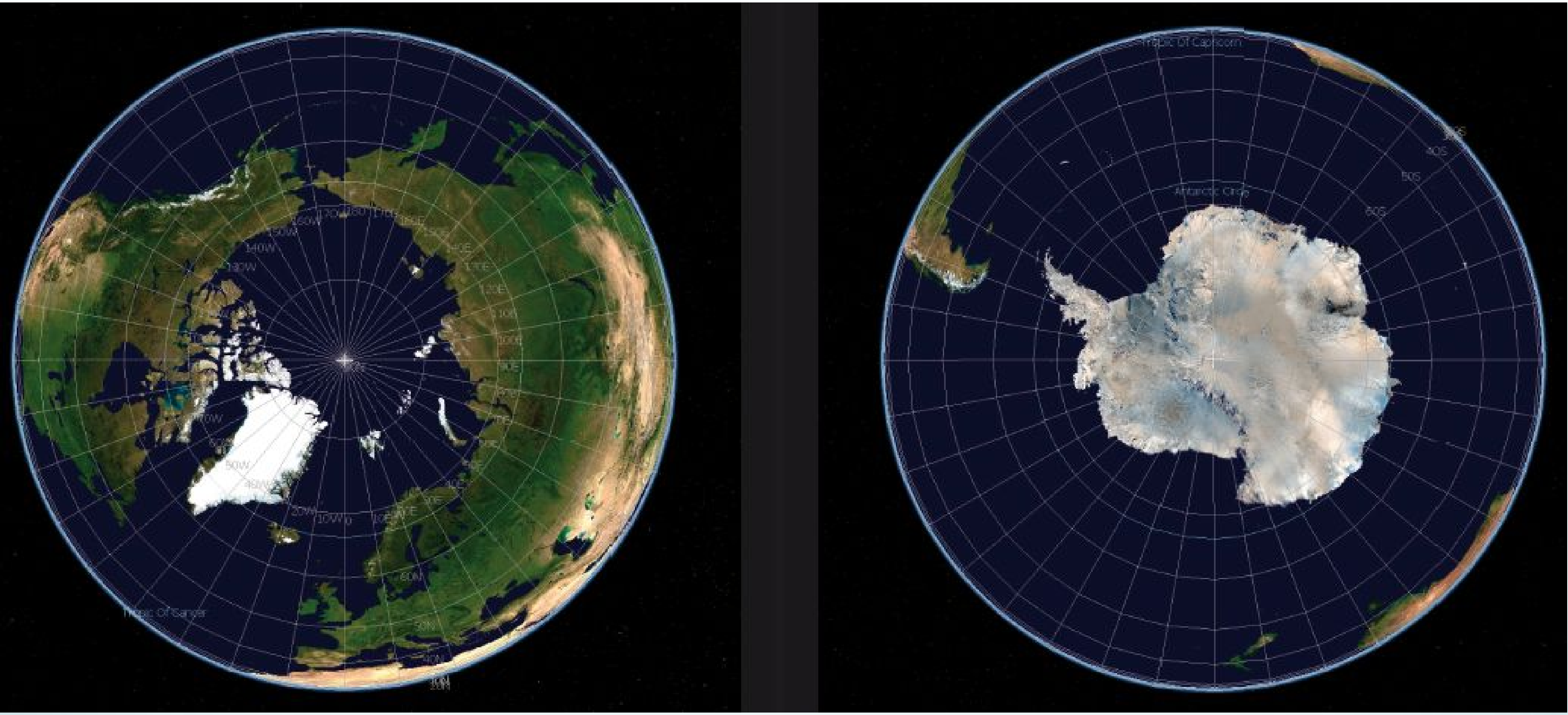
Voyage à l'intérieur d'une carotte de glace.

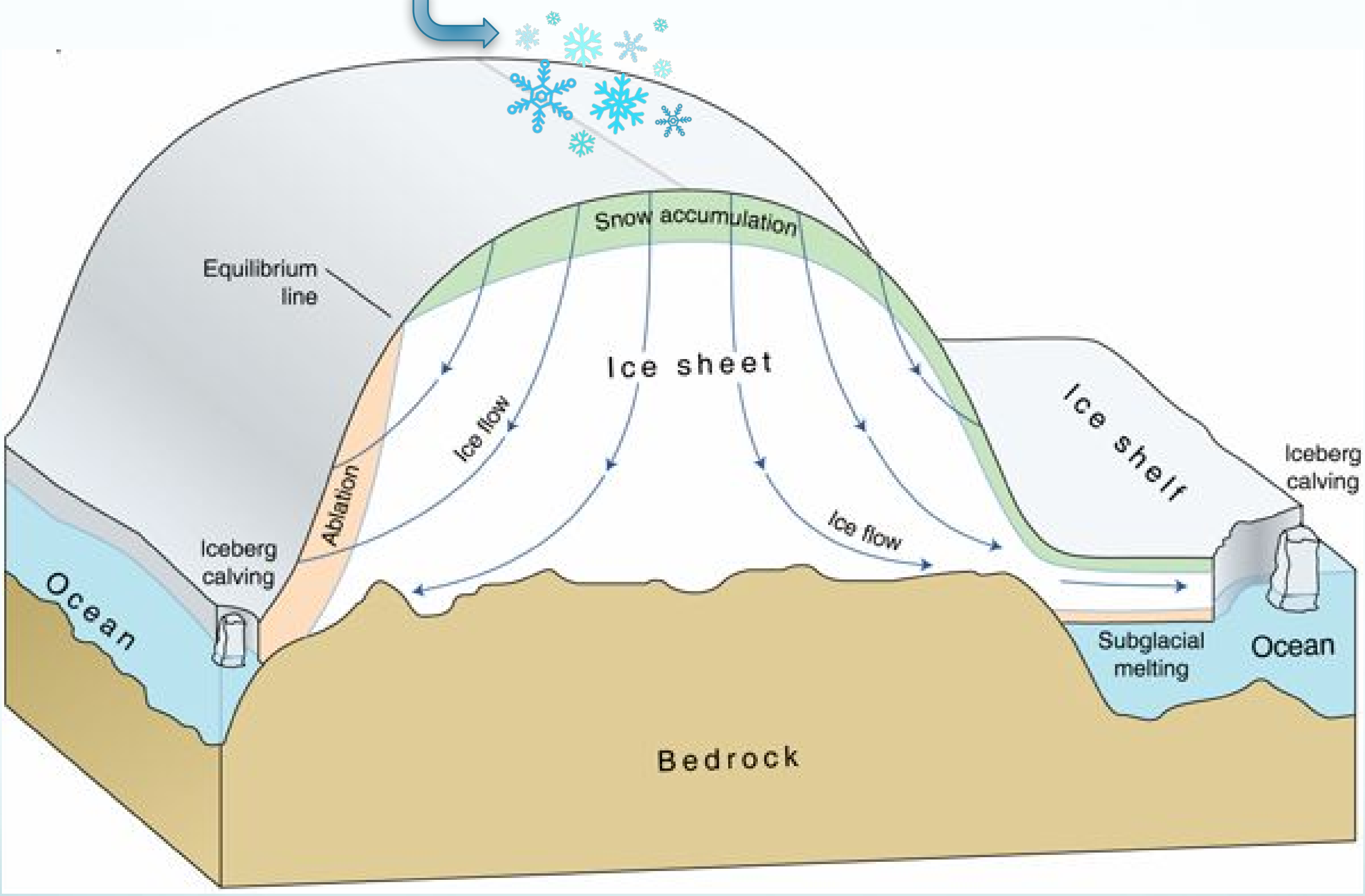
Maurine Montagnat
CNRS
Institut des Géosciences de l'Environnement
Grenoble

Les calottes polaires, Groenland et Antarctique



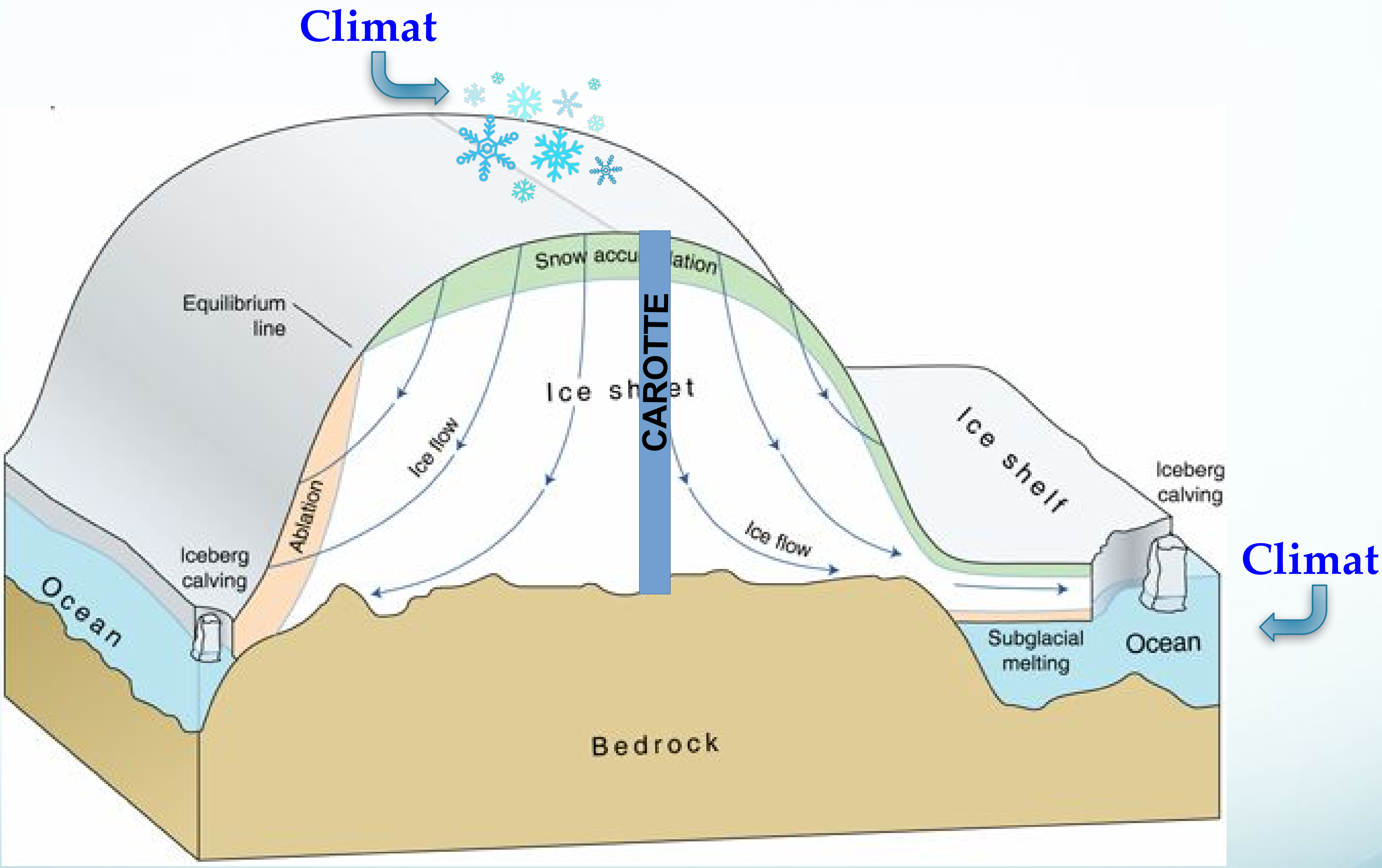
Le climat imprègne « sa trace » dans les calottes polaires

Climat

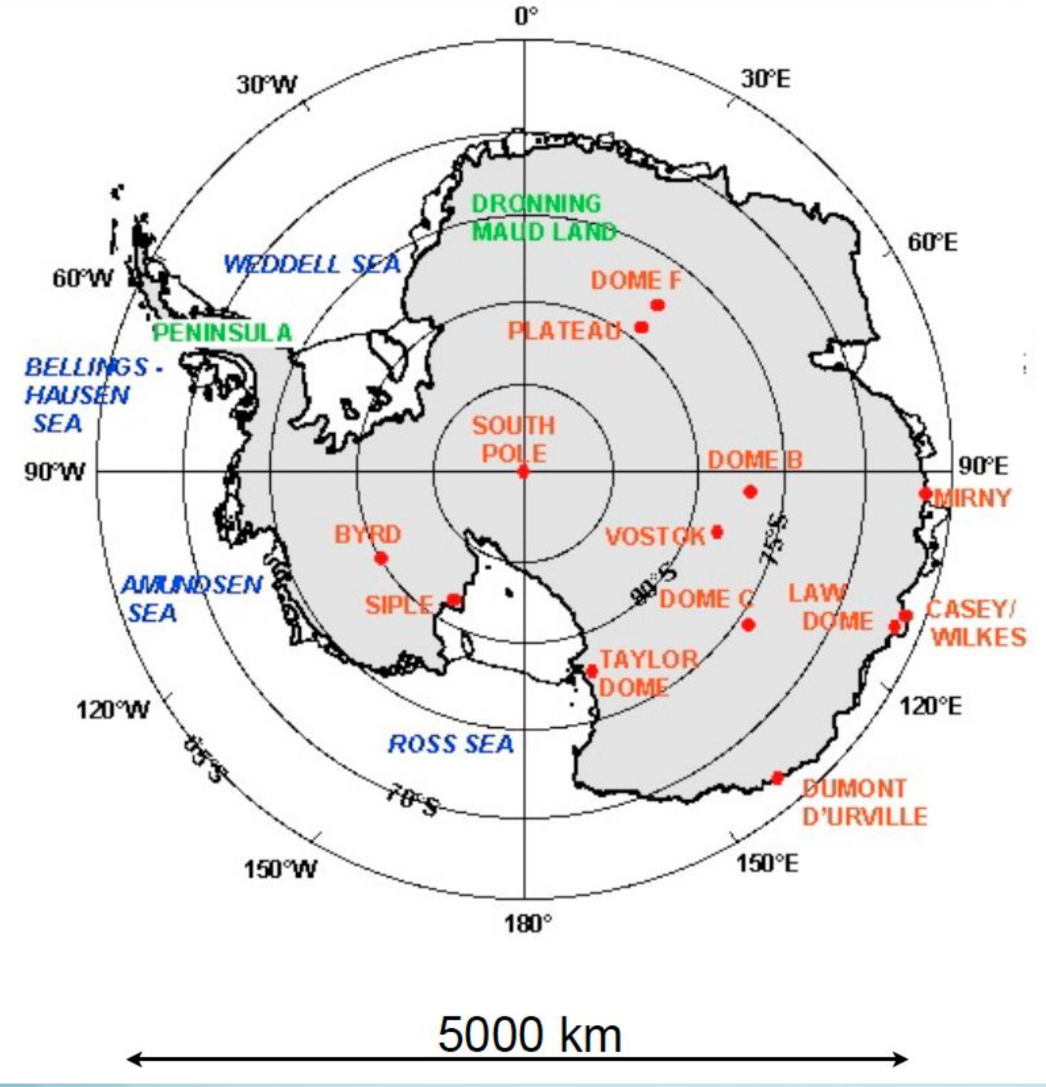


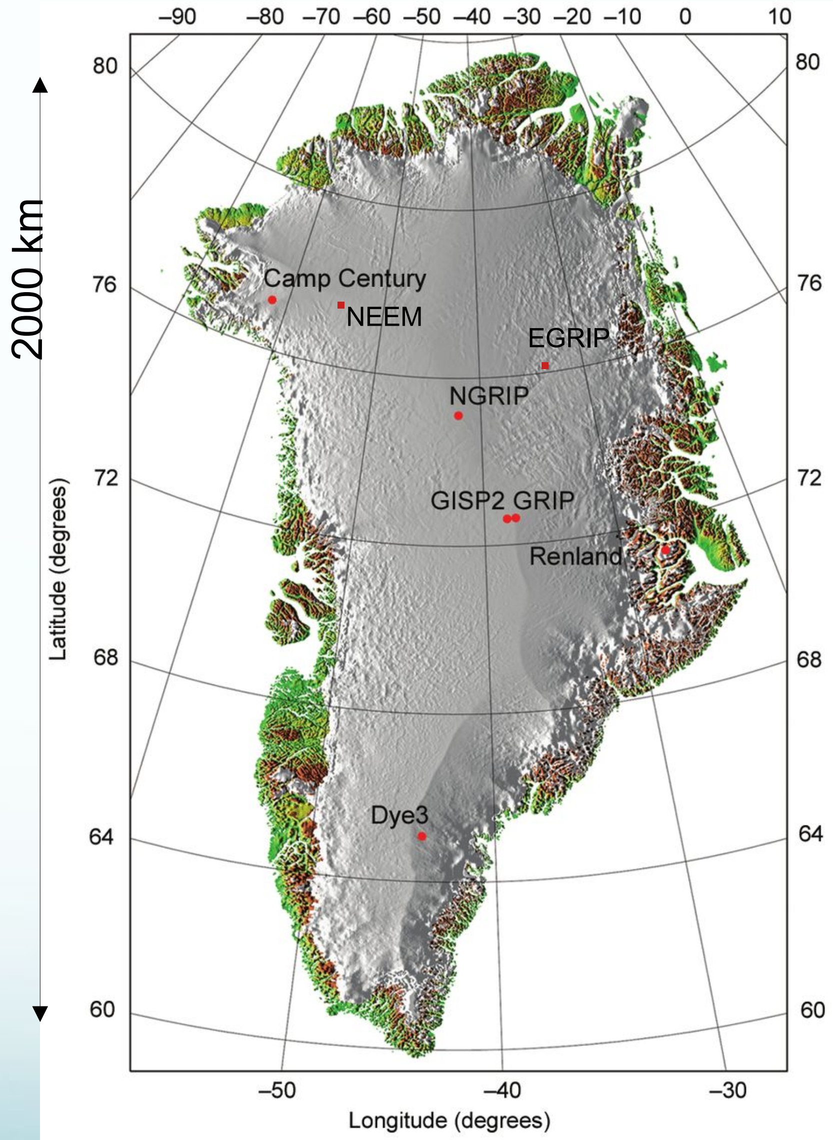
Climat

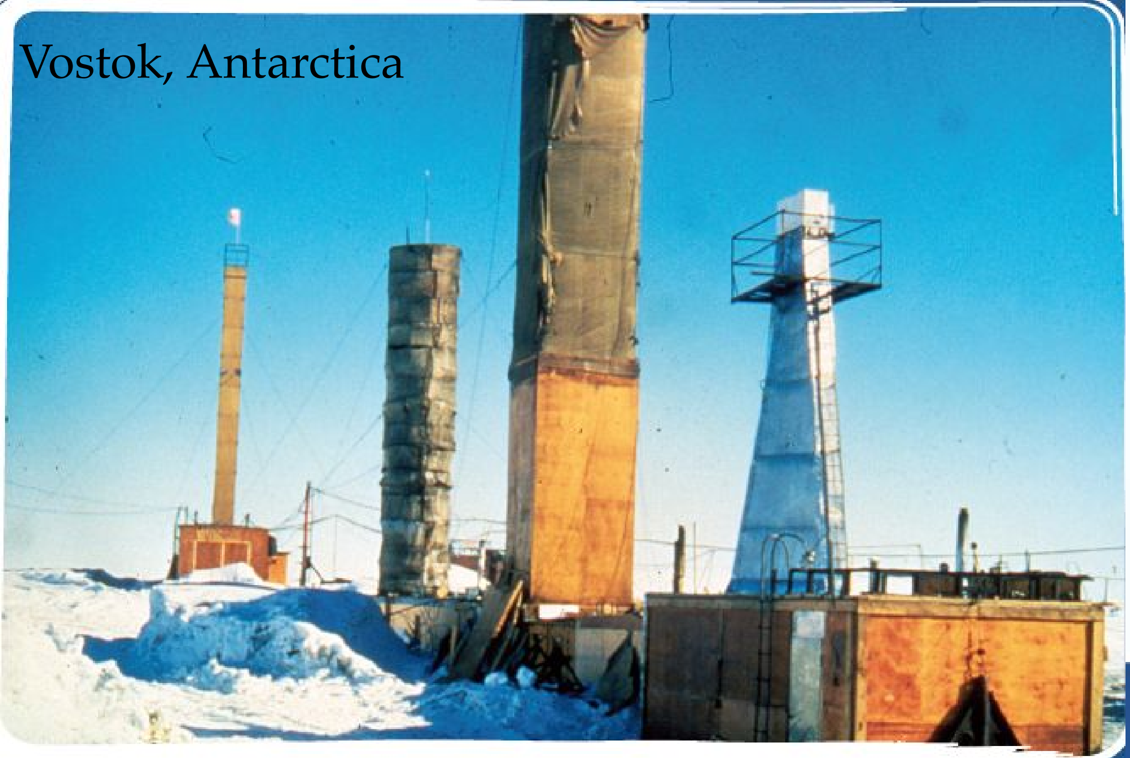
Le climat imprègne « sa trace » dans les calottes polaires

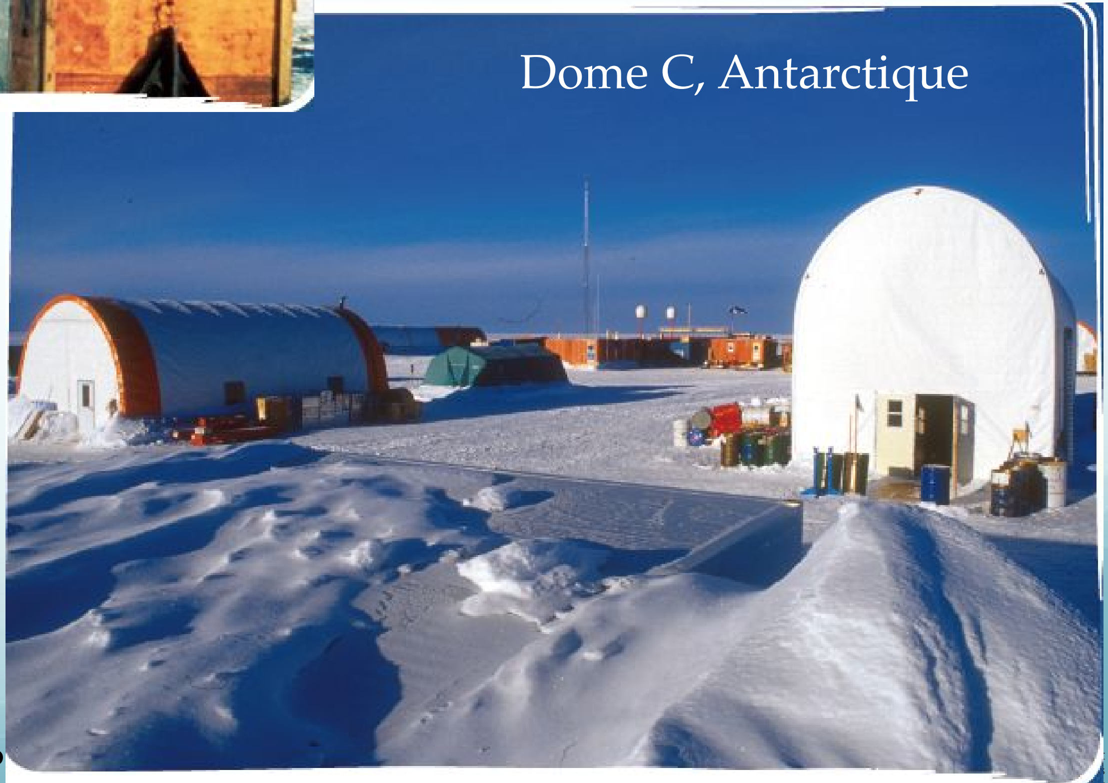


Différents sites de forage



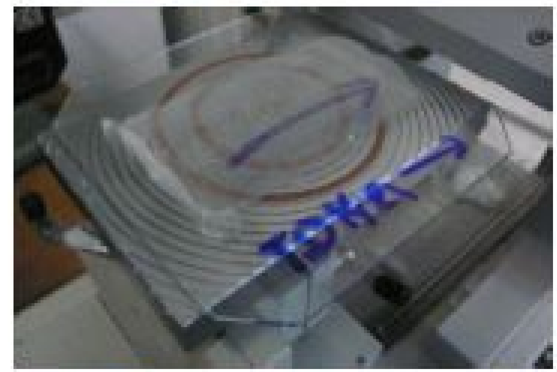



Vostok, Antarctica


Dome C, Antarctique

Base permanente, Concordia, Dome C

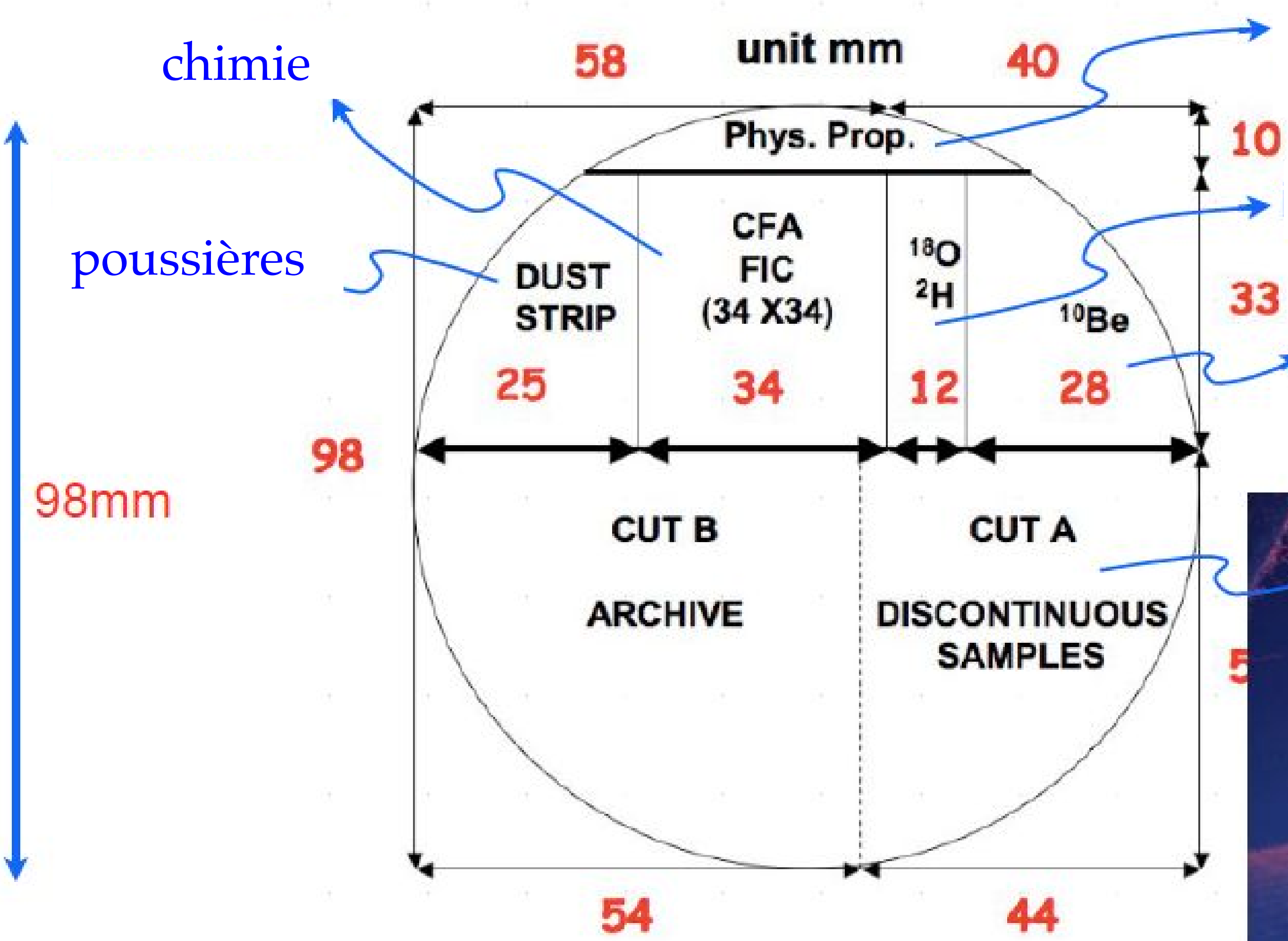
Carottages profonds



Que mesure-t-on dans une carotte de glace?

chimie

poussières



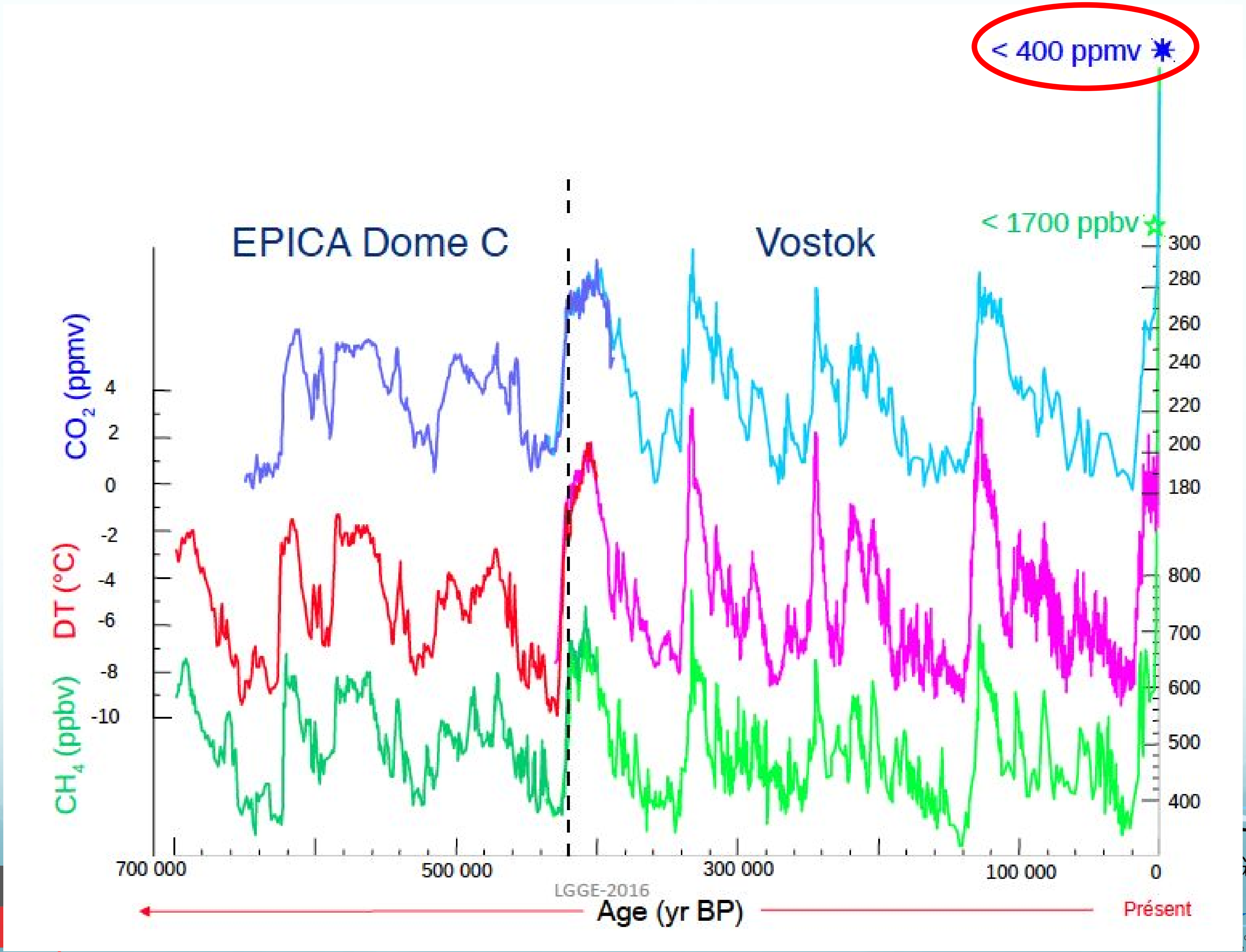
Propriétés Physiques

Isotopes de l'eau

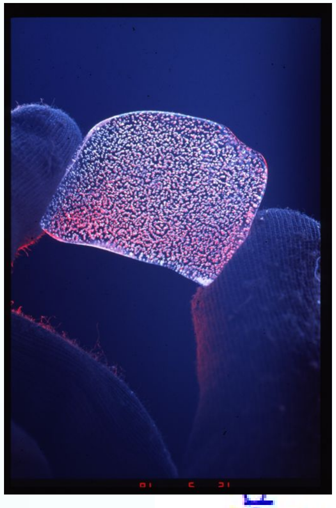
Isotopes Cosmogeniques (↔ soleil)

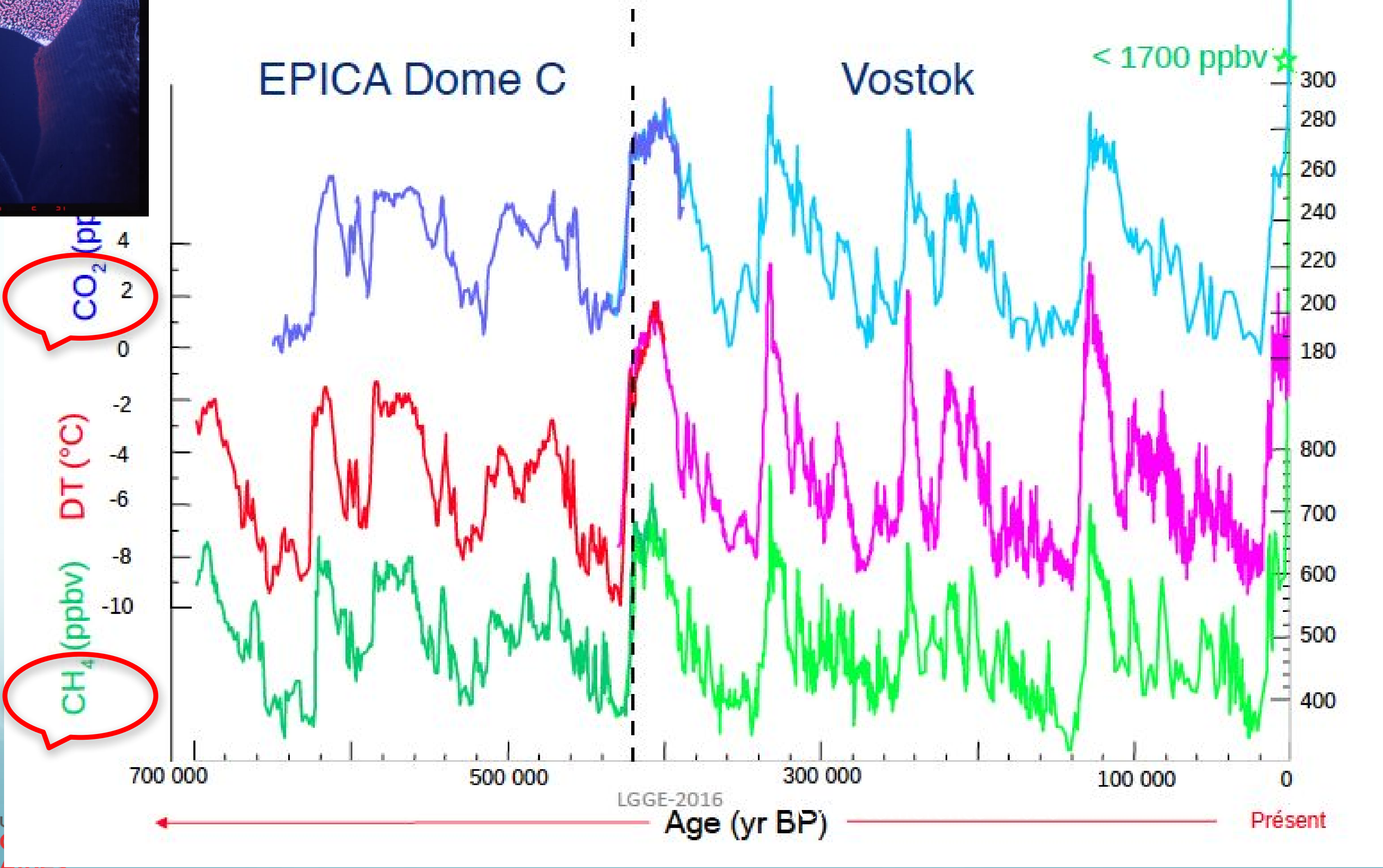
"Message in a bubble"

Le climat du passé

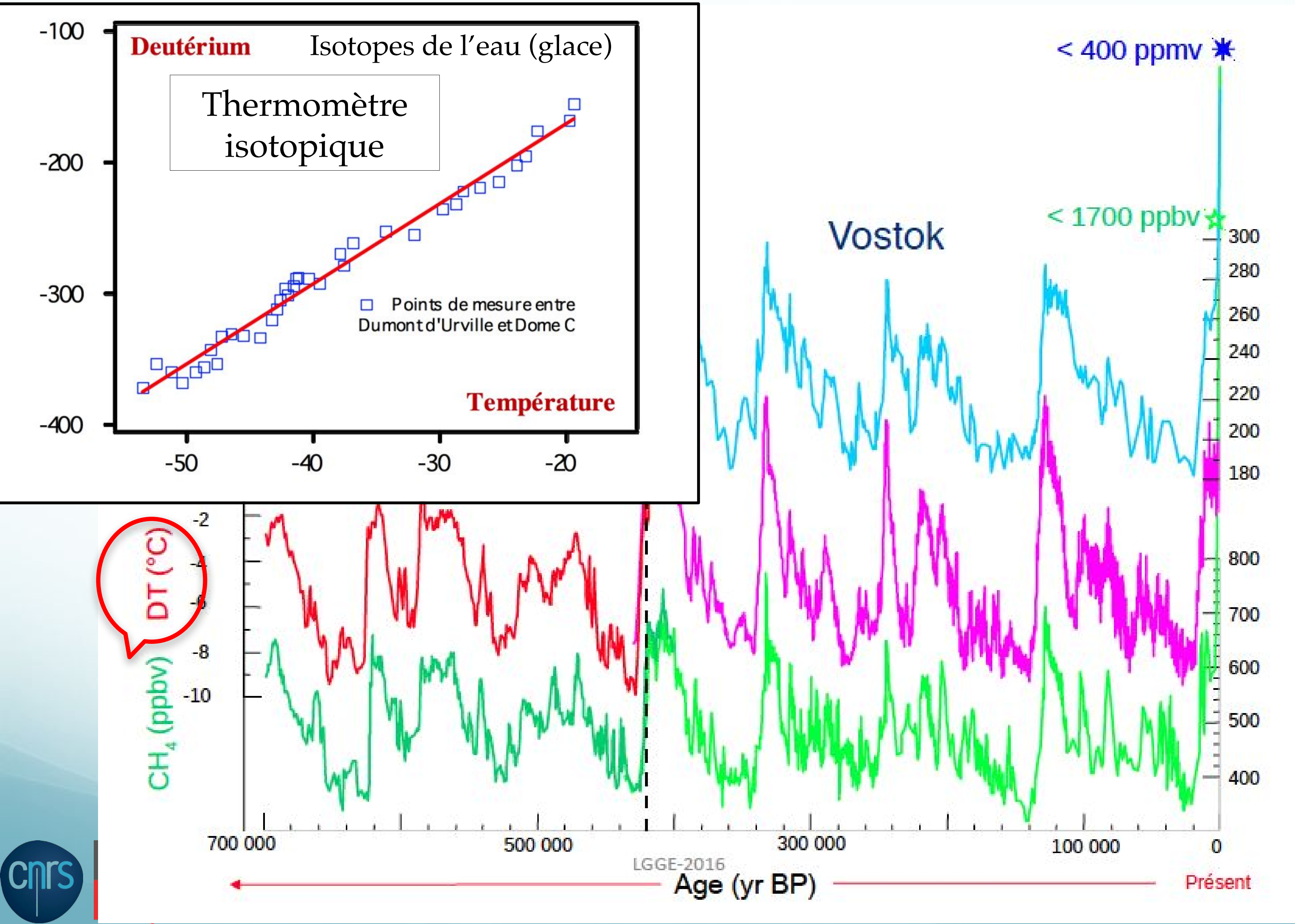


Le climat du passé

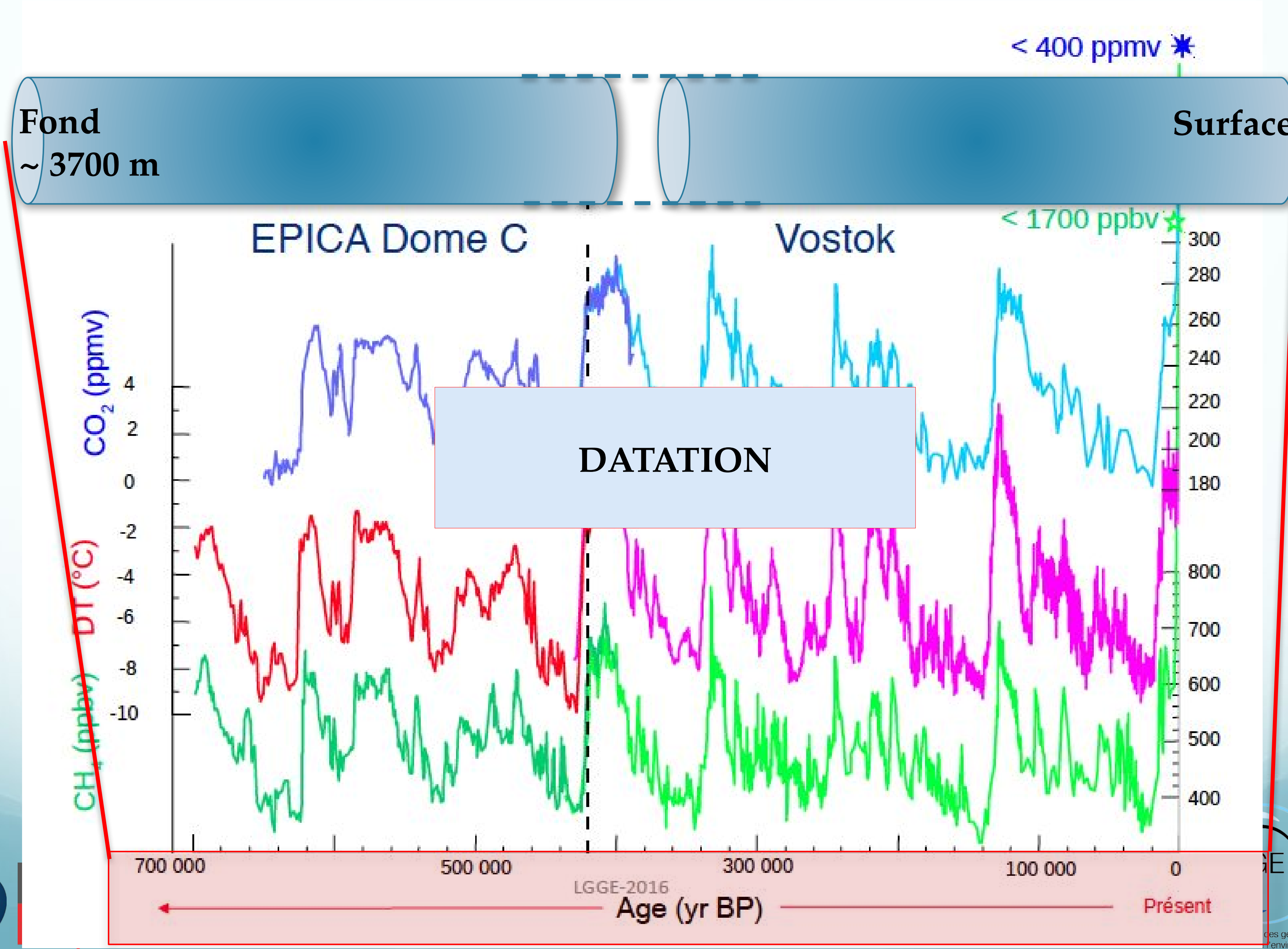




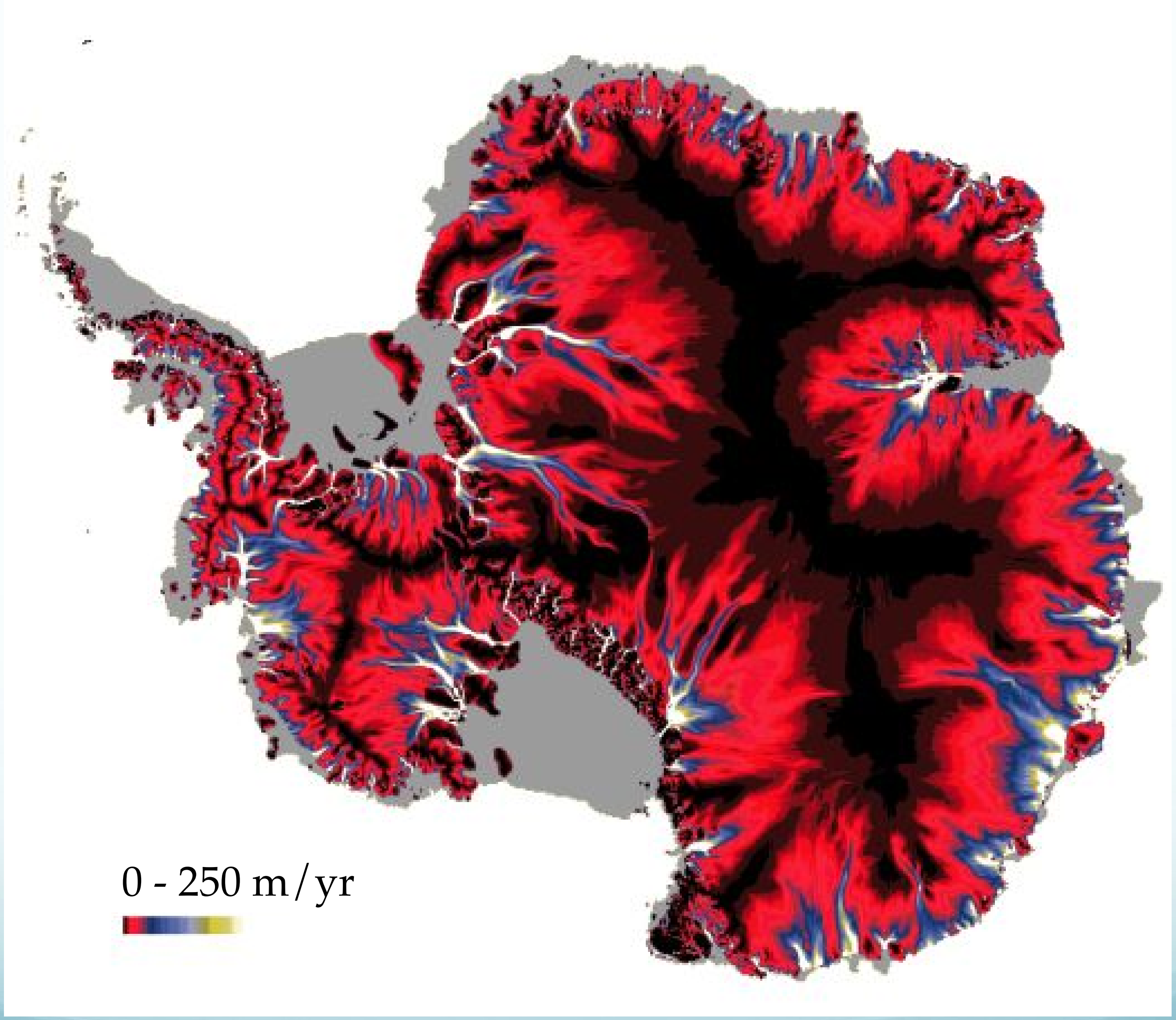
Le climat du passé



Le climat du passé

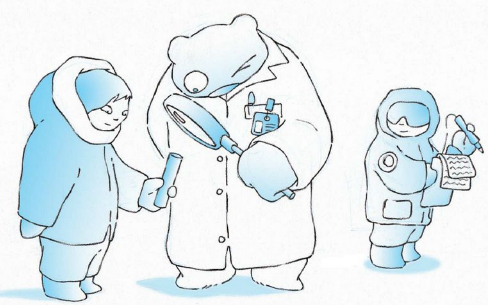


Vue de satellite, la glace s'écoule !



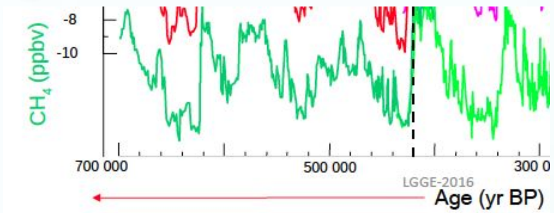
Calottes polaires : climat du passé et du futur

Densification
Deformation

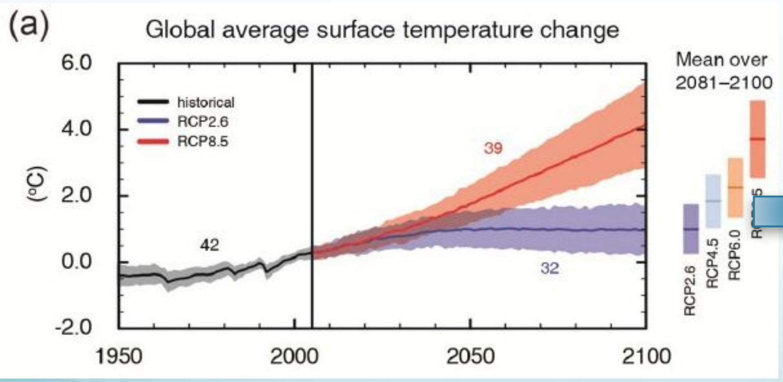


Modélisation de l'écoulement

DATATION

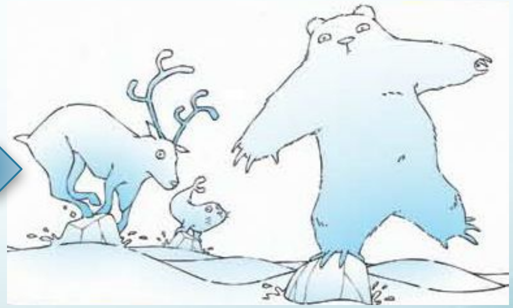


Climat du Futur



Modélisation de l'écoulement

Evolution de la calotte



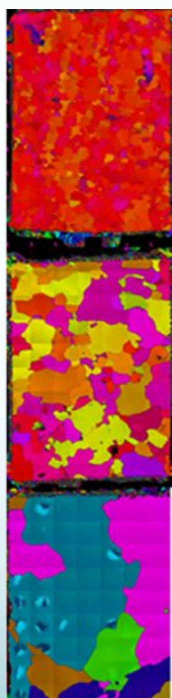
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

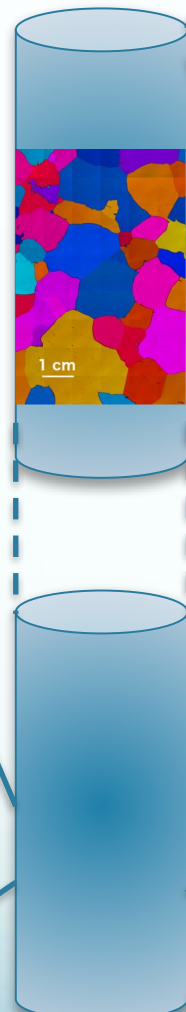
IGE Institut des géosciences de l'environnement

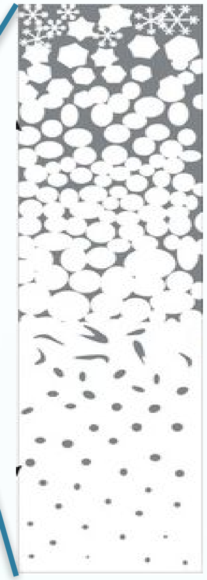
Processus physiques et carottes de glace

DEFORMATION

Microstructures
Textures
→ écoulement

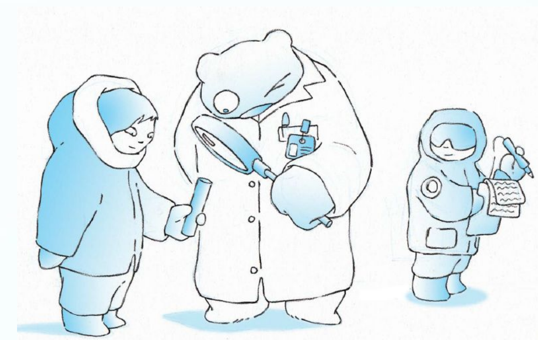




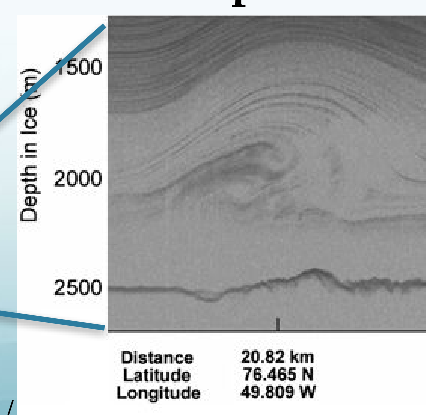


DENSIFICATION
Microstructures poreuses

Delta âge → datation



Couches profondes perturbées – Interaction avec le socle
→ écoulement



Modélisation de l'écoulement : ingrédients

Ecoulement lent
→ **équations de Stockes (fluide)**

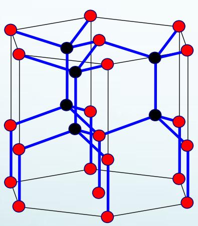
div **u** = 0 ; conservation de la masse

div **σ** + ρ**g** = **0** ; conservation du moment

+ **Comportement visco-plastique**:
S (contrainte) = f (Deformation)

Rheologie
Texture
Recristallisation
…

Polycristal

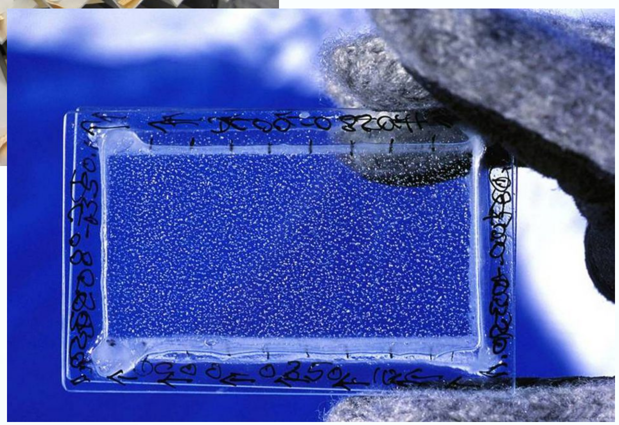


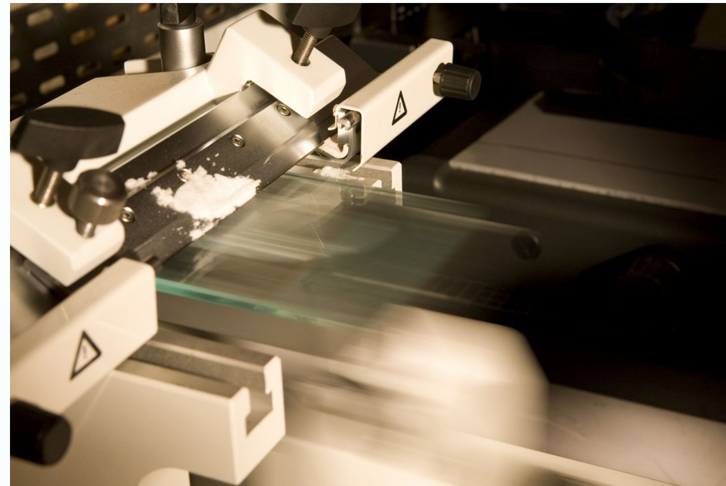
Monocristal

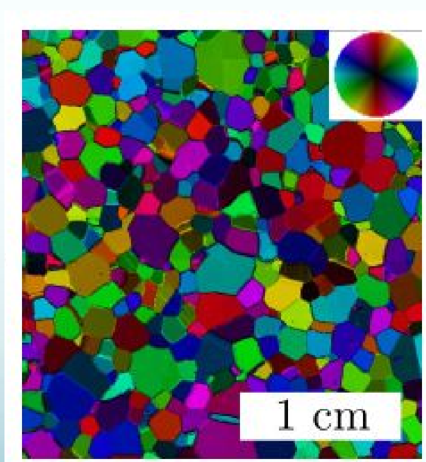
Anisotropie viscoplastique
Hétérogénéités (S, D, …)
…

Microstructures et textures

Lame mince



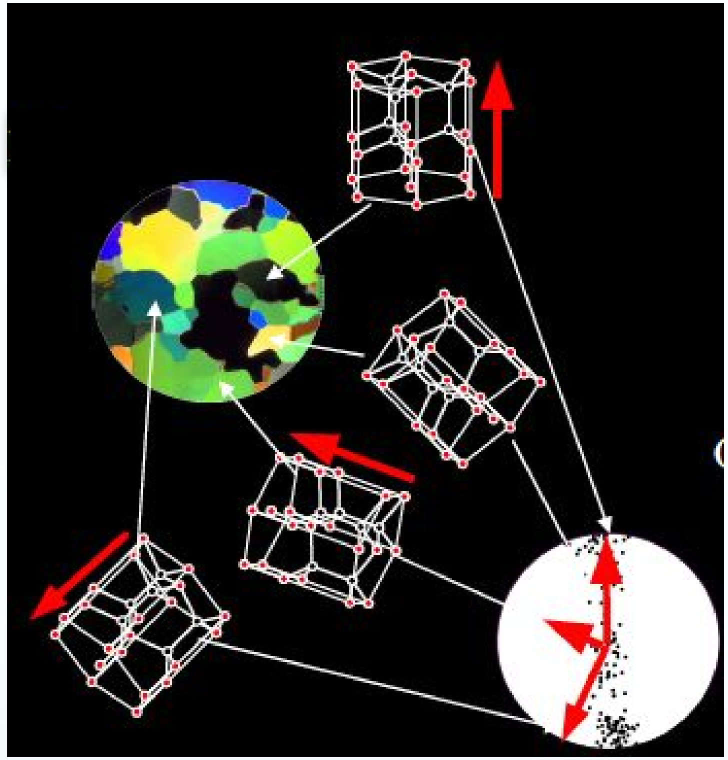




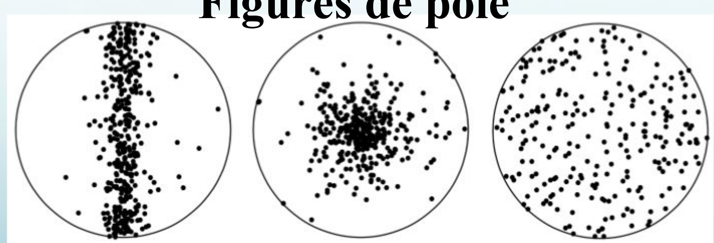
Microstructure
Texture

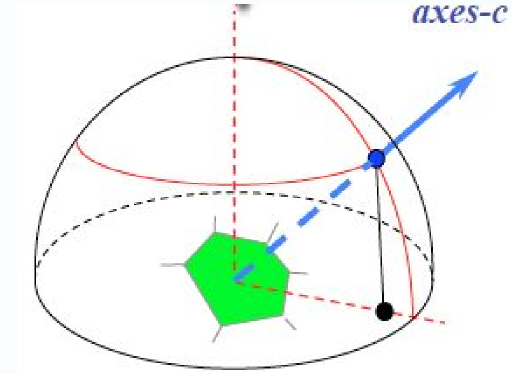
Microstructures et textures

Texture



Figures de pôle





+ Tenseur d'orientation :

$$a^{(2)} = \frac{1}{N}\sum^{N} c \otimes c$$

$$a_1 + a_2 + a_3 = 1$$

$$a_1 \gg a_2 \sim a_3 \; cône$$

$$a_1 \sim a_2 \gg a_3 \; couronne$$

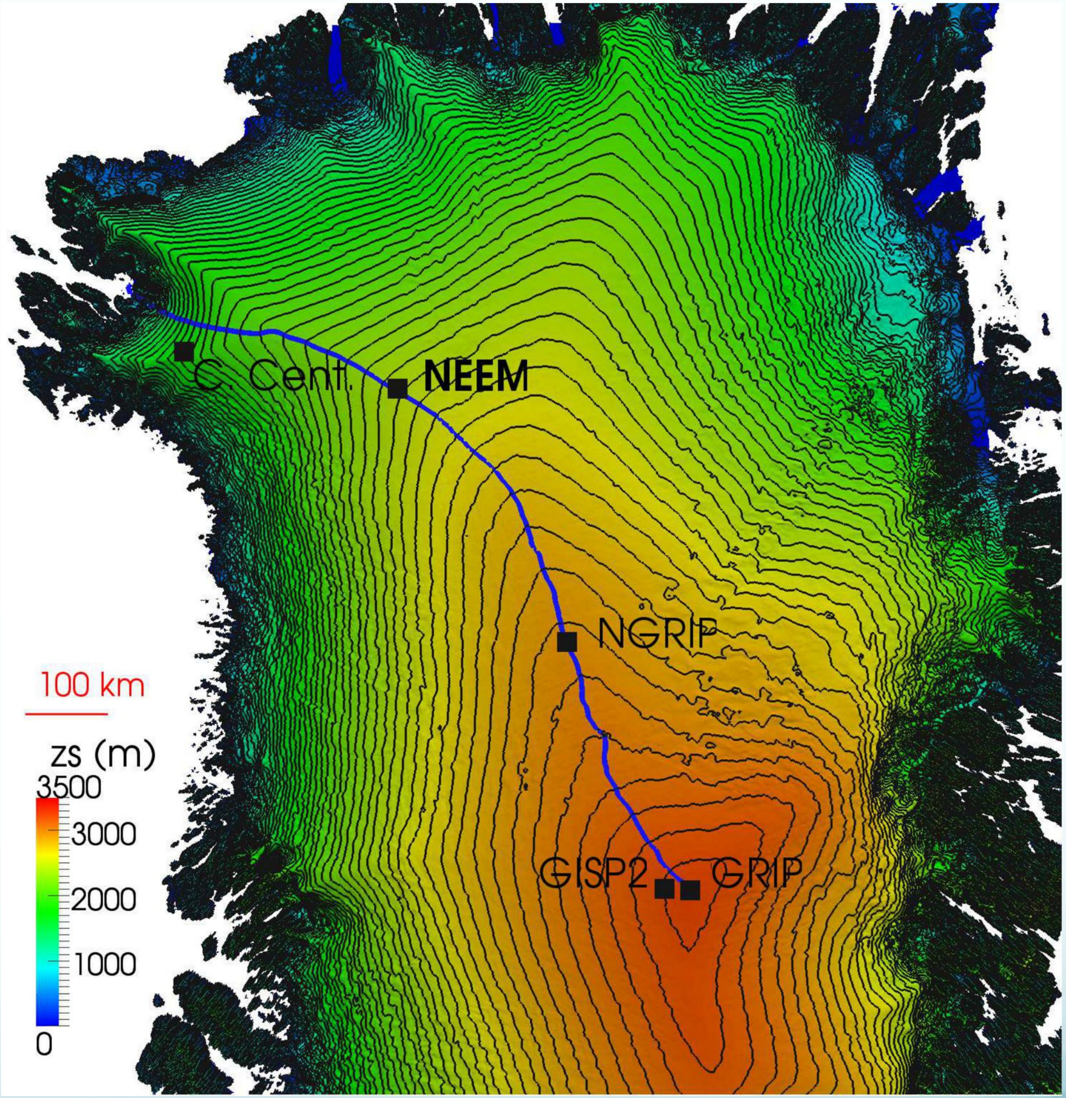
$$a_1 \sim a_2 \sim a_3 \sim 0{,}3 \; isotrope$$

Exemple – Carotte de NEEM

Forée étés 2009 - 2012

Deformation =
Compression +
Cisaillement (au fond)

Vitesse de def. verticale ~ 10^{-10} s^{-1}
Contrainte déviatoire ~ 0.1 MPa

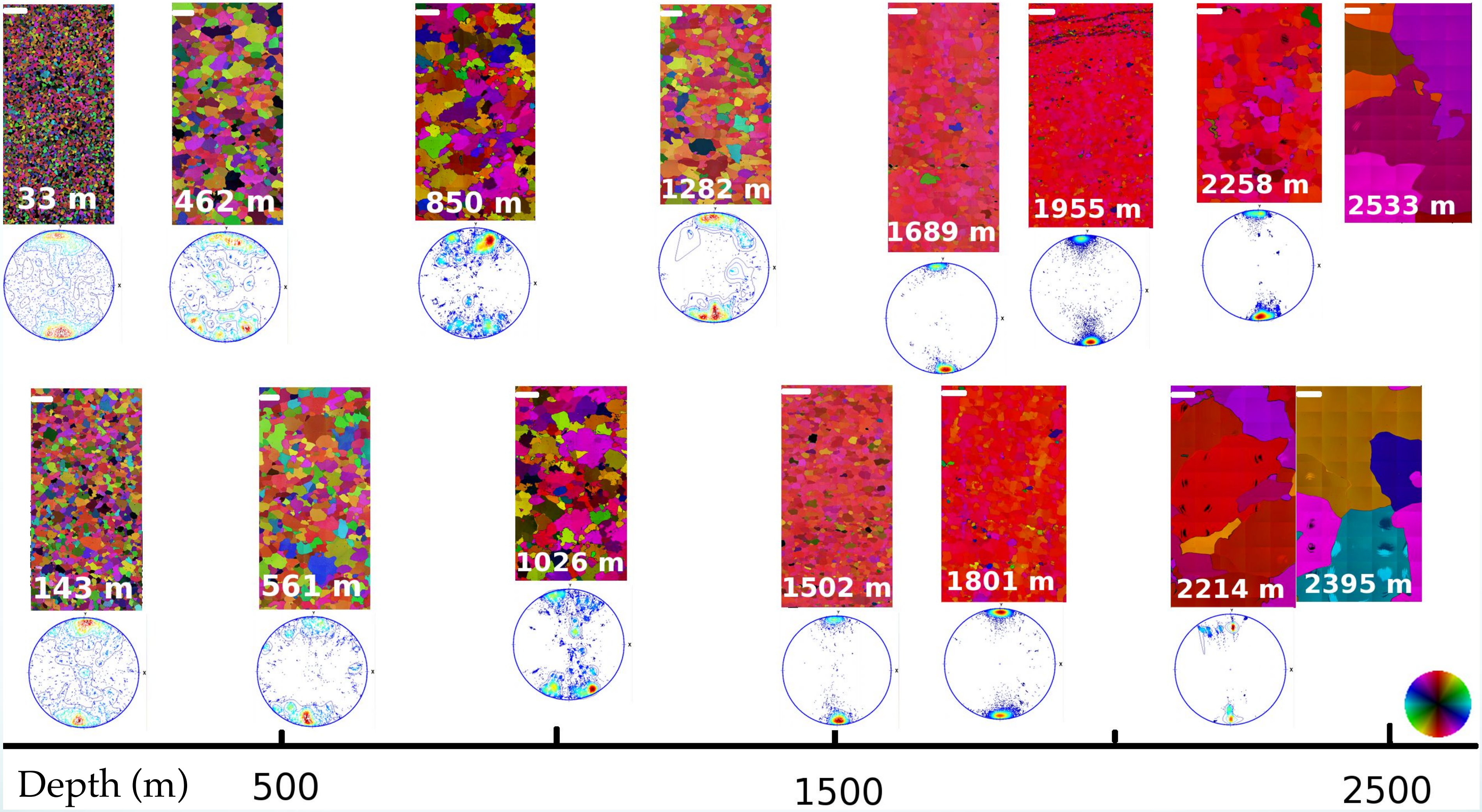


Exemple : carotte de NEEM

Carotte de ~ 2500 m de long

~ 1 lame mince / 10 m = 250 lames minces!

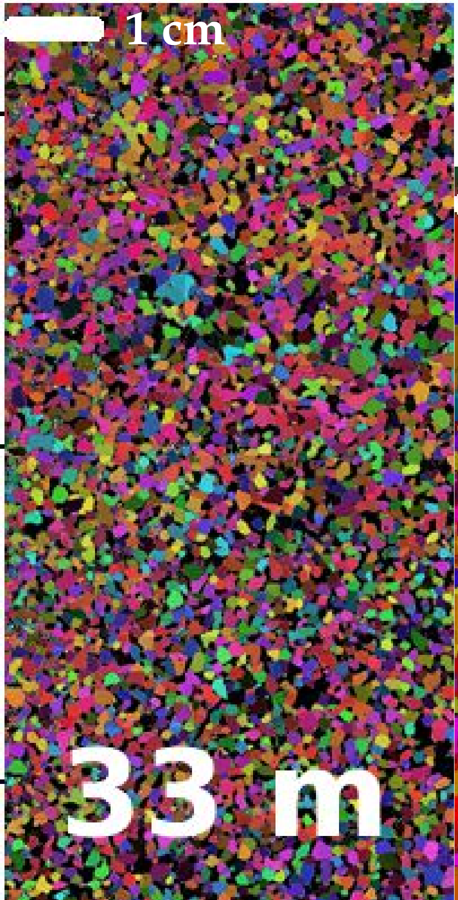
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes
IGE Institut des géosciences de l'environnement



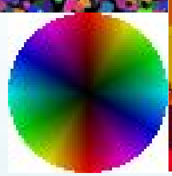
Microstructure et texture sur les lames minces

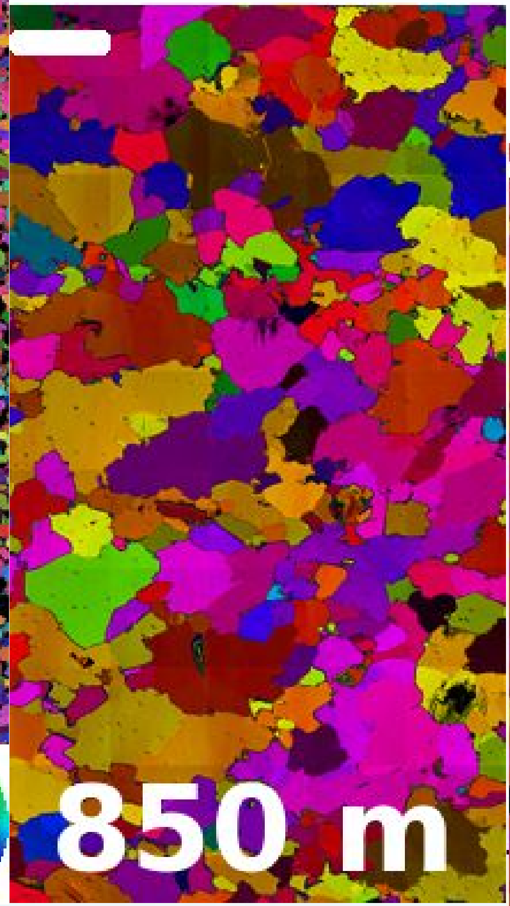
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

IGE Institut des géosciences de l'environnement



Névé

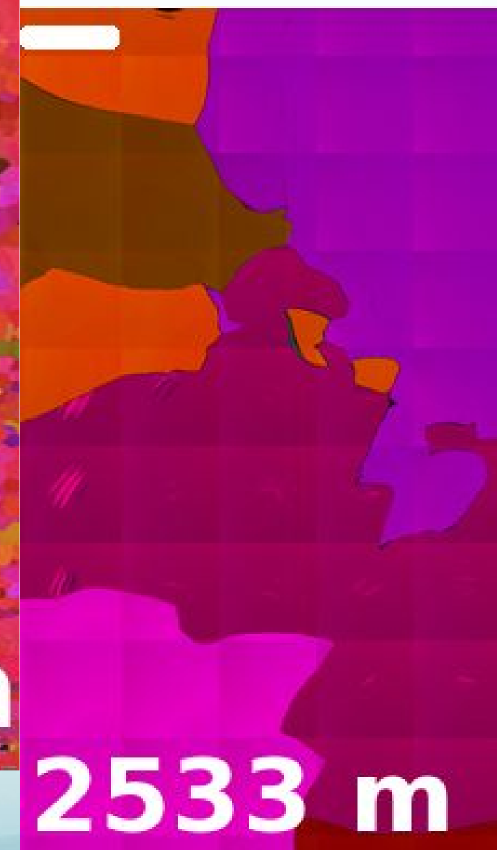


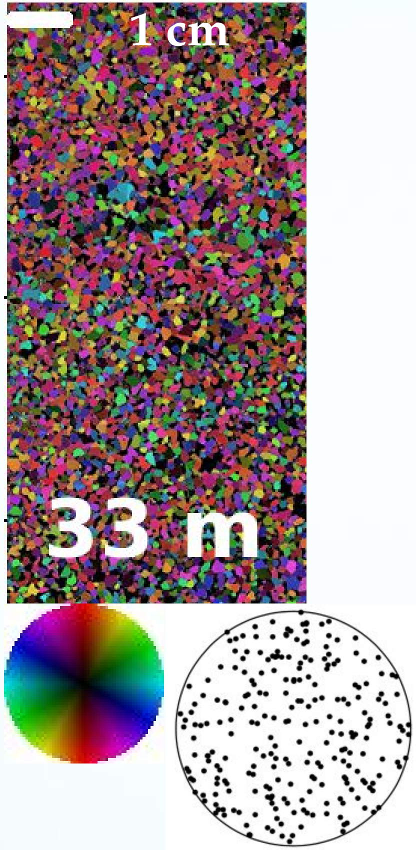


Déformation (compression) viscoplastique + **Recristallisation dynamique**

Cisaillement + **Changement d'origine climatique**!

Plus chaud vers le fond: **recristallisation**





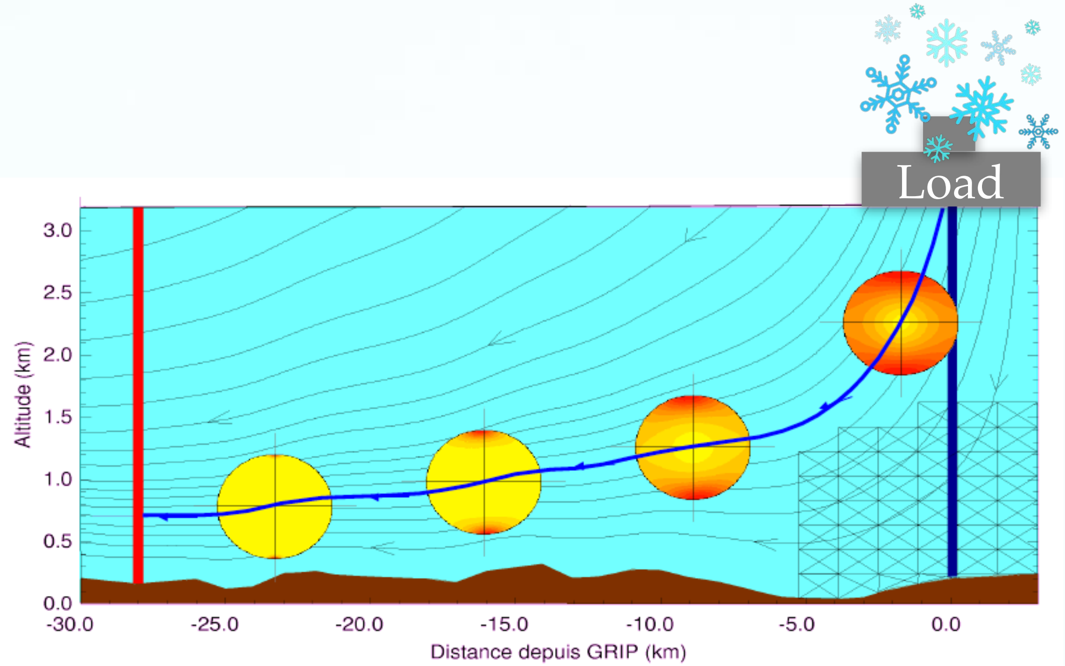
Comportement mécanique ~ isotrope

Comportement mécanique fortement anisotrope

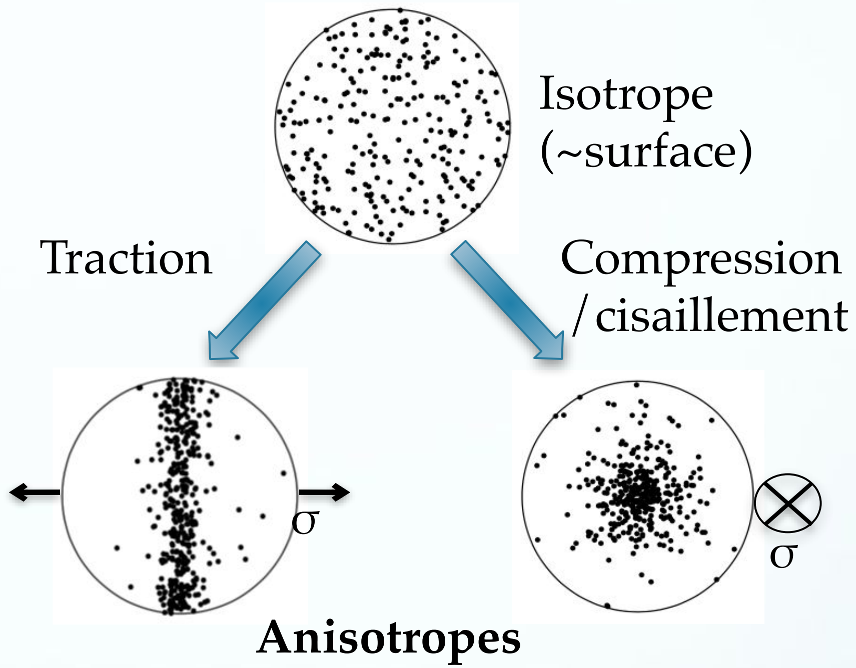
Comportement mécanique ~ isotrope

Déformation + recristallisation → impact sur l'écoulement !!

Textures, déformation et écoulement de la glace



Simulation de l'évolution de la texture autour du site de forage de GRIP (Groenland)



Les textures évoluent avec l'écoulement

ET

Les textures influencent l'écoulement

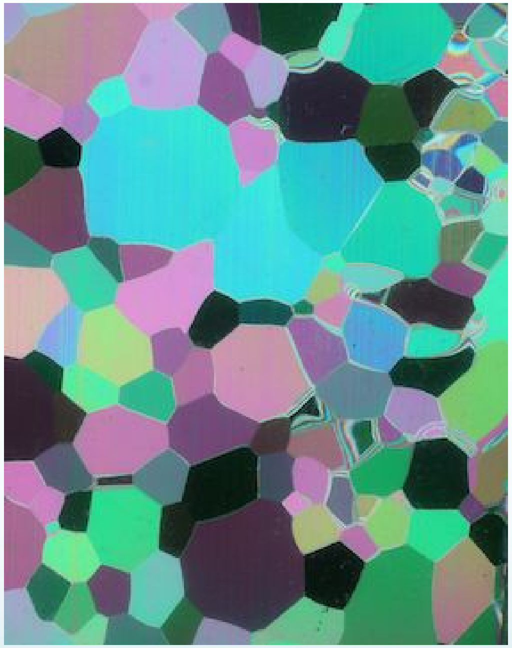
(e.g. texture "cône": dure pour compression, molle pour cisaillement…)

Institut des géosciences de l'environnement

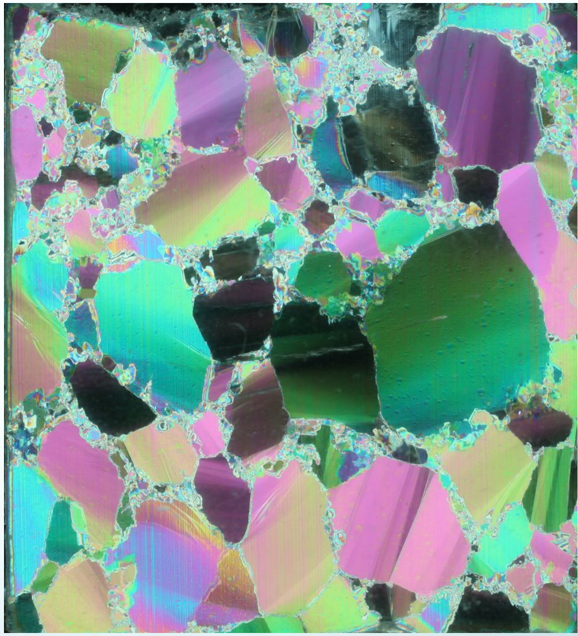
Etude des processus physiques en laboratoire

Exemple pour la

Recristallisation dynamique

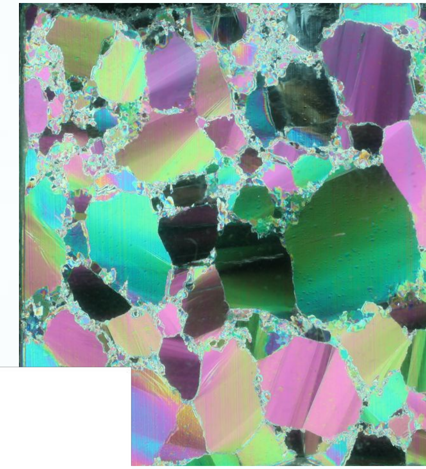


σ, ε, T

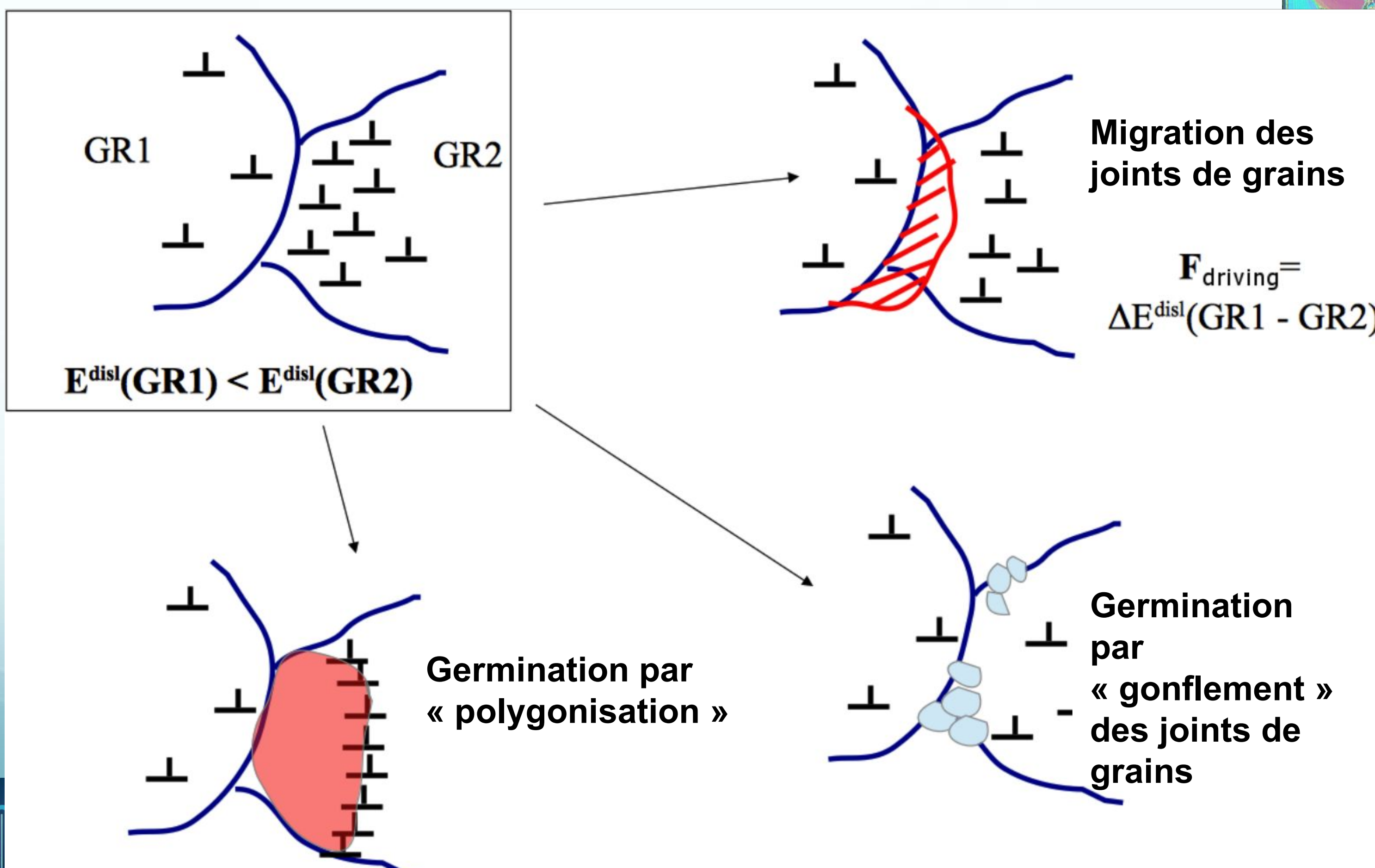


UNIVERSITÉ Grenoble Alpes
IGE Institut des géosciences de l'environnement

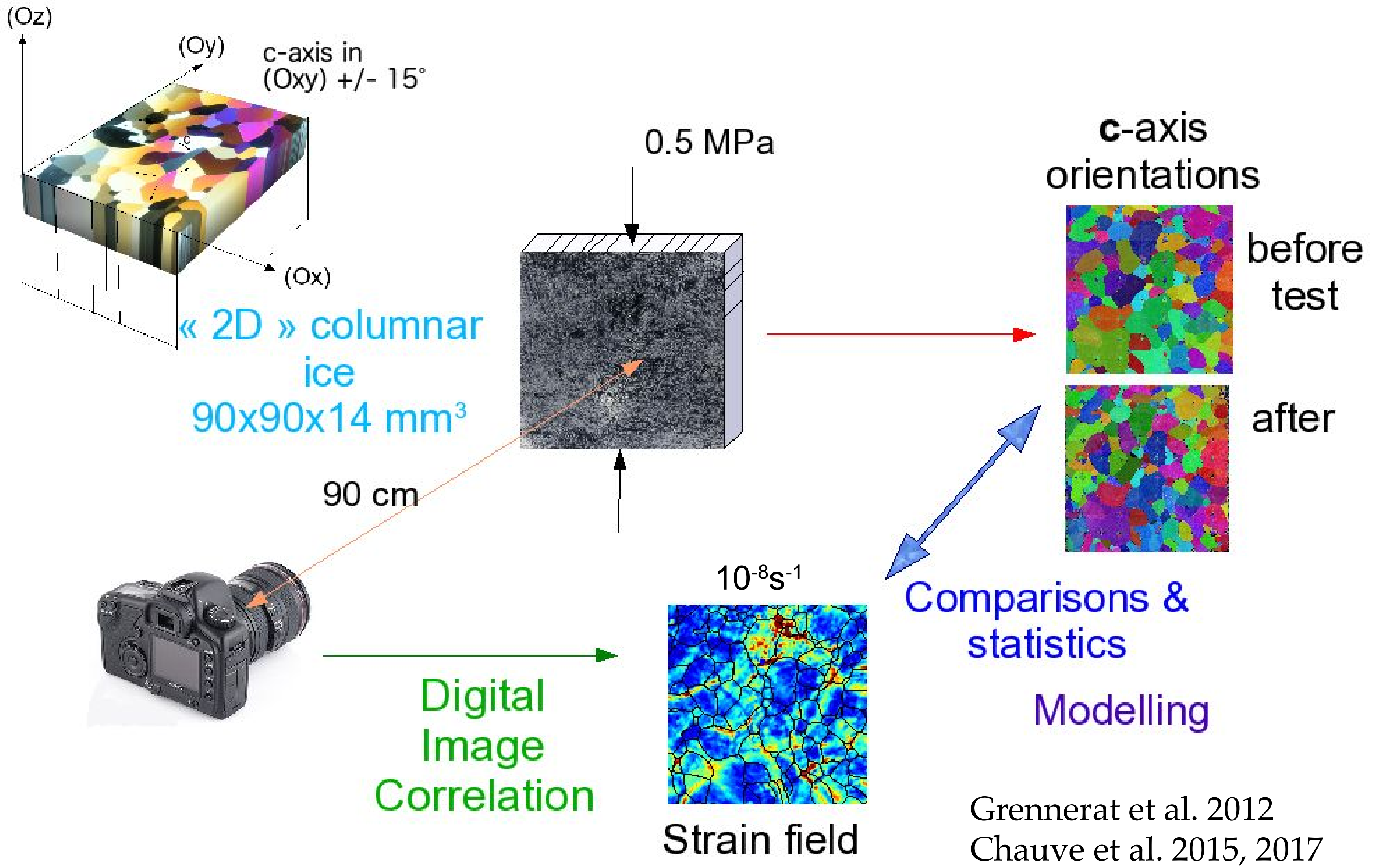
Etude des processus physiques en laboratoire



Déformation viscoplastique ↔ dislocations (défauts linéaires) ↔ énergie de déformation (E^{disl}) → **recristallisation**



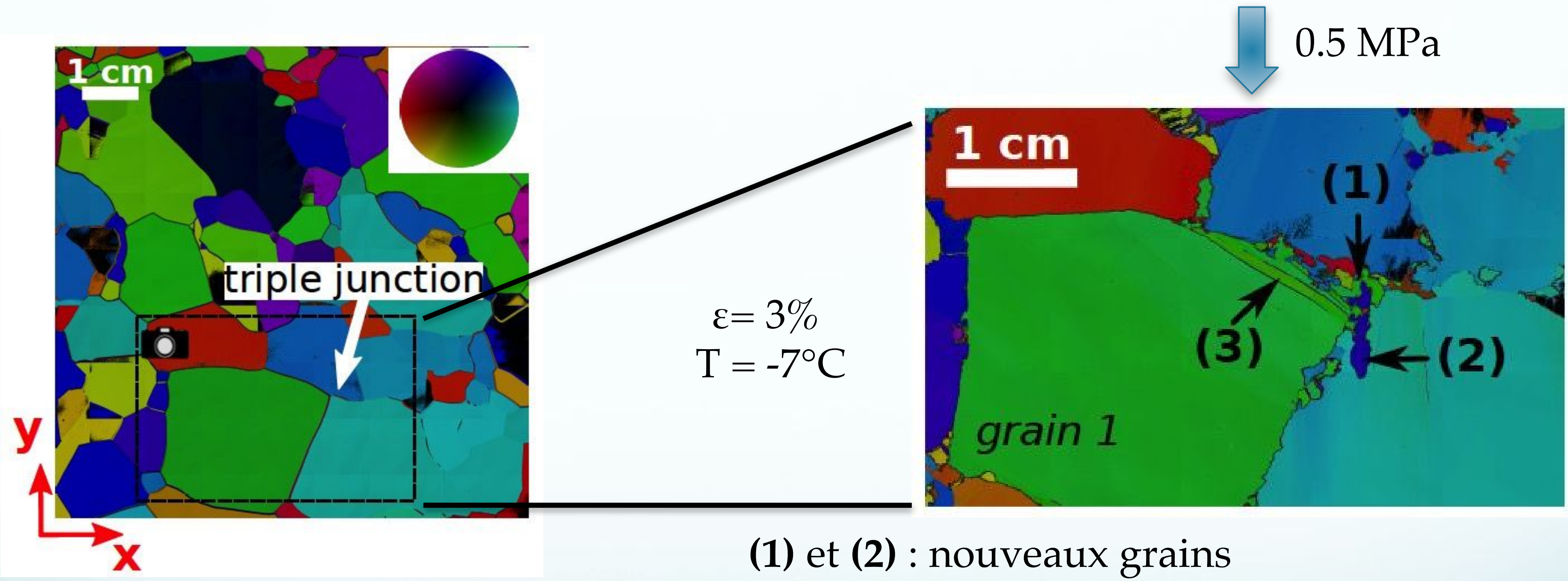
Recristallisation dans la glace suivie par corrélation d'images numériques



Grennerat et al. 2012
Chauve et al. 2015, 2017

Recristallisation dans la glace

Essai de compression - **corrélation d'images numériques**
1 image / 10 min
Resolution en déformation : 0.2%



(1) et **(2)** : nouveaux grains
(3) sous-joints de grains

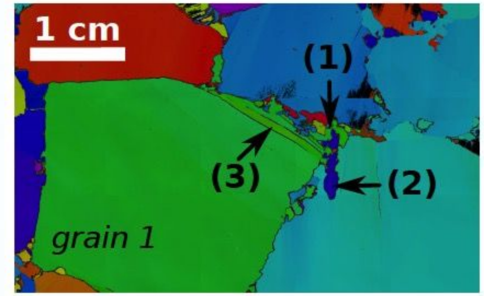
Chauve et al. 2015, 2017

UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

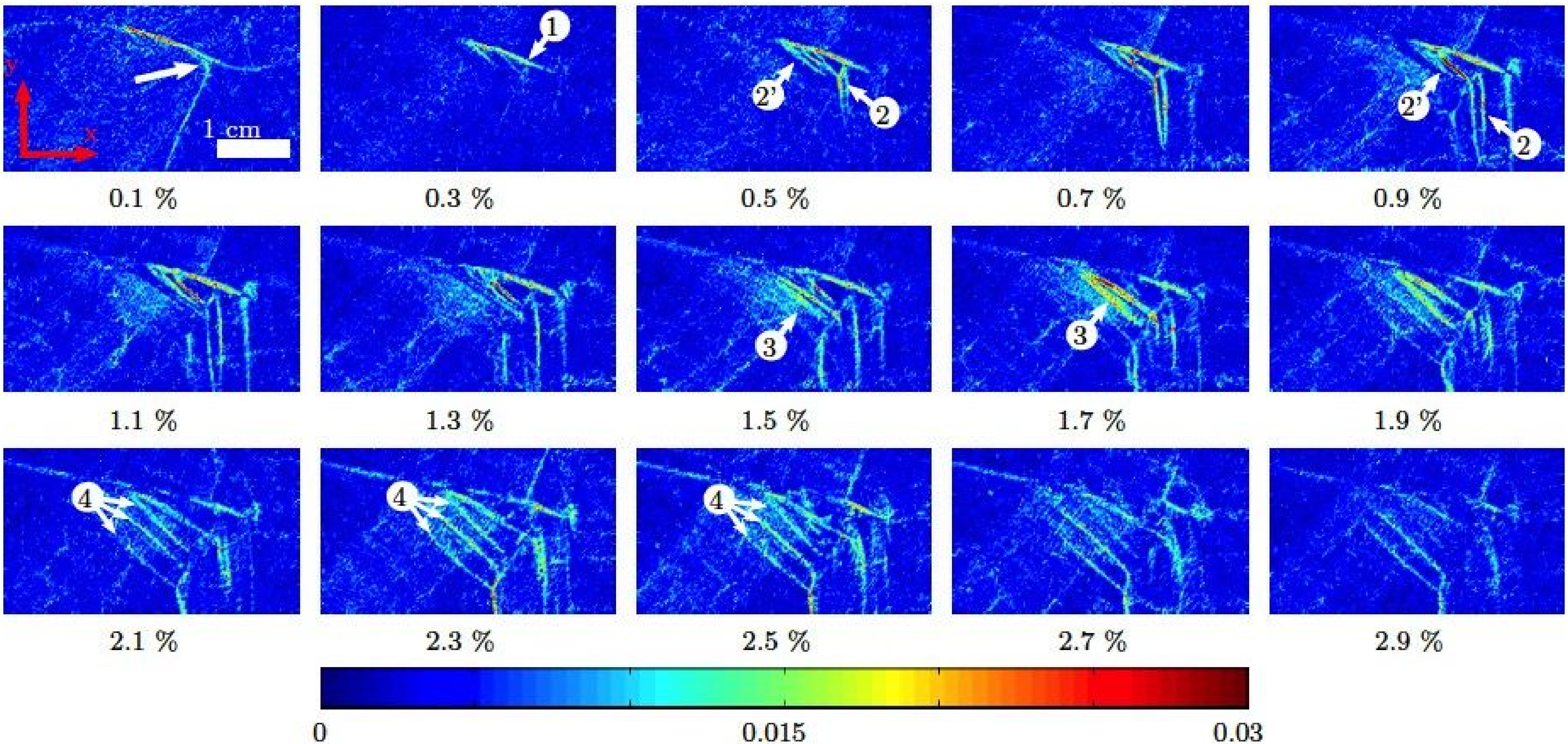
IGE Institut des géosciences de l'environnement

Recristallisation dans la glace

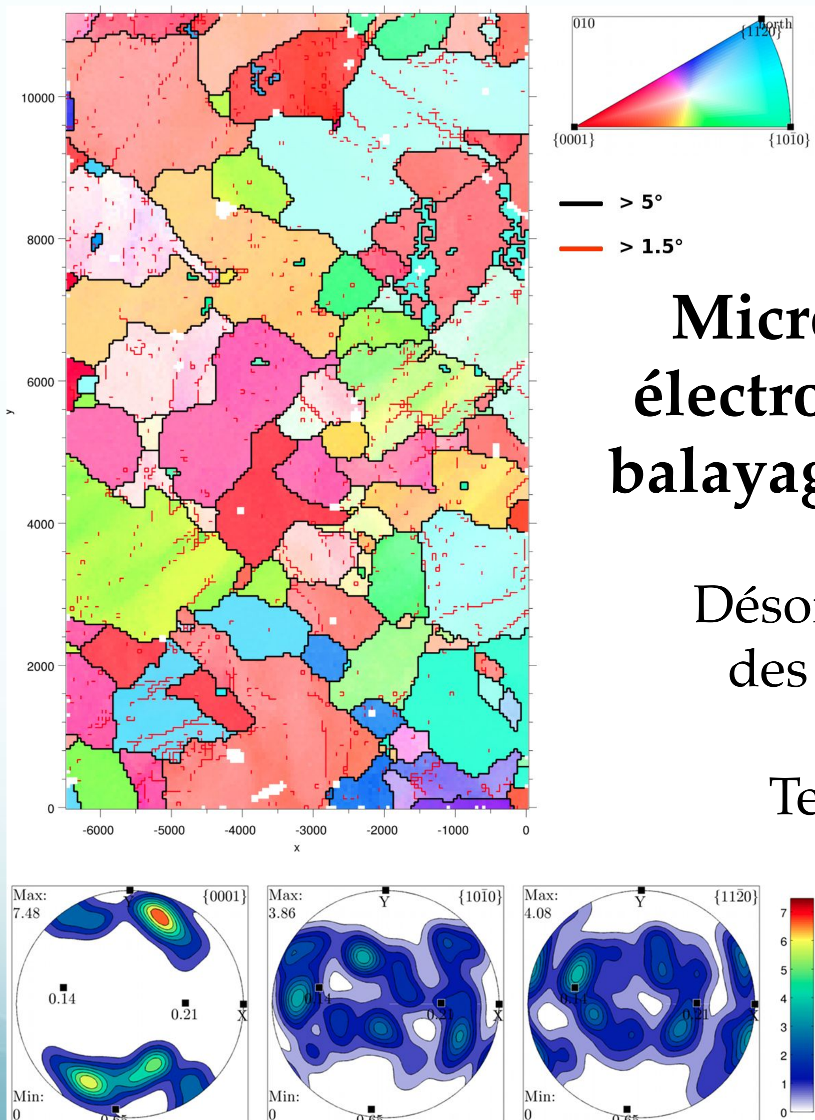
Suivi "en live" des mécanismes de germination via leur impact sur le champ de déformation



$\Delta\varepsilon_{eq}$ pour chaque pas de 0.1% de déformation globale

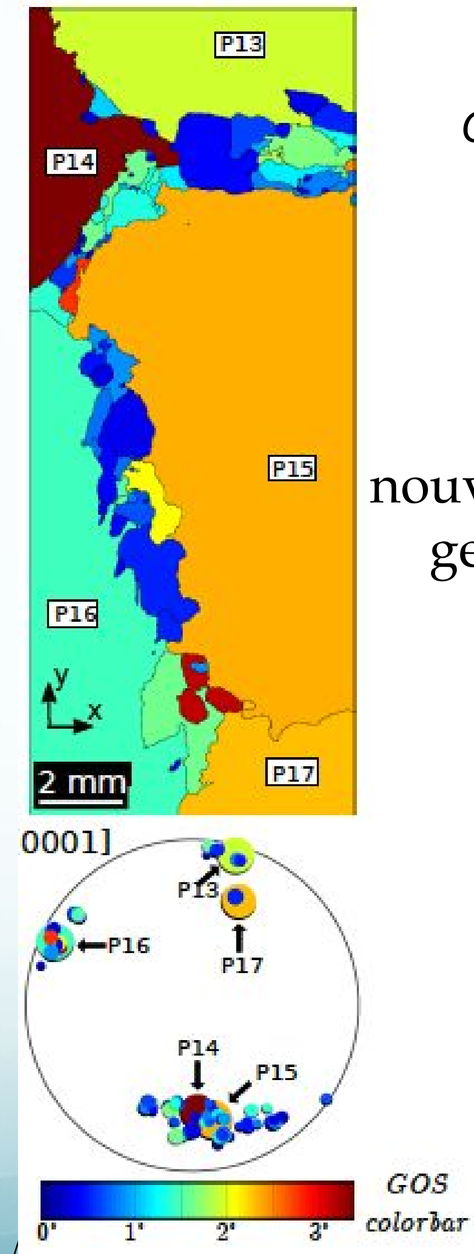


Recristallisation dans la glace - microstructures



Microscope électronique à balayage (MEB)

Désorientation des cristaux
+
Textures

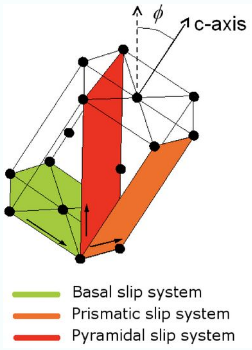


MEB Géosciences Montpellier

Obs des nouveaux grains, germination

Modélisation de l'impact de la DRX sur les textures

Chauve et al. 2024



Anisotropie viscoplastique <-> Loi transverse isotrope continue (Boehler 1987)

$$\mathbf{S} = \eta_n^\star \left(2\alpha_1 \mathbf{D} + 2\alpha_2 \mathbf{M}^D Tr(\mathbf{MD}) + \alpha_3 (\mathbf{MD} + \mathbf{DM})^D\right)$$

$$\eta_n^\star = 2\eta_n \left(\alpha_1 tr(\mathbf{D}^2) + \alpha_2 tr(\mathbf{MD})^2 + \alpha_3 tr(\mathbf{MD}^2)\right)^{\frac{1-n}{2n}}$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{c} \otimes \mathbf{c}$$

S : deviatoric stress   D : deviatoric strain rate

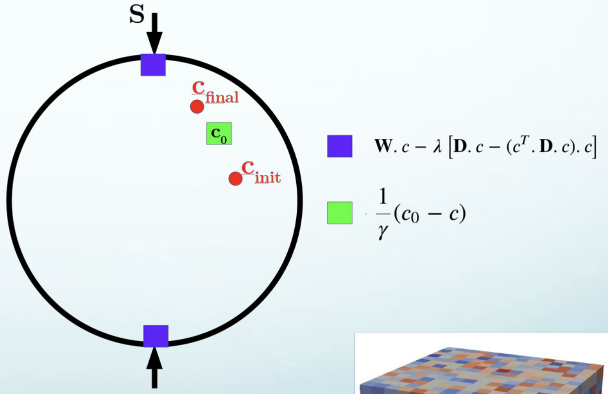
n : stress exponent (= 3) η_n, α_i fitted on lab experiments (Duval et al. 1983)

Textures issues de la recristallisation (DRX):

Rotation de l'axe c due à la déformation + rotation due à la recristallisation dynamique

$$\frac{\partial \mathbf{c}}{\partial t} = \mathbf{Wc} - \lambda \left[\mathbf{Dc} - \left(\mathbf{c^T D c}\right)\mathbf{c}\right] + \frac{1}{\Gamma_{RX}}(\mathbf{c_0} - \mathbf{c})$$

Chauve et al. 2024



DRX -> rotation de l'axe c vers un attracteur c_0

c_0 : maximise la contrainte résolue sur le plan de base (0001)

Modélisation de l'écoulement : ingrédients

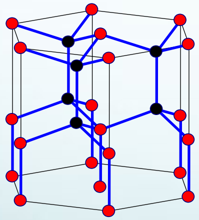
Ecoulement lent
→ **équations de Stockes (fluide)**

div **u** = 0 ; conservation de la masse
div **σ** + ρ**g** = **0** ; conservation du moment

+ **Comportement visco-plastique**: **S (contrainte)** = **f (Deformation)**

http://elmerice.elmerfem.org/
Gagliardini et al. 2013

Rheologie
Textures
Recristallisation

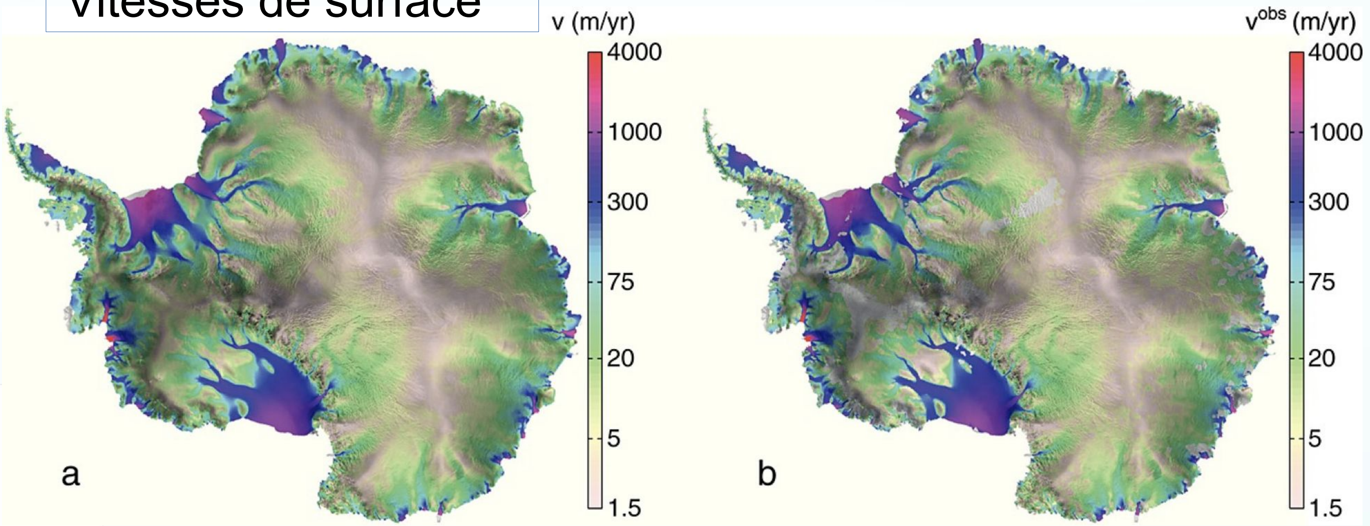


Monocristal

Anisotropie viscoplastique
Hétérogénéités (S, D, …)
…

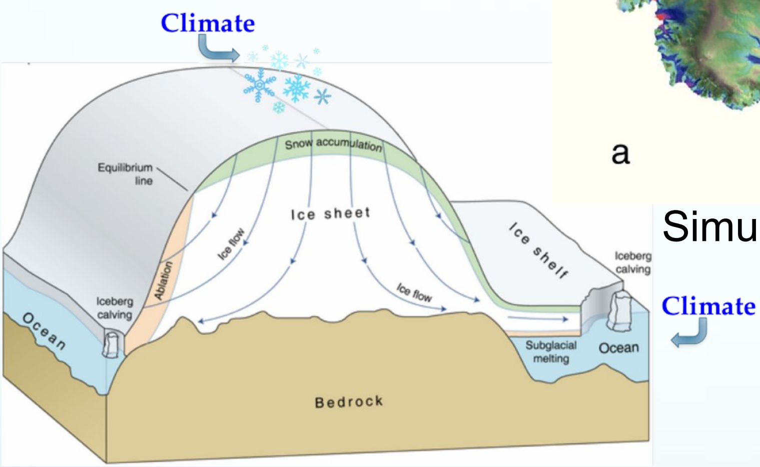
Modélisation de l'écoulement : Antarctique

Vitesses de surface



Simulations Elmer/Ice

Observations satellite

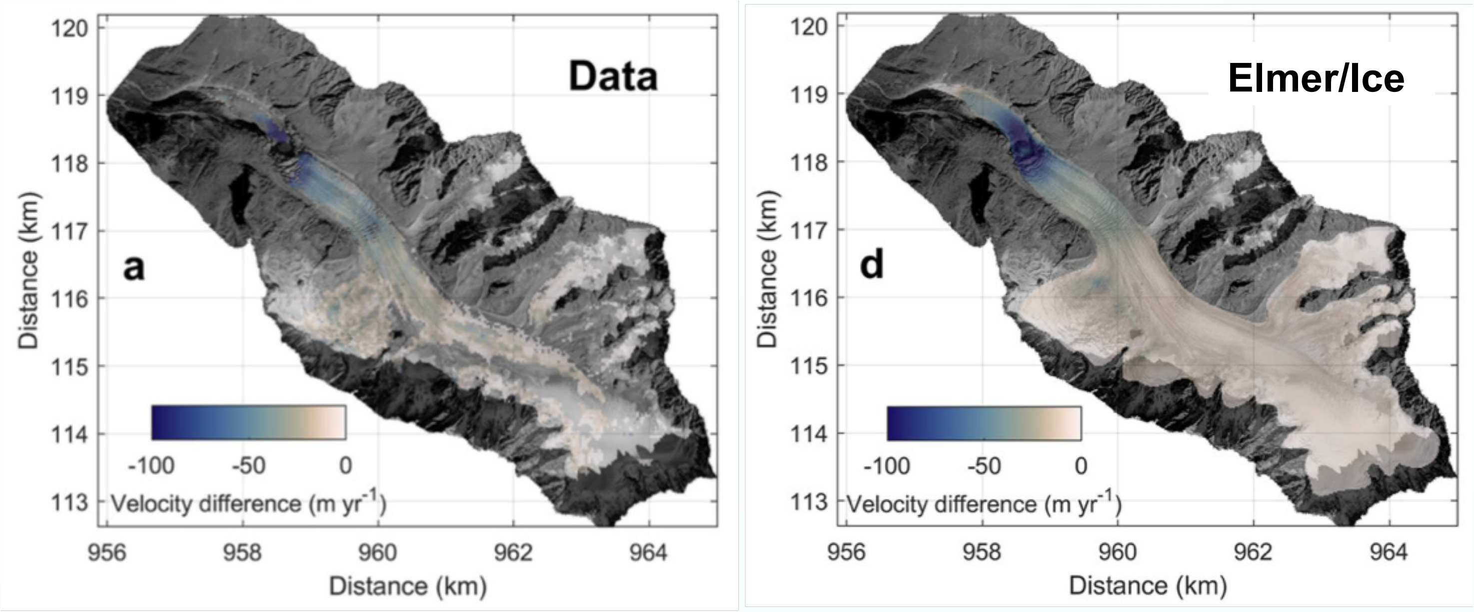


INGREDIENTS

- Modélisation full-stockes de l'écoulement
- Résolution spatiale 3 km sur la côte
- Inversion des paramètres de friction basale
- Viscosité isotrope : loi non linéaire dite « de Glen »

Modélisation de l'écoulement : les glaciers

Différences vitesses de surface 2018-2003, glacier d'Argentière



From Gilbert et al. 2023

INGREDIENTS

- Modélisation full-stockes de l'écoulement
- Résolution spatiale 3 km
- Inversion des paramètres de friction basale
- Viscosité isotrope : loi non linéaire dite « de Glen »
- Inversion de l'exposant des contraintes (n) via mesures locales d'inclinométrie

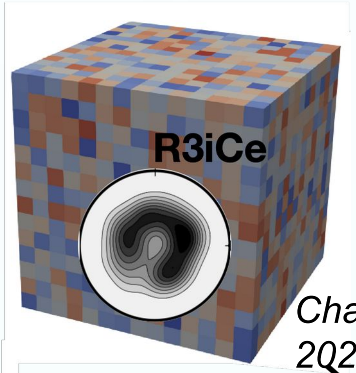
Modélisation de l'écoulement et évolution des textures

- Loi anisotrope (GOLF, Gillet-Chaulet et al. 2006)
- Intelligence Artificielle ? Tannous et al. 2024

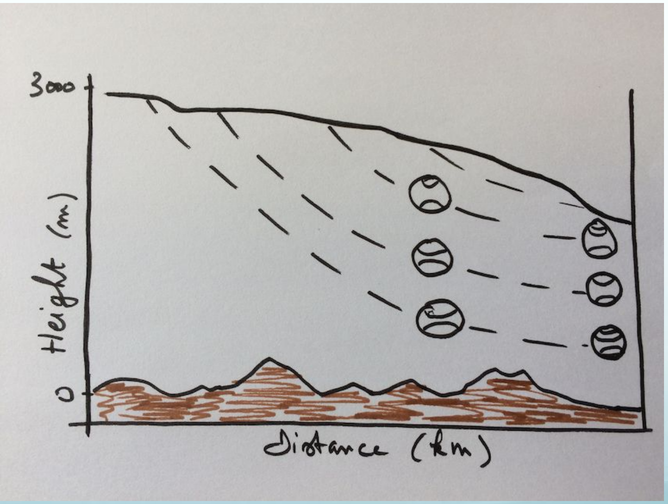
http://elmerice.elmerfem.org/

Gagliardini et al. 2013

- Avec recristallisation ?



Chauve et al. 2024



Institut des géosciences de l'environnement

Ce que vous pouvez retenir

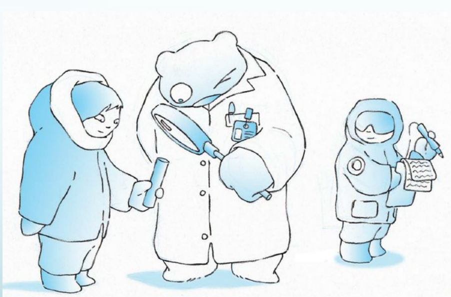
Analyser les propriétés physiques le long des forages permet de comprendre et modéliser la déformation de la glace

Les modèles grande échelle sont nécessaires pour

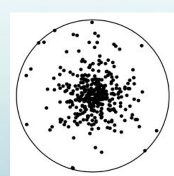
- Interpréter les données climatiques (datation)
- Prédire l'évolution des calottes dans un climat changeant

Modéliser les mécanismes à grande échelle demande

- Des connaissances précises à petite échelle (ex. labo)
- Des modèles à base physique
- Des méthodes de changement d'échelle

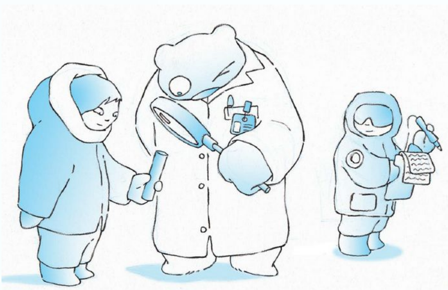


$$\dot{\varepsilon} = f(\sigma, texture, etc.)$$

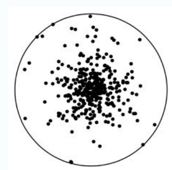


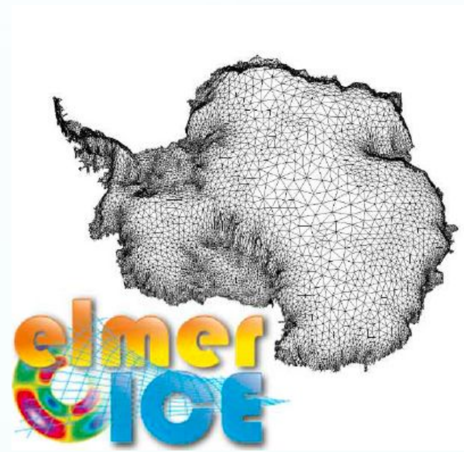
Merci à

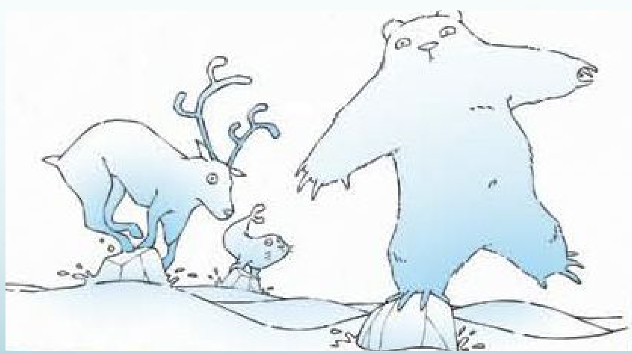
Paul Duval, Fanny Grennerat, Thomas Chauve, <u>Olivier Castelnau</u>, <u>Hervé Moulinec</u>, Baptiste Journaux, Andréa Tommasi, David Georges, Fabrice Barou, Olivier Gagliardini, Martin Thiriet, <u>Antonin Hilzheber</u>, etc.

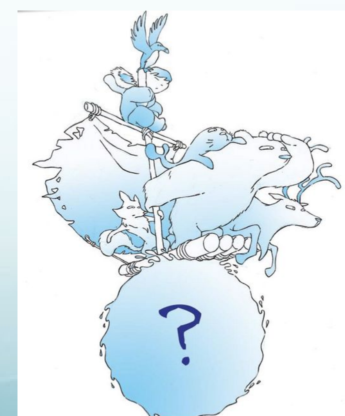


$$\dot{\varepsilon} = f\left(\sigma, texture, etc.\right)$$







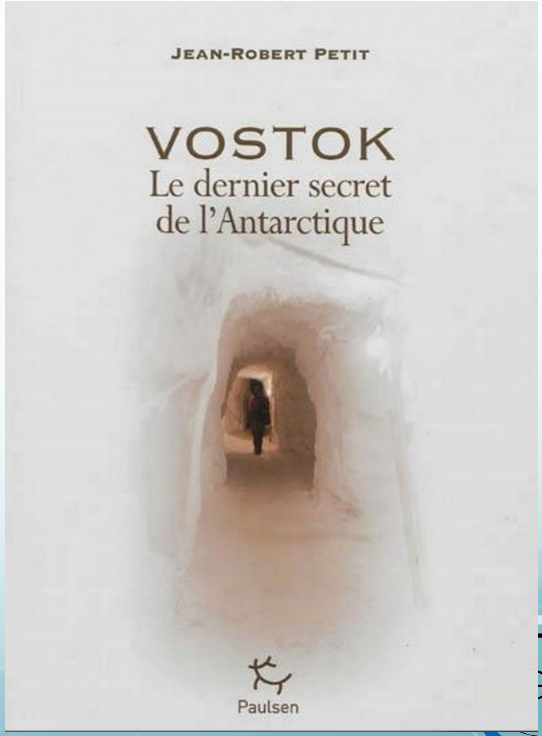


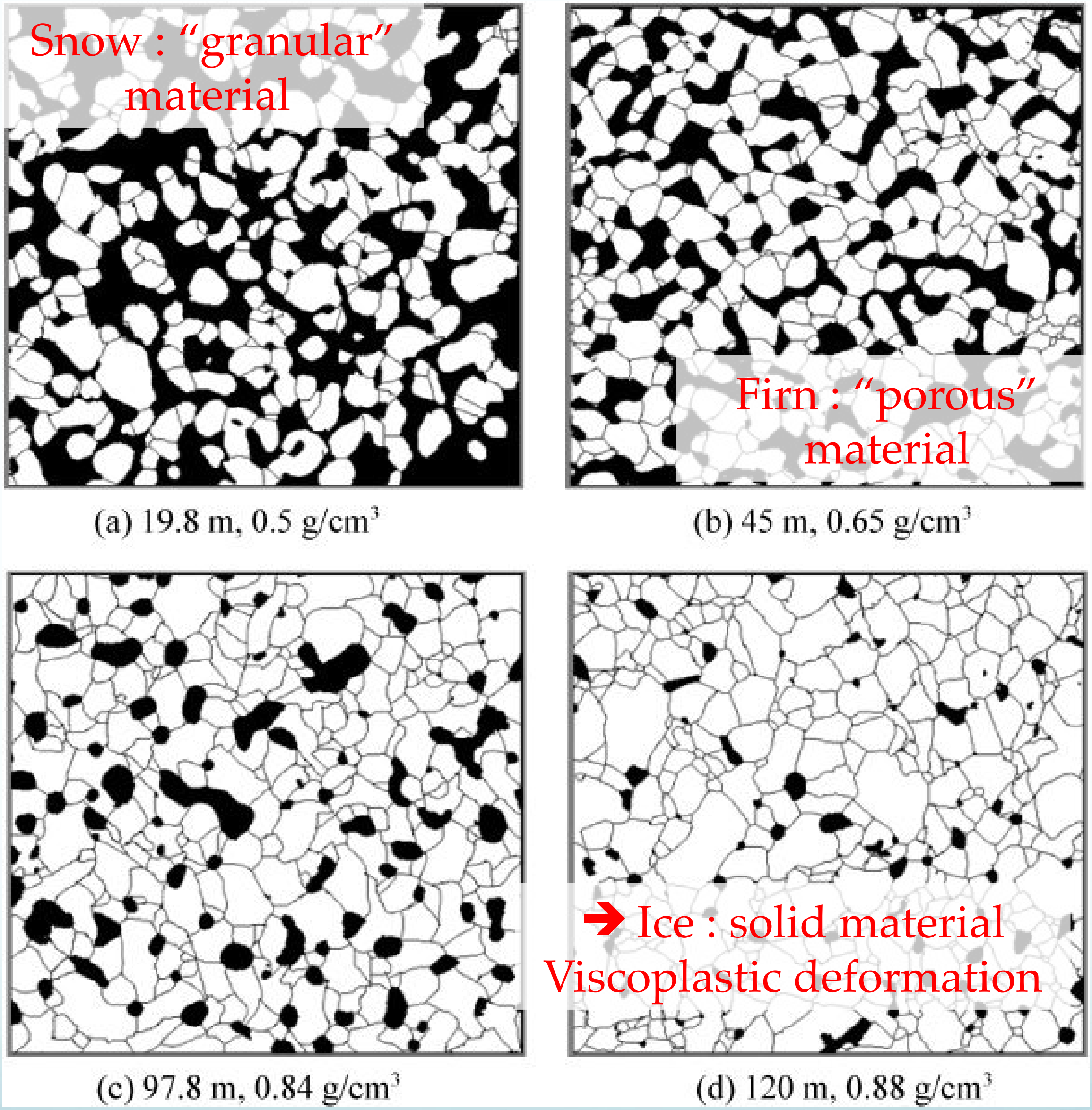
Remonter l'histoire d'un climat grâce aux forages de glace…
… une longue histoire qui remonte à la Guerre Froide!

Je vous conseille

- La Glace et Le Ciel (Luc Jacquet, avec Claude Lorius), laglaceetleciel.com

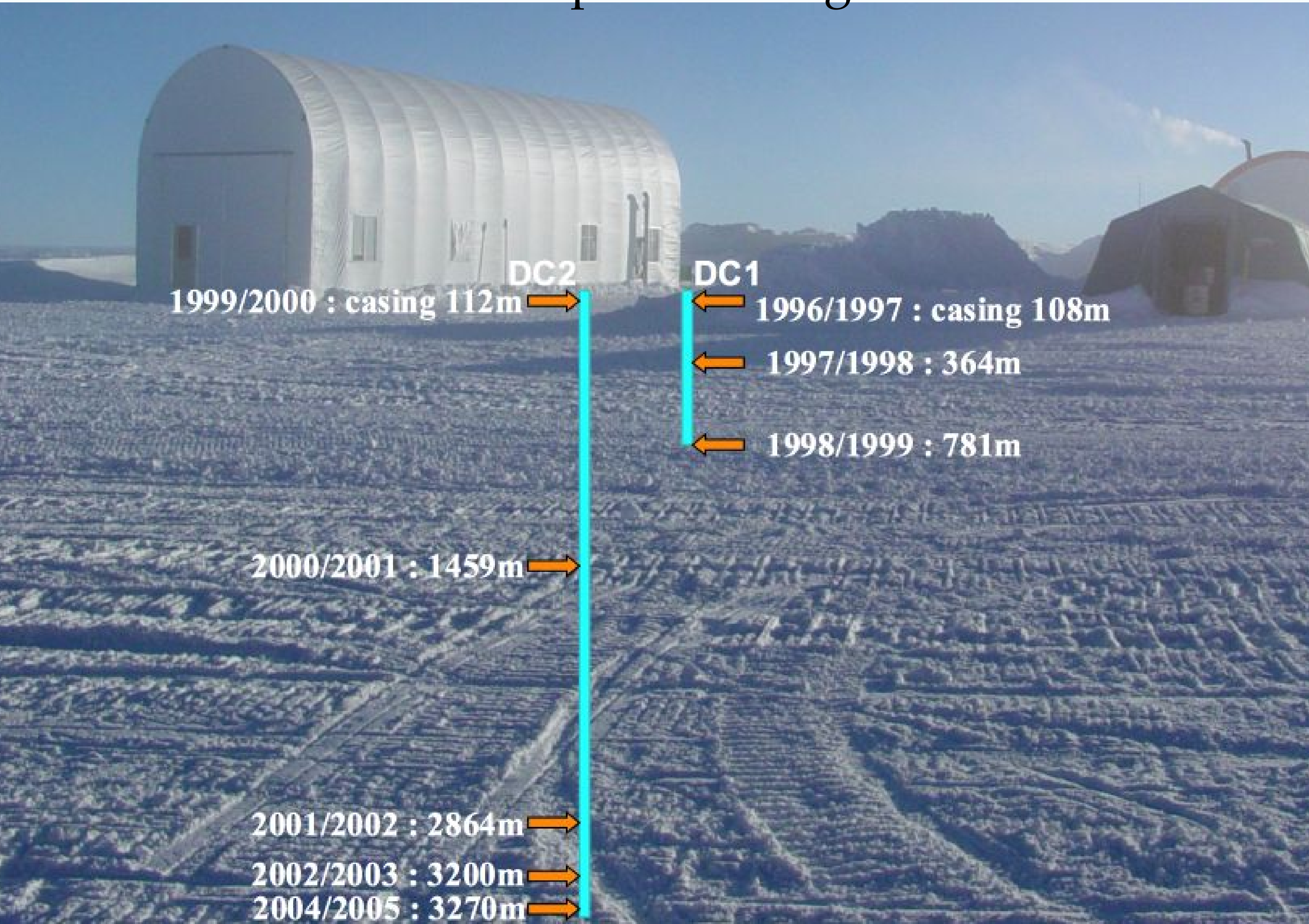
- Vostok, de Jean-Robert Petit, l'histoire d'une véritable aventure scientifique qui a défié le temps et la politique!



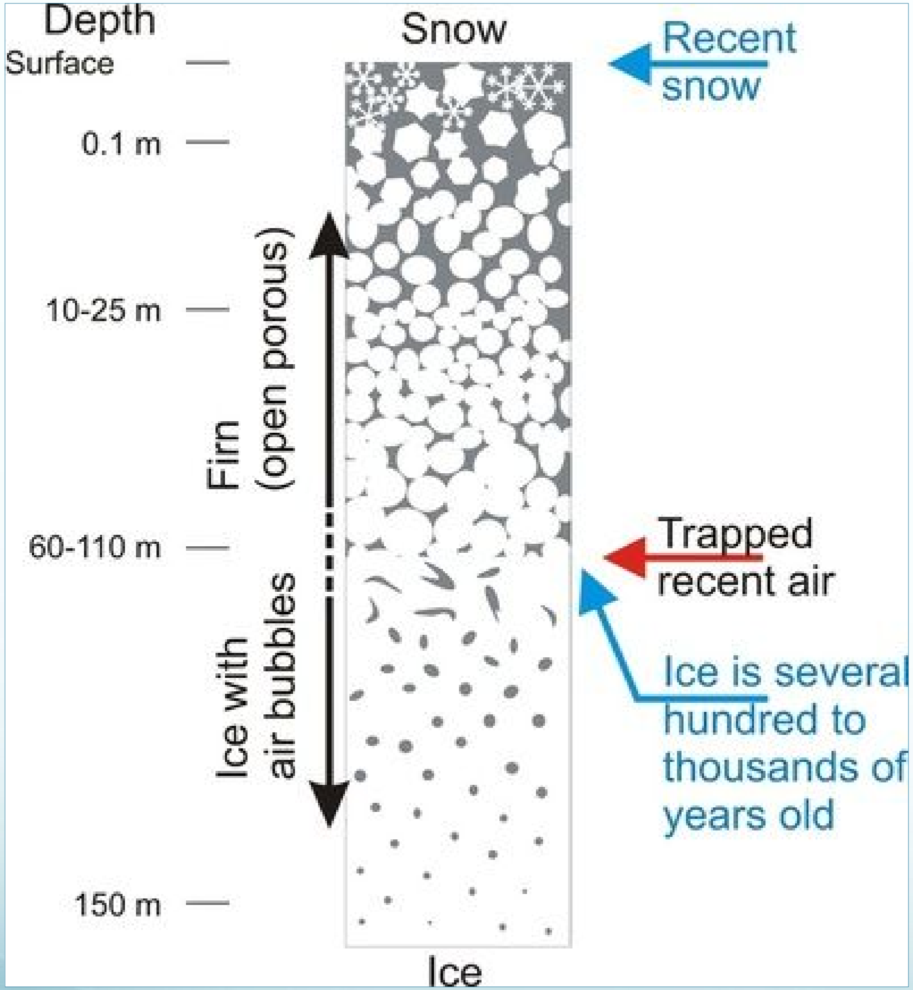


(a) 19.8 m, 0.5 g/cm³ (b) 45 m, 0.65 g/cm³ (c) 97.8 m, 0.84 g/cm³ (d) 120 m, 0.88 g/cm³

EPICA Dome C – Les étapes du forage



Snow – firn – ice: densification



From snow to ice:
- Pore close-off
- Trapping of climatic history

In gaz bubbles: greenhouse gases
In ice: temperature (isotopic thermometre)

Difference between ice and air ages :
Δage
100 to more than 2500 yrs!

Crucial ingredient for datation!
Requires modeling of densification processes