

Chap.3 – Statique des fluides dans le champ de pesanteur

1. Les fluides

- 1.1. Distinction fluide / solide
- 1.2. Les fluides : des milieux continus à l'échelle macroscopique
- 1.3. Pression au sein d'un fluide – Pression à l'interface entre deux fluides
- 1.4. Gaz et liquides : quelques ordres de grandeur

2. Statique des fluides dans le champ de pesanteur

- 2.1. Système étudié : un volume élémentaire de fluide
- 2.2. Relation fondamentale de la statique des fluides dans le champ de pesanteur
- 2.3. Force de pesanteur par unité de volume
- 2.4. Equivalent volumique des forces de pression
- 2.5. Comment retrouver très vite la relation fondamentale de la statique des fluides

3. Application à un fluide incompressible et homogène

- 3.1. Définition d'un fluide incompressible et homogène
- 3.2. La pression varie linéairement avec l'altitude
- 3.3. (*Complément*) Validité de l'hypothèse d'un fluide incompressible
- 3.4. Conséquence : interface entre deux liquides non miscibles
- 3.5. Conséquence : surface libre d'un liquide
- 3.6. Application : principe du siphon
- 3.7. Application : principe du manomètre et du baromètre

4. Application à un fluide compressible : cas de l'atmosphère

- 4.1. Modèle simple de l'atmosphère isotherme
- 4.2. Profil vertical de pression de l'atmosphère isotherme
- 4.3. (*Compléments*) Distribution des molécules avec l'altitude – Facteur de Boltzmann

5. Poussée d'Archimède

- 5.1. Résultante des forces de pression
- 5.2. Théorème d'Archimède
- 5.3. Conséquences bien connues
- 5.4. Application aux corps flottants : partie immergée d'un iceberg
- 5.5. Application : fonte des glaces et niveau des océans
- 5.6. Précautions à prendre pour utiliser le théorème d'Archimède

Intro :

On étudie dans ce chapitre les propriétés *macroscopiques* des fluides *au repos* dans le référentiel d'étude (cas « statique »). A ce stade du cours de thermodynamique, cette étude est principalement mécanique, la température étant ici un paramètre secondaire.

Dans un premier temps, on établit la *relation fondamentale de la statique des fluides*, stipulant que la somme des forces appliquées à un volume élémentaire de fluide est nulle à l'équilibre. On en déduit l'évolution de la pression au sein du fluide dans deux cas particuliers : fluide incompressible (liquides), et gaz assimilable à un GP.

Dans une dernière partie, on définit la poussée d'Archimède, et on démontre le théorème d'Archimède.

1. Les fluides

1.1. Distinction fluide / solide

La notion de fluide regroupe les liquides et les gaz. Contrairement aux solides, les fluides ne possèdent pas de forme propre : ils épousent la forme du récipient qui les contient. Les liquides possèdent un volume propre, indépendant du volume du récipient. Les gaz n'ont pas de volume propre, ils occupent tout l'espace disponible d'un récipient fermé.

1.2. Les fluides : des milieux continus à l'échelle macroscopique

A l'échelle macroscopique, les fluides peuvent être modélisés comme des milieux continus. On caractérise un fluide à l'équilibre par des variables d'état. Les variables intensives sont définies à l'échelle mésoscopique, et sont considérées comme des fonctions continues des coordonnées d'espace.

1.3. Pression au sein d'un fluide – Pression à l'interface entre deux fluides

La définition de la pression à l'échelle mésoscopique a été donnée dans les chapitres précédents. On fera rarement référence à l'origine microscopique des forces de pression. On retiendra simplement que la force exercée par le fluide sur une surface élémentaire est due aux chocs des molécules (« pression cinétique ») et aux interactions entre molécules (« pression moléculaire »).

Pour mesurer la pression en un point d'un fluide au repos, on peut placer un manomètre en ce point du fluide. On remarque alors que la norme de la force mesurée par la surface du manomètre (donc la pression) est indépendante de l'orientation de cette surface. Cela s'explique simplement du fait de l'isotropie du mouvement des molécules dans le fluide. Quelque soit l'orientation de la surface, le nombre et l'intensité des chocs des molécules sur la surface restent les mêmes.

Enfin, on admettra que la pression est continue à la traversée d'une interface entre deux fluides. Ce n'est vrai que si l'on peut négliger le phénomène de tension superficielle (hors programme de prépa). Ce sera toujours le cas pour nous (interfaces planes, ou peu courbées, situations où la tension superficielle est négligeable).

*La pression est une grandeur intensive définie en tout point d'un fluide.
La norme de la force exercée par le fluide est **indépendante de l'orientation** de la surface considérée.
La pression est **continue à l'interface entre deux fluides**.*

1.4. Gaz et liquides : quelques ordres de grandeur

On donne ici quelques ordres de grandeur qui permettent de faire la distinction entre les liquides et les gaz.

Dans les conditions ordinaires de pression et de température :

- masse volumique ρ : air $1,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ / eau $10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- compressibilité isotherme χ_T : air 10^{-5} Pa^{-1} / eau $5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$

2. Statique des fluides dans le champ de pesanteur

« Statique des fluides » signifie que l'on va étudier les propriétés des fluides à l'équilibre mécanique. Les fluides seront donc étudiés au repos dans le référentiel galiléen d'étude. Si le référentiel n'est pas galiléen, il suffit de tenir compte des forces d'inertie dans le bilan des forces. La « mécanique des fluides » qui étudie aussi les fluides en mouvement sera vue en spé.

On notera que dans le cadre de ce chapitre, on ne s'intéressera pas aux phénomènes thermiques, et la température sera ici une variable d'intérêt secondaire. La prise en compte des phénomènes thermiques sera l'objet du chapitre suivant.

2.1. Système étudié : un volume élémentaire de fluide

Avant de s'intéresser aux forces qui agissent sur un fluide, il faut d'abord définir précisément le système étudié. Puisque les grandeurs intensives (pression, masse volumique) ne sont pas nécessairement uniformes dans le fluide, notre système d'étude sera mésoscopique.

Par la pensée, on découpe le fluide en « volumes élémentaires », définis comme des systèmes *fermés* (donc de masse constante). Le système étudié sera alors un *volume élémentaire* de fluide.

On notera toujours **les grandeurs extensives associées à ce système précédées de la lettre d** :

- masse du volume élémentaire : dm
- nombre de molécules contenues dans le volume élémentaire : dN
- quantité de matière du volume élémentaire : dn
- volume du volume élémentaire : $d\tau$

La lettre d signifie simplement que ce sont des quantités très petites (quantités élémentaires), définies pour un système mésoscopique.

On définit toujours sur un schéma ce volume élémentaire. On le choisit comme bon nous semble : la seule contrainte est qu'il doit être très petit, pour que les grandeurs intensives puissent être considérées uniformes à l'intérieur de ce volume. On se donne aussi un repère qui permet de repérer la position du système.

- On étudie un fluide contenu dans un récipient. En définissant un repère cartésien fixe dans le référentiel terrestre supposé galiléen, dessiner un volume élémentaire rectangulaire dont les arêtes sont dirigées selon les axes du repère.
- Le sommet en arrière, en bas et à gauche, est repéré par les coordonnées (x,y,z) . Le volume étant élémentaire, comment peut-on noter les coordonnées des autres sommets ?
- Donner l'expression du volume élémentaire $d\tau$ en fonction de dx , dy , dz . Faire de même pour l'aire de chacune des surfaces du cube.

La statique des fluides se limite à l'application de la RFD au volume élémentaire au repos (assimilé à un point matériel) : il est immobile dans le référentiel galiléen d'étude.

On peut distinguer deux types de forces appliquées au volume élémentaire : la pesanteur (force à distance), les forces de pression (forces de contact).

Remarque : Pour un fluide au repos, la pression est la seule force de contact qui s'exerce sur le volume élémentaire. Lorsque le fluide est en mouvement, il existe aussi des forces qui s'appliquent tangentiellement aux surfaces. Ces forces de frottement internes au fluide caractérisent la viscosité du fluide (programme de spé).

2.2. Relation fondamentale de la statique des fluides dans le champ de pesanteur

- Donner l'expression de la force de pesanteur $d\vec{F}_g$ appliquée au système
- Donner l'expression des projections (selon x , y et z) de la résultante des forces de pression appliquées à la particule de fluide. Exprimer ces projections en fonction des dérivées partielles de la pression par rapport aux coordonnées d'espace (x , y et z)
- Appliquer la RFD au volume élémentaire au repos dans le référentiel terrestre galiléen
- En déduire que la pression ne dépend que de z . Comment évolue la pression selon z ?

Dans un fluide au repos dans le référentiel terrestre, la pression est une **fonction de l'altitude uniquement**, et

$$-\frac{dP}{dz}\vec{e}_z + \rho\vec{g} = \vec{0}$$

Remarques :

- On appelle cette équation « la relation fondamentale de la statique des fluides »
- Elle ne s'applique que *si le fluide est au repos !!*
- Raisonner sur un volume élémentaire nous a permis de déterminer comment évolue la pression en tout point du fluide. Ce type de raisonnement est très fréquent en physique, il faut savoir le refaire
- Une surface isobare est définie comme le lieu des points de même pression. On vient de montrer que ces surfaces isobares sont des *plans horizontaux*.

Le champ de pesanteur étant supposé uniforme à l'échelle du fluide, deux grandeurs physiques sont des fonctions de la position dans l'équation établie : la pression P et la masse volumique ρ . Pour pouvoir déterminer la pression et la masse volumique en tout point du fluide, il nous manque une équation.

- A quelle équation va-t-on faire appel ?

2.3. Force de pesanteur par unité de volume

- Donner l'expression de la force de pesanteur $d\vec{F}_g$ appliquée à la particule de fluide
- A partir de l'expression de la force de pesanteur $d\vec{F}_g$ appliquée au volume élémentaire, définir $\vec{f}_g$ la force de pesanteur par unité de volume, à partir de $d\vec{F}_g$ et $d\tau$
- En déduire l'expression de $\vec{f}_g$ en fonction de ρ et $\vec{g}$

2.4. Equivalent volumique des forces de pression

- Par analogie avec la force volumique de pesanteur, on définit une résultante volumique des forces de pression. Etablir alors l'expression de ses projections selon x , y et z
- En écrivant que la somme des forces volumiques est nulle à l'équilibre, donner la relation de la statique des fluides lorsque l'axe $\vec{e}_z$ est dirigé vers le bas.

2.5. Comment retrouver très vite la relation fondamentale de la statique des fluides

Le calcul complet effectué pour établir la relation fondamentale de la statique des fluides avait pour but de nous familiariser avec les raisonnements et les notations différentielles à l'échelle mésoscopique. Pour retrouver rapidement cette équation, on procédera plutôt de la sorte :

- On dessine un volume élémentaire de fluide, une tranche très fine de dimensions latérales quelconques
- On remarque que la pression ne peut être qu'une fonction de l'altitude (par symétrie « droite-gauche »)
- On finit avec une RFD projetée selon la verticale

3. Application à un fluide incompressible et homogène

3.1. Définition d'un fluide incompressible et homogène

Un fluide est dit homogène lorsque sa masse volumique est uniforme : elle est la même en tout point du fluide.

On sait déjà ce qu'est un fluide *incompressible* : c'est un fluide dont le volume ne varie pas sous l'effet d'une variation de pression. C'est une approximation adaptée à l'étude des liquides dans les conditions usuelles.

- Montrer que ces deux hypothèses impliquent que la masse volumique d'un tel fluide est indépendante de la pression.

On voit donc que l'hypothèse d'un fluide homogène n'implique pas que la pression soit uniforme au sein du fluide.

3.2. La pression varie linéairement avec l'altitude

Evolution de la pression avec l'altitude

Dans un fluide homogène et incompressible au repos, si l'axe vertical $\vec{e}_z$ est orienté vers le haut :

$$P(z_2) - P(z_1) = -\rho g(z_2 - z_1)$$

Remarques :

- Si la pression est connue à une altitude, on peut en déduire la pression à une autre altitude
- La différence de pression est proportionnelle à la dénivellation (variation d'altitude)

Comment retrouver cette formule

En considérant une colonne de fluide de hauteur h ,
la pression en bas P_{bas} est égale à la pression en haut P_{haut} + le poids de la colonne par unité de surface :

$$P_{bas} = P_{haut} + \rho gh$$

Conséquence : Théorème de Pascal

Une modification $\Delta P(z_1)$ de la pression en un point z_1 du fluide (due à un facteur extérieur)
se répercute en tout point du fluide : $\Delta P(z_2) = \Delta P(z_1)$

Le principe de fonctionnement d'une presse hydraulique est un exemple d'application directe du théorème de Pascal. On remarquera que le rapport entre les forces exercées par les pistons est proportionnel au rapport des surfaces, mais le rapport des déplacements lui est inversement proportionnel. « La presse appuie fort, mais déplace peu ».

3.3. (Complément) Validité de l'hypothèse d'un fluide incompressible

Supposer la masse volumique homogène est une hypothèse qui peut sembler assez forte, on vérifie ici sa validité. L'hypothèse d'un fluide incompressible revient à considérer que le coefficient de compressibilité isotherme est nul. Vérifions numériquement dans le cas de l'eau la validité de cette hypothèse.

- Quelle est la pression de l'eau à la surface d'un océan ($z = 0$) ?
- On se place à une profondeur de 1km ($z = -10^3$ m). On suppose que la masse volumique varie suffisamment peu pour assimiler sa variation à une variation élémentaire. Exprimer la variation relative de la masse volumique entre les deux altitudes considérées, en fonction de χ_T , $\rho(\theta)$, g et Δz .

- Faire l'application numérique, et conclure quant à la validité de l'hypothèse incompressible pour les liquides.
- Dans l'océan (eau supposée incompressible), à quelle profondeur la pression est-elle le double de la pression atmosphérique ?

En considérant les liquides comme des phases condensées incompressibles, on voit que l'hypothèse « fluide homogène » est tout-à-fait valable.

3.4. Conséquence : interface entre deux liquides non miscibles

Dans un tube à essai, on verse de l'eau puis de l'huile. On observe que l'huile ne se mélange pas à l'eau, et l'huile reste au-dessus de l'eau.

- En raisonnant par l'absurde, montrer que l'interface entre l'huile et l'eau est nécessairement horizontale.

3.5. Conséquence : surface libre d'un liquide

On considère un tube en U rempli d'eau.

- Faire un schéma. Montrer que le niveau de l'eau est le même dans les deux branches du tube.

On appelle cela le principe des vases communicant. Cette propriété se généralise au cas de plusieurs vases de forme et de hauteur différente, reliés à leur base par un tuyau permettant les échanges de fluide entre chacun des vases.

3.6. Application : principe du siphon

On veut vider l'eau d'un aquarium à l'aide d'un tuyau en caoutchouc (après avoir retiré les poissons..). On place une extrémité du tuyau dans l'aquarium. A l'autre extrémité, on aspire de l'eau avec la bouche pour faire pénétrer de l'eau dans tout le tuyau. On bouche cette extrémité avec le doigt et on la pose au fond d'une bassine placée à une altitude inférieure à celle de l'aquarium. On enlève alors le doigt.

- Faire un schéma du dispositif à l'instant où l'on enlève le doigt du tuyau.
- En invoquant le principe des vases communicant, expliquer ce qui se passe après avoir enlevé le doigt

On vient d'illustrer le principe du siphon. C'est sur ce principe que fonctionne la distribution d'eau à partir d'un château d'eau. C'est aussi ce principe qui permet à la cuvette des wc de se vider après avoir tiré la chasse d'eau.

3.7. Application : principe du manomètre et du baromètre

On peut modéliser simplement un manomètre à eau par un tube en U partiellement rempli d'eau, dont une extrémité est ouverte sur l'atmosphère et l'autre est reliée au robinet de sortie d'un récipient contenant un fluide (gaz dans une bonbonne par exemple).

- Expliquer comment la dénivellation de l'eau à l'équilibre dans le tube en U permet de mesurer la pression du gaz dans la bonbonne.

Un baromètre sert à mesurer la pression atmosphérique. Contrairement au manomètre, on ne peut donc pas utiliser la pression atmosphérique comme référence, puisque c'est elle que l'on veut mesurer. On peut modéliser un baromètre à mercure de manière simple par un tube en U partiellement rempli de mercure, dont une extrémité est fermée et l'autre est ouverte sur l'air atmosphérique.

- En admettant que du côté de l'extrémité fermée, on ne peut trouver que du mercure liquide ou du vide, expliquer comment la dénivellation du mercure dans le tube permet de mesurer la pression atmosphérique

- Sachant que $\rho_{Hg} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$, calculer numériquement la dénivellation dans le tube en U pour une pression atmosphérique de 1 bar. Pourquoi n'utilise-t-on pas de l'eau à la place du mercure ?

NB : En réalité, du côté de l'extrémité fermée, le tube n'est pas vide mais occupé par du mercure gazeux. La pression de ce gaz de mercure est connue et très faible devant la pression atmosphérique.

4. Application à un fluide compressible : cas de l'atmosphère

4.1. Modèle simple de l'atmosphère isotherme

Comme précédemment, on suppose que la pesanteur est uniforme. Même en considérant un système aussi étendu que l'atmosphère, cette hypothèse reste valable compte tenu de la faible variation du champ de pesanteur à cette échelle (cf. cours sur la pesanteur).

L'air n'est pas un corps pur. Il est principalement composé de 80% de diazote et de 20% de dioxygène. Cette composition est homogène dans toute l'atmosphère. Vous verrez en chimie (ou en physique en spé) qu'un mélange de gaz parfait est aussi un gaz parfait. On peut en définitive modéliser l'air atmosphérique par un gaz parfait de masse molaire égale à la moyenne des masses molaires du diazote et du dioxygène.

- Calculer la masse molaire M de l'air ainsi modélisé.
- Exprimer la masse volumique d'un (petit) volume d'air en fonction de n , M , V . Ecrire l'équation d'état pour cette particule de fluide à l'équilibre.

Pour déterminer le profil vertical de pression dans l'atmosphère, on va compléter la relation fondamentale de la statique des fluides par l'équation d'état du gaz parfait. Mais on introduit alors la température, qui est aussi une fonction de la position *a priori*. On se retrouve avec 3 variables et 2 équations...

A ce stade du cours de thermodynamique, on sait que la température est reliée à l'énergie interne du gaz, mais on ne sait rien d'autre sur l'énergie interne : il nous manque une loi physique, qui sera l'objet du prochain chapitre.

En définitive, l'hypothèse la plus simple consiste à considérer la température uniforme dans toute l'atmosphère : c'est le modèle de *l'atmosphère isotherme*. Jusqu'à 10 km d'altitude, les mesures montrent qu'en moyenne la température décroît avec l'altitude de 2% par km. Ca n'est pas complètement négligeable, surtout à plusieurs kilomètres d'altitude.

4.2. Profil vertical de pression de l'atmosphère isotherme

- Déterminer le profil vertical de pression $P(z)$, en fonction de M , g , R , T et P_0 la pression au niveau du sol
- Définir une altitude caractéristique, et l'exprimer en fonction des données. Faire l'application numérique pour une température de 25°C
- Etablir le profil vertical de masse volumique $\rho(z)$. Calculer numériquement la masse volumique au niveau du sol

4.3. (Compléments) Distribution des molécules avec l'altitude – Facteur de Boltzmann

On va interpréter le résultat précédent à *l'échelle microscopique*, en étudiant la distribution en altitude du nombre de molécules par unité de volume (i.e. la densité particulaire ou densité volumique de particules n^*). On modélise l'air de manière simplifiée, en le supposant constitué d'un seul type de molécule de masse molaire M (et de masse notée m).

- Etablir la relation entre la masse volumique et de la densité volumique de particules. En déduire l'évolution de la densité particulaire avec l'altitude
- Donner l'énergie potentielle de pesanteur d'une molécule d'air. Exprimer alors le résultat précédent en fonction de cette énergie potentielle

En interprétant la densité particulaire comme *une probabilité pour une molécule de se trouver dans l'état d'énergie E_{pp}* , on vient d'établir que cette probabilité est proportionnelle au facteur $\exp\left(-\frac{E_{pp}}{k_B T}\right)$. Ce terme s'appelle *le facteur de Boltzmann*. C'est un terme très important en physique statistique, et son rôle n'est pas limité à l'étude de l'atmosphère isotherme.

On voit que les molécules ont plus tendance à peupler les états de basse énergie, au détriment de ceux de haute énergie. A l'échelle microscopique, ce facteur fait apparaître deux influences opposées :

- le poids tend à ramener toutes les molécules au niveau du sol, et leur faire atteindre ainsi l'état d'énergie potentielle minimale
- l'agitation thermique : elle tend à uniformiser la densité particulaire dans toute l'atmosphère

La distribution résultante est un compromis entre ces deux influences, c'est la signification du facteur de Boltzmann. On retrouve ce facteur dans la loi d'Arrhénius en cinétique chimique, qui traduit l'influence de la température, donc de l'agitation thermique, sur la constante de vitesse (augmentation du nombre de chocs entre réactifs, et plus grande efficacité des chocs). Le facteur de Boltzmann permet aussi d'expliquer la largeur des raies du spectre en longueur d'onde d'une lampe spectrale basse pression.

5. Poussée d'Archimède

Un corps quelconque immergé dans un fluide subit une force de poussée dirigée verticalement vers le haut : c'est la *poussée d'Archimède*. Cette force de poussée n'est rien d'autre *que la résultante des forces de pression* exercées par le fluide dans lequel le corps est immergé. Le théorème d'Archimède est un outil puissant permettant de calculer facilement l'intensité de cette poussée.

5.1. Résultante des forces de pression

Considérons un corps solide immergé totalement dans l'eau. Le raisonnement qui suit reste valable pour un corps fluide non miscible avec le fluide dans lequel il est immergé. En chaque point M de la surface Σ du solide, l'eau exerce une force de pression. *La résultante des forces de pression*, notée $\vec{\Pi}$, exercées par l'eau sur le solide est la somme des forces exercées sur chaque surface élémentaire $\vec{dS}$ du solide :

$$\vec{\Pi} = \iint_{M \in \text{surface } \Sigma} -P(M) \vec{dS}$$

Pour comprendre cette écriture :

- le symbole intégrale signifie « *somme sur la surface Σ* »
 - l'intégrale est double car on somme sur une courbe bidimensionnelle (une surface)
 - les éléments de surface $\vec{dS}$ sont centrés sur chacun des points M constituant la surface totale Σ , et sont orientés vers *l'extérieur du solide*
 - le signe « - » signifie que la force élémentaire $-P(M)\vec{dS}$ appliquée au point M est dirigée vers l'intérieur du solide
- En considérant un solide cubique, expliquer pourquoi cette résultante est nulle si la pression du fluide est uniforme tout autour du solide

Ce résultat se généralise quelque soit la forme du solide : la poussée d'Archimède est non nulle *seulement si la pression n'est pas uniforme*. Le calcul de cette résultante des forces de pression est généralement difficile à effectuer. Le théorème d'Archimède est un moyen simple et efficace pour déterminer cette résultante.

5.2. Théorème d'Archimède

*Pour un corps immergé dans un fluide au repos,
la poussée d'Archimède est égale à l'opposé du poids de fluide déplacé.*

Considérons un solide à l'équilibre totalement immergé dans l'eau. On va faire le parallèle entre deux situations :

- la situation réelle où le solide est en équilibre avec l'eau environnante
- une situation fictive, où l'on aurait remplacé le solide par de l'eau en équilibre avec l'eau environnante

Le volume fictif d'eau qui remplace le solide dans la situation fictive s'appelle *le fluide déplacé*.

Situation fictive : Le volume fictif d'eau est en équilibre avec l'eau environnante : donc la résultante des forces de pression exercées par l'eau environnante sur l'eau fictive est l'opposée du poids du « fluide déplacé ».

Situation réelle : La résultante des forces de pression exercées par le fluide environnant *ne dépend pas du corps qui se trouve à l'intérieur du volume considéré*. Donc la résultante calculée dans la situation fictive est identique à celle de la situation réelle. On vient de démontrer le théorème d'Archimède.

NB : Le théorème d'Archimède a été établi dans le cas *statique*. On admettra qu'il reste valable lorsque le fluide environnant se déplace « lentement » par rapport au corps immergé.

5.3. Conséquences bien connues

- Montrer par application de la RFD au corps immergé que le corps monte s'il est moins dense que le fluide

On retrouve les phénomènes bien connus : « l'air chaud monte », « l'huile se place au-dessus de l'eau », etc..

5.4. Application aux corps flottants : partie immergée d'un iceberg

On souhaite déterminer le volume immergé d'un iceberg, et le comparer à son volume émergé. On rappelle que la glace flotte car l'eau solide est *moins dense* que l'eau liquide ($\rho_{\text{glace}} = 0,9 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). C'est un cas très particulier, car généralement un corps pur est plus dense sous sa forme solide.

- Pourquoi peut-on négliger la poussée d'Archimède résultant des forces de pression exercées par l'air devant la poussée d'Archimède exercée par l'eau ?
- Déterminer les volumes immergés et émergés de l'iceberg.

Pour un corps flottant sur un liquide, on pourra toujours négliger la poussée d'Archimède due à l'air.

5.5. Application : fonte des glaces et niveau des océans

On entend souvent dire que la fonte des glaces va provoquer la hausse du niveau des océans. On va préciser ce que cela signifie vraiment.

- En considérant un glaçon de volume V flottant dans un verre d'eau, montrer que le niveau de l'eau est identique après que le glaçon a fondu.

NB : c'est la *dilatation* de l'eau des océans sous l'effet de la hausse de température qui est susceptible de provoquer la hausse du niveau des océans, pas directement la fonte des glaces. Bien que le coefficient de dilatation de l'eau soit très faible, ce petit effet (à l'échelle des océans) est non négligeable à l'échelle humaine.

5.6. Précautions à prendre pour utiliser le théorème d'Archimède

Avant d'utiliser le théorème d'Archimède, on prendra garde à toujours vérifier que :

- la partie du corps pour laquelle on calcule la résultante des forces de pression doit être intégralement immergée dans le fluide.
- lorsque l'on remplace le corps par le « fluide déplacé », toujours s'assurer que le fluide déplacé est alors en équilibre avec le fluide environnant !!
- Le théorème d'Archimède est-il valide dans le cas d'une clef reposant au fond de la baignoire ?
- Le théorème d'Archimède peut-il être appliqué à un verre flottant dans l'eau et contenant de l'huile, si l'on considère le système {verre seul} ?
- Le théorème est-il valable si l'on considère le système {verre + huile} ?

Notions clefs

Savoirs :

- Définition d'un fluide + échelle adaptée pour la description d'un fluide
- Définition « fluide homogène incompressible »
- Définition de la pression +
 - norme de la force indépendante de l'orientation de la surface
 - pression est continue à l'interface entre deux fluides non miscibles
- Connaître par cœur la relation fondamentale de la statique des fluides + surfaces isobares
- Pression varie linéairement avec l'altitude pour un fluide homogène incompressible
- Pression varie exponentiellement avec l'altitude pour l'atmosphère isotherme
- Définition de la poussée d'Archimède
- Théorème d'Archimède

Savoirs faire :

- Etablir la relation fondamentale de la statique des fluides (avec un énoncé)
- Utiliser l'équation d'état du fluide pour en déduire l'évolution de P et ρ
- **Savoir refaire toutes les démonstrations des exemples étudiés** (notamment atmosphère isotherme)
- Utiliser le théorème d'Archimède pour calculer la résultante des forces de pression sur un corps immergé