



Dynamique bistable de l'océan sous les plateformes de glace antarctique

GDR: Défis théoriques
des sciences du climat

28 mai 2024

Louis Saddier



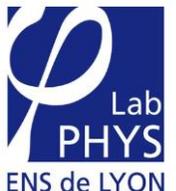
PHAST
PHYSIQUE
ET ASTROPHYSIQUE
UNIVERSITÉ DE LYON



ÉCOLE
DOCTORALE
— 52 —



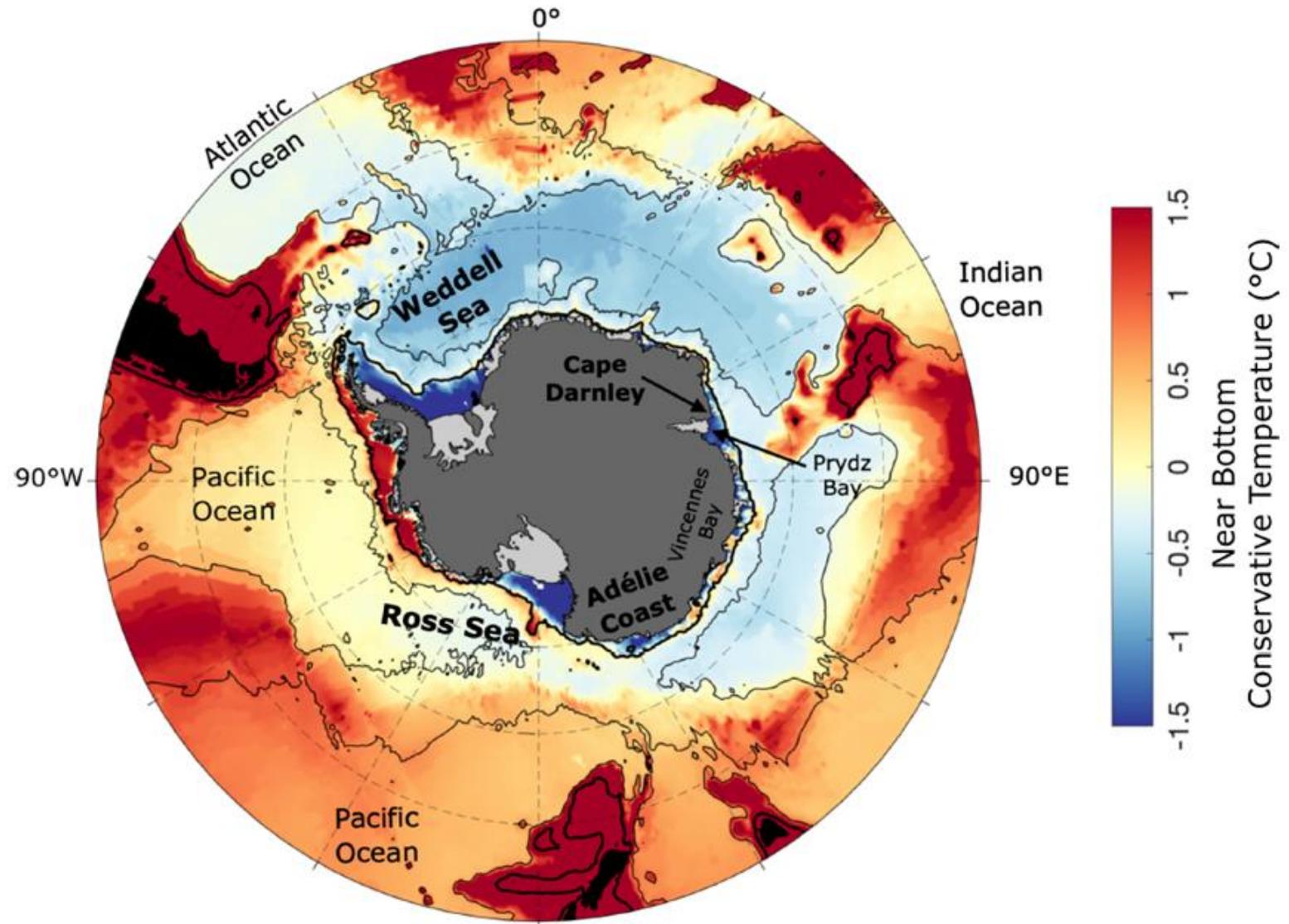
ENS
ENS DE LYON



Motivations

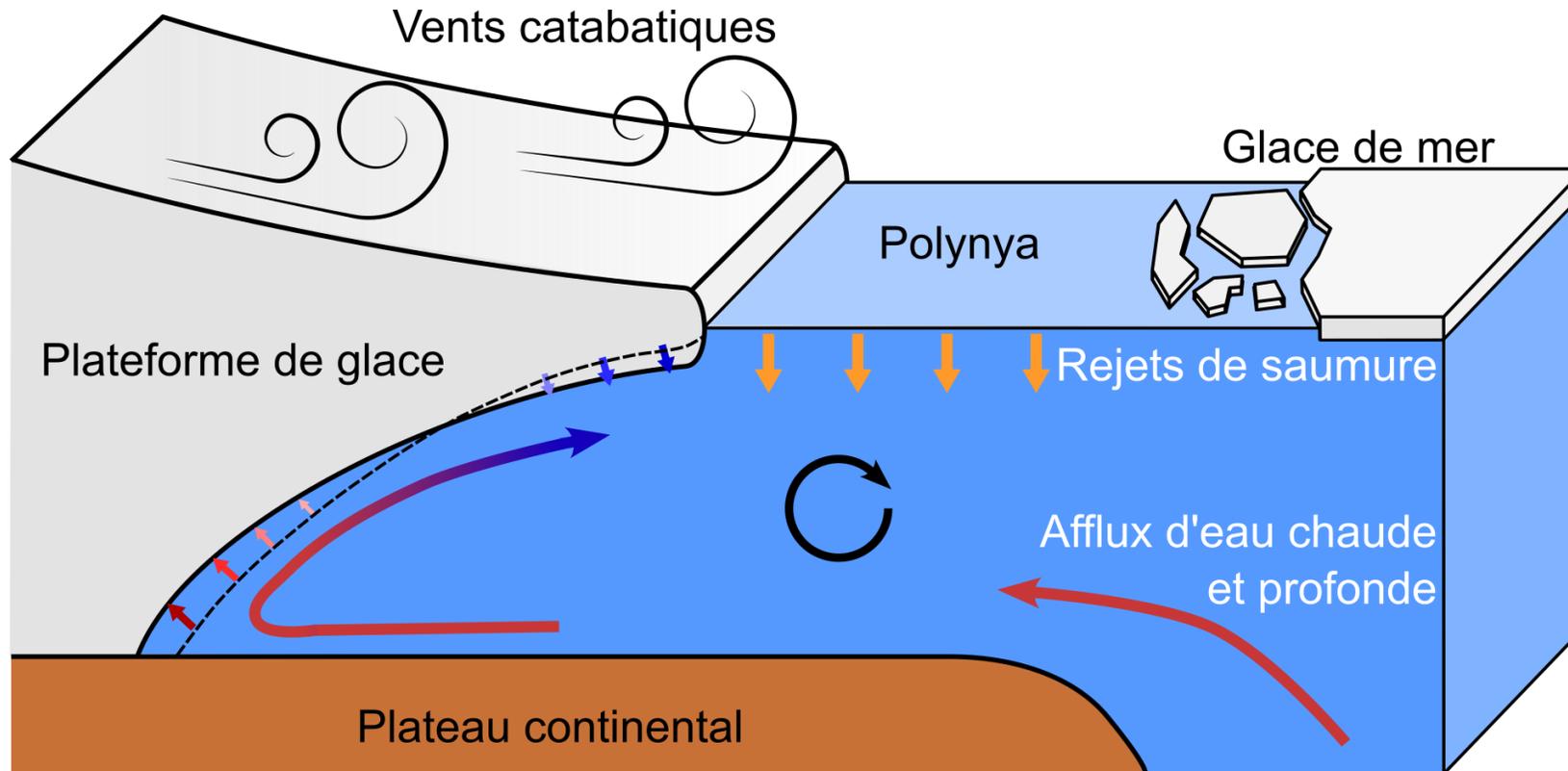
Plateformes de glace soumises à l'intrusion d'eaux profondes de températures variées

- Quelle est leur **réponse à l'intrusion de ces eaux** ? (taux de fonte, formation d'eau profonde, ...)
- Des **points de bascules** sont-ils possibles d'une **cavité "froide"** à une **cavité "chaude"** ?

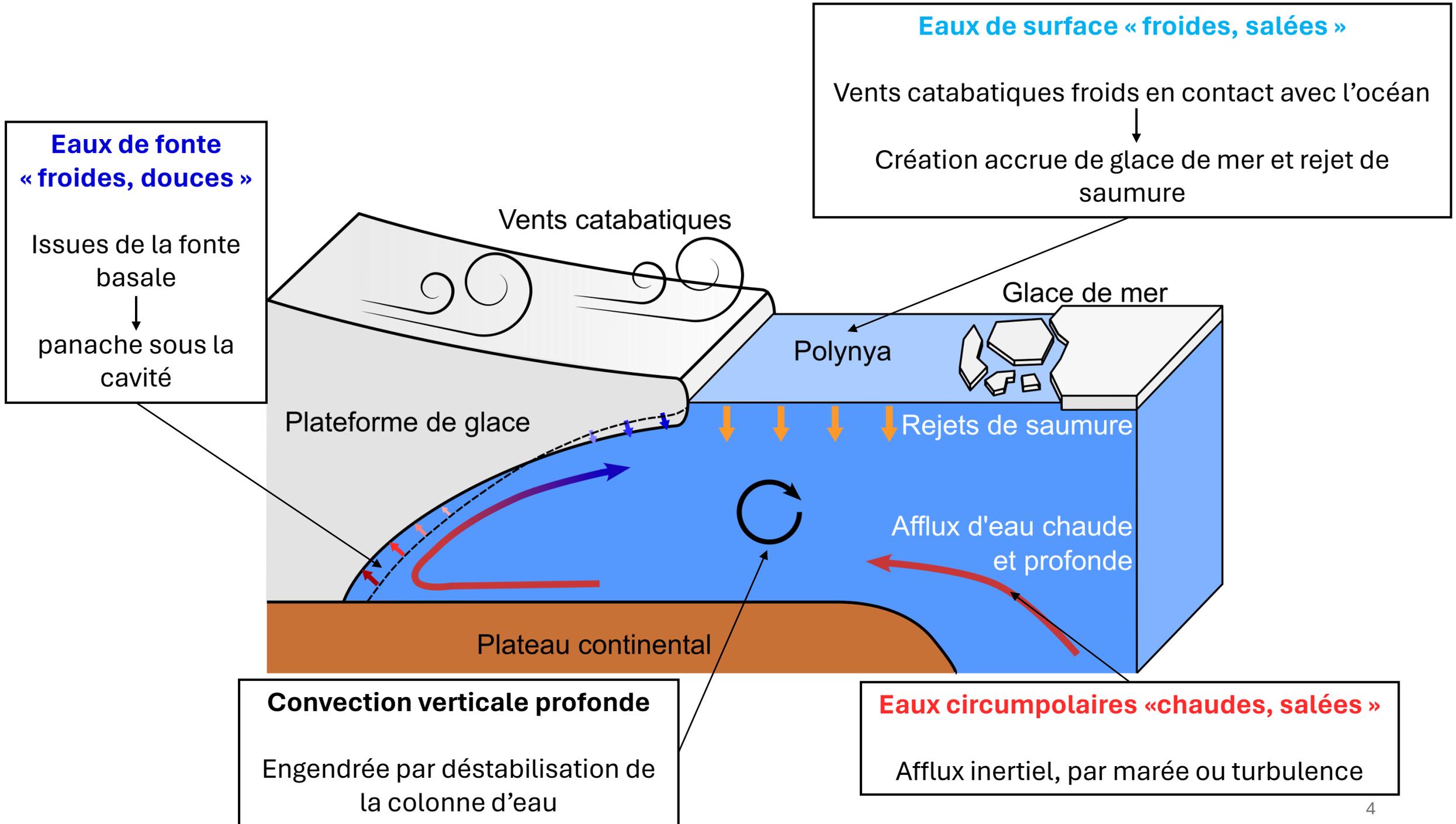


Crédit: Silvano et al. (2020)

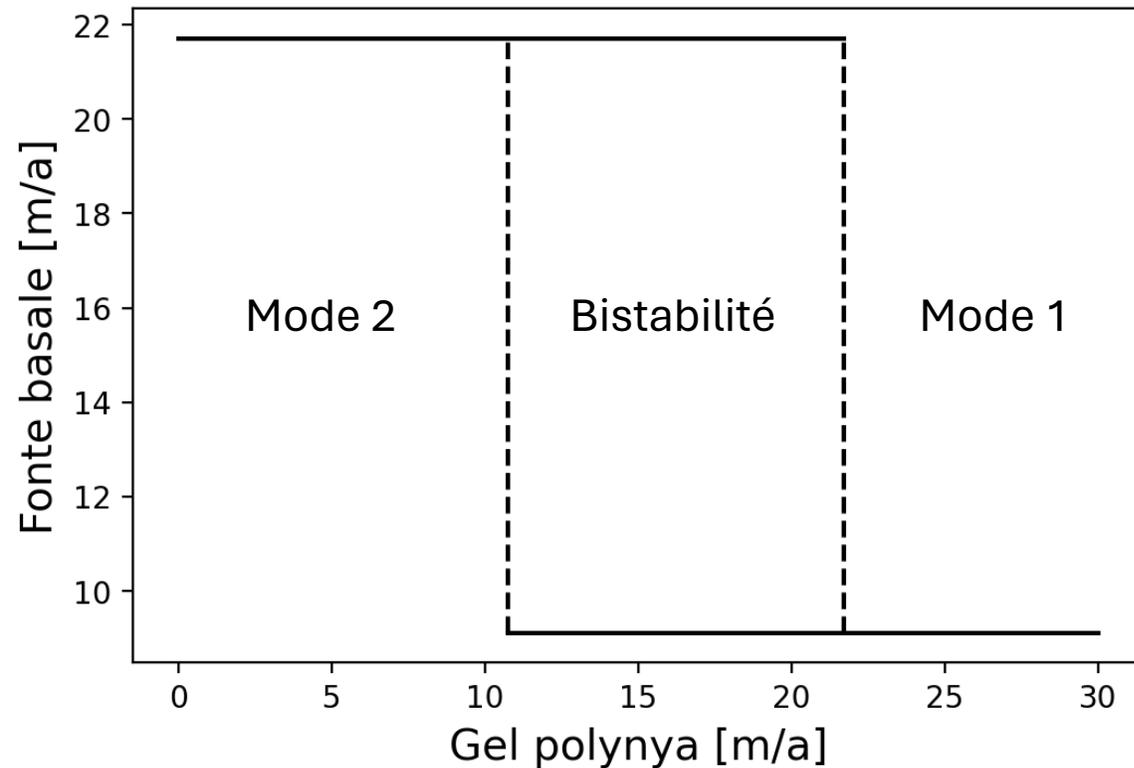
Principaux mécanismes géophysiques



Différentes masses d'eaux
Interfaces **océan/glace** et **océan/atmosphère**



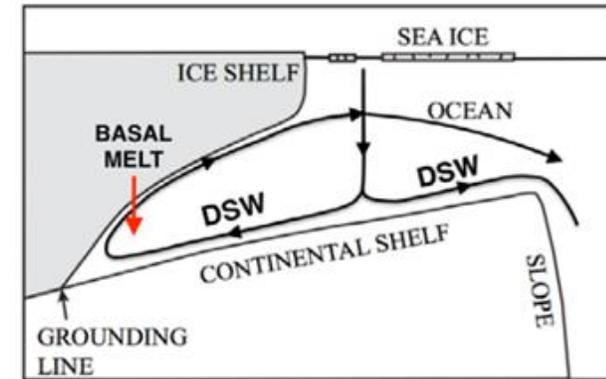
Dynamique bistable



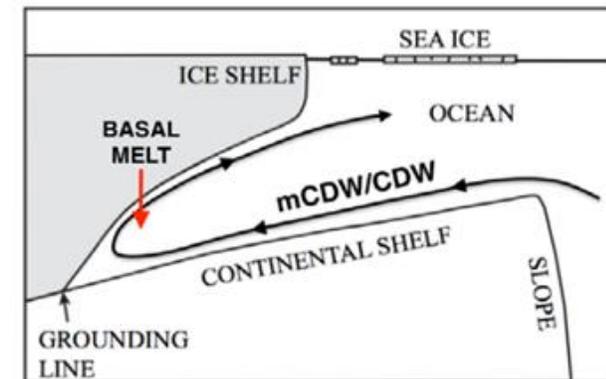
Points clés:

- 2 modes de mélange vertical (effet de seuil)
- Rétroaction positive due à la fonte basale

Mode 1

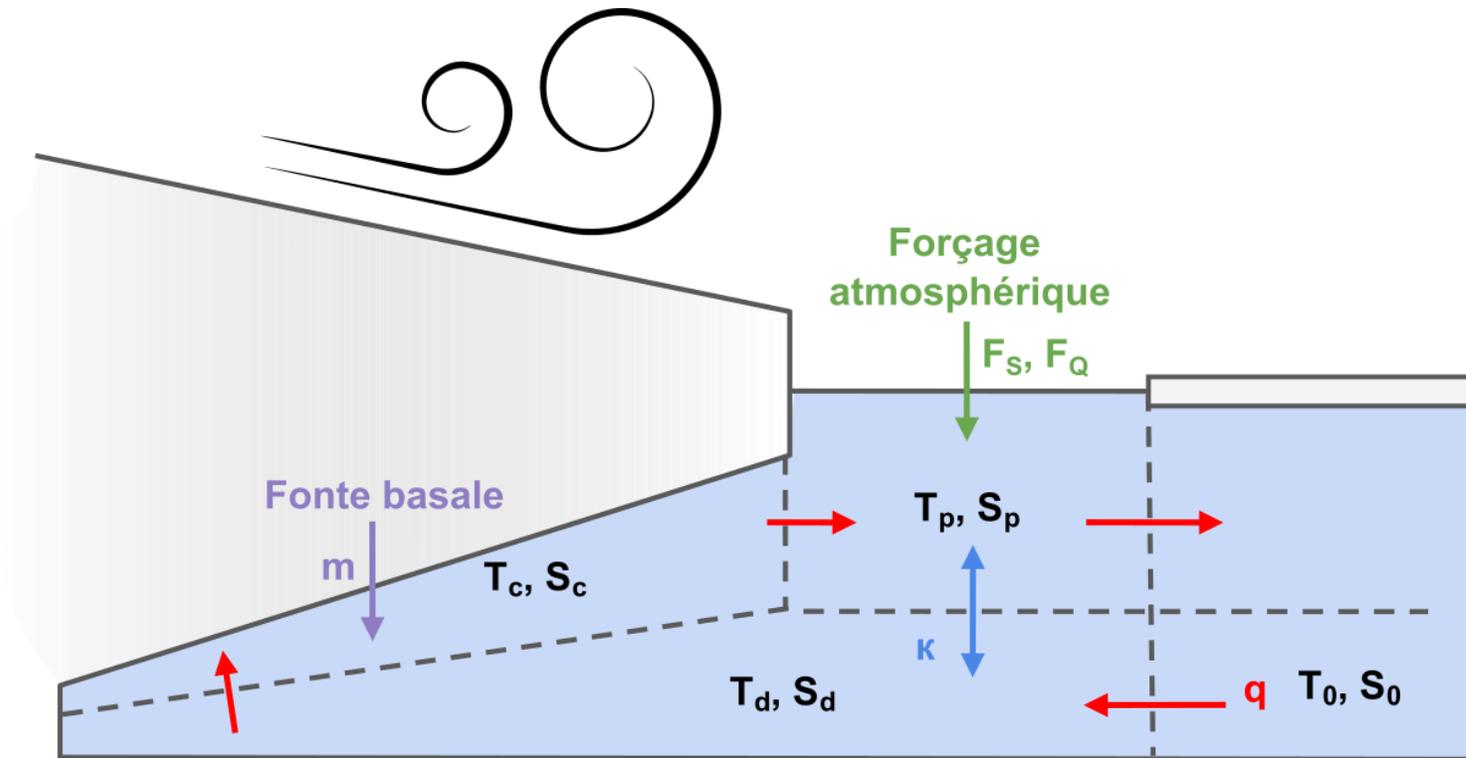


Mode 2



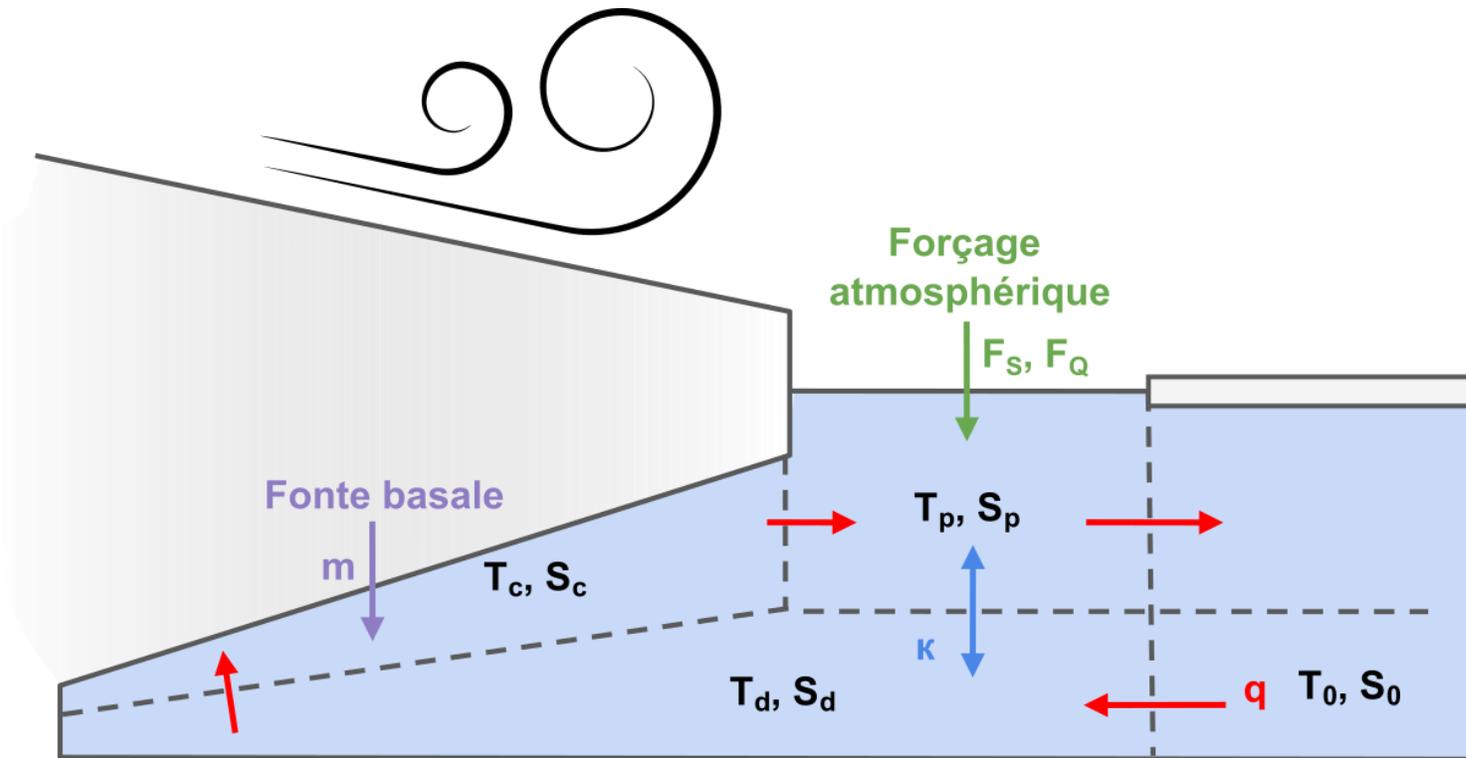
Crédit: Silvano et al. (2016)

Modélisation par un modèle en boîte



- Bilans de chaleur et de salinité dans chaque boîte

Modélisation par un modèle en boîte

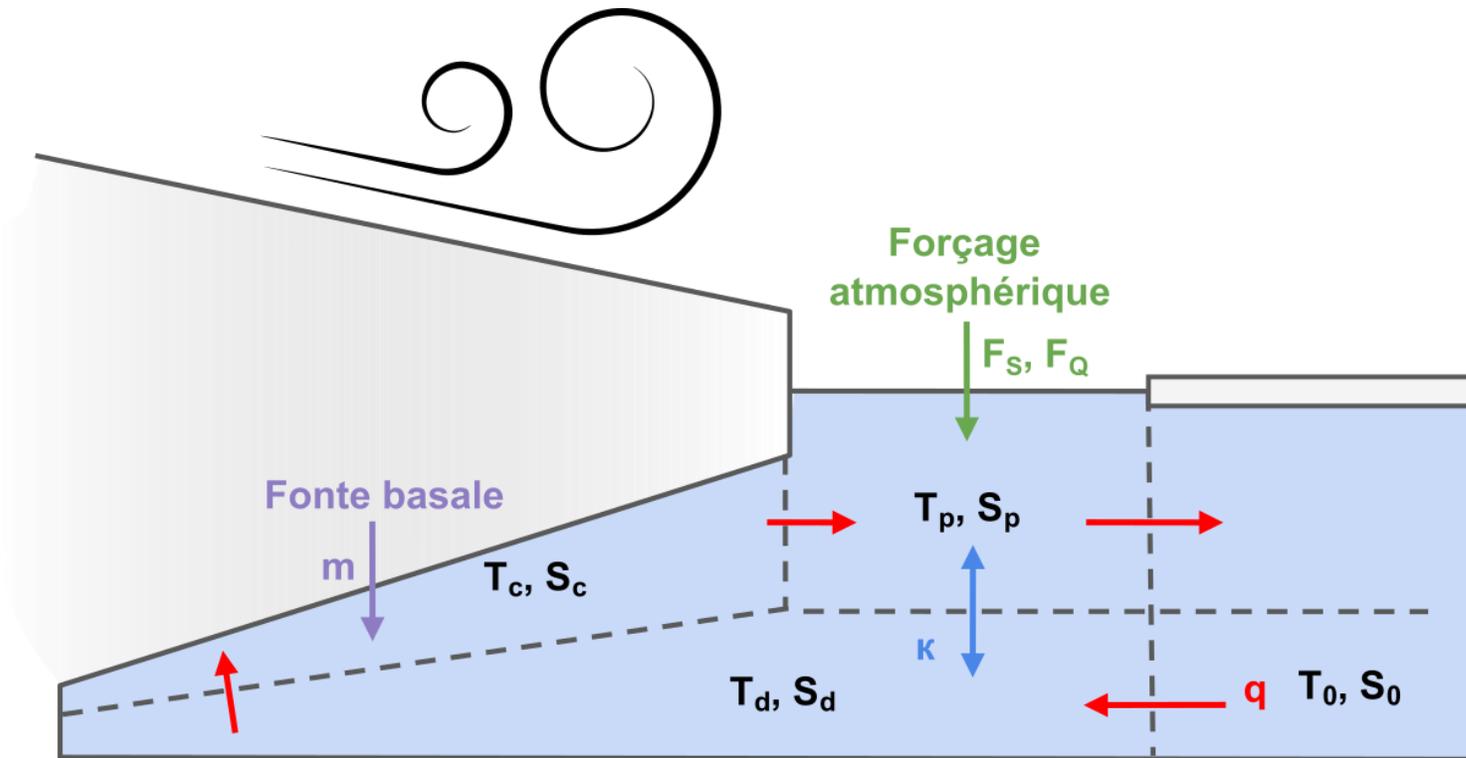


- Bilans de chaleur et de salinité dans chaque boîte
- Circulation de retournement q

Afflux peut être **inertiel** ou induit par les **différences de flottabilité** $q \propto (\rho_d - \rho_c)$

Pour le moment, considérons un afflux inertiel constant

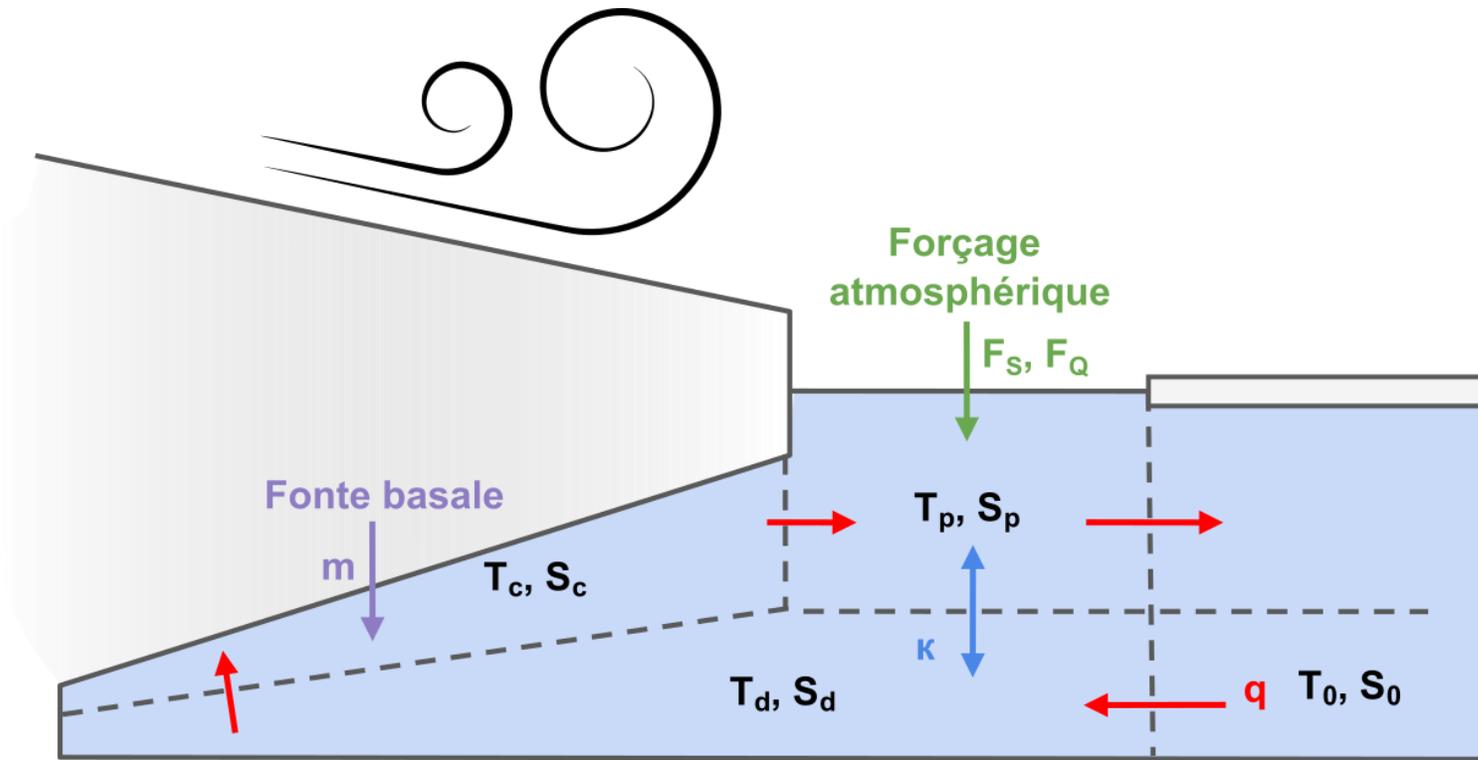
Modélisation par un modèle en boîte



- Bilans de chaleur et de salinité dans chaque boîte
- **Circulation de retournement q**
- 2 modes de mélange vertical: diffusif ou convectif selon le gradient de densité

Choix du mode de mélange vertical:
$$\kappa = \begin{cases} \kappa_{diff} & \text{if } \rho_p < \rho_d \\ \kappa_{conv} & \text{if } \rho_p > \rho_d \end{cases}, \quad \frac{\kappa_{conv}}{\kappa_{diff}} = O(10^4)$$

Modélisation par un modèle en boîte



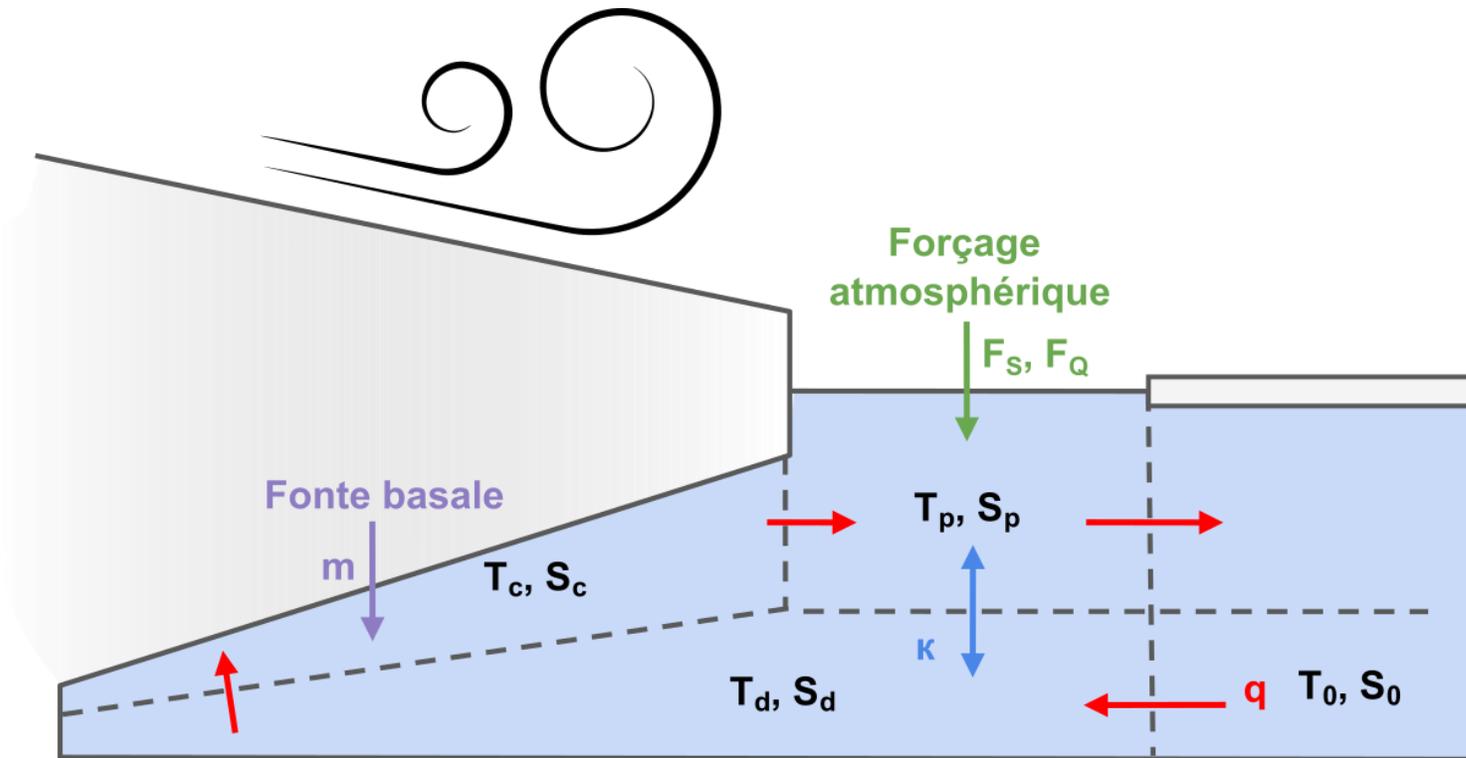
- Bilans de chaleur et de salinité dans chaque boîte
- **Circulation de retournement q**
- 2 modes de mélange vertical: diffusif ou convectif selon le gradient de densité
- Paramétrisation de la fonte basale à l'interface glace/océan

Modèle aux 3 équations: Calcul de la vitesse de fonte $m(T_c, S_c, \gamma_T)$

γ_T : Coefficient de transfert turbulent de chaleur à l'interface eau/glace



Modélisation par un modèle en boîte

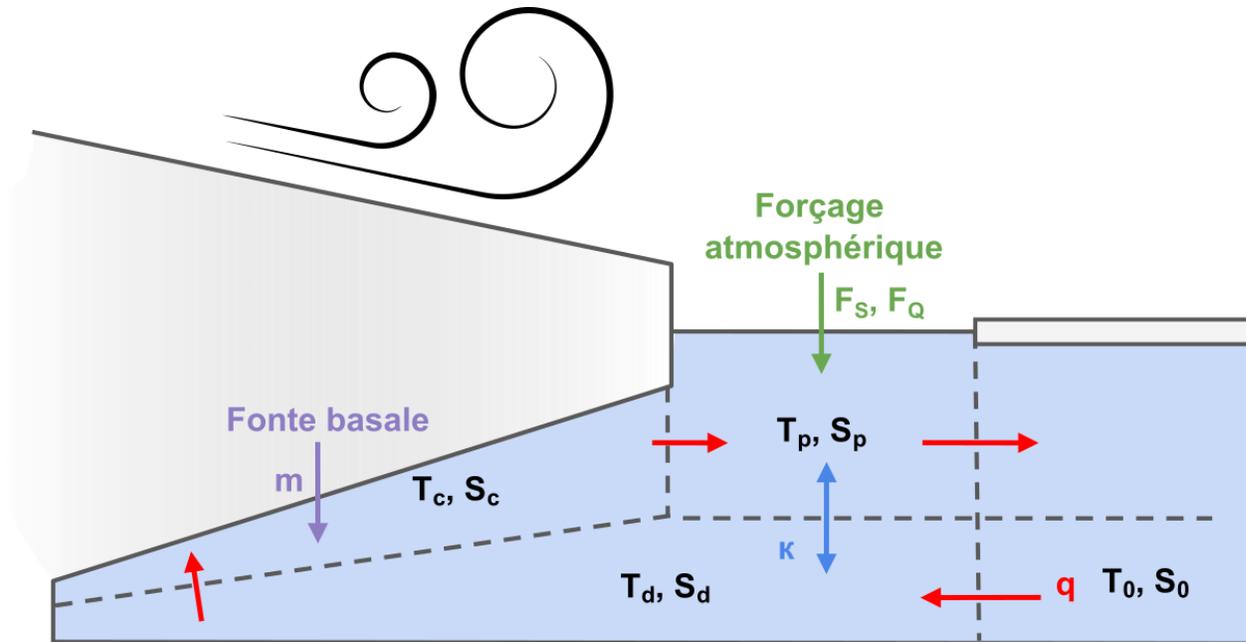


- Bilans de chaleur et de salinité dans chaque boîte
- **Circulation de retournement q**
- 2 modes de mélange vertical: diffusif ou convectif selon le gradient de densité
- Paramétrisation de la fonte basale à l'interface glace/océan
- Forçage atmosphérique F_S, F_Q

- Traité comme une interface eau/glace → **modèle à 3 équations**
- Température à la surface T_s **maintenue à la température de solidification**
- Rejet de saumure F_S dépendant de Ω **la vitesse de gel** en surface

Systeme dynamique

En linéarisant les paramétrisations: $\dot{X} = -MX + F$

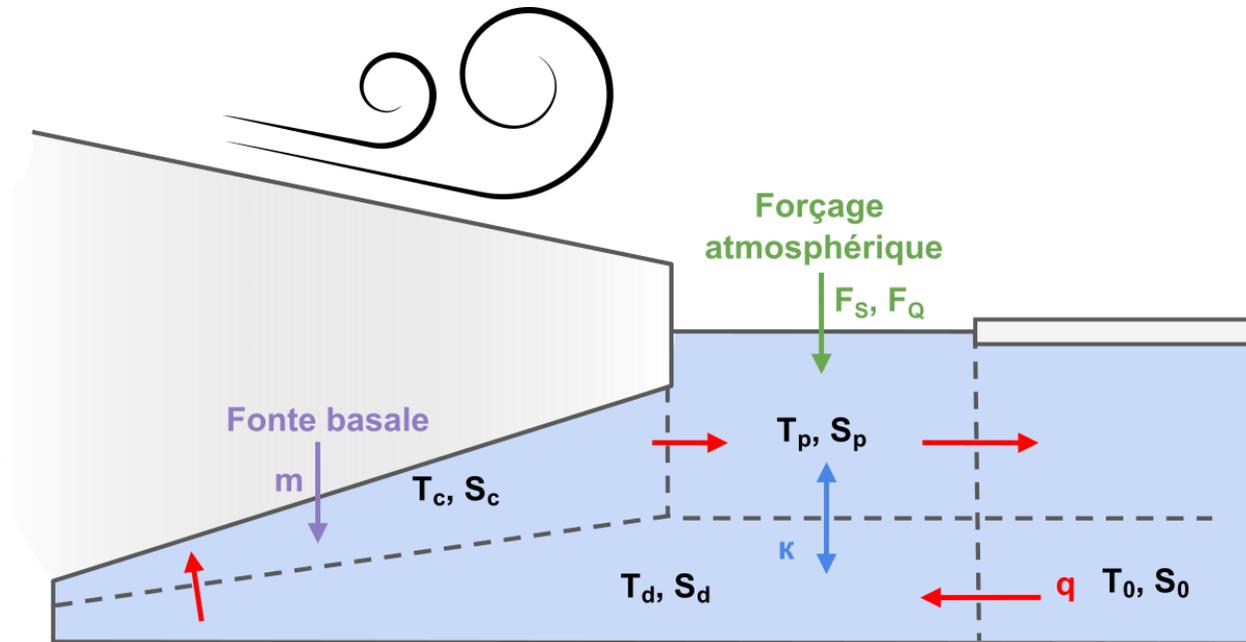


Non linéarités:

- Convection verticale (fonction escalier)
- Modèle à 3 équations. Des linéarisations sont possibles

Systeme dynamique

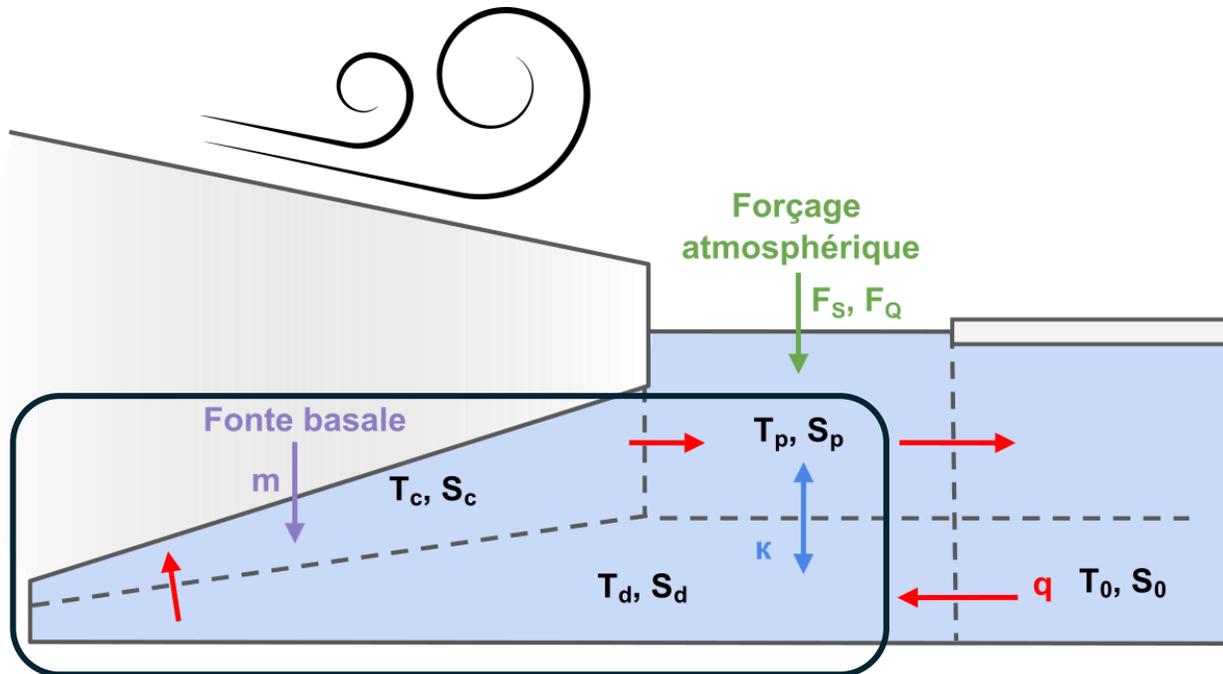
En linéarisant les paramétrisations: $\dot{X} = -MX + F$



$$X = \begin{pmatrix} T_p \\ T_d \\ T_c \\ S_p \\ S_d \\ S_c \end{pmatrix} \text{ contient les variables dynamiques}$$

Systeme dynamique

En linéarisant les paramétrisations: $\dot{X} = -MX + F$

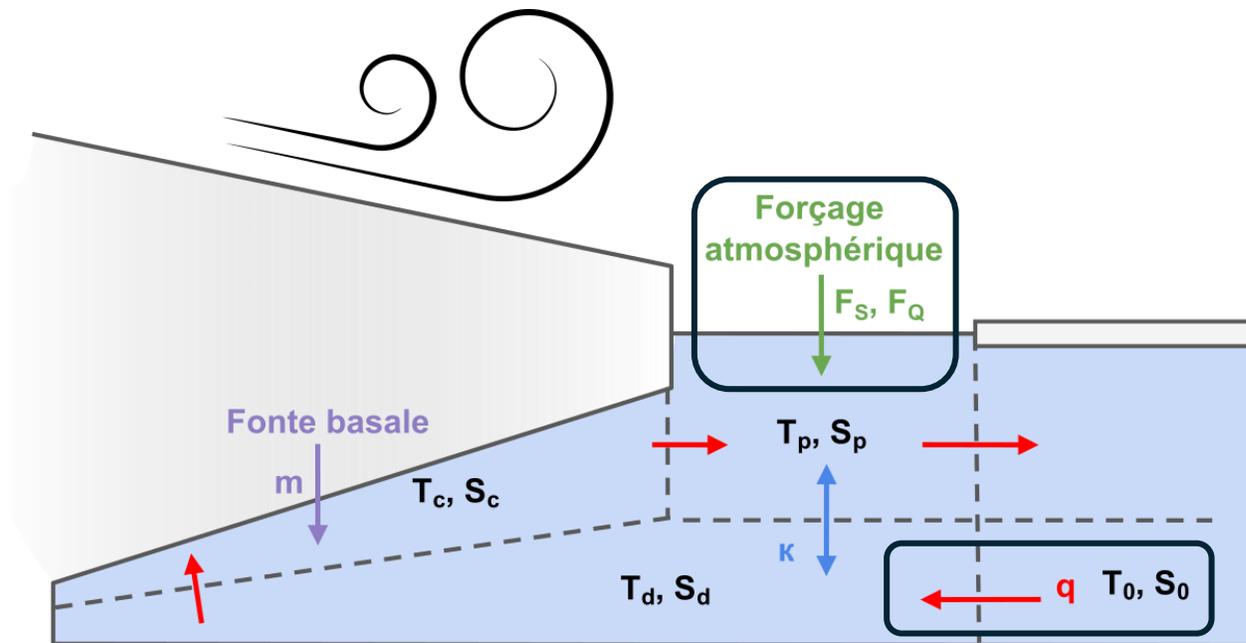


$$X = \begin{pmatrix} T_p \\ T_d \\ T_c \\ S_p \\ S_d \\ S_c \end{pmatrix} \text{ contient les variables dynamiques}$$

$M(\kappa, q, \gamma_T, \dots)$: matrice 6×6 , dynamique interne

Systeme dynamique

En linéarisant les paramétrisations: $\dot{X} = -MX + F$



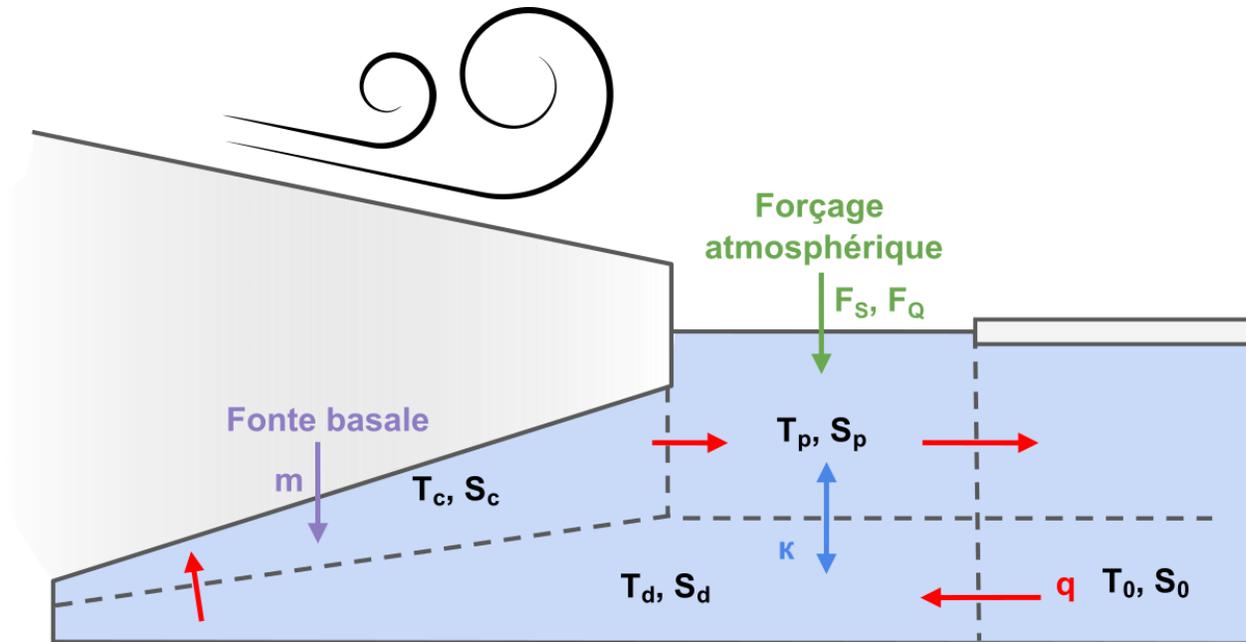
$$X = \begin{pmatrix} T_p \\ T_d \\ T_c \\ S_p \\ S_d \\ S_c \end{pmatrix} \text{ contient les variables dynamiques}$$

$M(\kappa, q, \gamma_T, \dots)$: matrice 6×6 , dynamique interne

$F(T_0, F_S(\Omega), q, \dots)$: vecteur 6×1 , forçage externe

Systeme dynamique

En linéarisant les paramétrisations: $\dot{X} = -MX + F$



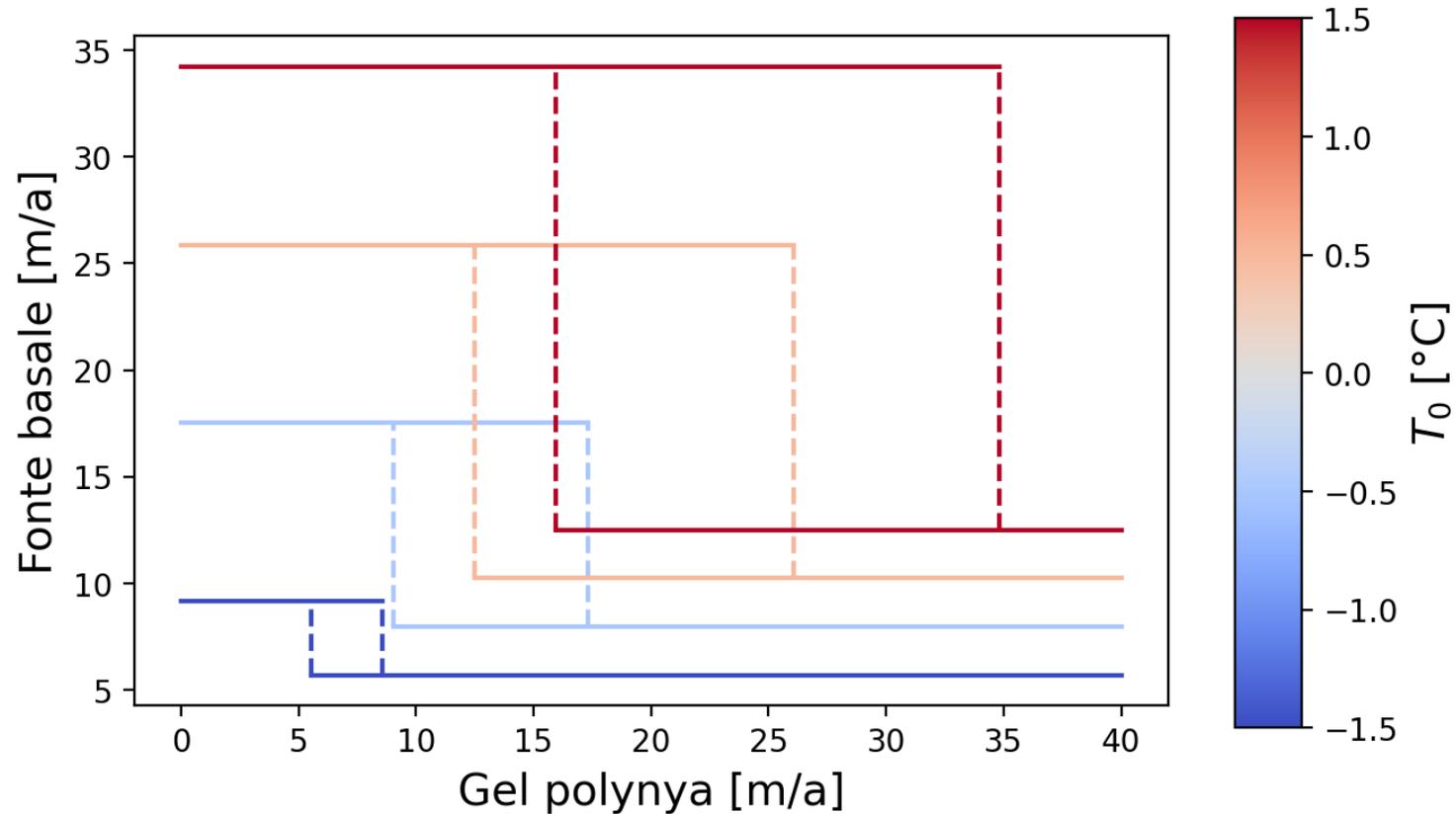
$$X = \begin{pmatrix} T_p \\ T_d \\ T_c \\ S_p \\ S_d \\ S_c \end{pmatrix} \text{ contient les variables dynamiques}$$

$M(\kappa, q, \gamma_T, \dots)$: matrice 6×6 , dynamique interne

$F(T_0, F_S(\Omega), q, \dots)$: vecteur 6×1 , forçage externe

Etat stationnaire: $\dot{X} = 0 \Rightarrow X_{st.} = M^{-1}F \longrightarrow X_{st.}(\kappa, \dots) = \begin{cases} X_{st.}^{diff} & \text{si } \kappa = \kappa_{diff} \\ X_{st.}^{conv} & \text{si } \kappa = \kappa_{conv} \end{cases} \longrightarrow \mathbf{2 \text{ points fixes}}$

Cycle d'hystérésis



Stabilité de la colonne d'eau $\sigma = \frac{\rho_p - \rho_d}{\rho_{ref}} = -\alpha(T_p - T_d) + \beta(S_p - S_d)$ donne la stabilité des points fixes

Paramétrisations de la circulation q et de γ_T

Jusqu'à présent:

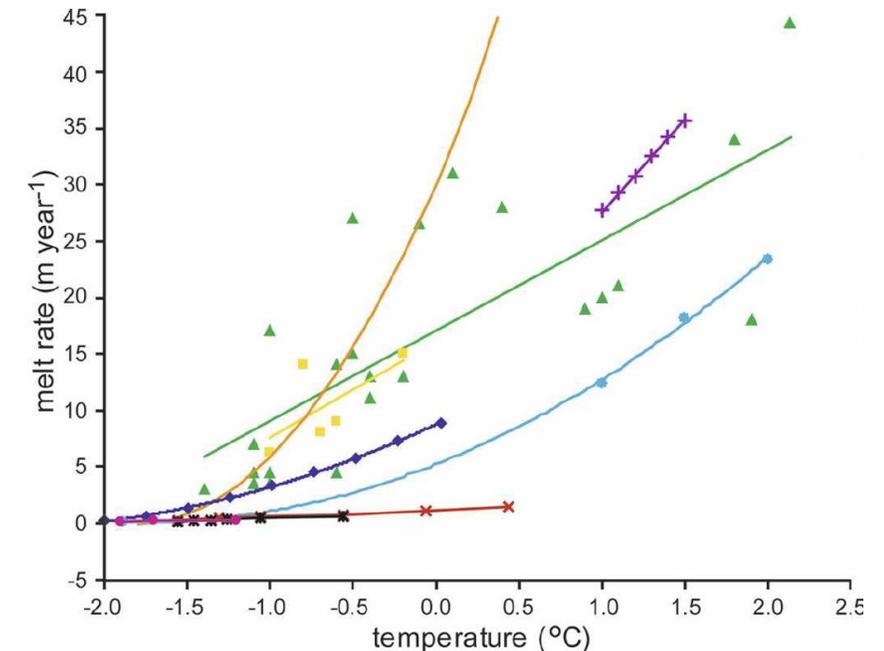
- q constant: **écoulement inertiel**
- γ_T constant: ne dépend pas de la vitesse du panache

→ Taux de fonte $m \propto qT_0$ (dans les 2 modes)

Autre choix de paramétrisation:

- $q \propto \rho_d - \rho_c$: **Circulation thermohaline** pilotée par la flottabilité
- $\gamma_T \propto q$: La **vitesse du panache** induit plus de transferts thermiques

→ Circulation $q \propto T_0$ et taux de fonte $m \propto T_0^2$



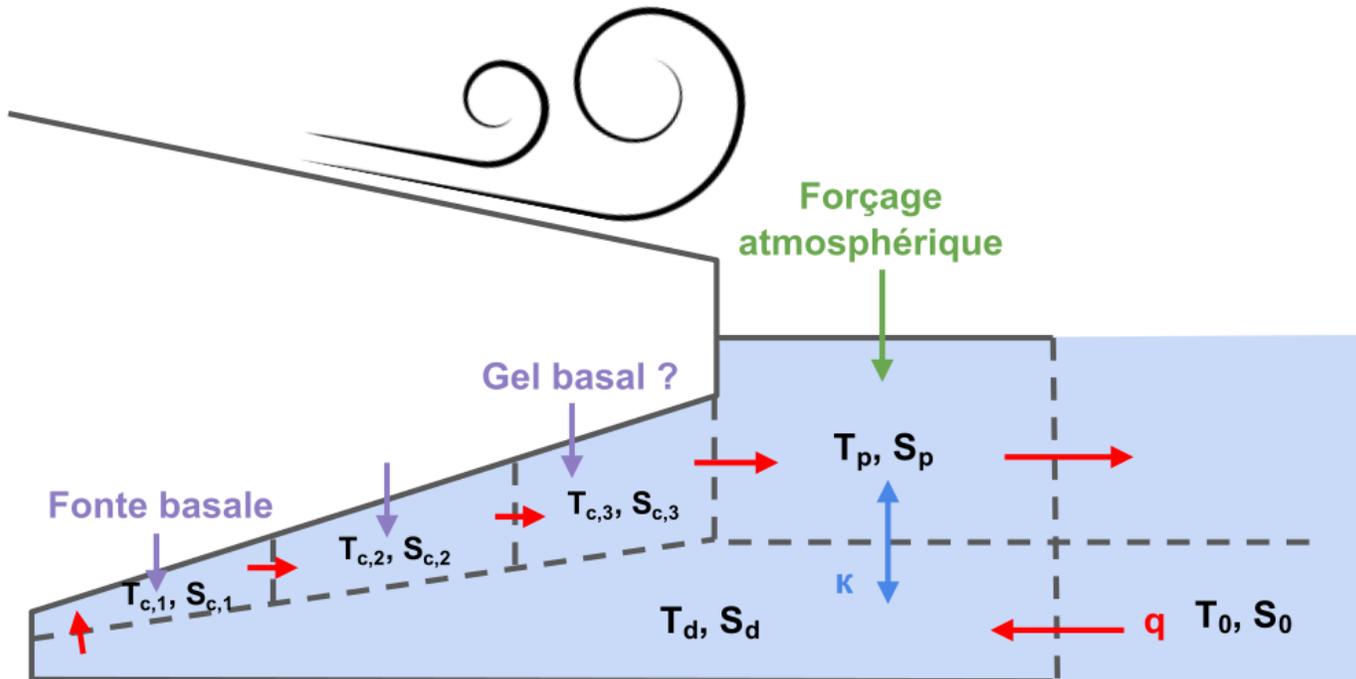
Credit: Holland et al, 2008

Différentes lois d'échelles émergent selon les choix de paramétrisation

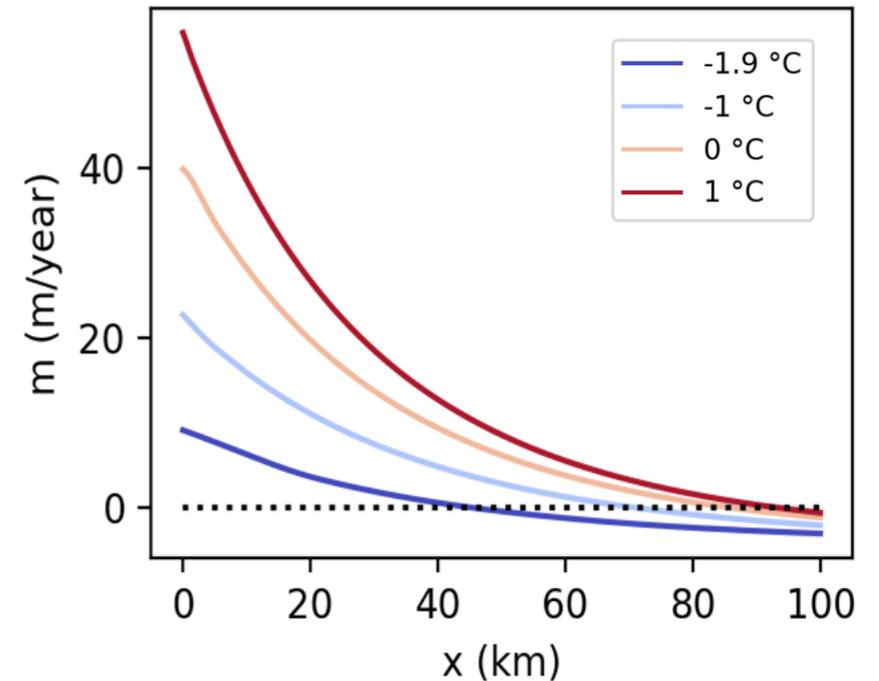
Ajout de boîtes

Panache d'eau surfondue possible à cause des effets de pression $T_b = aS_b + b + cP$

Grandes cavités et/ou faible flux de chaleur entrant \longrightarrow gel basal proche du front de la plateforme ?

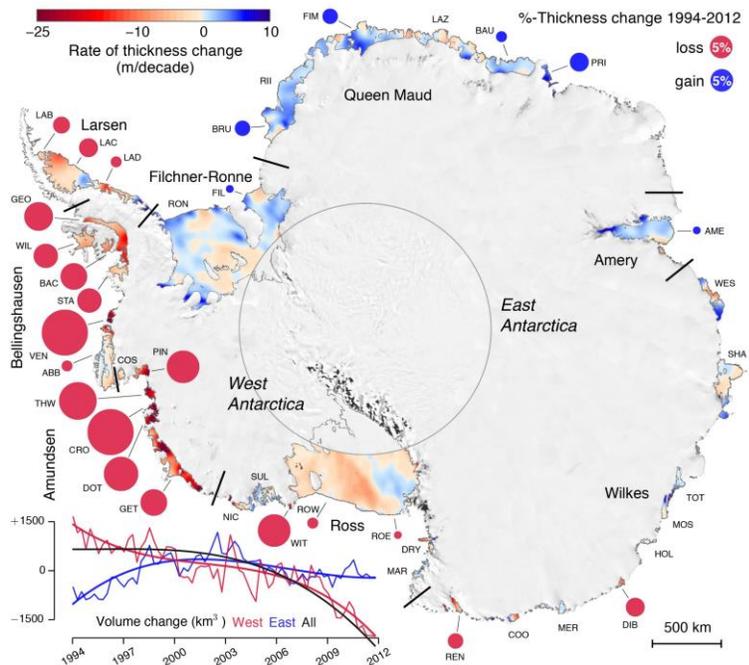


Taux de fonte, limite continue



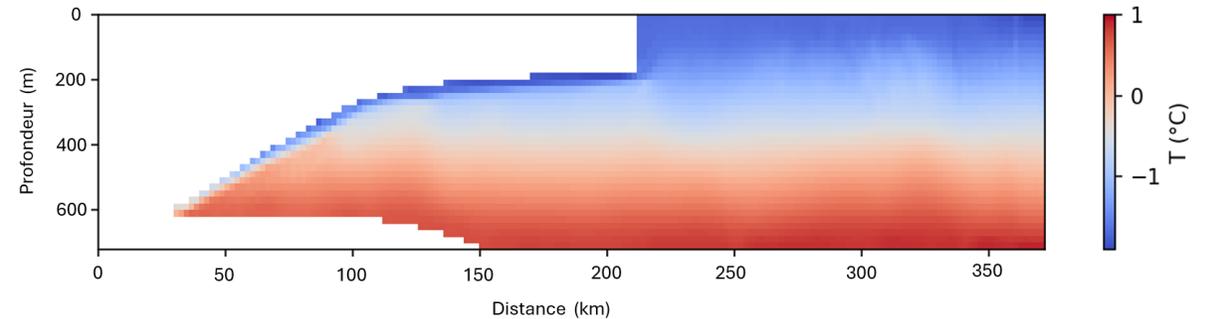
Perspectives

- Simulation numérique d'une cavité générique et simplifiée pour vérifier les paramétrisations et les résultats du modèle en boîte



Crédit: Paolo et al. (2015)

Coupe d'une simulation 3D en configuration ISOMIP+ avec NEMO



- Application à des plateformes de glace réelles

→ Dynamique bistable est-elle pertinente dans certaines cavités ?
Si oui, sous quelles conditions un point de bascule est possible ?



Merci de m'avoir écouté !
Des questions ?

Crédit: National Science Foundation

Contact: louis.saddier@ens-lyon.fr



PHAST
PHYSIQUE
ET ASTROPHYSIQUE
UNIVERSITÉ DE LYON

