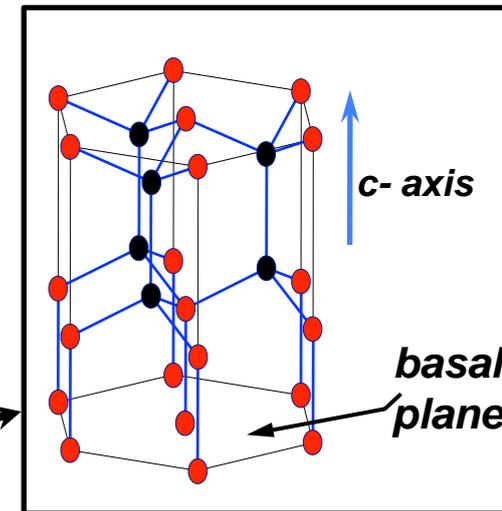
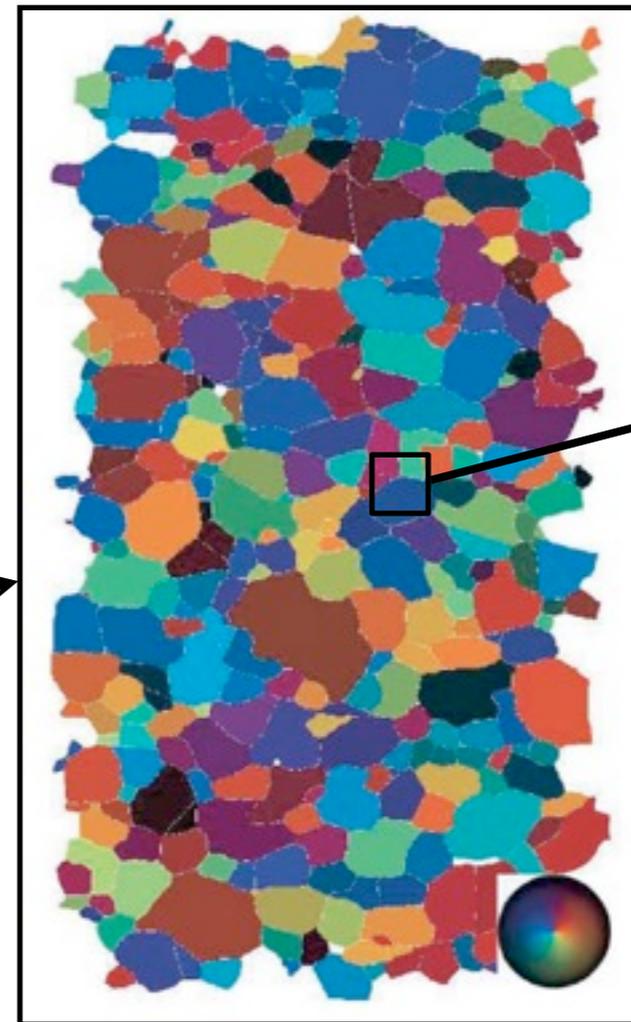
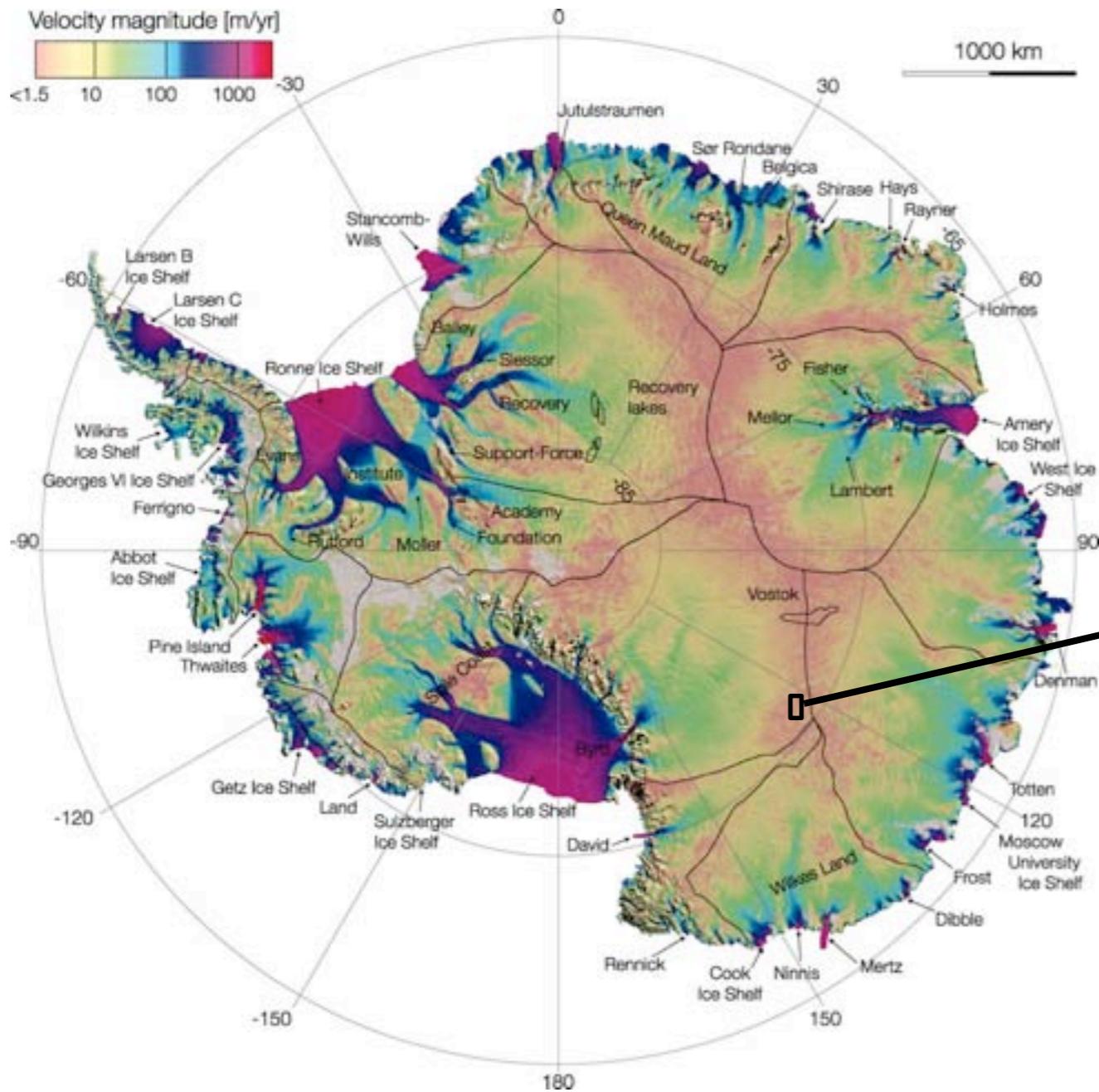
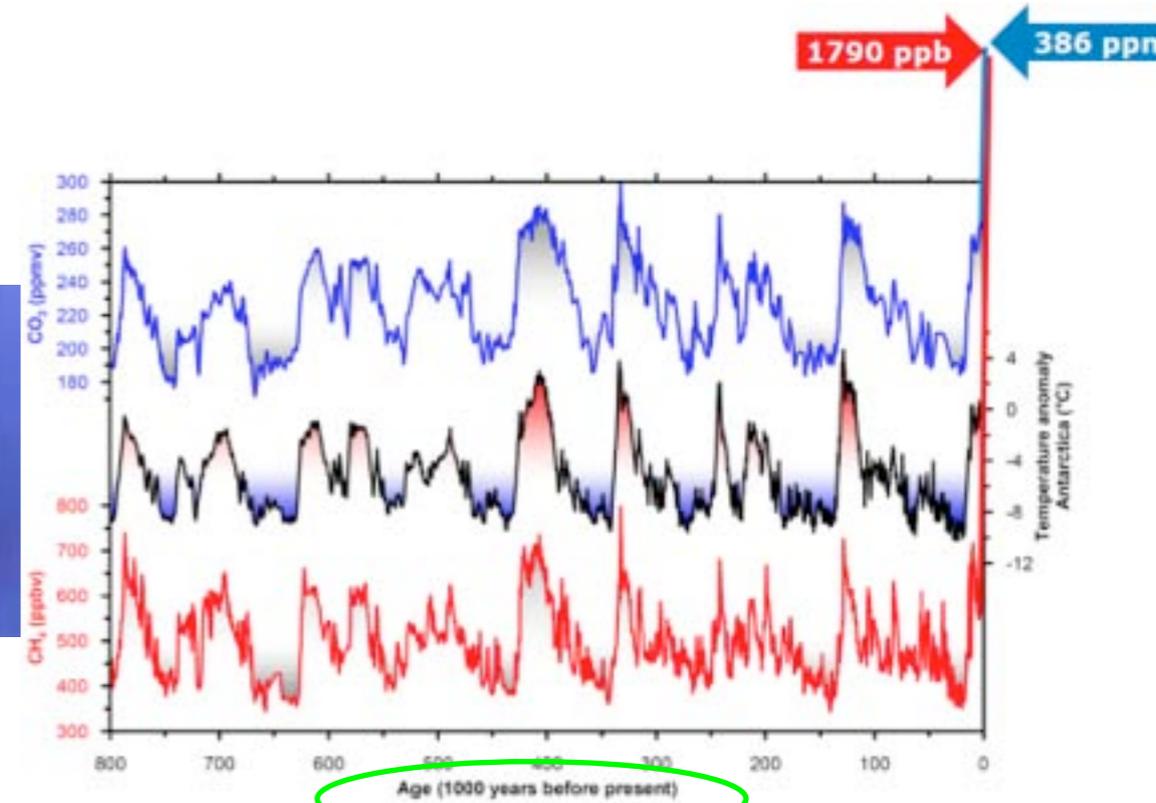
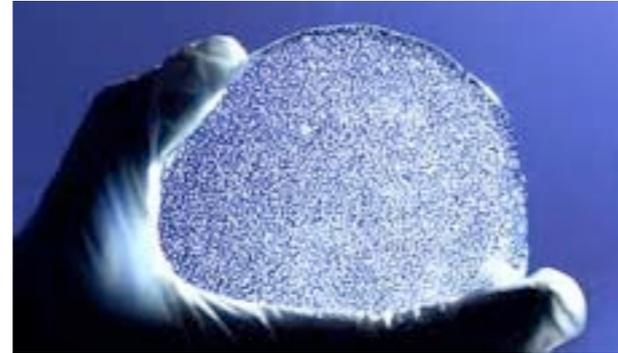
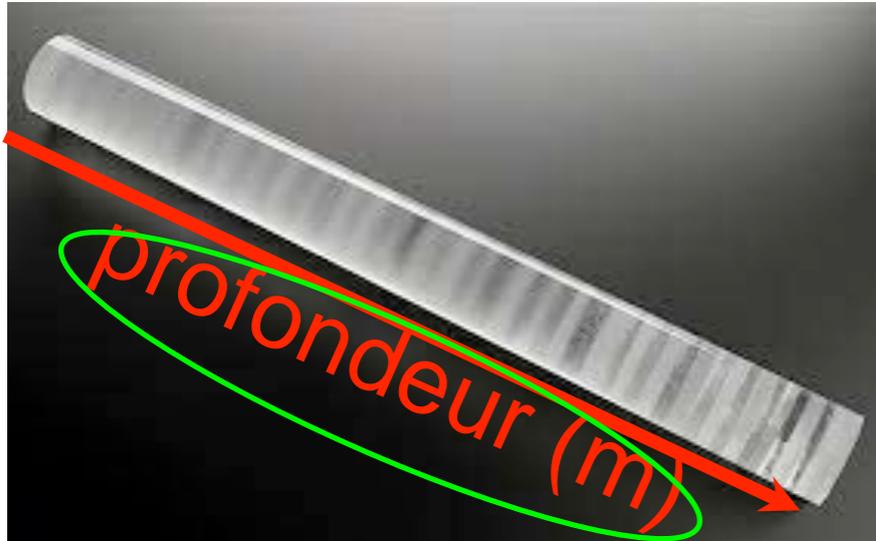


Anisotropie induite des glaces polaires: du cristal à la calotte

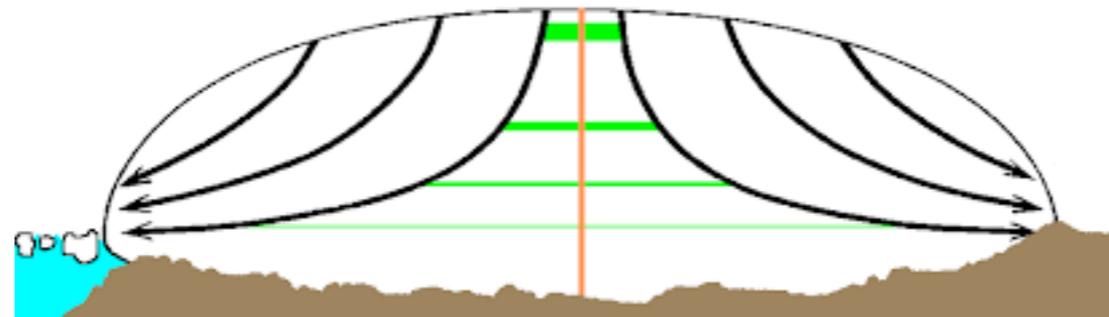
f. Gillet-Chaulet
LGGE



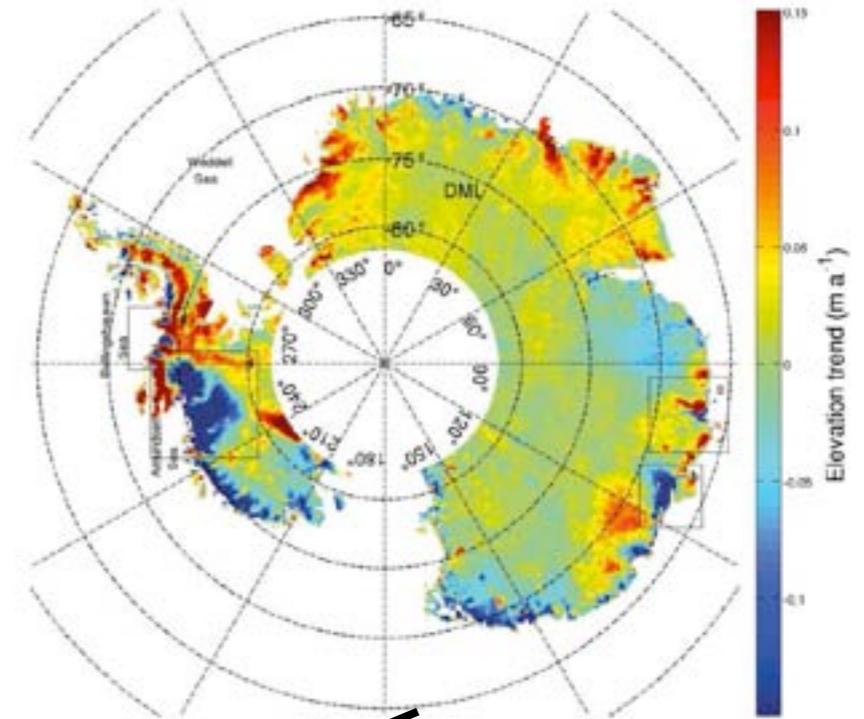
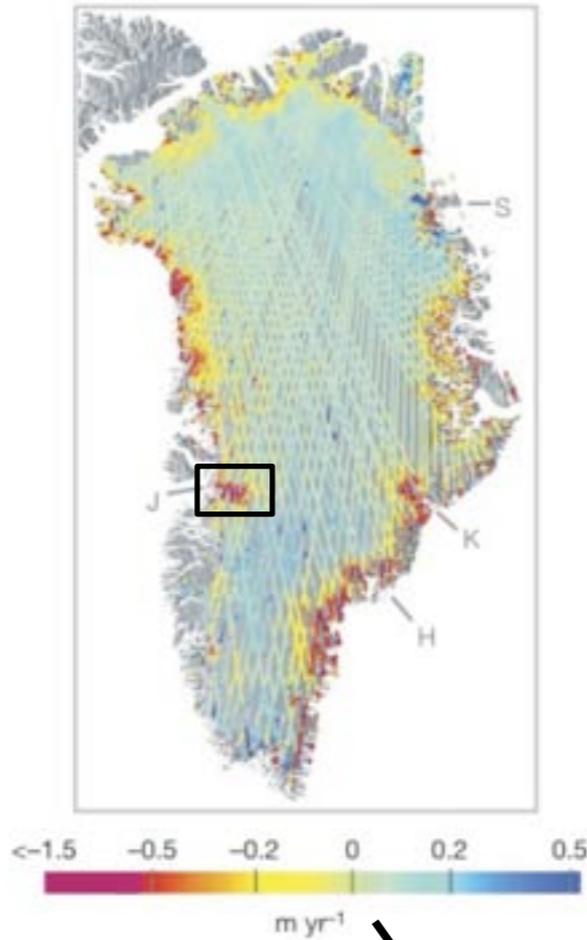
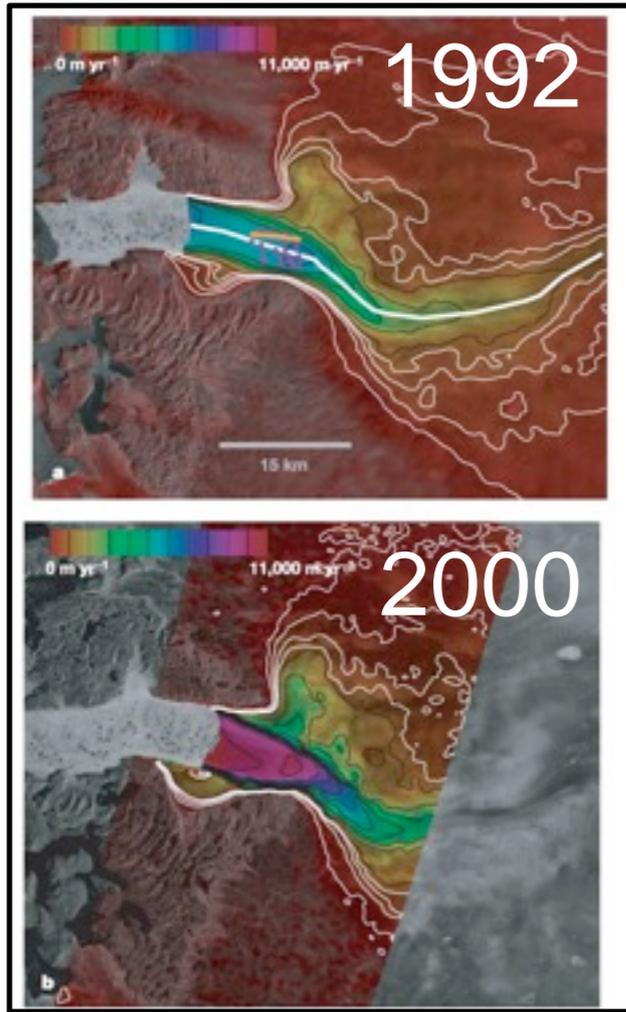
Motivations: Datation des forages glaciaires



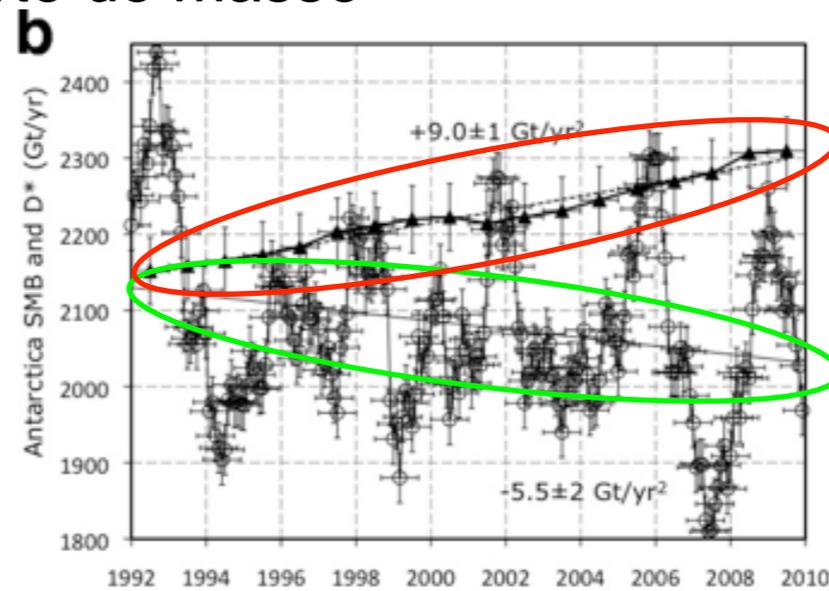
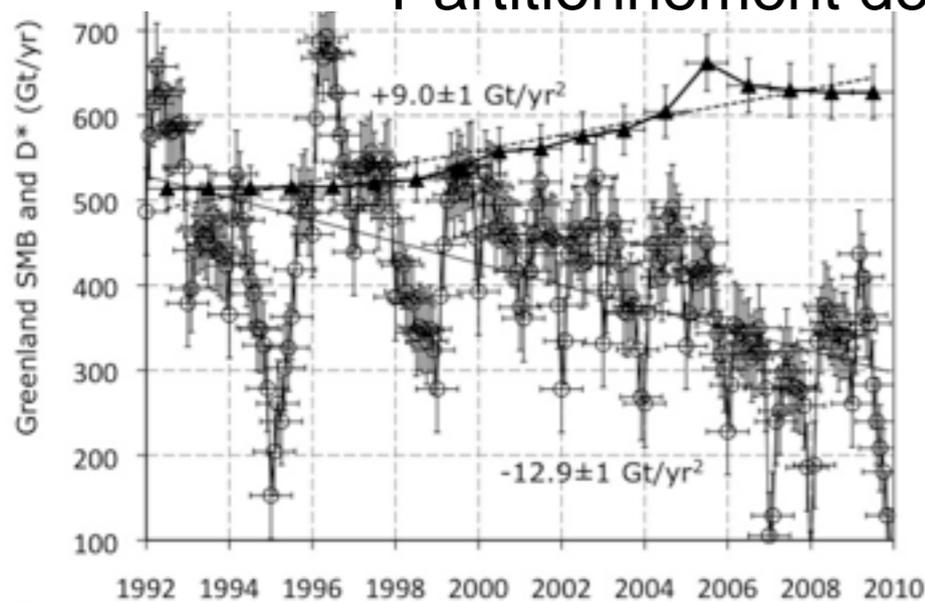
a(t)
modèle mécanique



Motivations: Contribution des calottes au niveau des océans



Partitionnement de la perte de masse



$$\frac{dV}{dt} = SMB - D$$

Écoulement des glaces polaires: Lois de la mécanique

Écoulement lent à faible Reynolds

Equations de Stokes:

- conservation de la masse

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0$$

- conservation de la quantité de mouvement

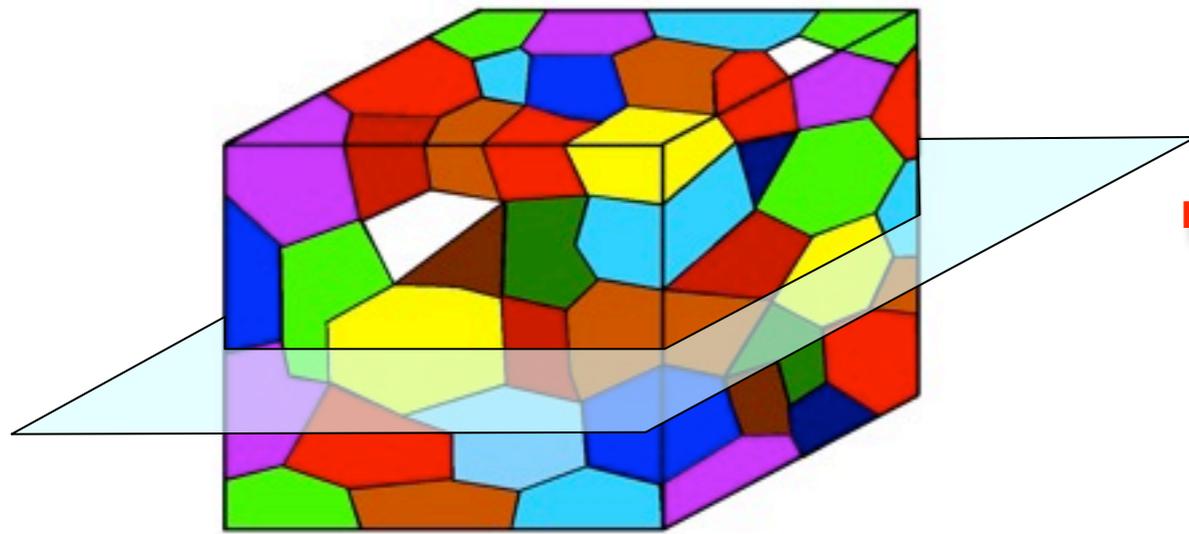
$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} = 0$$

Comportement visco-plastique:

$$\mathbf{S} = f(\mathbf{D})$$

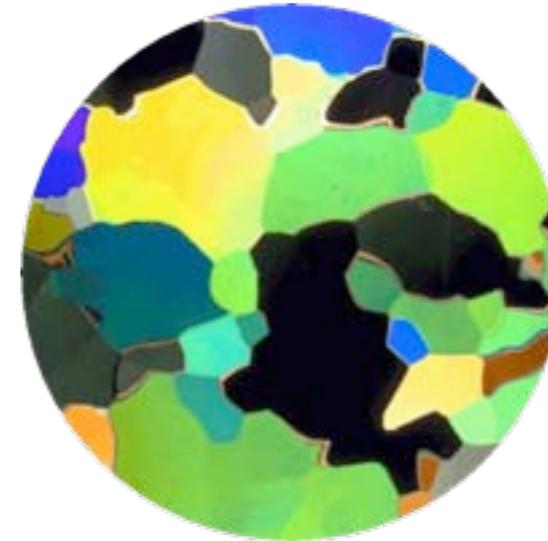


VER: Le polycristal



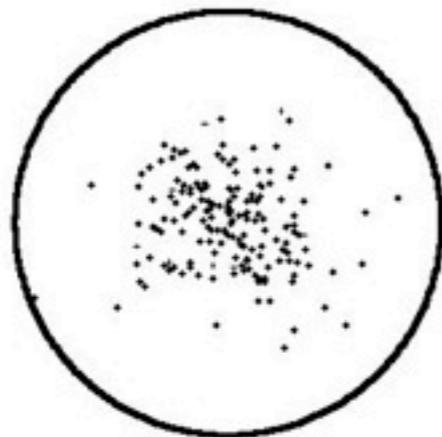
Lame mince

Sous lumière polarisée

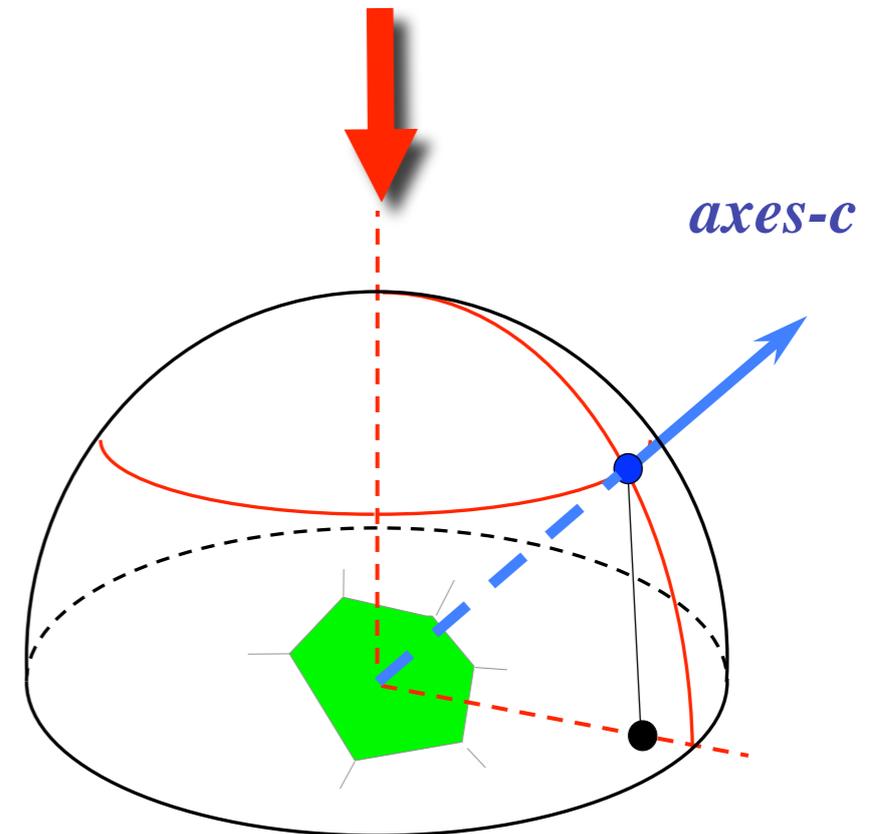


une couleur =
un grain =
une orientation

Diagramme de Schmidt



décrit la fabrique

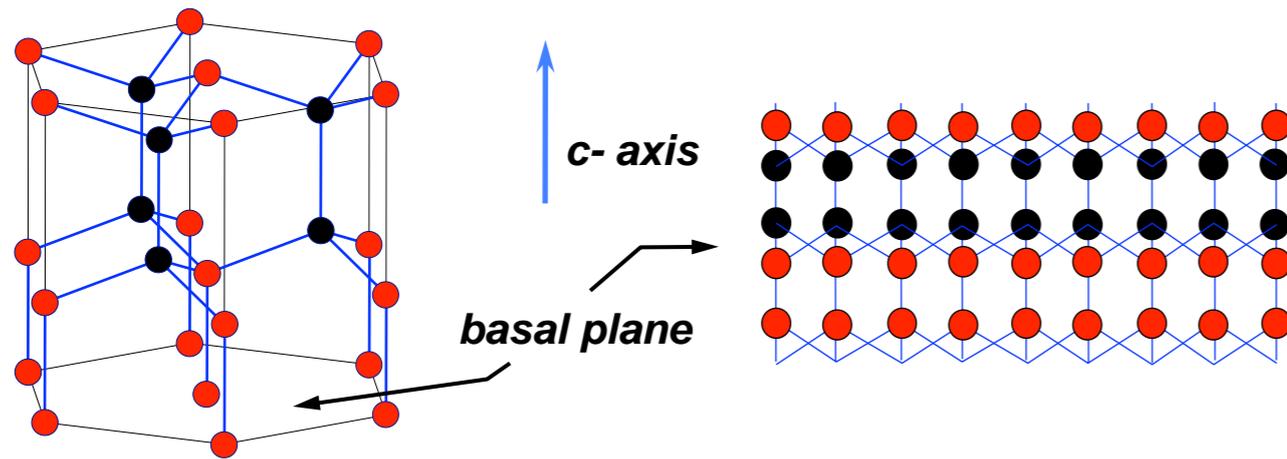
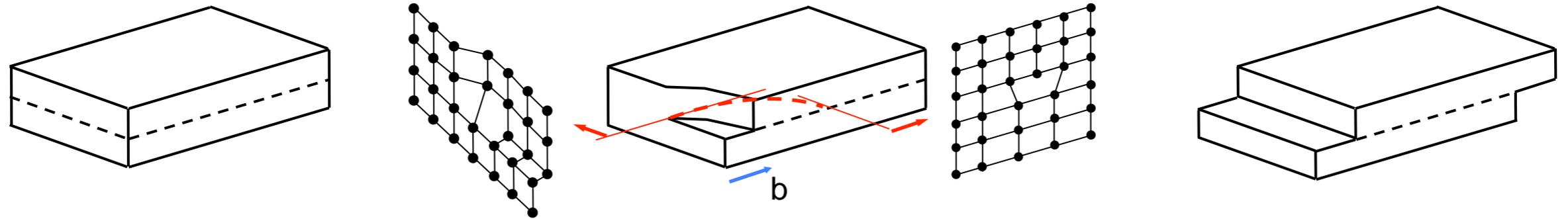


axes-c

Le comportement du poly dépend du comportement des monos et de leur distribution

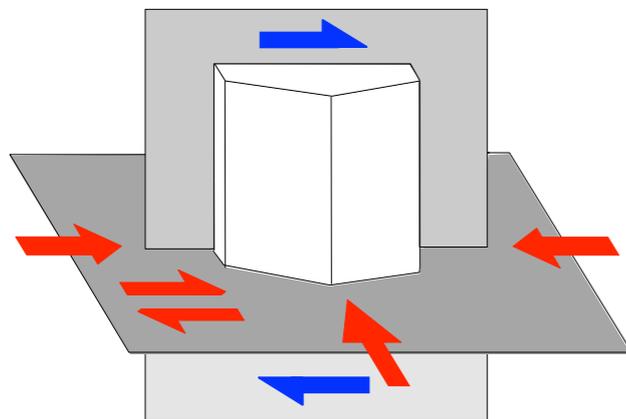
Comportement visco-plastique du monocristal de glace

La déformation visco-plastique est due au mouvement des dislocations



Le cristal de glace se déforme principalement par glissement des dislocations dans les plans de base

La glace est l'un des matériaux naturel le plus anisotrope

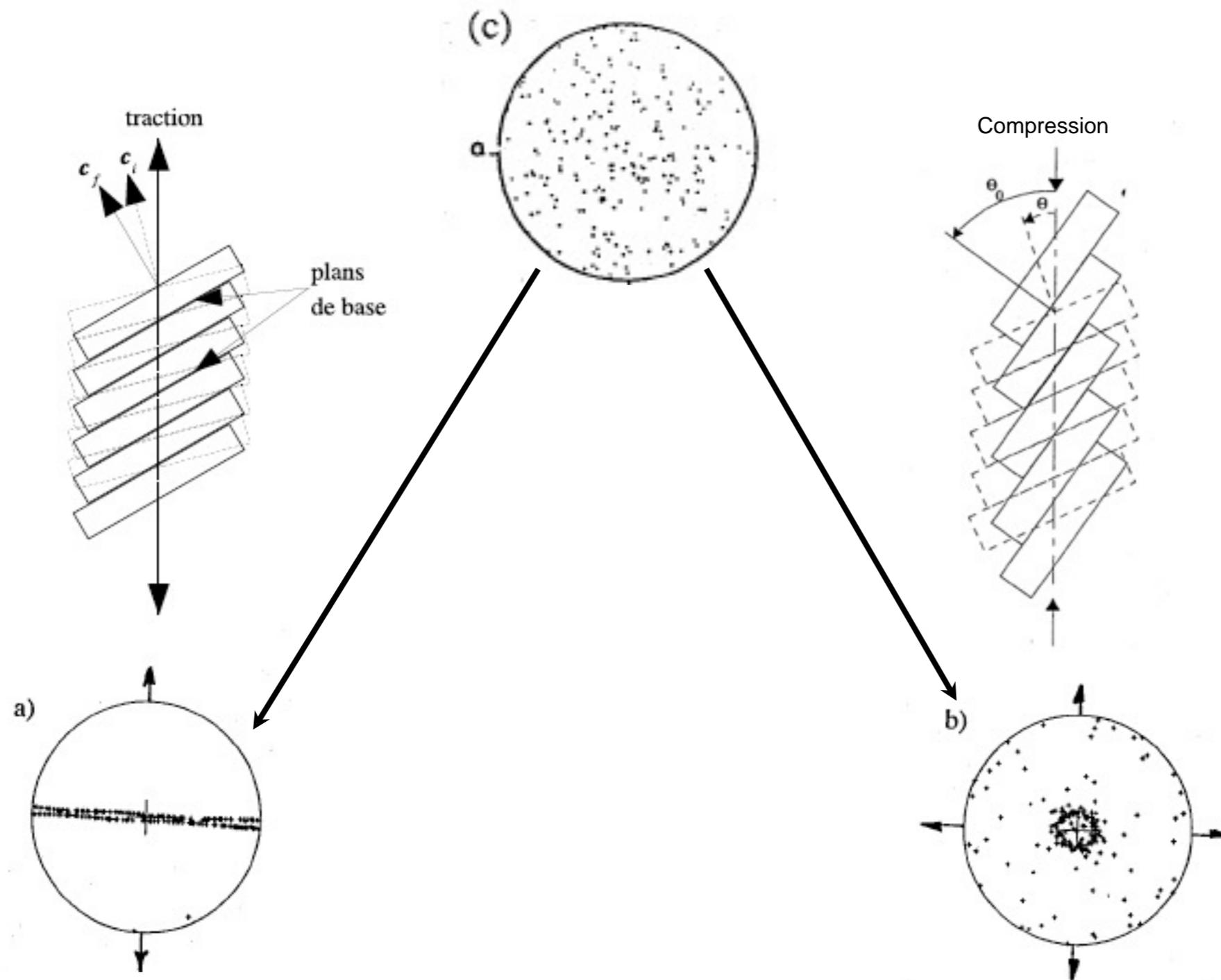


Le **cisaillement parallèlement** aux plans de base est environ **1000 plus rapide** que la compression (\perp ou $//$ p. b.) ou le cisaillement dans le plan de base

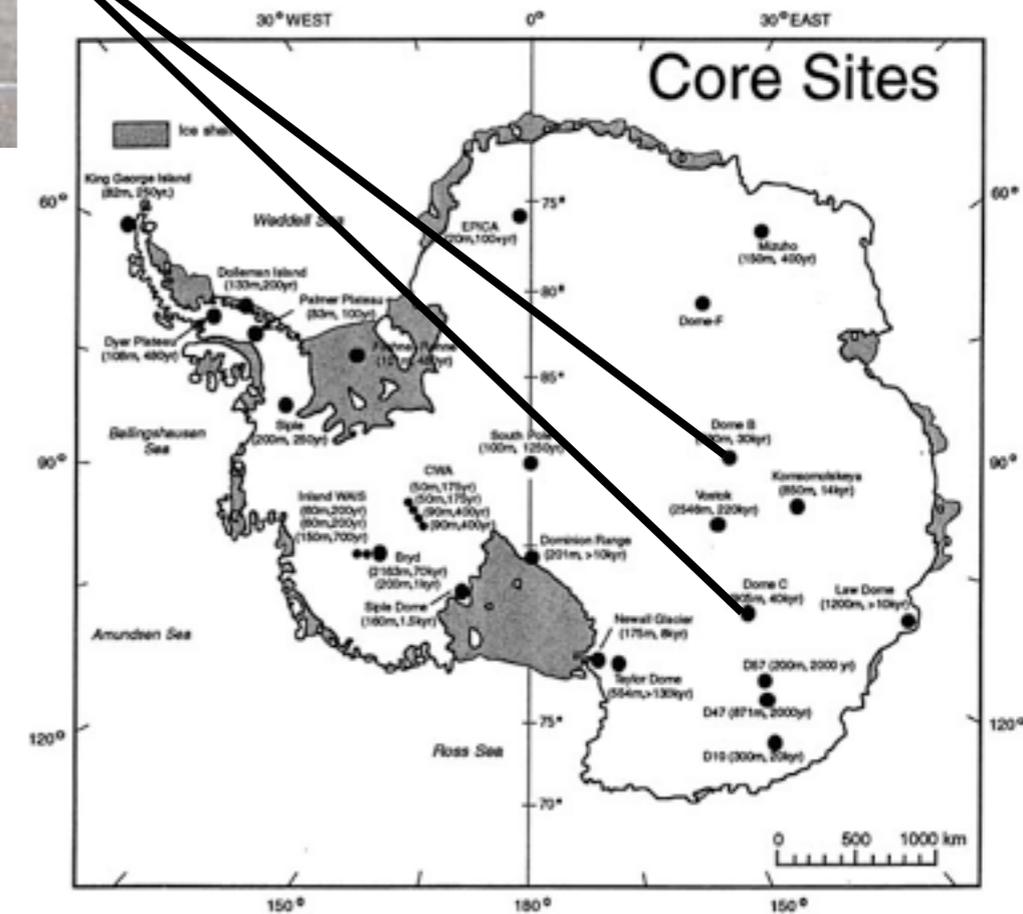
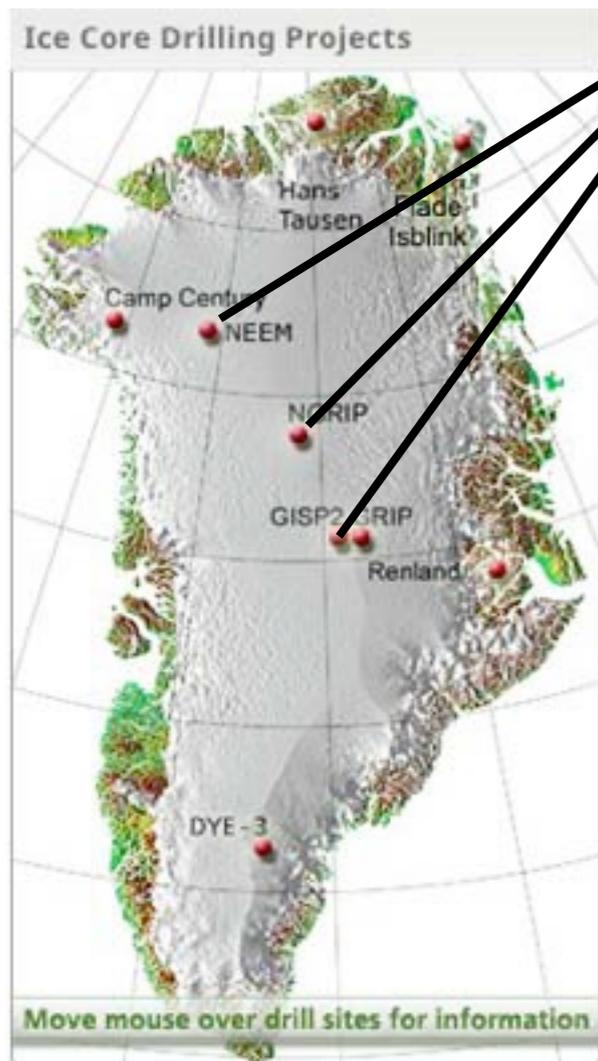
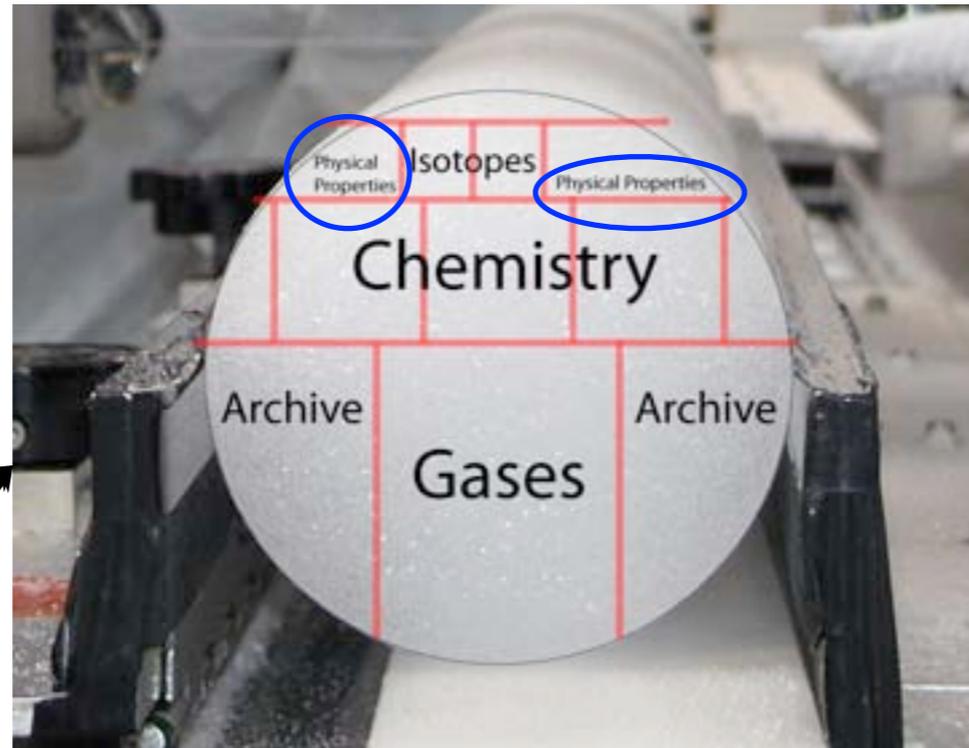
~ se comporte comme un paquet de carte

Evolution de l'orientation des cristaux

Du fait de la forte anisotropie, la déformation entraîne une ré-orientation des cristaux



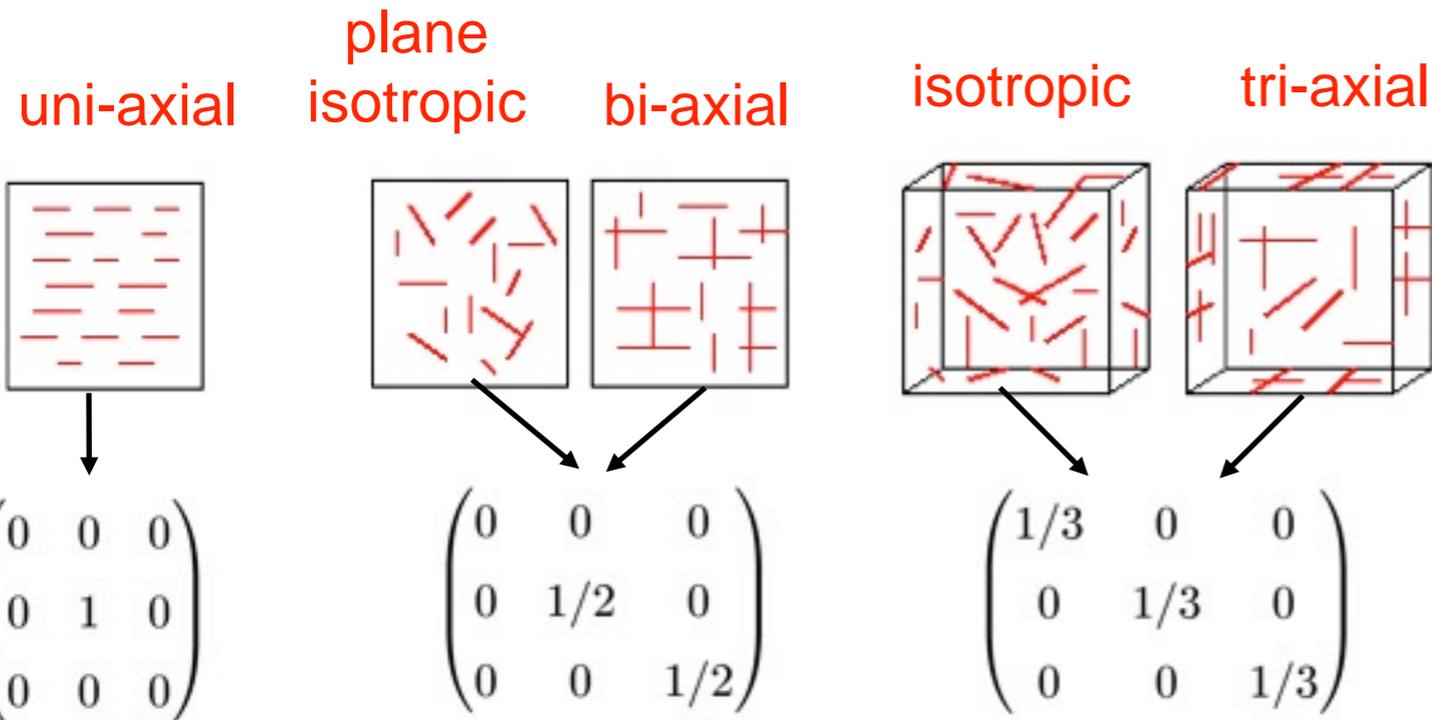
Les fabriques = témoins des conditions de déformation



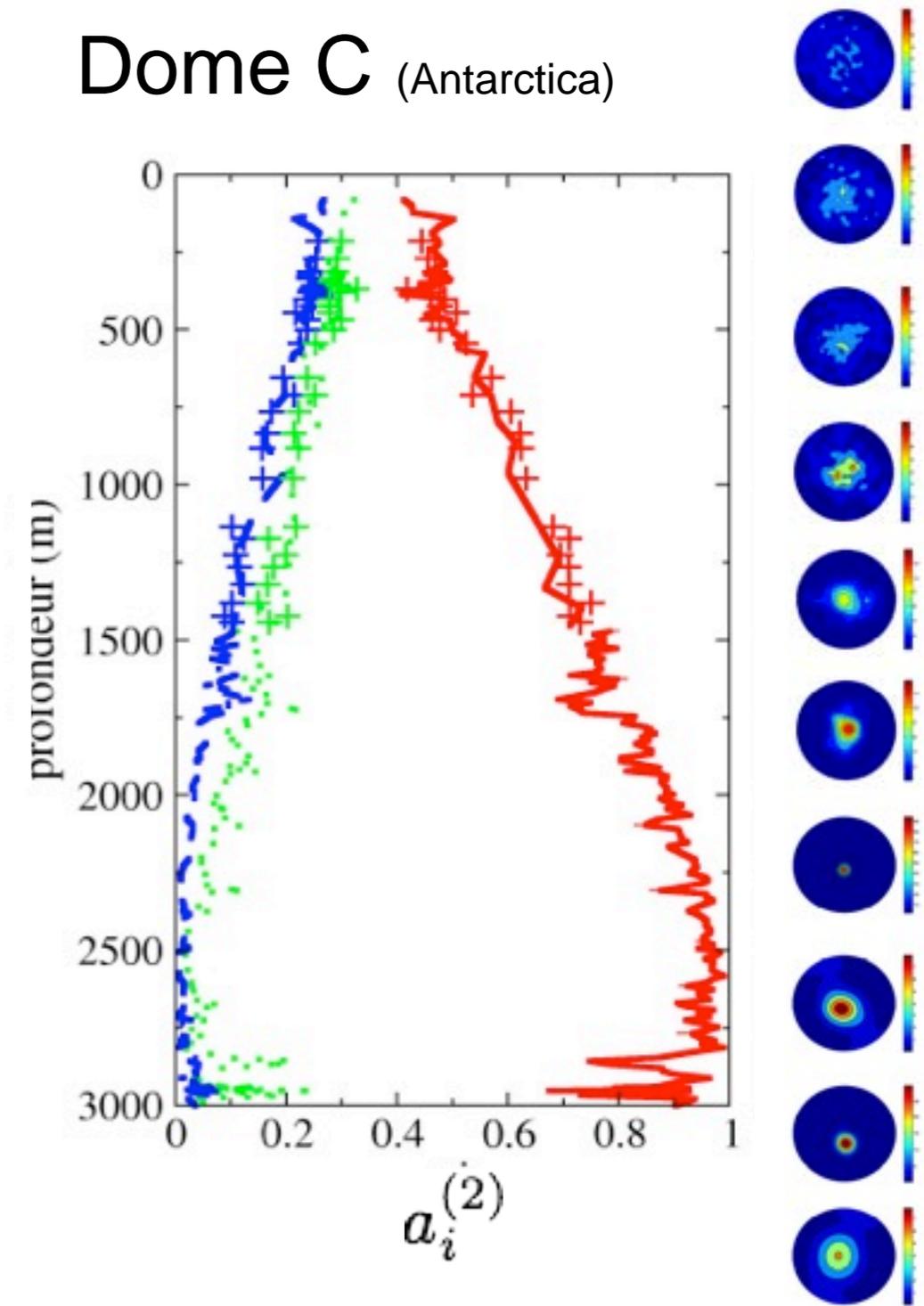
Tenseurs d'orientation

$$\mathbf{a}^{(2)} = \langle \mathbf{c} \otimes \mathbf{c} \rangle$$

$$\mathbf{a}^{(4)} = \langle \mathbf{c} \otimes \mathbf{c} \otimes \mathbf{c} \otimes \mathbf{c} \rangle$$

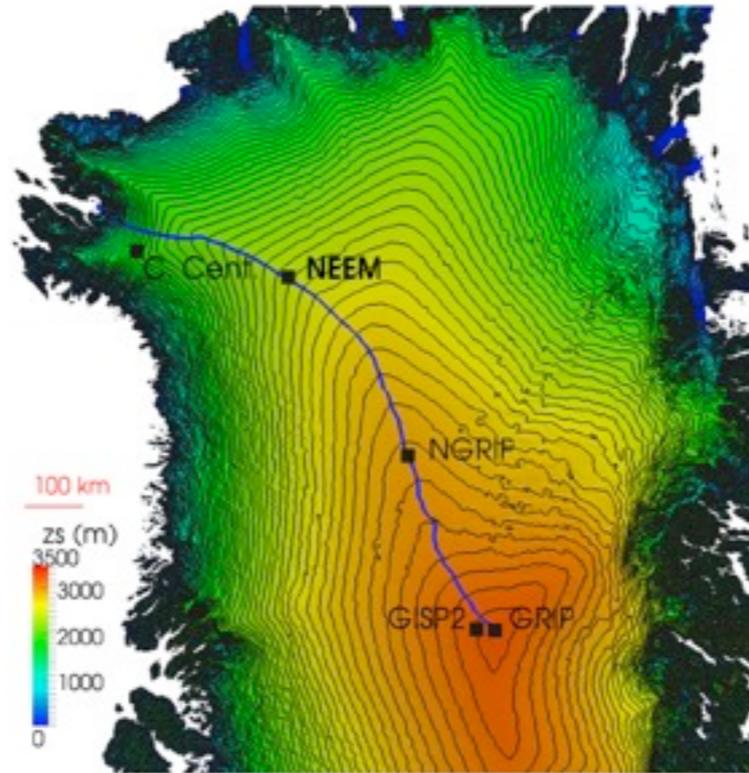


Dome C (Antarctica)

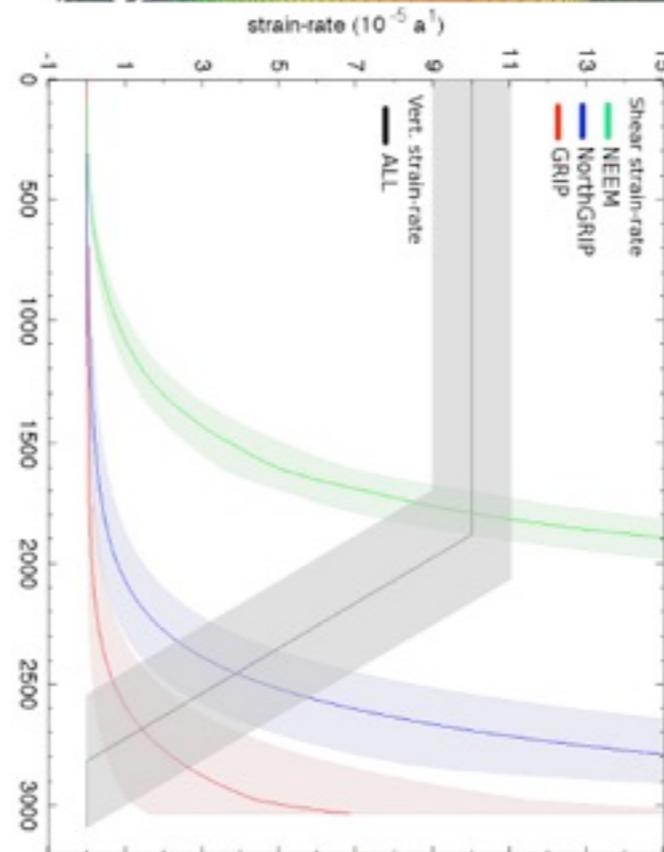
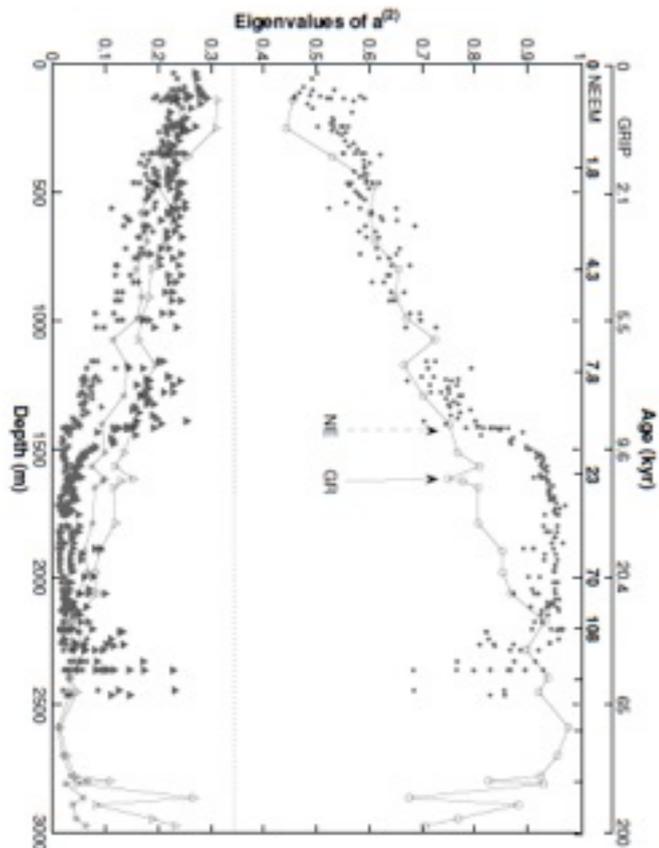


(Wang et al, 2003 ; Durand et al., 2007)

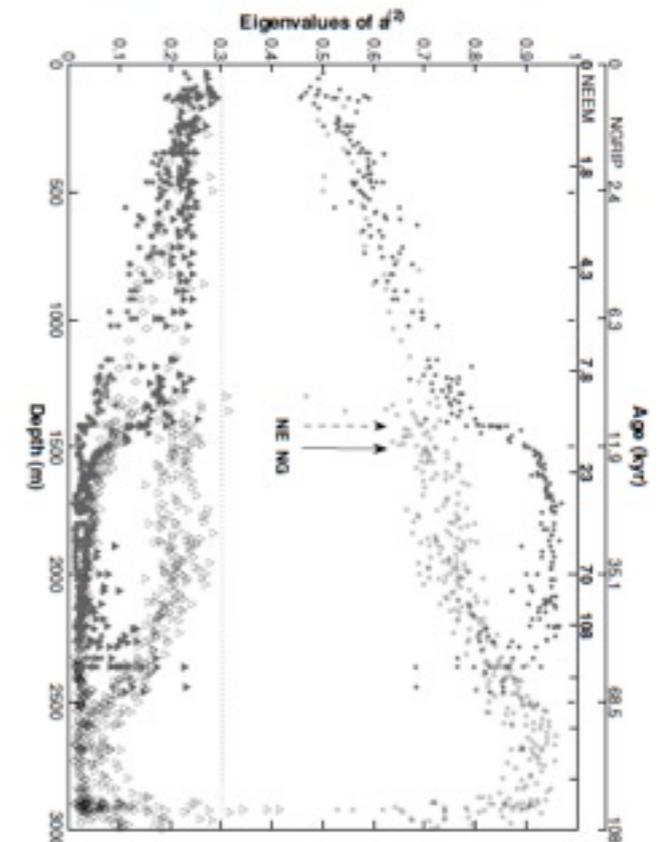
Exemples de fabriques



Comparaison NEEM-GRIP

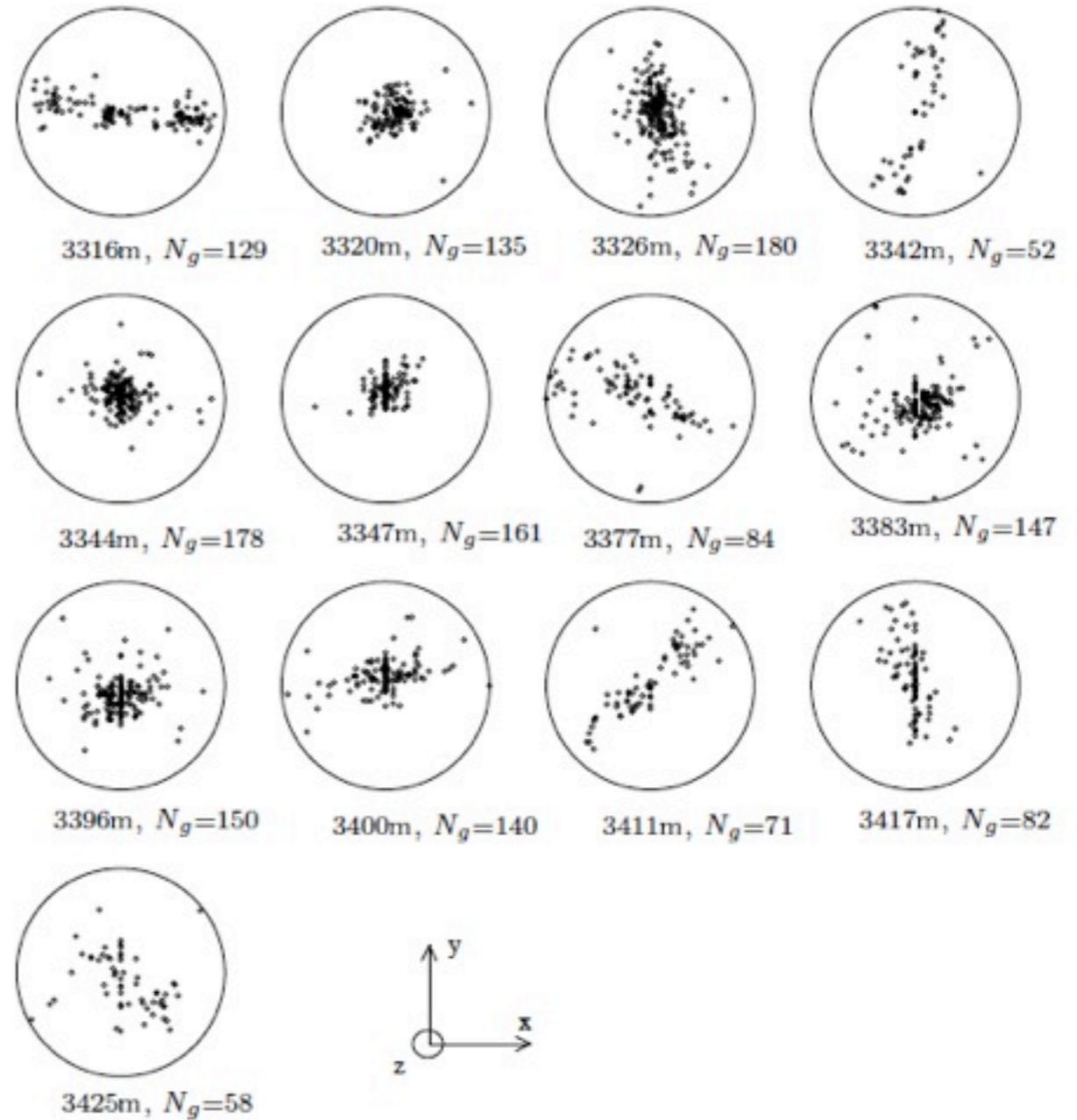
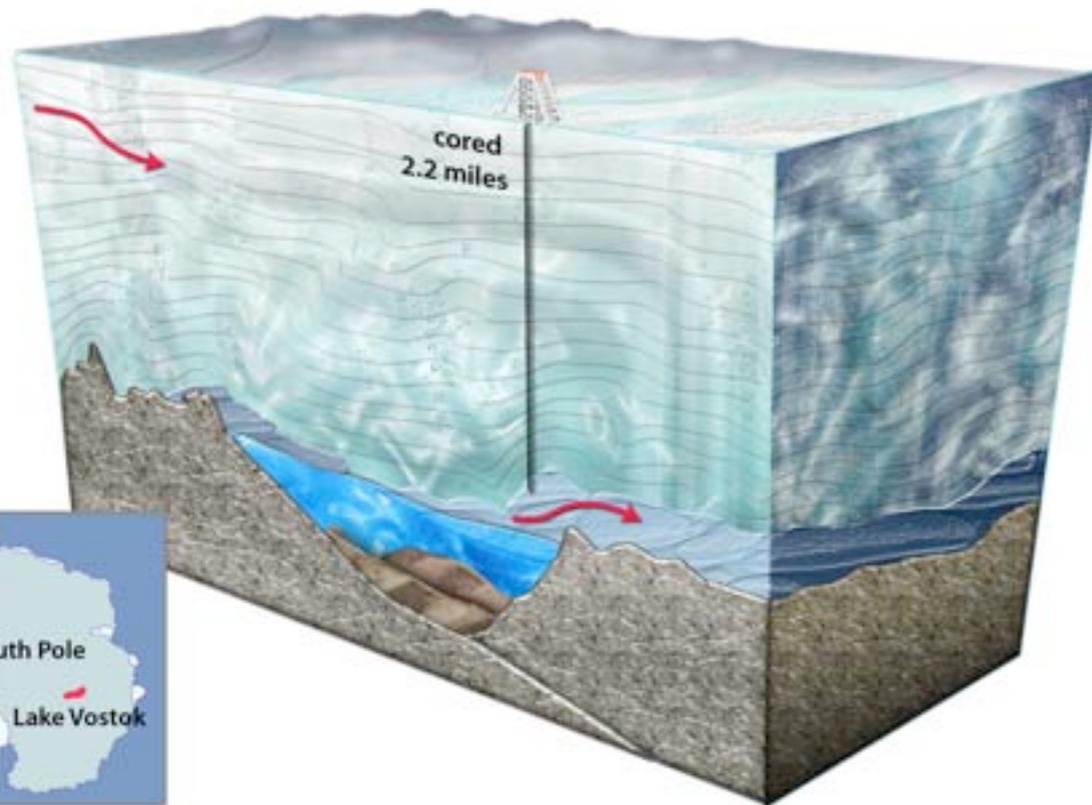


Comparaison NEEM-NGRIP

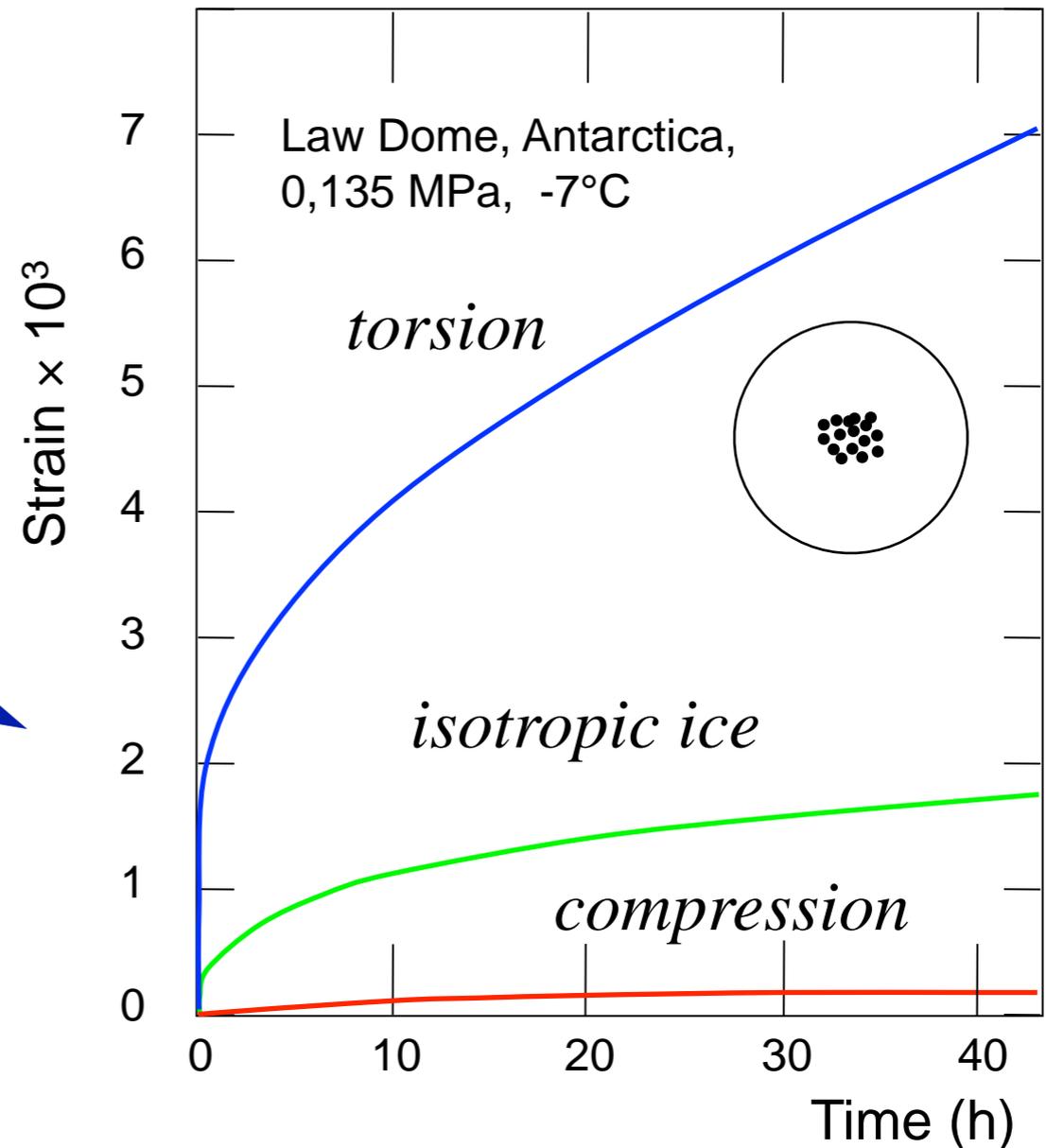


(Montagnat et al., 2014)

Vostok ice core



Anisotropie du polycristal

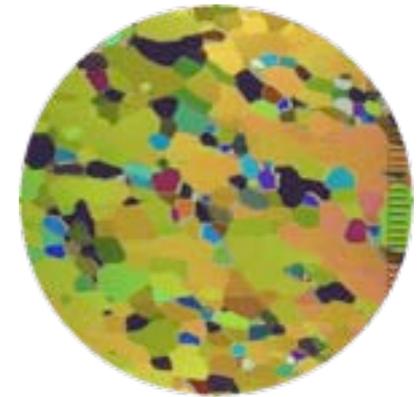
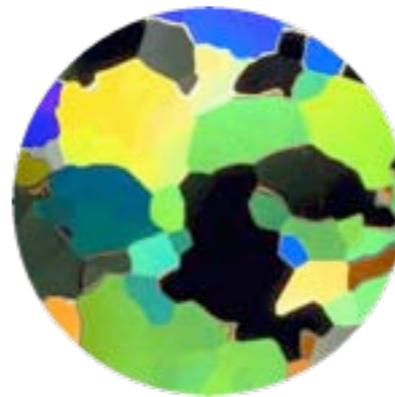
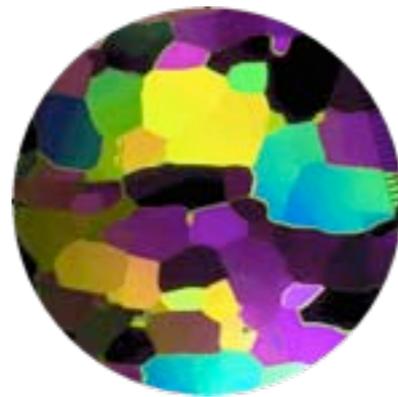
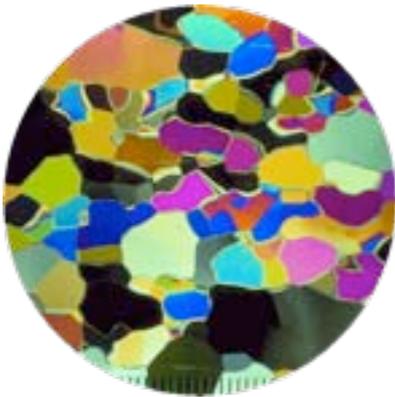


Fabriques à 1 max. **~ 10 fois plus faciles à cisailer** que la glace isotrope
~ 3 fois plus difficiles à comprimer

Propriétés rhéologiques de la glace



Le comportement de chaque morceaux de glace est unique !



fabrique

Size of the crystals (?)

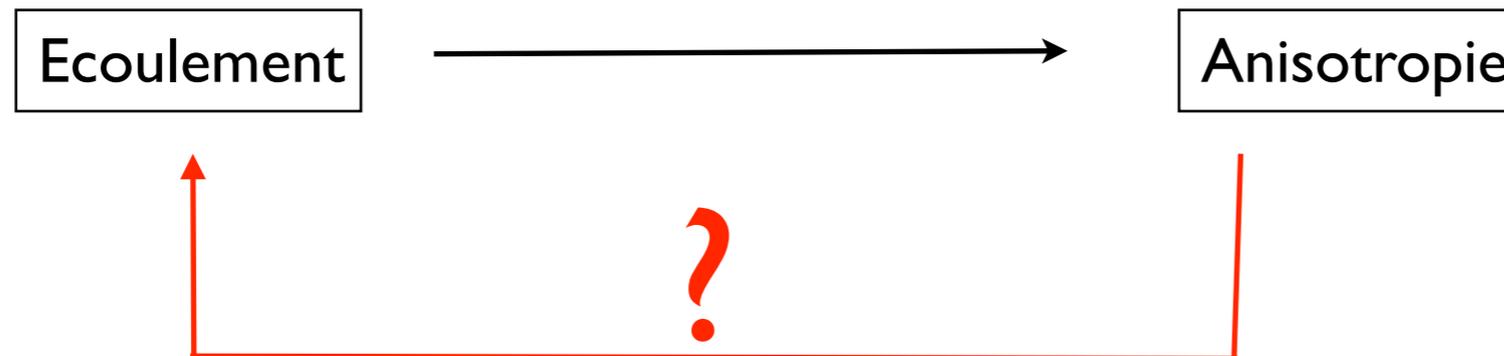
Temperature

Water content

Contraintes

Dust content

Influence de l'anisotropie sur l'écoulement



Méthode:

- Modèle d'écoulement de calotte polaire Elmer/Ice (Stokes)

- Loi de comportement anisotrope:

- orthotrope
- tabulée à partir d'un modèle auto-cohérent
- calibrée sur les données disponibles

$$S = f(D, a^2)$$

- Loi d'évolution de la fabrique :

- tabulée à partir d'un modèle auto-cohérent

$$\frac{Da^2}{Dt} = g(D, S, a^2)$$

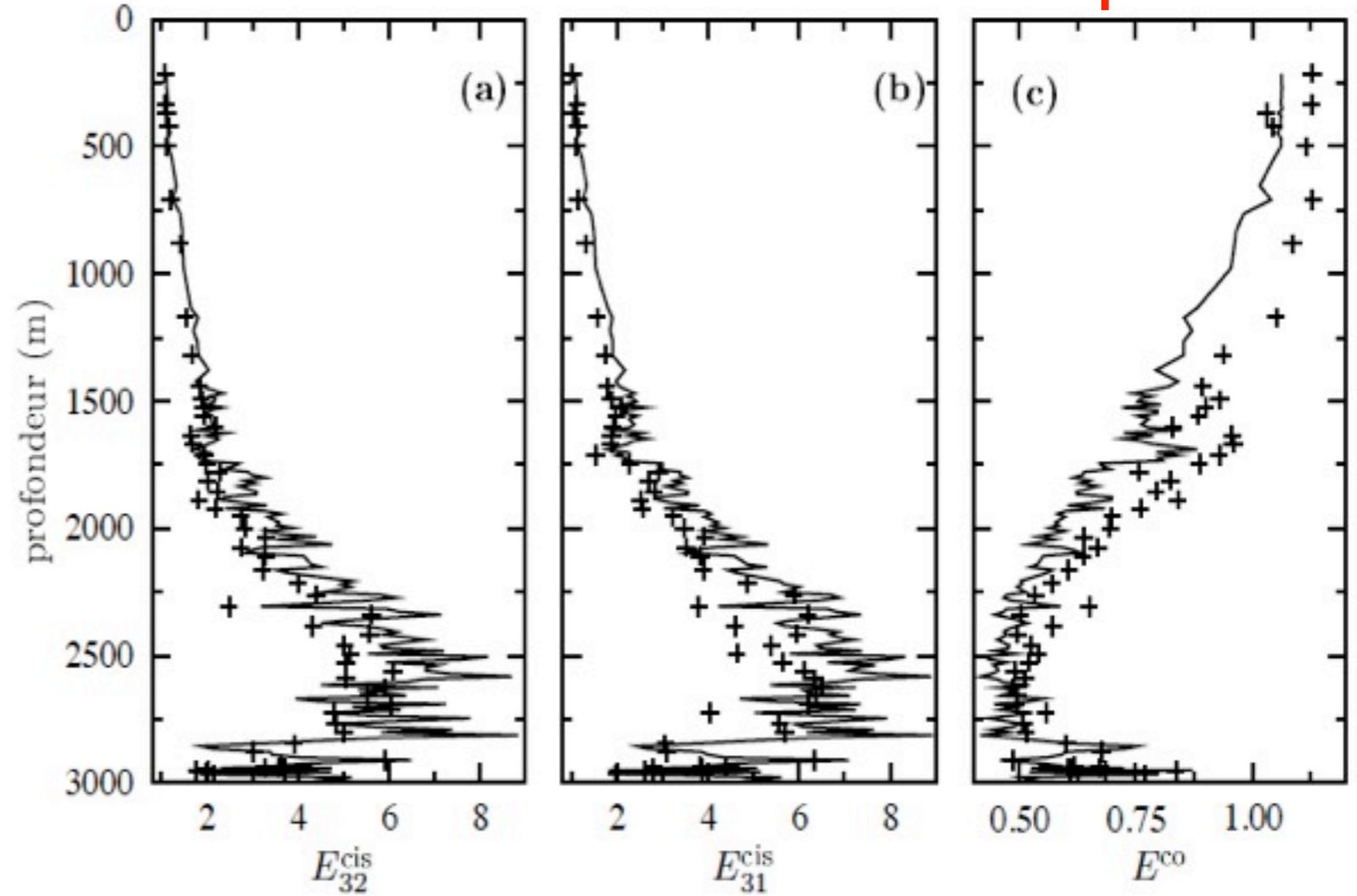
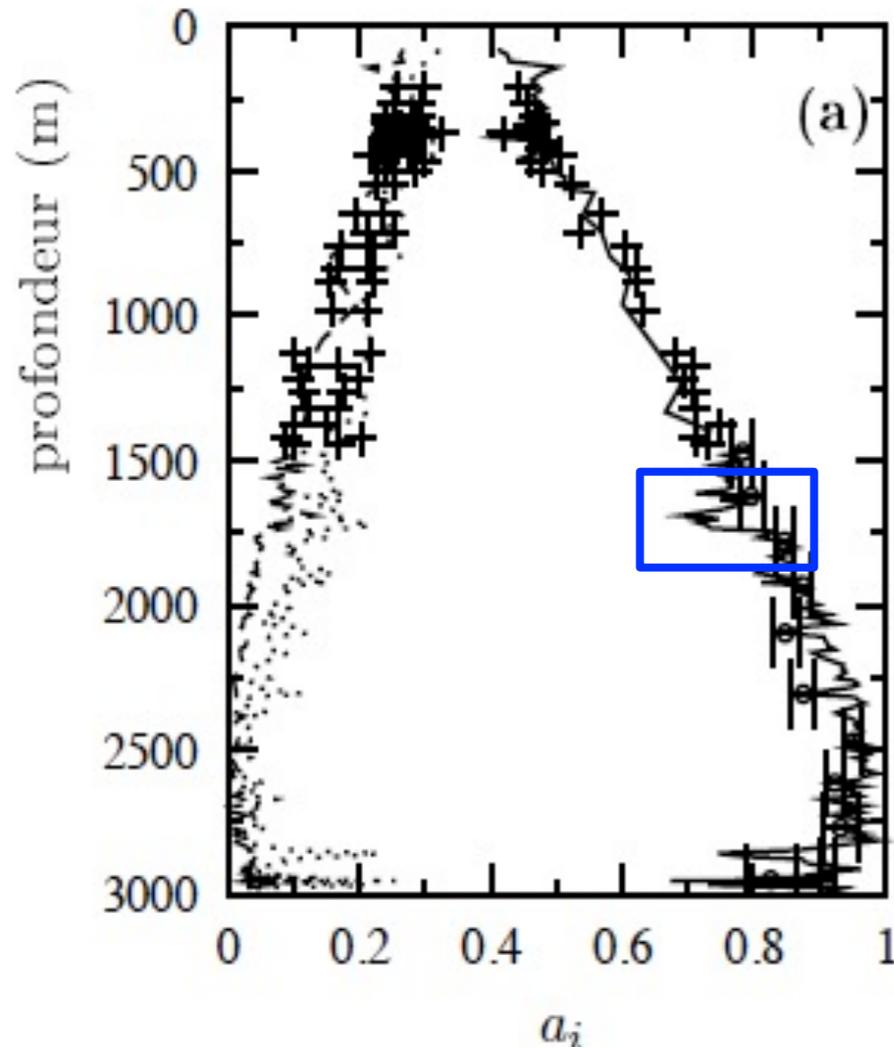
2 applications:

- Pourquoi les glaces de périodes glaciaires sont parfois plus fluides (*Durand et al., 2007*)
- L'anisotropie explique-t'elle les facteurs d'amplification ad-hoc? (*Ma et al., 2010*)

Fluidité relatives // isotrope

cisaillement

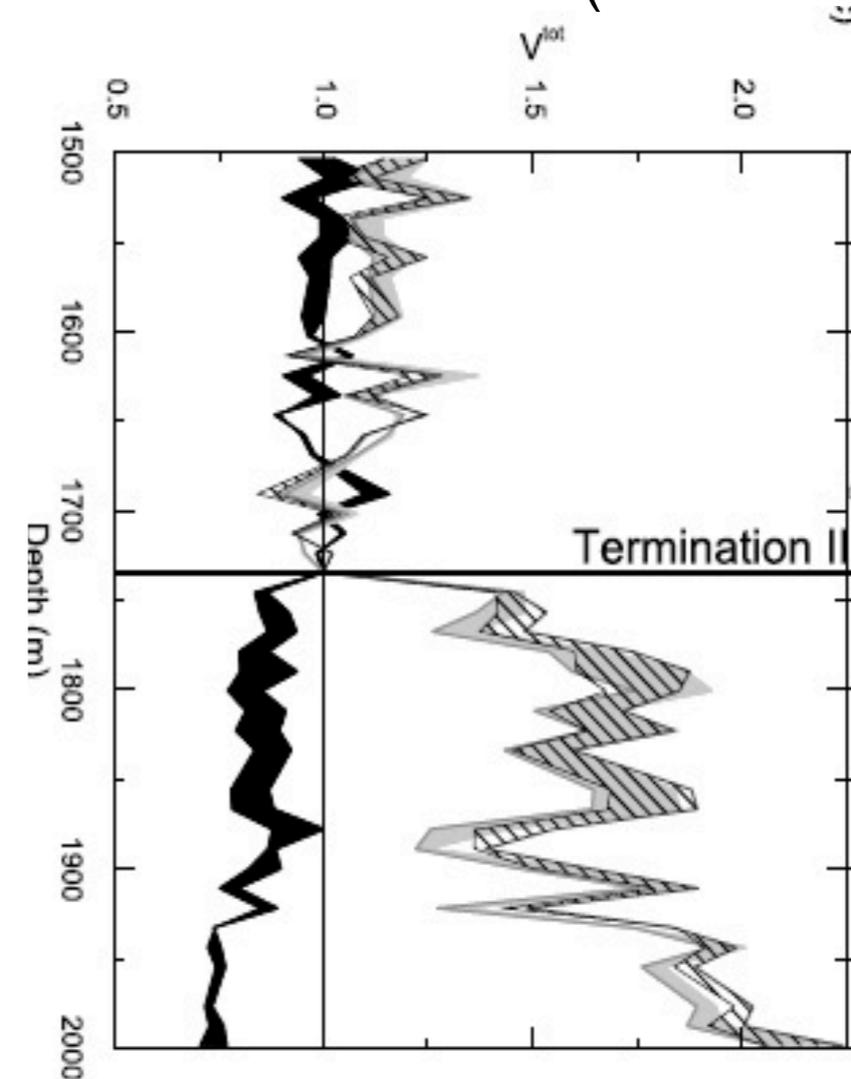
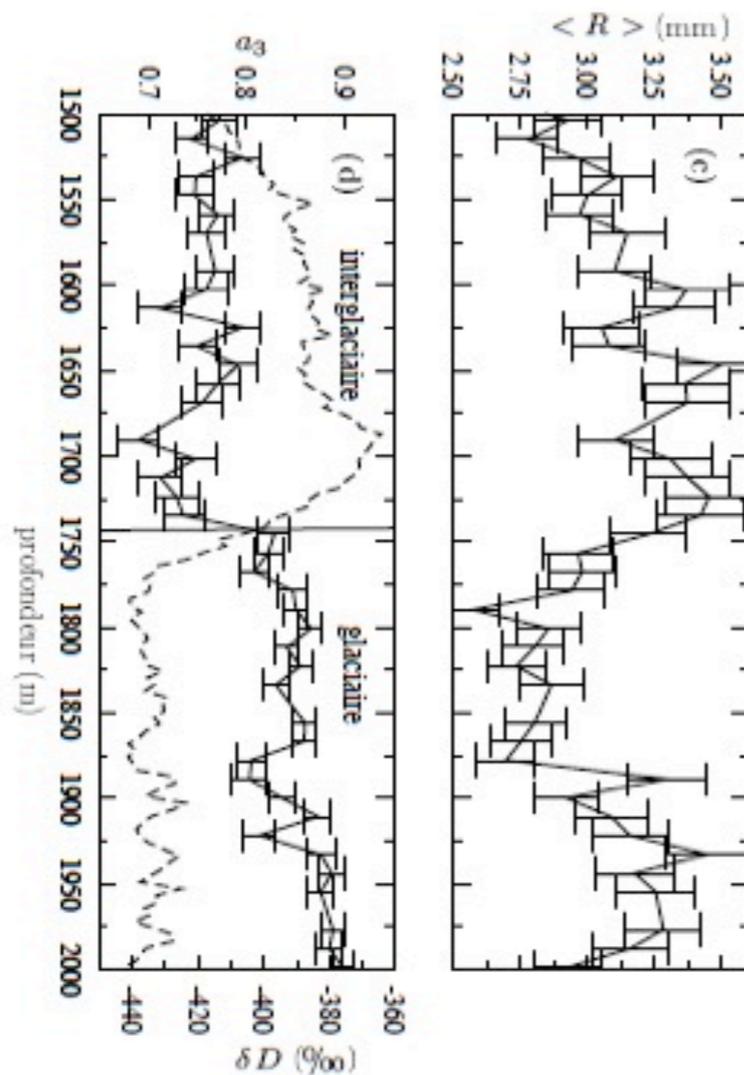
compression



Cas de la terminaison II (136 ka BP)

Changement de fluidité:

- anisotropie
- taille des cristaux (1.01 à 1.15)



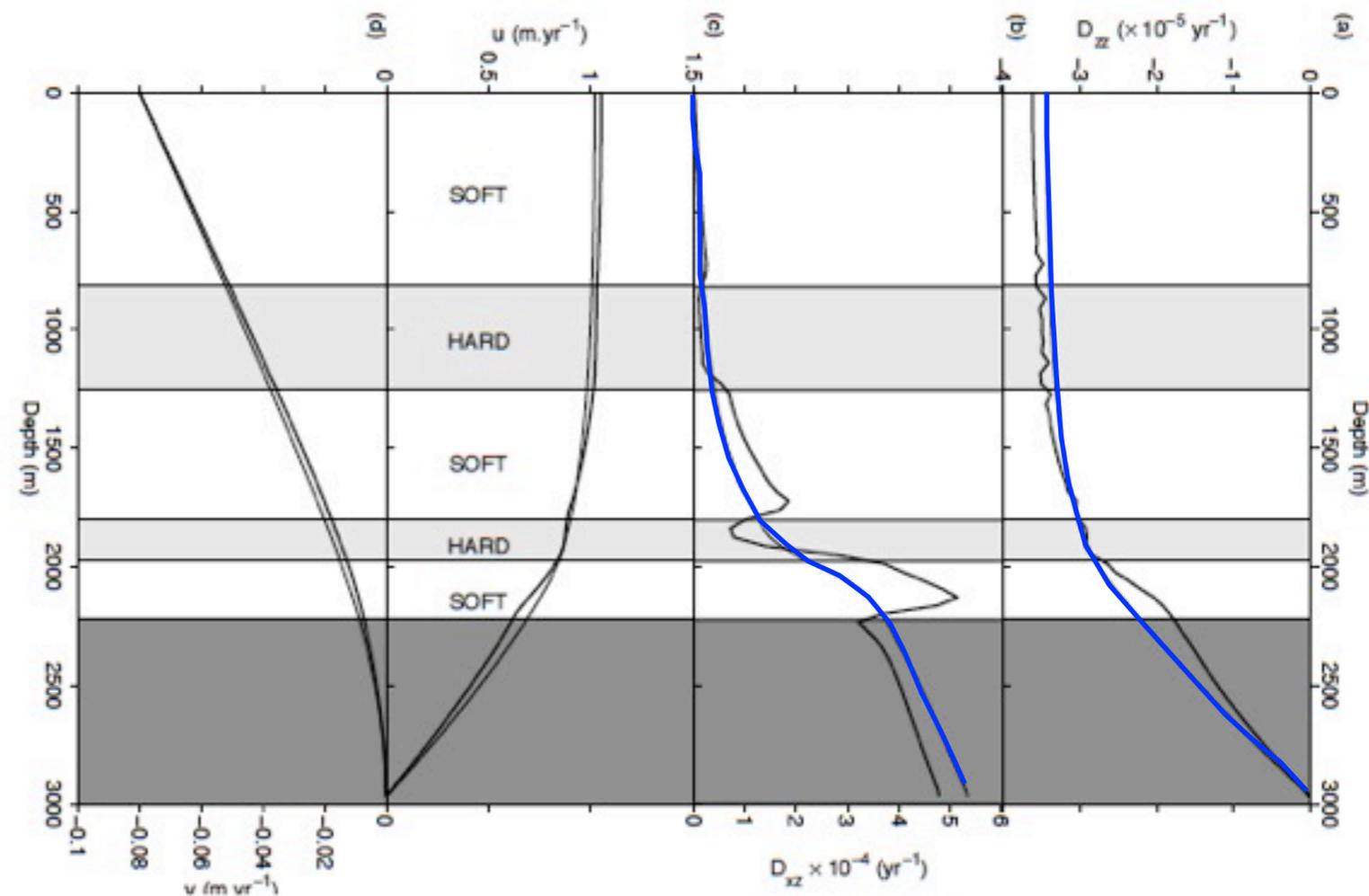
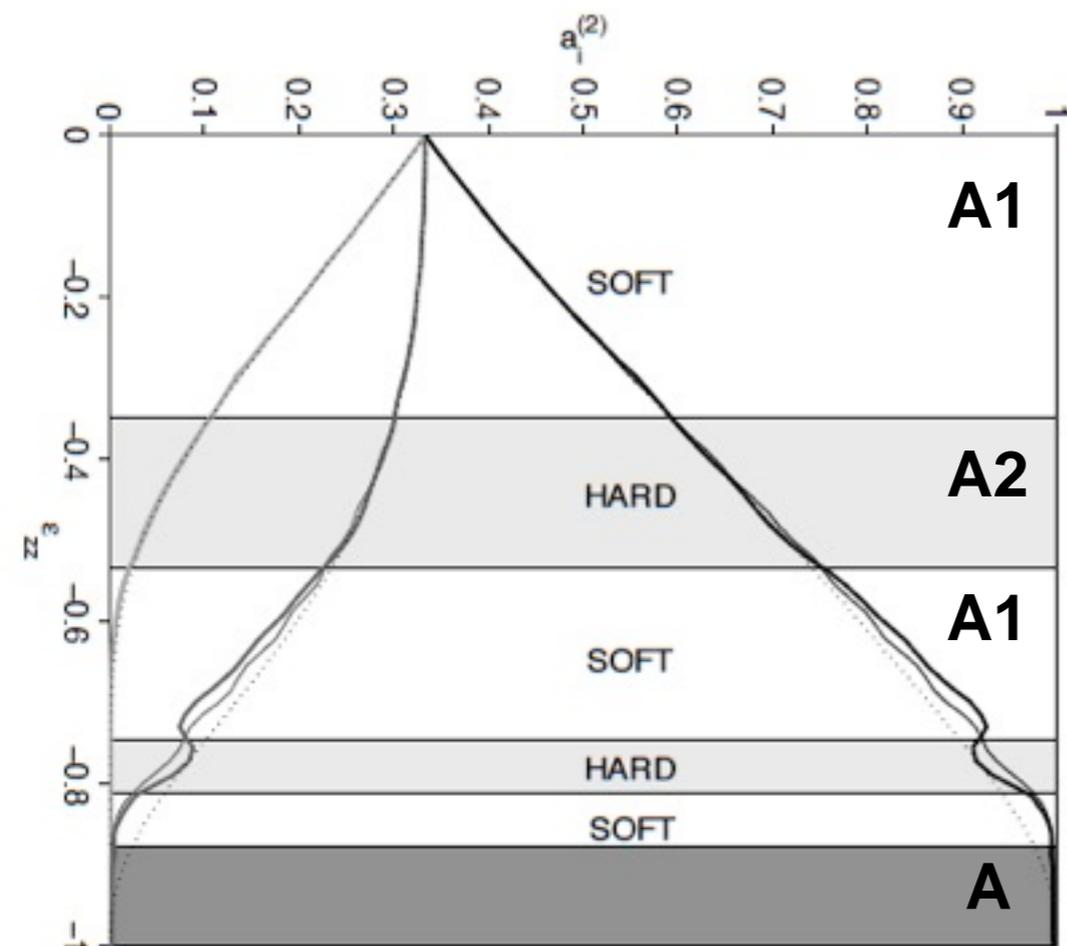
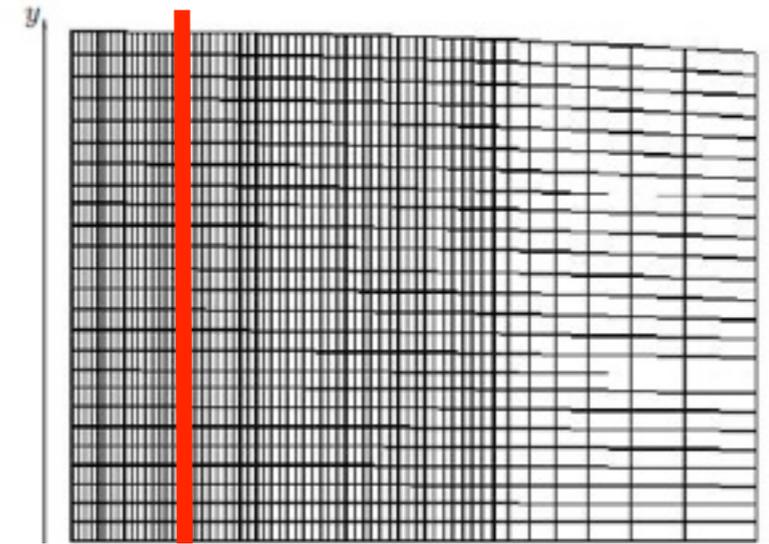
Dôme C: changement des propriétés aux transitions climatiques

(Durand et al., 2007)

Expérience:

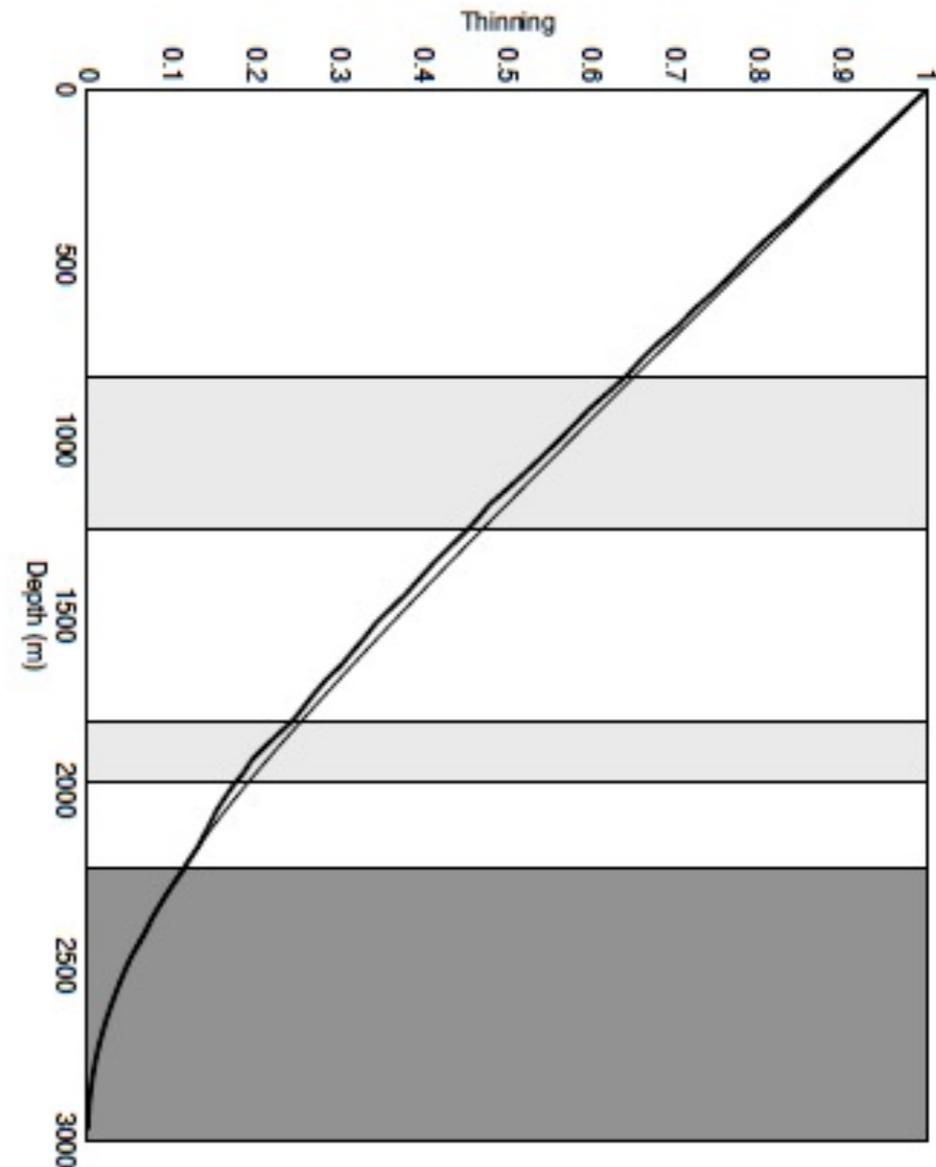
- modèle 2D plan
- **Exp 1:** paramètre de fluidité **A** (fluidité hors anisotropie)
- **Exp 2:** **A1**=1.75 **A** pendant 20 ka
A2=**A**/1.75 pendant 10 ka

$$A1/A2=3.06$$



=> **Rétroaction positive en cisaillement!!**

Ceci n'est pas une calotte polaire!



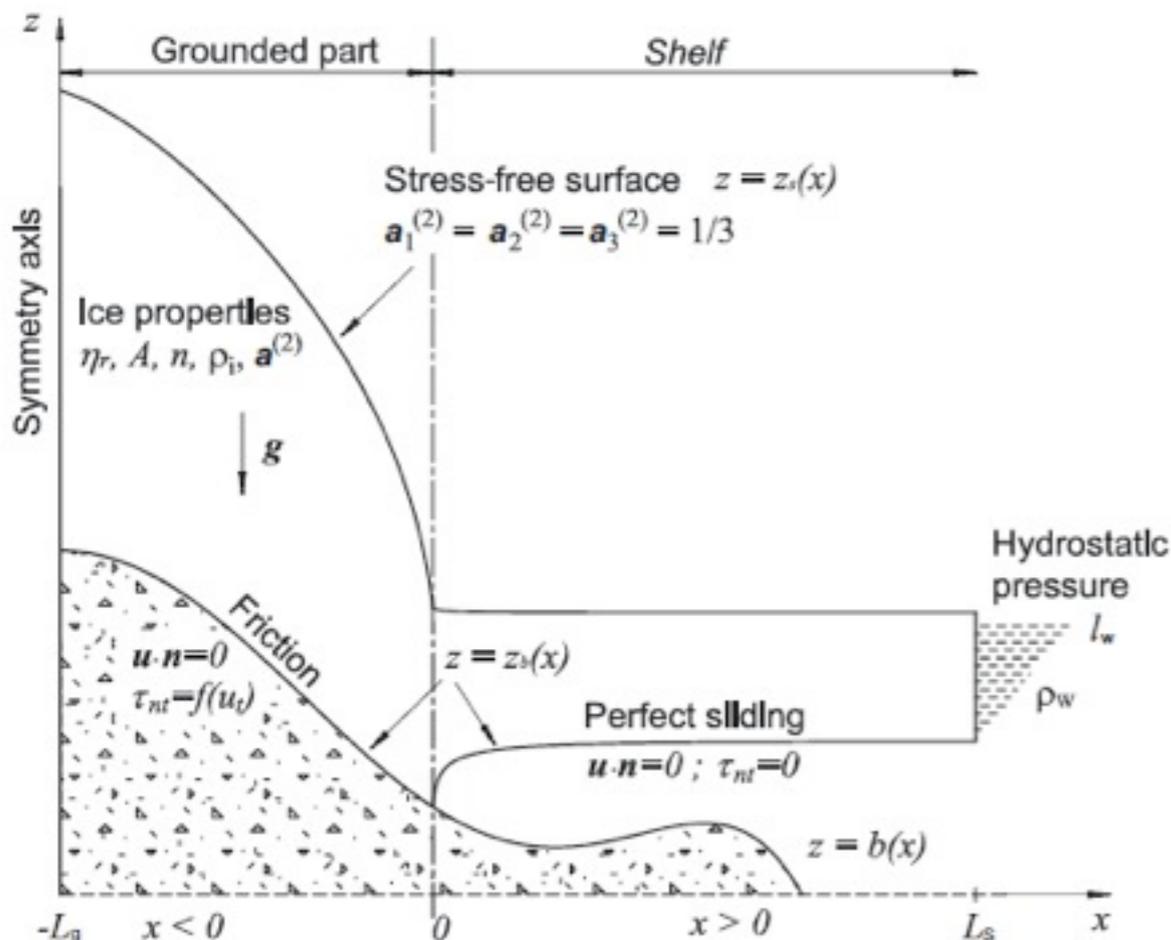
- Pas d'extrusion (amincissement différentiel) à grande échelle
- la fonction d'amincissement dépend de l'histoire des déformations

La **majorité des modèles** utilisent une **loi isotrope** où la fluidité est modifiée par un **facteur d'amplification E ad-hoc** pour coller au mieux aux observations .

En général:

- $E > 1$ dans les zones posées
- $E < 1$ dans les shelves

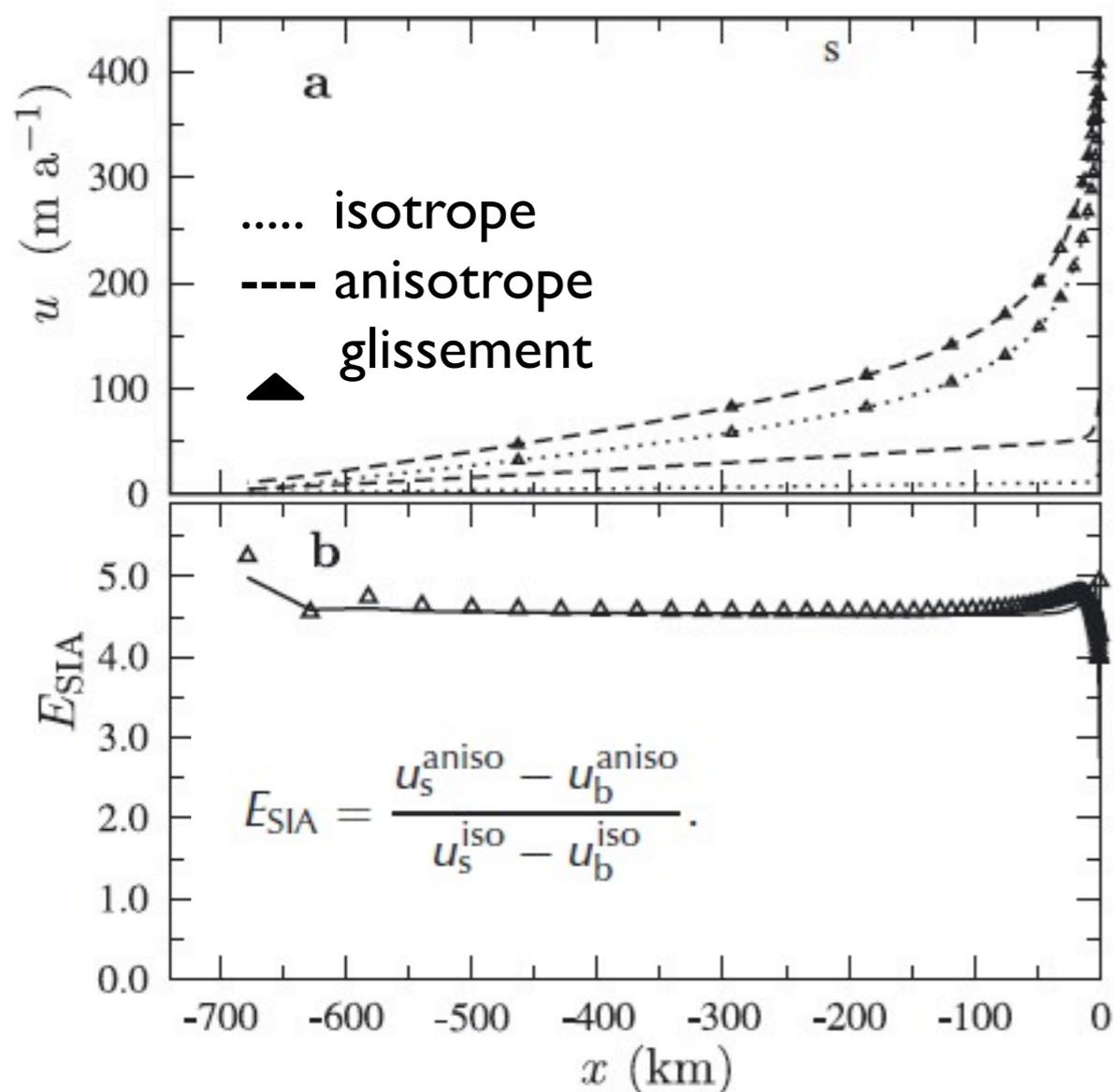
L'anisotropie peut elle expliquer ces valeurs ad-hoc?



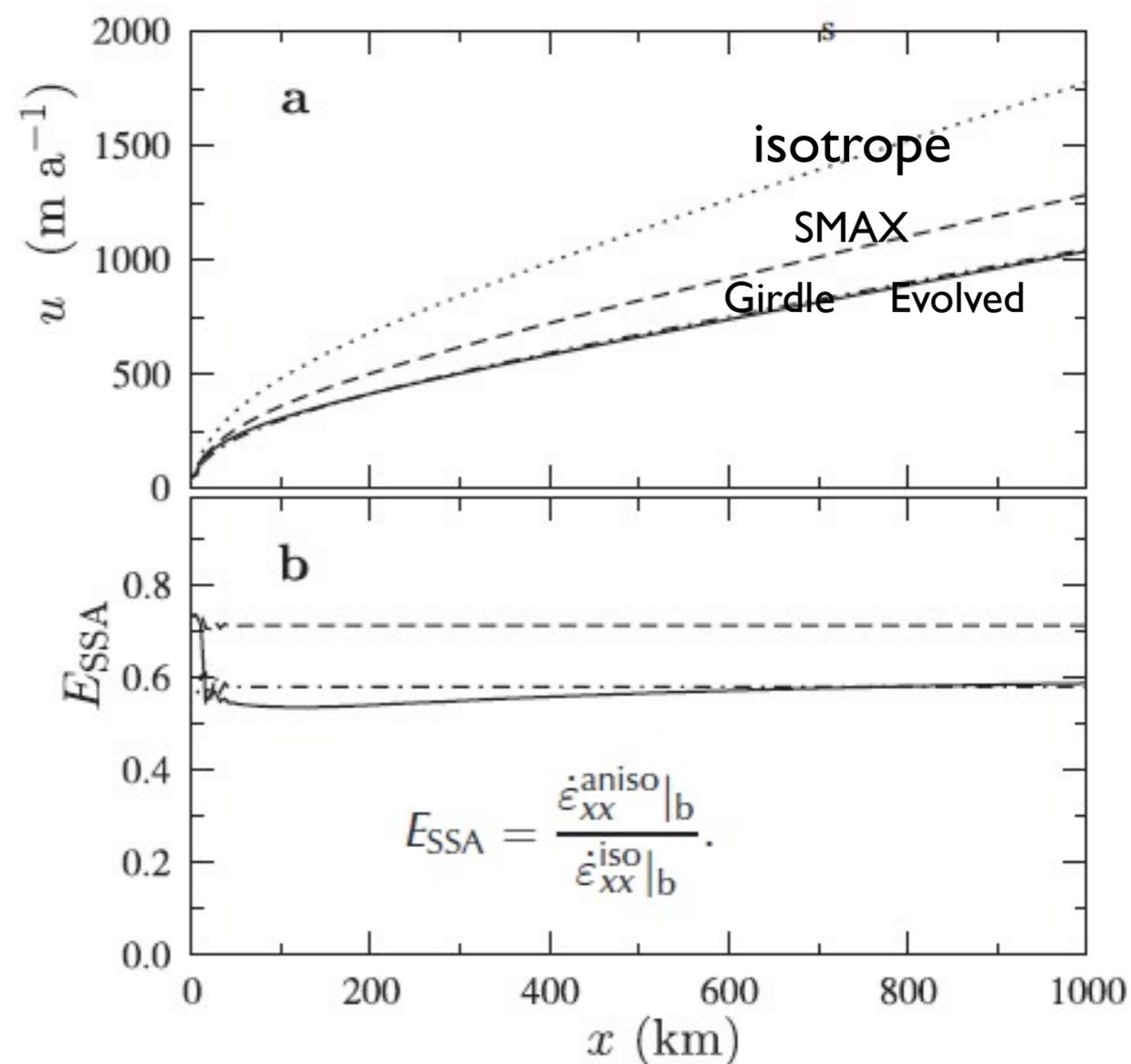
Test	Domain	Fabric	Sliding
Exp. 1	Sheet and shelf	SMAX	No
Exp. 2	Sheet and shelf	SMAX	Yes
Exp. 3	Shelf	Girdle	—
Exp. 4	Shelf	Evolved	—

Test	Domain	Fabric	Sliding
Exp. 1	Sheet and shelf	SMAX	No
Exp. 2	Sheet and shelf	SMAX	Yes
Exp. 3	Shelf	Girdle	—
Exp. 4	Shelf	Evolved	—

Calotte posée



ice-shelf



- Ecoulement **favorisé sur la partie posée** $E \sim 5$; **cisaillement** dominant
- Ecoulement **défavorisé dans les shelves** $E \sim 0.5$; **contraintes longitudinales** dominant

Conclusion

- Les fabriques sont des marqueurs de l'histoire des déformations subies par la glace
- La très forte anisotropie du cristal combinée à des fabriques très marquées peut avoir des effets importants localement et à grande échelle
- La prise en compte de l'anisotropie dans les modèle de calotte n'est pas triviale
- Peu d'observations disponibles pour contraindre les modèles
- Les expériences de labo ne couvrent qu'un faible gamme des conditions rencontrées in-situ