

Devoir en temps libre n° 26

Le fameux problème du glaçon

On considère un verre rempli à ras-bord d'eau liquide. On y ajoute doucement un glaçon d'eau, ce qui fait déborder une partie du liquide. Le verre contient alors du liquide (à ras-bord) sur lequel flotte le solide. Le verre est laissé au repos à température ambiante ; le glaçon fond progressivement. Comment le niveau du liquide dans le verre évolue-t-il ? De l'eau déborde-t-elle ?

On pourra par commodité considérer que le glaçon est cubique d'arête a , et il est conseillé de s'aider d'un schéma. On veillera à ne pas remplacer l'eau liquide par un liquide d'une autre composition : il faudrait modifier le raisonnement, et cela n'est pas souhaitable pour votre santé.

Lorsqu'on discute de l'élévation du niveau de la mer sous l'effet du réchauffement climatique, l'effet de la fonte de la banquise est considérée comme sans effet. Ceci est-il compatible avec le raisonnement précédent ? En est-il de même si on considère la salinité de l'océan, sachant que lors de la formation de la banquise, la glace est appauvrie en sel par rapport au liquide ? Discuter.

type d'eau	masse volumique
océan	$1027,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
glace de banquise à $-45 \text{ }^\circ\text{C}$	$917 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
eau de fonte de la banquise	$999,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

TABLE 1 – Masse volumique de l'eau sous divers états

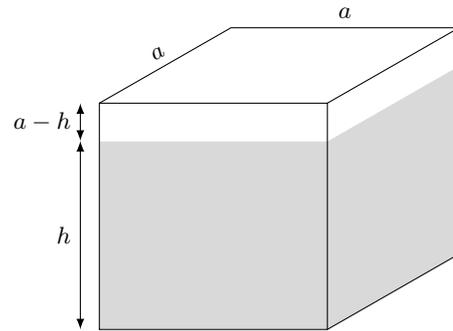
Corrigé du devoir en temps libre n° 26

éléments de correction

Pour tout l'exercice, on pose :

- ρ_g et V_g la masse volumique et le volume total du glaçon ;
- ρ_ℓ et $V_{\ell \text{ dep}}$ la masse volumique de l'eau dans le verre et le volume de l'eau liquide du verre déplacée par le glaçon ;
- $\rho_{\ell \text{ fondue}}$ et $V_{\ell \text{ fondue}}$ la masse volumique et le volume de l'eau liquide issue de la fonte du glaçon.

Si le glaçon est à l'équilibre, alors son poids et la poussée d'Archimède se compensent, ce qui permet d'obtenir le volume d'eau déplacée par le glaçon :



$$\rho_g \times V_g \times g = \rho_\ell \times V_{\ell \text{ dep}} \times g \Rightarrow V_{\ell \text{ dep}} = V_g \times \frac{\rho_g}{\rho_\ell}$$

Calculons maintenant le volume $V_{\ell \text{ fondue}}$ de l'eau liquide issue de la fonte du glaçon. Comme la masse est conservée lors de la fusion, la masse d'eau liquide issue de la fonte est égale à la masse du glaçon, soit :

$$m_{\text{glace}} = m_{\text{eau fondue}} \Rightarrow \rho_g \times V_g = \rho_{\ell \text{ fondue}} \times V_{\ell \text{ fondue}} \Rightarrow V_{\ell \text{ fondue}} = V_g \times \frac{\rho_g}{\rho_{\ell \text{ fondue}}}$$

Si la masse volumique de l'eau issue de la fonte du glaçon est la même que celle de l'eau dans le verre, soit $\rho_{\ell \text{ fondue}} = \rho_\ell$, alors les deux équations précédentes montrent immédiatement que : $V_{\ell \text{ fondue}} = V_{\ell \text{ dep}}$, autrement dit le volume d'eau fondue remplace exactement le volume d'eau déplacée. Sur le schéma ci-dessus, cela revient à dire que l'eau initialement solide, qui occupe le volume a^3 , n'occupe plus que le volume grisé a^2h une fois qu'elle s'est liquéfiée.

En conséquence, la fonte du glaçon ne fait pas varier la hauteur d'eau dans le verre, si la masse volumique de l'eau fondue est égale à celle de l'eau dans le verre.

Peut-on en déduire quelque chose sur la fonte de la banquise ? L'hypothèse de l'égalité des masses volumiques de l'eau de la mer et de l'eau de fonte de la banquise n'est pas rigoureusement vérifiée : ces masses volumiques sont proches mais pas égales ; en conséquence, c'est seulement en première approximation que la fonte de la banquise n'entraîne pas de modification du niveau de la mer.

En réalité, les masses volumiques sont différentes en raison de deux effets indépendants.

- L'eau de fonte de la banquise et l'océan ne sont pas à la même température. L'océan liquide est à une température généralement supérieure à 0°C , alors que l'eau de fonte de la banquise est à 0°C ou un peu moins¹.
- La banquise et l'océan n'ont pas la même composition. Lors de la formation de la banquise, l'eau qui gèle s'apauvrit en sel : l'eau de la banquise est plus douce que l'eau de mer.

On peut faire une évaluation quantitative avec les données fournies. Calculons le rapport entre le volume d'eau fondue et le volume d'eau déplacée ; en utilisant les deux équations établies au début et les masses volumiques classiquement mesurées :

$$\frac{V_{\ell \text{ fondue}}}{V_{\ell \text{ dep}}} = \frac{\rho_\ell}{\rho_{\ell \text{ fondue}}} = \frac{1027,7}{999,8} = 1,03$$

autrement dit l'eau de fonte de la banquise occupe un volume 3% plus important que l'eau océanique déplacée, soit une très légère élévation du niveau de la mer.

1. La glace de la banquise est elle beaucoup plus froide, car elle est refroidie par l'air polaire au contact de sa face émergée. La glace de la banquise atteint couramment -20°C , et éventuellement beaucoup moins.

Du point de vue des conséquences de l'augmentation des températures de l'atmosphère terrestre, la fonte de la banquise a un effet marginal sur l'augmentation du niveau de la mer. On rappelle que la banquise est de l'eau de mer qui gèle en surface, donc de l'eau qui est initialement dans l'océan. L'augmentation du volume de l'océan sous l'effet de l'augmentation de sa température (dilatation thermique) aura un impact sensiblement plus important. L'effet prépondérant sera en réalité la fonte de l'eau douce stockée sur les continents sous forme de glace (glaciers, permafrost, et surtout calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique) qui correspondent à des volumes d'eau liquide monstrueux.

Pour mémoire, lors du dernier maximum glaciaire il y a environ 21000 ans :

- la température moyenne de la Terre était d'environ 3 à 6 °C moins élevée qu'aujourd'hui,
- le niveau de la mer était environ 125 m plus bas qu'aujourd'hui,
- la totalité de la Scandinavie et la majeure partie de la Grande-Bretagne étaient recouvertes d'une calotte polaire atteignant 3 km d'épaisseur,
- la totalité du Canada était sous 4 km d'épaisseur de glace.

On imagine, à l'inverse, les conséquences que pourraient avoir un réchauffement de la température moyenne de 3 °C. On peut estimer à environ 1/4 la surface de la France qui se trouve en-dessous de 100 m d'altitude, qui sera recouverte d'eau océanique dans un avenir peut-être pas si lointain.

Pour un histogramme de la distribution des altitudes de la France :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Relief_de_la_France

Pour une carte des calottes polaires et de la ligne de côte lors du dernier maximum glaciaire :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Derni%C3%A8re_p%C3%A9riode_glaciaire

Pour une discussion complète sur l'effet de la fonte de la banquise sur le niveau océanique, voir le site de Planète-Terre de l'ENS de Lyon :

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/fonte-banquise-2005-10-06.xml>