

Module de Panorama des Sciences de la Terre I

TD 4 : La cryosphère

Les calottes glaciaires occupent une surface importante sur la planète et recouvrent continents et océans. Le volume de glace varie en fonction du climat et on cherche à évaluer les conséquences pour la morphologie terrestre et pour les océans. On notera  $\rho_e$  et  $\rho_g$  les densités de l'eau et de la glace, et on trouvera les valeurs numériques utiles à la fin du texte.

1 – La glace de mer.

• La glace est moins dense que l'eau. En supposant qu'un iceberg est un cylindre vertical de section  $S$ , calculer l'épaisseur  $h_2$  de la "quille" d'un iceberg en fonction de sa hauteur émergée  $h_1$ .

• La glace de mer fond et libère donc une certaine quantité d'eau. Déterminer le volume d'eau libéré pour une banquise de surface totale  $S_{go}$  et de hauteur  $h_1$ . Déterminer la variation du niveau des mers qui en résulte.

2 – Les inlandis.

La glace qui s'accumule sur un continent forme ce que l'on appelle un inlandis et représente une charge qui provoque la subsidence du continent.

• En utilisant le principe d'isostasie, calculer la variation d'altitude  $d$  du continent pour une épaisseur de glace  $h_g$ . On notera par  $\rho_c$  et  $\rho_m$  les densités de la croûte continentale et du manteau.

• Un inlandis n'est pas statique : il s'étale et s'écoule vers l'océan comme une goutte d'huile qui se répand sur une table. Le flux de glace correspondant (volume de glace évacué par unité de temps) est noté  $\Phi_g$ . D'autre part, l'inlandis est constamment alimenté par des chutes de neige qui se compacte et se transforme en glace. Le flux de glace correspondant est noté  $\Phi_n$ . On peut montrer qu'un régime permanent est atteint avec un inlandis d'un certain volume. Quelle est alors la relation entre  $\Phi_g$  et  $\Phi_n$ ? Pour un volume total  $V_g$  de glace dans l'inlandis, donner l'expression donnant le temps de résidence moyen de la glace? Faire le calcul pour l'inlandis d'Antarctique.

• Conséquences pour la circulation océanique. Quelle est la différence entre l'eau de mer et l'eau provenant de la fonte des glaces de mer?

Même question pour les glaces continentales.

Comment varie la densité de l'eau si l'on augmente la concentration de sel dissous? Même question si l'on augmente la température.

Quel est le flux et le devenir des eaux glaciaires de l'Antarctique?

Valeurs numériques.

$$\rho_g = 910 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\rho_e = 1030 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\rho_c = 2700 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\rho_m = 3300 \text{ kg m}^{-3}$$

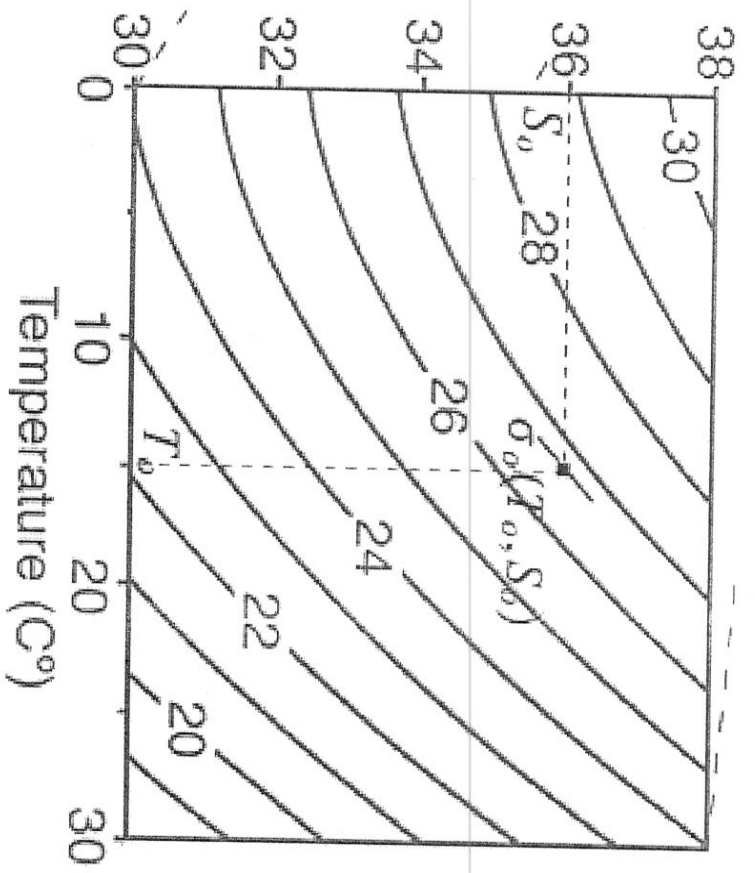
$$h_1 = 1 \text{ m}$$

$$h_g = 2 \text{ km}$$

$$\text{Surface de la banquise de la mer Arctique} = S_{go} = 10^7 \text{ km}^2$$

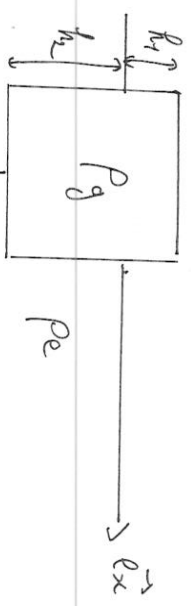
$$\text{Surface de l'inlandis d'Antarctique} = S_{gc} = 1.2 \cdot 10^7 \text{ km}^2$$

$$\text{Flux de neige/glace en Antarctique} = \Phi_n = 2.4 \cdot 10^2 \text{ km}^3/\text{an}$$



$$P_{\text{eau}} = 1000 + \sigma_0(T, S) \quad \text{kg } \text{m}^{-3}$$

Rappel sur l'équilibre hydrostatique



La force de pression  $\vec{F}$  agit sur le cylindre équilibré au poids  $\vec{P}$ .

$$\vec{P} + \vec{F} = \vec{0}$$

Force de pression: 
$$\vec{F} = - \int_S P \cdot \vec{n} \, ds$$

où  $\vec{n}$  est la normale sortante du cylindre de surface  $S$ .

D) La glace de mer

$P_g < P_e$ : la glace est immergée dans l'eau.

Dans l'océan fluide, la boue (glace de mer, iceberg) peut s'enfoncer dans la loi de l'équilibre hydrostatique.

Equilibre hydrostatique:

La force de pression agit sur la surface du cylindre équilibré au poids.

$$\vec{F} = - P(h_2) \cdot \vec{e}_3 \cdot S_0 \quad \text{où } S_0 \text{ est la surface de la base du cylindre.}$$

La force de pression  $P$  dépend de la profondeur  $z$ , les forces de pression sont nulles sur  $\vec{e}_1 \Rightarrow \vec{F}$  est une force verticale dirigée vers le haut.

$$\vec{F} = - P_e \rho g h_2 S_0 \vec{e}_3$$

Soit  $\vec{P}$  le poids de l'iceberg:

$$\vec{P} = P_g \rho g (h_1 + h_2) S_0 \vec{e}_3$$

La force de pression s'oppose au poids de l'iceberg.

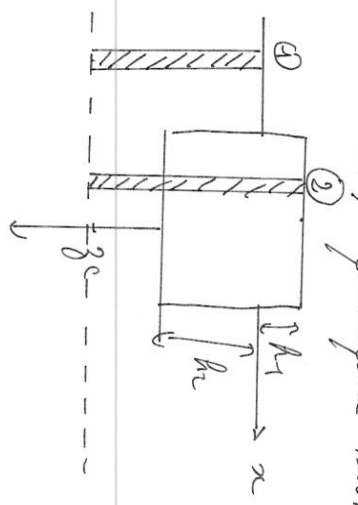
Equilibre hydrostatique:  $\vec{P} + \vec{F} = \vec{0}$

$$\Rightarrow \text{sur } \vec{e}_3: \quad P_e \rho g h_2 S_0 = P_g \rho g (h_1 + h_2) S_0$$

$$\Rightarrow \quad h_2 = \frac{P_g}{P_e - P_g} h_1$$

à  $h_1 = 1 \text{ m}$ , on trouve  $h_2 = 7,6 \text{ m}$ . La "hauteur" de l'iceberg est beaucoup plus grande que la partie émergée.

Pour toute profondeur  $z > h_2$ , la pression est la même, quelque soit  $x$ .



ou  $z = z_c$ , la pression est la même sur la structure ou à côté.

$\Rightarrow$  le poids de la colonne 1 = le poids de la colonne 2

La place fond

Conservation de la masse:  $N_{place} = N_{ou\ vide}$

$$\Rightarrow \rho_g (h_1 + h_2) S_g = \rho_e V_{eau}$$

$$\Rightarrow V_{eau} = (h_1 + h_2) S_g \frac{\rho_g}{\rho_e}$$

on utilise la relation pression - précisément pour une vitesse ou équilibre hydrostatique

$$h_2 = \frac{\rho_g}{\rho_e - \rho_g} h_1, \text{ on trouve}$$

$$h_1 + h_2 = \left( \frac{\rho_e - \rho_g}{\rho_g} + 1 \right) h_2$$

$$= \frac{\rho_e}{\rho_g} h_2$$

$$\Rightarrow V_{eau} = S_g \times h_2$$

$\Rightarrow$  le niveau de la mer ne varie pas quand on creuse fond:

Etat initial

$$\left[ \begin{array}{c} 0 \\ \rho_e \end{array} \right] \xrightarrow{\text{fuite}} \left[ \begin{array}{c} \rho_e \\ 0 \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} 0 \\ \rho_e \end{array} \right] = \frac{0}{\rho_e}$$

Application numérique

Hauteur critique =  $\rho_g S_g \left( \frac{\rho_e}{\rho_e - \rho_g} h_1 \right) = 7,81 \times 10^{16} \text{ kg}$

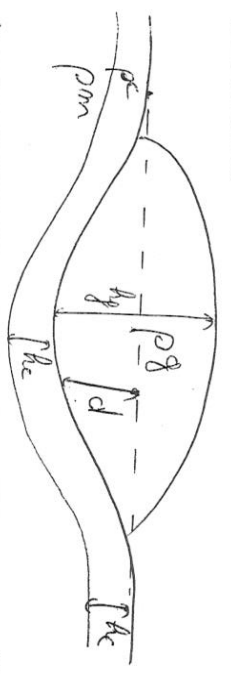
$h_1 + h_2 = 8,5 \text{ m.}$

(3)

(4)

② Les inlandsis

2/ ISOSTASIE



d: subsidence.

$z_c$  profondeur de centre de masse

$z' = z_c$ , car le centre de masse de la croûte se trouve à la même hauteur que le centre de masse de la Terre.

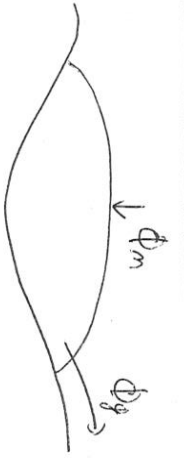
$$\rho_c h_c + \rho_m (z_c - h_c) = \rho_c h_g + (\rho_c d - h_c) \rho_m + h_e \rho_c$$

$$\Rightarrow -\rho_m h_c = \rho_c h_g - \rho_m (d + h_c)$$

$$\Rightarrow \boxed{d = \frac{\rho_c}{\rho_m} h_g}$$

A.N.  $\rho_c = 2800 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_m = 3300 \text{ kg/m}^3$   
 $h_g = 2 \text{ km}$   
 $\Rightarrow d = 0,55 \text{ km}$

FLUX DE GLACE



$\phi_g$ : flux de glace correspondant à l'écartement de l'inlandsis vers l'océan.

$\phi_m$ : flux de glace correspondant aux chutes de neige qui se compense.

Soit  $h_g$  la hauteur de l'inlandsis =  $\rho_c V_g$

$$\frac{d(\rho_c V_g)}{dt} = \rho_c (\phi_m - \phi_g)$$

équation différentielle  $\Rightarrow \frac{dV_g}{dt} = 0 \Rightarrow \phi_m = \phi_g$

Temps de résidence:  $T = \frac{V_g}{\phi_g} = 100000 \text{ ans}$

CONSEQUENCES POUR LA CIRCULATION Océanique

(3)

eau de mer : salinité = 30 ‰

⇒ 30 ‰ → 1000 g eau.

eau de fonte de glace de mer : salinité = 0 ‰.

eau des calottes de glace → salinité 0

si  $\rho_{\text{eau}} \rightarrow \rho_{\text{glace}}$   
 $T \rightarrow P \downarrow$

flux noroïquique des glaces de l'Antarctique =  $\Phi_{\text{mg}}$

$$\Phi_{\text{mg}} = \rho_g \Phi_g = 2,184 \cdot 10^{14} \text{ kg/ea}$$

$\Phi_e$  : flux des eaux antarctiques :  $\rho_g \Phi_g = \rho_e \Phi_e \rightarrow \Phi_e = 24 \text{ km}^3/\text{an}$

note : pendant  $T$ , les glaces fondent,

l'eau au  $\rho_{\text{eau}}$  s'ajoute, les chutes de neige s'empilent