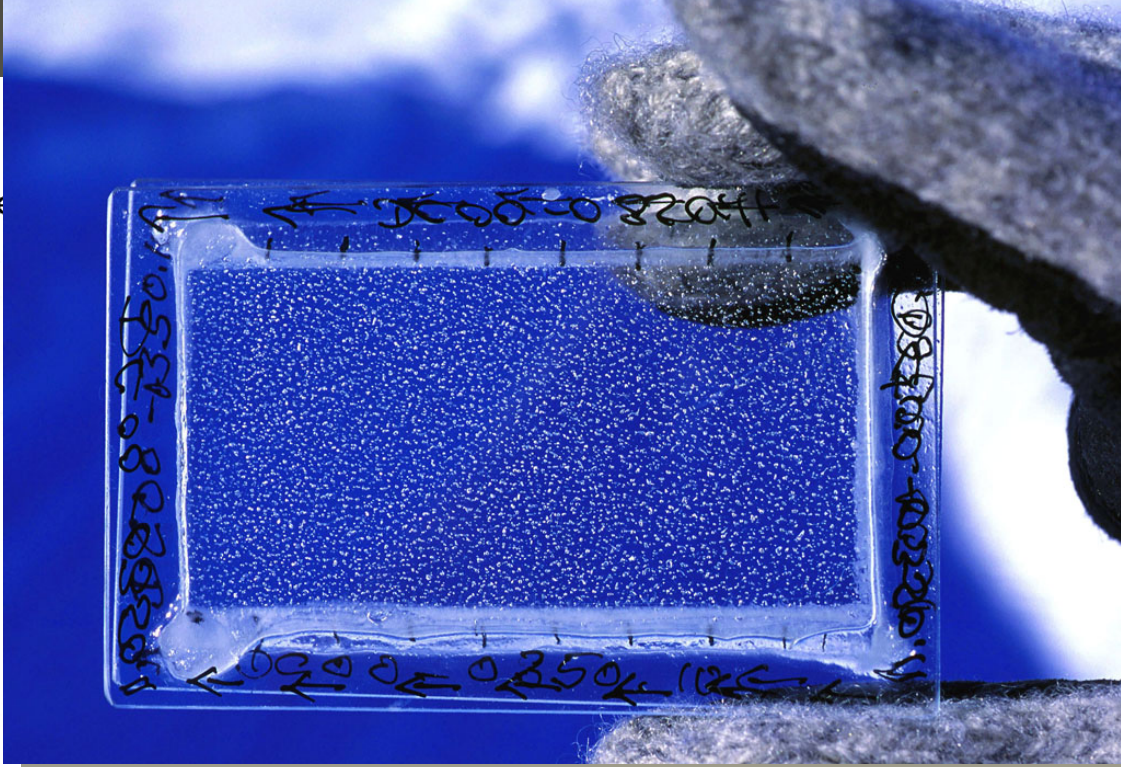
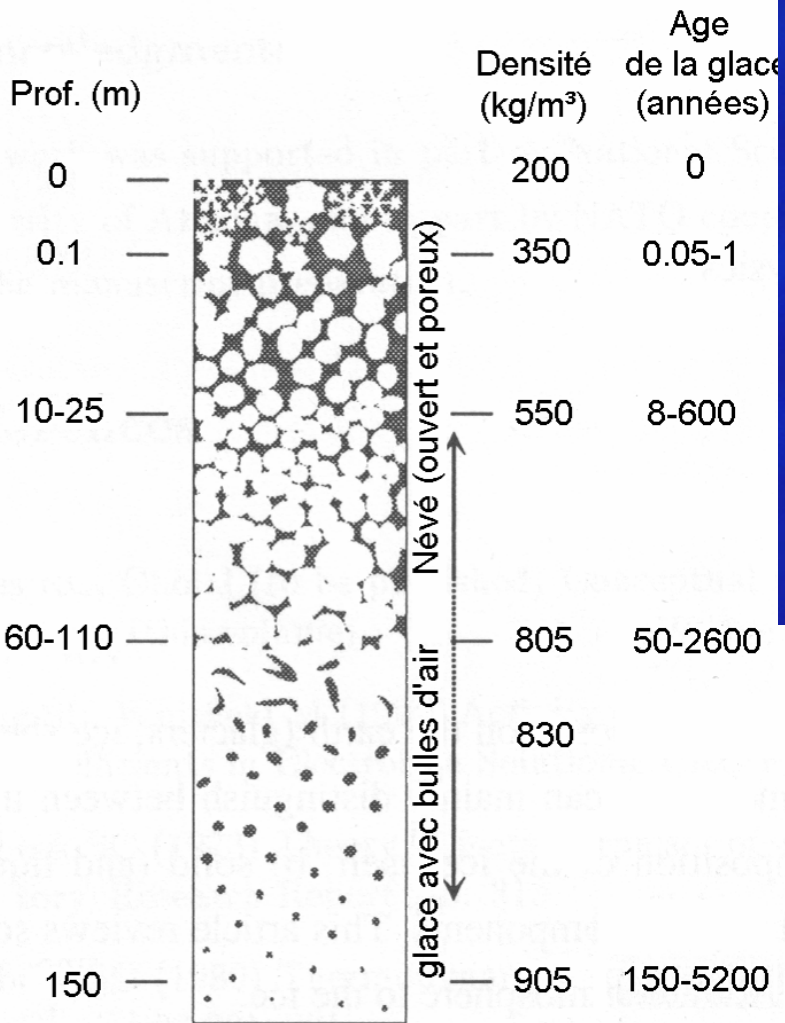
Cycle de la glace

Quelques
heures,
jours

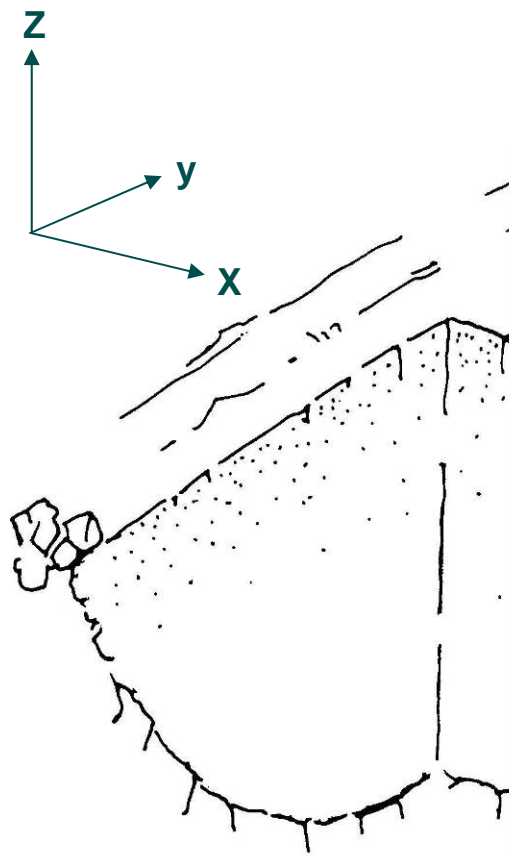
1 année

décennies, millénaires

Siècles, 100000 ans

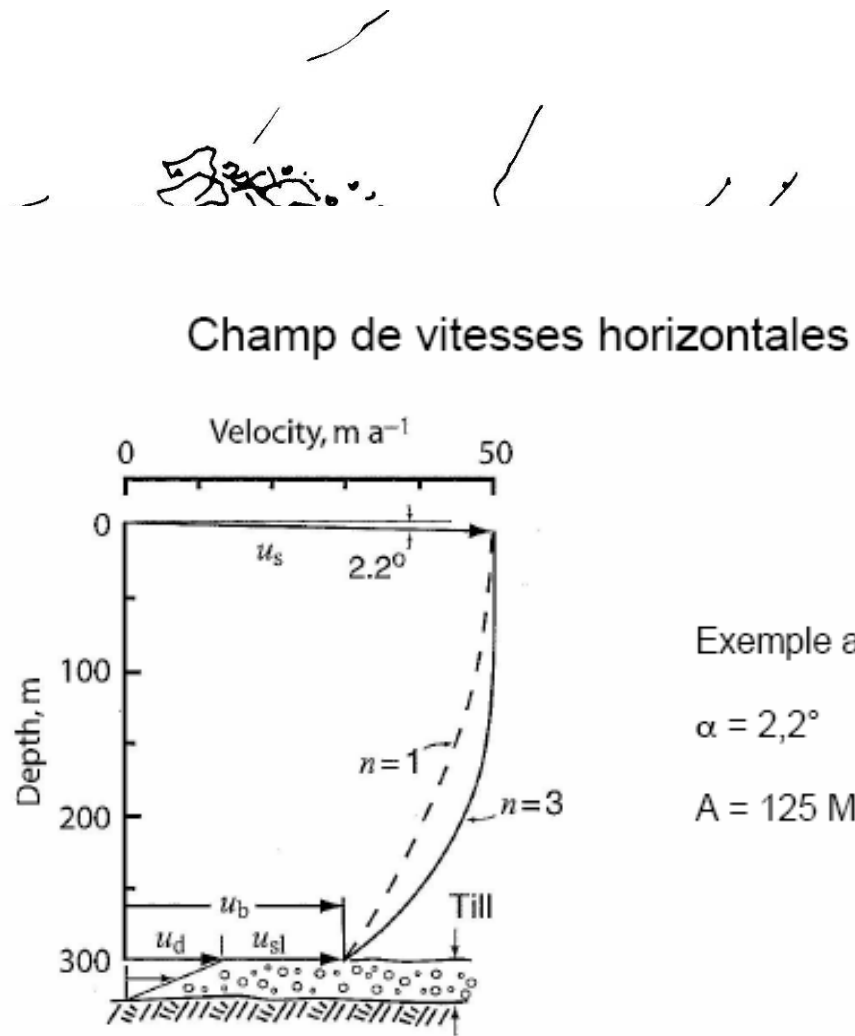


Distribution de la vitesse au sein du glacier



Glissement

Shéma adapté de A. Zryd, 2001



Exemple avec :
 $\alpha = 2,2^\circ$
 $A = 125 MPa \cdot n a^{-1}$

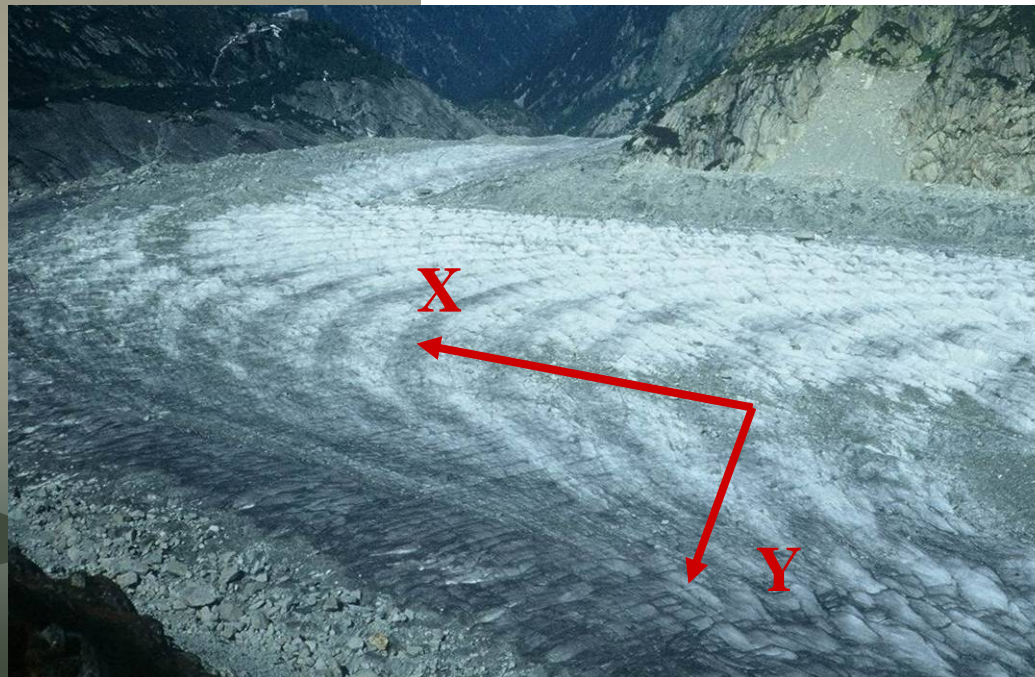
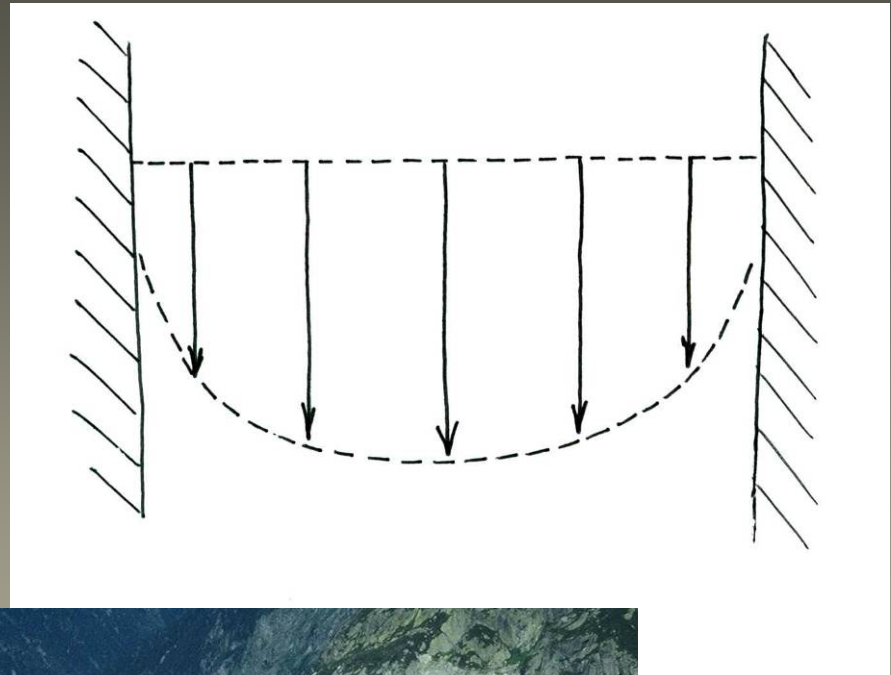
Sans glissement

Distribution en surface

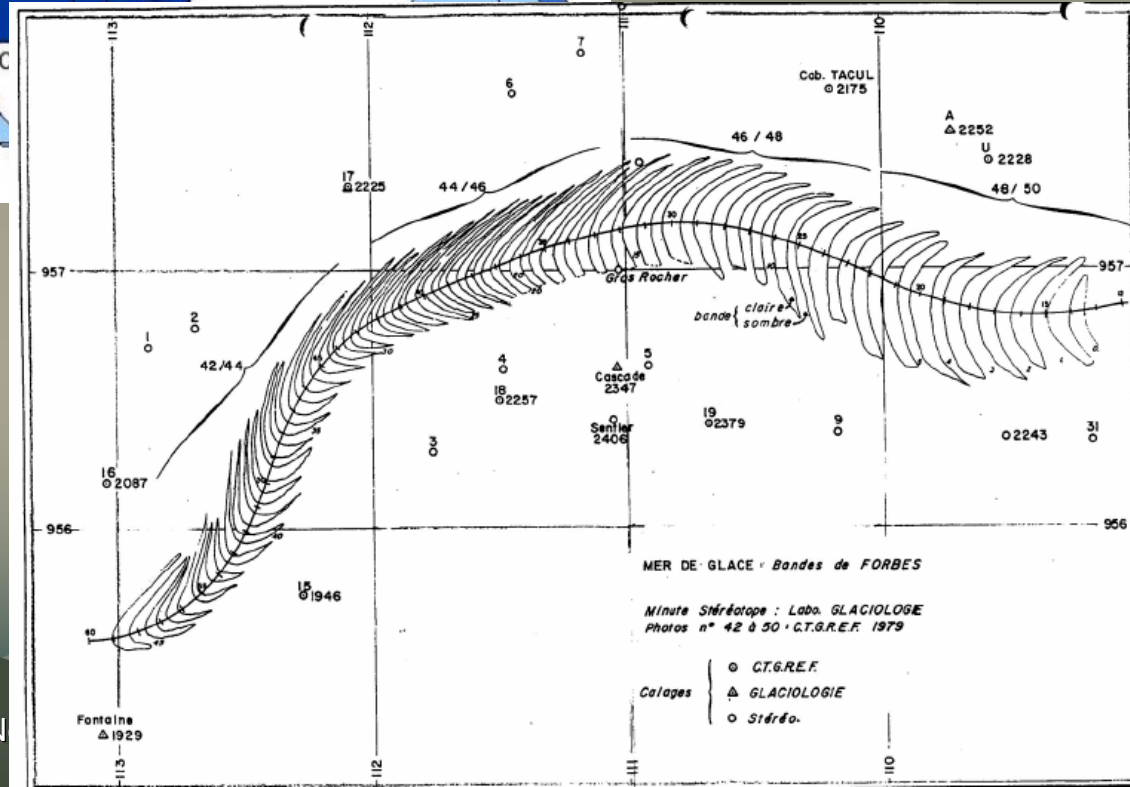
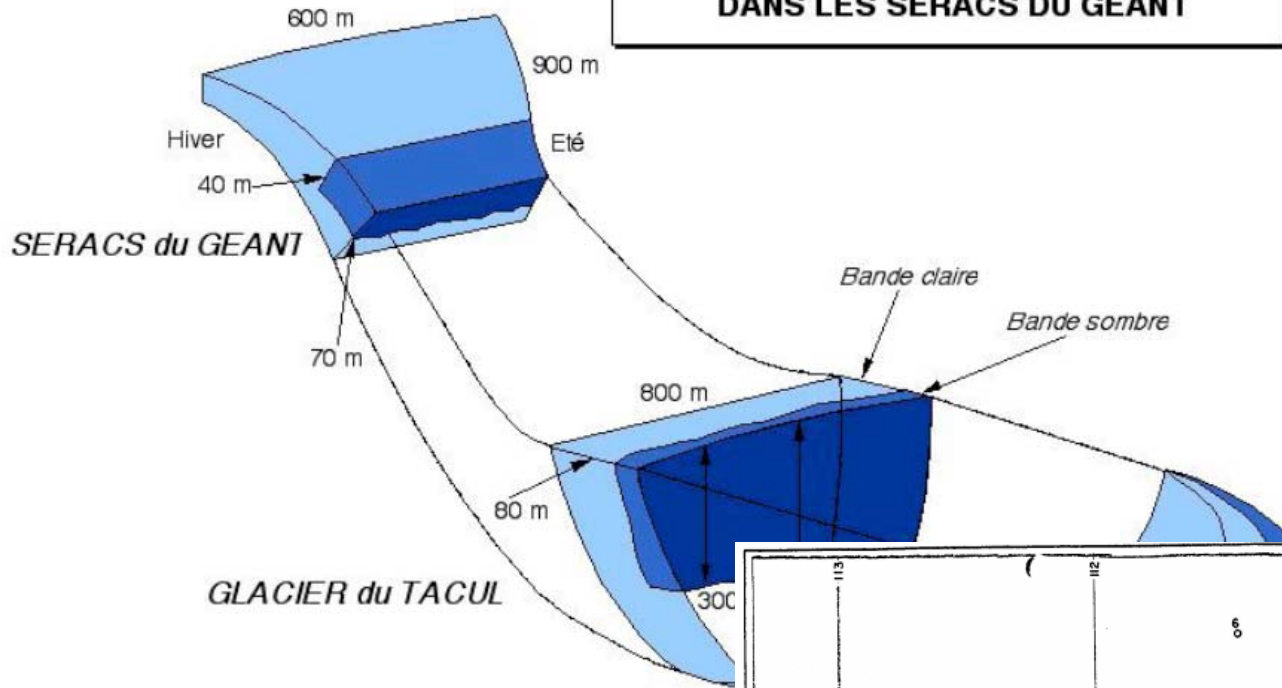
Soulignée par des structures visibles à la surface
du glacier

→ Bandes de Forbes

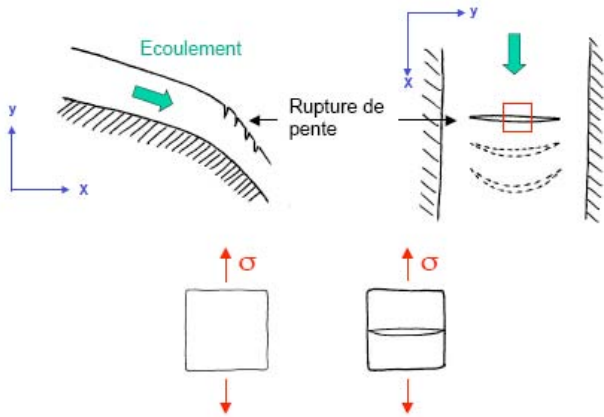
Gradient latéral matérialisant le frottement
sur les bords → zone de cisaillement



FORMATION DES BANDES DE FORBES DANS LES SERACS DU GEANT

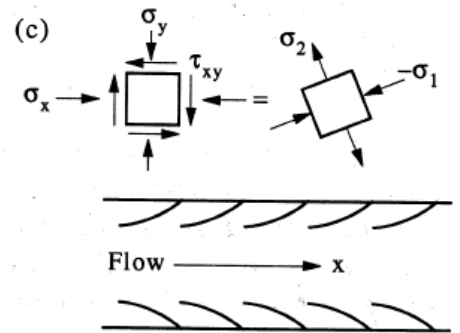
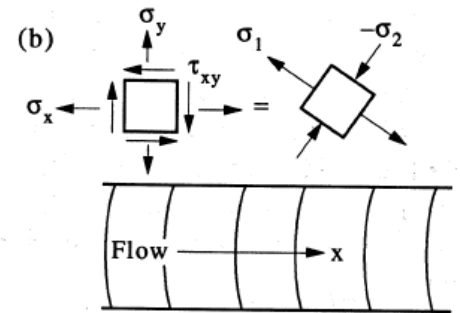
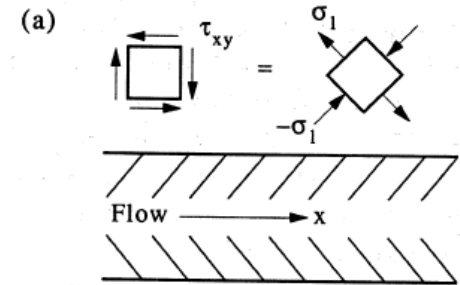
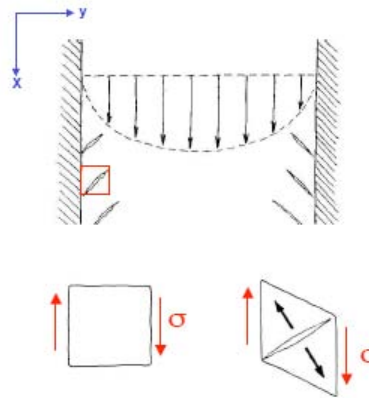


Crevasses transverses



37

Crevasses latérales



38

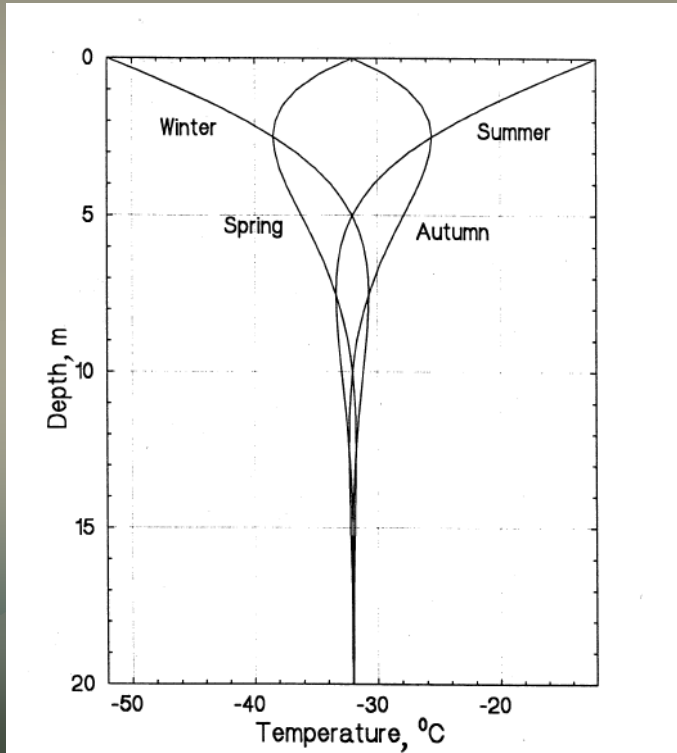
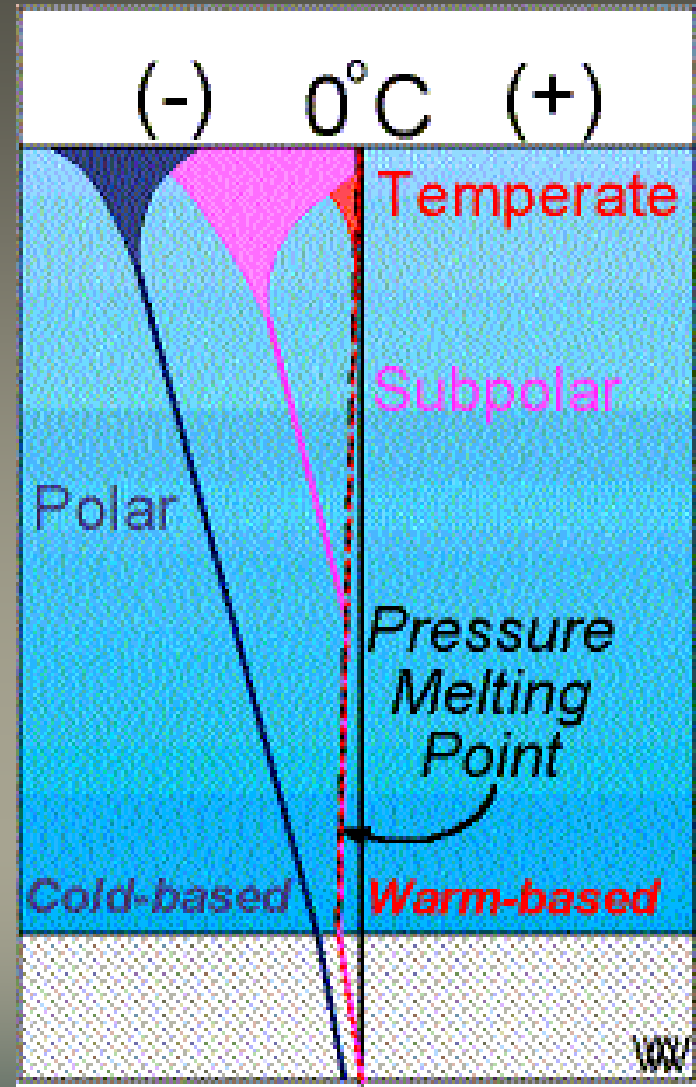
Distribution de température dans les glaciers

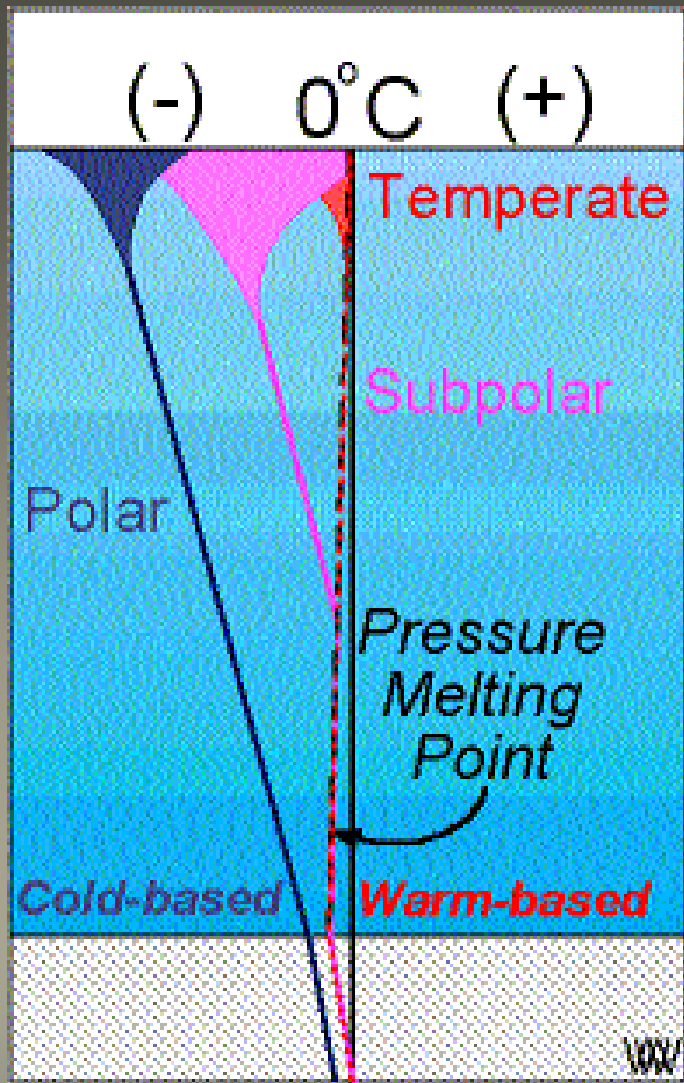
Fondamentale car contrôle :

- La déformation de la glace
- Les conditions de glissement
 - rôle dans l'établissement des structures côtières
 - rôle dans la stabilité de certains glaciers
- Le contenu en eau (risque, capacités d'archivage)

Est elle-même contrôlée par :

- La latitude
- L'altitude





Glaciers polaires : a priori froids partout (pas systématique en Antarctique ou Groenland (PMT atteint localement car
 → chaleur sup ← déformation basale
 → variations du flux geoth + effet isolant

Glaciers sub-polaires : glace advectée moins froide + diffusion de conds de temp moins froides
 → base atteint le PMT
 → éventuellement une couche estivale de surface tempérée, mai à terme advectée et refroidie par diffusion

→ Glaciers dits **polythermes**

Glaciers tempérés : températures < 0 en hiver et >0 en été
 → moyennage des effets par diffusion ? (oui si de haute altitude → glaciers froids

→ Autre effet fondamental : **La percolation**

Temp. Estivales → percolation de l'eau dans le manteau neigeux → regel au contact de la neige froide (1 g d'eau qui regèle ↔ élévation de 1° C de 160 g de neige

Si percolation importante (basse et moy. Altitude) → toute la couche froide d'hiver ramenée à zéro → **Glaciers dits tempérés**

Si percolation partielle, reste une partie de neige froide advectée
 → **glaciers froids** (glaciers d'altitude >3500 m)

Retour à la température de 0°C de la neige froide d'hiver par percolation

