- Statique des fluides -

Notions et contenus	Capacités exigibles
Pression dans un fluide au repos *- Forces volumiques, forces surfaciques.*	*- Citer des exemples de forces surfaciques ou volumiques.*
- Résultante de forces de pression sur une surface.	*- Utiliser les symétries pour déterminer la direction d'une résultante de forces de pression.* *- Déterminer l'expression ou la valeur de la résultante des forces de pression sur une surface plane.*
- Statique des fluides dans le champ de pesanteur uniforme.	*- Établir la relation dP/dz = ±ρg.*
- Poussée d'Archimède.	*- Expliquer l'origine de la poussée d'Archimède et démontrer son expression*
Équilibre hydrostatique dans le champ de pesanteur terrestre *- Modèle de l'atmosphère isotherme. Échelle de hauteur caractéristique de variation de la pression.*	*- Établir l'expression de la pression en fonction de l'altitude dans le cas de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait.* *- Citer la valeur de la pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer.*
- Stratification verticale des océans.	*- Établir l'expression de la pression avec la profondeur dans le cas d'un fluide incompressible.*
- Flottabilité.	*- Interpréter la flottabilité d'une particule de fluide à l'aide des projections verticales du poids et de la poussée d'Archimède.* *- Identifier quelques phénomènes physiques favorables ou défavorables aux mouvements verticaux de convection dans l'atmosphère ou les océans terrestres.* *- Construire, par analyse dimensionnelle, les temps caractéristiques associés à ces phénomènes et les comparer*

On parle souvent de la pression d'un gaz comme étant une grandeur caractérisant l'ensemble du système, alors que c'est une ***grandeur locale***. En effet si un système gazeux est en équilibre, dans le champ de pesanteur et dans un récipient de petite taille, alors la pression est quasi-uniforme ; mais si nous montons plus en altitude la pression diminue.

D'autre part, ***la pression n'est pas une notion réservée aux gaz*** : on la définit également au sein d'un liquide ou d'un solide ; et dans ces deux cas, elle évolue très rapidement avec la profondeur.

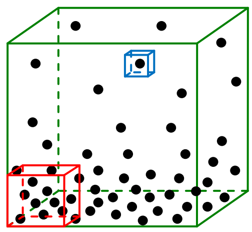
L'objectif de ce chapitre est de caractériser de manière quantitative les variations de pression pour les fluides (liquides et gaz) au repos (pas de mouvement d'ensemble) en fonction de l'altitude dans le champ de pesanteur terrestre uniforme. Ces lois d'évolution de la pression nous permettront ainsi de comprendre qualitativement la stratification verticale de l'atmosphère terrestre et des océans ainsi que les mouvements de convection qui s'y déroulent.

I- Les forces au sein d'un fluide au repos

➨ **Conditions de l'étude** :

Nous avons vu dans le cours de *Physique 04* qu'il existait différentes échelles d'observation des systèmes thermodynamiques. Celles-ci sont rappelées ci-dessous avec quelques-unes de leurs caractéristiques.

Echelle …			
La matière apparaît-elle comme continue ?	OUI	OUI	NON
Peut-on définir température, pression, masse volumique ?	OUI	OUI	NON
Ces grandeurs rendent-elles compte de l'aspect local ?	NON	OUI	-



Les forces s'appliquant sur les particules fluides peuvent être classées en *deux catégories*.

1) Les forces de VOLUME

Les ***forces de VOLUME*** sont des forces ***à distance qui s'exercent en tout point du volume de fluide*** ; la force élémentaire de volume $\overrightarrow{dF}$ que subit une particule fluide est proportionnelle à son volume **dV** selon la relation suivante :

La plus commune des forces de volume est le **poids**. Si on raisonne sur une particule fluide de volume **dV**, de masse **dm** et de masse volumique ρ, elle subira un poids élémentaire $\overrightarrow{dP}$ tel que :

2) Les forces de SURFACE

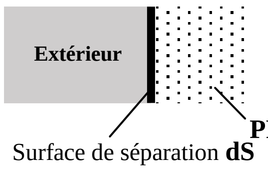
a/ Description générale

Les ***forces de SURFACE*** sont des forces ***de contact qui s'exercent en tout point d'une surface délimitant le fluide*** de l'extérieur ; la force élémentaire de surface $\overrightarrow{\mathbf{dF}}$ que subit une particule fluide est alors proportionnelle à la surface **dS** selon la relation suivante :

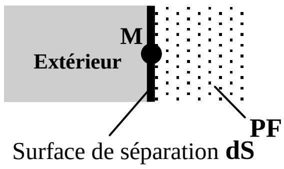
Pour un fluide macroscopiquement au repos, même s'il n'y a pas de mouvement d'ensemble, les molécules qui constituent le fluide ont un mouvement microscopique permanent. ***Chaque particule fluide subit donc des chocs incessants de la part des molécules de fluide situées autour d'elle***, chocs qui sont à l'origine des forces de contact évoquées précédemment.

La surface **dS** de la particule fluide PF subit donc une ***force de contact*** de la part des molécules extérieures, *force qu'on décompose en deux forces de directions orthogonales* :

- une force de direction normale à la surface de séparation **dS** entre l'extérieur et la particule fluide PF : on parle de **force pressante** ou de **force de pression** ;
- une force de direction tangente à la surface de séparation **dS** entre l'extérieur et la particule fluide : on parle de **force visqueuse** ou de **force de viscosité** ;



Pour un fluide en équilibre, ***la force visqueuse est nulle*** (car il y a en moyenne autant de chocs dans un sens que dans l'autre). Il ne reste donc plus qu'à prendre en compte la ***force pressante élémentaire*** $\overrightarrow{\mathbf{dF_{press}}}(\mathbf{M})$ ***exercée par l'extérieur sur la surface élémentaire* dS *au voisinage d'un point* M** ; celle-ci est reliée à la pression **P(M)** du point **M** par la relation :



D'après la 3ème loi de Newton, pour un fluide en équilibre, ***la force pressante*** $\overrightarrow{\mathbf{dF}}$ ***qu'exerce une particule fluide sur la surface* dS *au voisinage du point* M** *vaut* $\overrightarrow{\mathbf{dF}} = -\mathbf{P(M).dS}.\vec{\mathbf{n}}$.

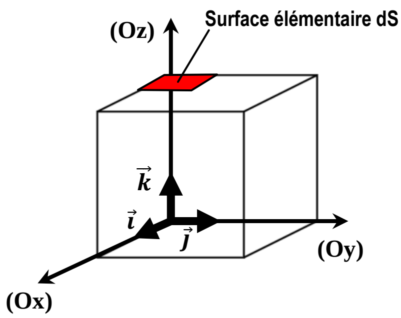
b/ Résultante des forces pressantes

L'expression de la force pressante élémentaire $\overrightarrow{\mathbf{dF_{press}}}$ donnée précédemment est celle subie par une ***surface élémentaire* dS**. Passons à une échelle plus grande et déterminons alors la **résultante** $\vec{\mathbf{F}}_{\mathbf{press}}$ des forces pressantes subies par une ***grande surface* S** ; pour cela, on décompose cette grande surface **S** en une multitude de petites surfaces élémentaires **dS** subissant chacune une force pressante élémentaire $\overrightarrow{\mathbf{dF_{press}}}$.

En toute logique, **cette résultante est obtenue en additionnant toutes les forces pressantes élémentaires** $\overrightarrow{\mathbf{dF_{press}}}$ subies par chaque surface élémentaire **dS**.

✍ ***Application 1* : *Pression UNIFORME exercée sur une surface***

Une boite métallique de forme cubique et d'arête a = 10,0 cm *contient un gaz à la pression* P = 5,00 bars. *Indiquer les caractéristiques de la force pressante exercée par ce gaz sur la face horizontale supérieure de ce cube.*



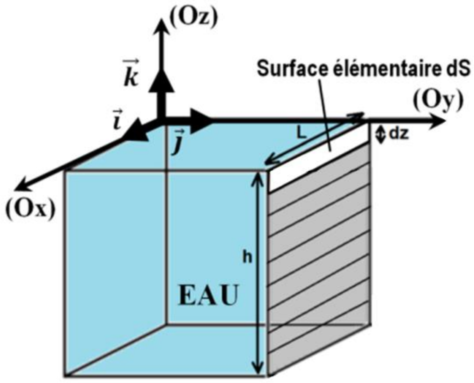
➔ Origine :
➔ Direction :
➔ Sens :
➔ Norme :

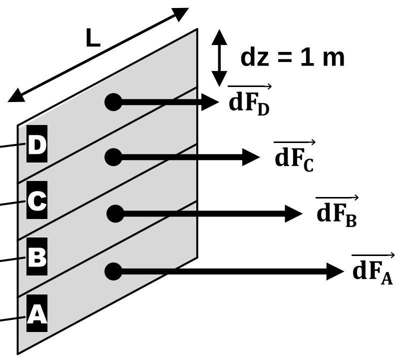
✍ ***Application 2** : **Pression NON UNIFORME exercée sur une surface***

Dans l'eau, la pression **P** *dépend de l'altitude « z » selon la relation :*

$$\mathbf{P(z) = P_0 - \rho_{eau}.g.z} \quad \text{avec } \mathbf{P_0 = 1,00.10^5\ Pa}\ ;\ \mathbf{\rho_{eau} = 1000\ kg.m^{-3}} \text{ et } \mathbf{g = 9,80\ m.s^{-2}}$$

Indiquer les caractéristiques de la force pressante exercée par l'eau sur la paroi verticale d'une piscine de profondeur **h = 4,00 m** *et de largeur* **L = 10,00 m**.

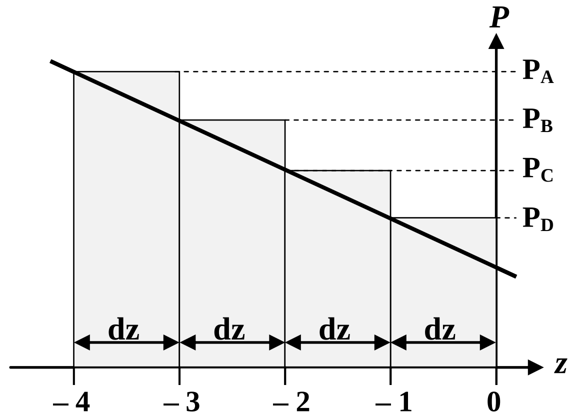




La surface **A** subit une force pressante $\overrightarrow{dF_A}$ =
La surface **B** subit une force pressante $\overrightarrow{dF_B}$ =
La surface **C** subit une force pressante $\overrightarrow{dF_C}$ =
La surface **D** subit une force pressante $\overrightarrow{dF_D}$ =

La force pressante $\vec{F}_{eau/paroi}$ exercée par l'eau sur l'ensemble de la paroi est la ***SOMME*** de toutes les forces pressantes élémentaires :

$\vec{F}_{eau/paroi} =$



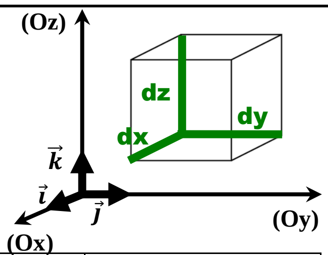
Finalement, « $\mathbf{P_A.dz + P_B.dz + \dots + P_D.dz}$ » représente **l'aire sous la courbe P = f(z) entre les altitudes – 4 m et 0 m** (à condition que **dz** soit infiniment petit). C'est pourquoi nous allons utiliser l'outil « intégrale » pour réaliser ce calcul.

$\vec{F}_{eau/paroi} =$

- ➔ Origine :
- ➔ Direction :
- ➔ Sens :
- ➔ Norme :

II- Relation fondamentale de la statique des fluides

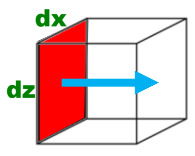
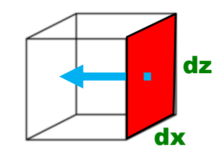
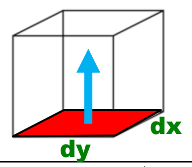
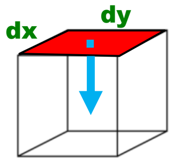
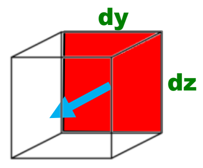
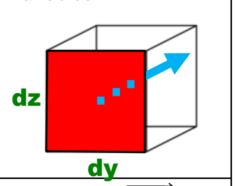
1) Etablissement de la relation



☛ ***Système*** : particule fluide mésoscopique de masse volumique ρ, de forme parallélépipédique de côtés **dx**, **dy** et **dz**, de volume **dV = dx.dy.dz** et de masse **dm**, au repos dans le champ de pesanteur uniforme $\vec{g}$.

☛ ***Référentiel*** : terrestre, supposé galiléen.

☛ ***Bilan des forces*** : - **Poids** de la particule fluide :
- **1 force pressante exercée sur chaque face** de la particule fluide :

Face située à l'ordonnée « y »	Face située à l'ordonnée «y+ dy»	Face située à la hauteur « z »	Face située à la hauteur « z + dz »	Face située à l'abscisse « x »	Face située à l'abscisse « x + dx »
					
Force $\overrightarrow{dF_1}$	Force $\overrightarrow{dF_2}$	Force $\overrightarrow{dF_3}$	Force $\overrightarrow{dF_4}$	Force $\overrightarrow{dF_5}$	Force $\overrightarrow{dF_6}$

		$\overrightarrow{dF_5} = P(x).dy.dz.\vec{i}$ $\overrightarrow{dF_6} = -P(x+dx).dy.dz.\vec{i}$

☛ ***Application de la 1ère loi de Newton*** :

☛ ***Projection sur l'axe (Ox)*** : Seules ………… et ………… ont une coordonnée non nulle

☛ ***Projection sur l'axe (Oy)*** : Seules ………… et ………… ont une coordonnée non nulle

☛ ***Projection sur l'axe (Oz)*** : Seules …………, ………… et ………… ont une coordonnée non nulle

➨ **Quelques remarques et conséquences** :

• Les différentes projections réalisées précédemment montrent que ***la pression*** au sein d'un fluide au repos dans le champ de pesanteur ***ne dépend que de l'altitude du point considéré***.

• Dans le fluide au repos ***les surfaces isobares (de même pression) sont donc des surfaces de même altitude*** : si on suppose le champ de pesanteur uniforme, ces surfaces sont donc horizontales.

• ***La pression ne présente pas de discontinuité au passage d'un milieu fluide à un autre*** : à l'interface de deux fluides, la pression est la même de part et d'autre (attention si une surface solide indéformable sépare deux fluides alors la pression de part et d'autre peut être différente).

• ***La surface de séparation entre deux fluides non miscibles à l'équilibre est horizontale***.

2) Application aux fluides INCOMPRESSIBLES

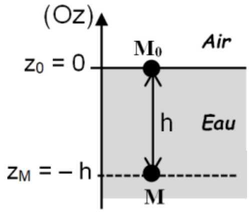
Les liquides peuvent être considérés comme étant des fluides incompressibles, c'est-à-dire des ***fluides dont le volume ne dépend pas de la pression*** (voir cours de *Physique 04*). De plus, pour les ***systèmes fermés*** que nous étudierons par la suite, la ***masse est constante***. On en déduit donc que **les fluides incompressibles sont caractérisés par une masse volumique ρ indépendante de la pression** qui sera par conséquent **la même en tout point du fluide, quelle que soit l'altitude z**.

Cette remarque permet de déterminer la pression au sein d'un fluide incompressible en fonction de la profondeur en utilisant la relation fondamentale de la statique des fluides. Prenons l'exemple d'un liquide de masse volumique ρ pour lequel on cherche la pression P_M en un point **M** situé à une profondeur **h** par rapport à la surface de ce liquide où il règne une pression $P_0 = P_{atm}$. On travaille avec un ***axe (Oz) ascendant*** dans un ***champ de pesanteur uniforme***.

☛ ***Pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer (A CONNAÎTRE)*** :

☛ ***Séparation des variables dans la relation fondamentale de la statique des fluides*** :

☛ ***Intégration entre le point M (Pression P_M, altitude z_M) et le point M_0 (Pression P_0, altitude z_0)*** :



☛ ***Cohérence de la relation obtenue*** :

☛ **Autre formulation** : Dans un ***champ de pesanteur uniforme***, pour un ***axe (Oz) ascendant***, la pression au sein d'un ***fluide incompressible*** est telle que :

*La relation obtenue montre que la pression dans un fluide incompressible varie fortement avec la profondeur : **on ne parle donc pas de pression DU fluide mais de pression EN UN POINT du fluide**.*

✍ ***Application 3*** : *Que vaut la pression au fond de la fosse des Mariannes, lieu le plus profond de l'océan, situé environ* **11 km** *sous la surface libre, au large des Philippines ?*

✍ ***Application 4*** : *A quelle profondeur doit-on descendre pour que la pression soit égale à 2 bars ?*

*Ces valeurs numériques montrent qu'à chaque profondeur est associée une pression : on peut donc modéliser les océans comme une **succession de différentes couches (ou strates) où la pression augmente régulièrement avec la profondeur**. On parle de **STRATIFICATION des océans**.*

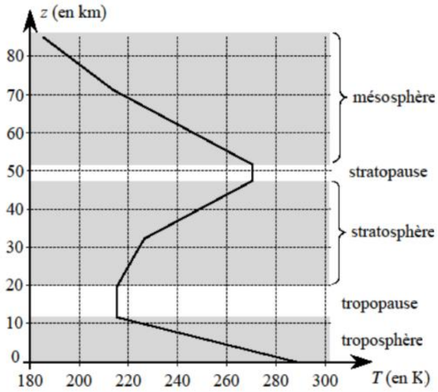
3) Application aux fluides COMPRESSIBLES

On a vu dans le cours de *Physique 04* qu'un fluide compressible est un ***fluide dont le volume dépend de la pression***. De plus, pour les ***systèmes fermés*** que nous étudierons par la suite, la ***masse est constante***. On en déduit donc que **les fluides compressibles sont caractérisés par une masse volumique ρ qui dépend de la pression** et qui sera par conséquent **différente selon l'altitude z du point étudié**.

Prenons l'exemple de l'air qui nous entoure et intéressons-nous à l'évolution de la pression en fonction de l'altitude dans le **modèle simplifié de l'ATMOSPHERE ISOTHERME** décrit ci-dessous :

Hypothèses de travail

❶ *L'atmosphère terrestre est un mélange gazeux constitué d'environ 20 % de O_2 et 80 % de N_2 qu'on assimilera à un **gaz parfait** unique de masse molaire* M_{air} = **29,0 g.mol** $^{-1}$.
❷ ***La valeur g du champ de pesanteur sera supposée constante*** *sur toute l'épaisseur de l'atmosphère terrestre (≈ 500 km).*
❸ *L'atmosphère terrestre est supposée **isotherme** : sa température* T_0 *ne dépend donc pas de l'altitude* **z**.
❹ *Pour pouvoir appliquer la relation fondamentale de la statique des fluides, l'atmosphère terrestre sera considérée comme un **fluide au repos**.*



☛ ***Commentaires sur les hypothèses de travail*** :

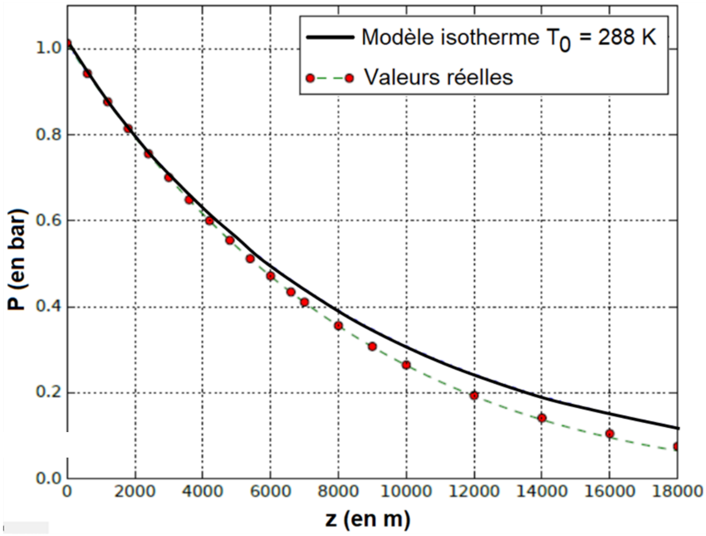
Malgré ces écarts constatés entre la réalité et les hypothèses formulées, l'utilisation de la relation fondamentale de la statique des fluides conduit à une loi de pression réaliste.

☛ ***Relation fondamentale de la statique des fluides pour un axe (Oz) ascendant dans un champ de pesanteur uniforme*** :

☛ ***Exprimer ρ_{air} en fonction de M_{air}, R, T_0 et P*** :

☛ ***Equation différentielle vérifiée par P*** :

☛ ***Résolution de l'équation différentielle*** :



☛ ***Cohérence avec la réalité*** :

☛ ***Echelle de hauteur caractéristique de variation de la pression*** :

*On peut retrouver l'expression précédente de manière analogue à la démonstration du **II-2.**, c'est à dire en séparant les variables dans la relation fondamentale de la statique des fluides, qui s'écrit alors :*

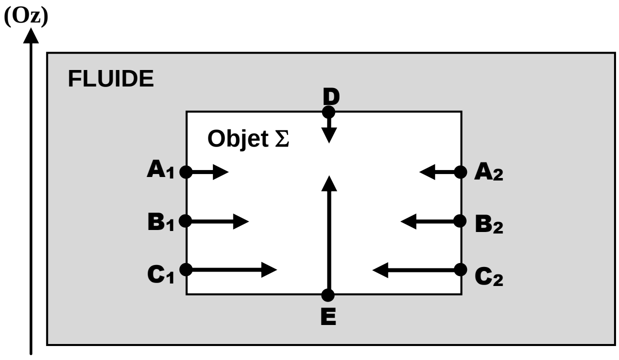
$$\frac{dP}{P} = -\frac{M_{air}g}{RT_0}dz \Leftrightarrow \int_{P_0}^{P}\frac{dP}{P} = \int_0^z -\frac{M_{air}g}{RT_0}dz \Leftrightarrow \ln\frac{P}{P_0} = -\frac{M_{air}g}{RT_0}z \Leftrightarrow P = P_0 e^{-\frac{M_{air}g}{RT_0}z}$$

✍ ***Application 5*** : *A quelle altitude* **z'** *la pression a-t-elle diminué de* **1 %** *par rapport à la pression* $\mathbf{P_0}$ *du niveau de la mer ? Conclure.*

III- Poussée d'Archimède et applications

1) Définition et expression

Considérons un solide Σ de masse **m** et de volume **V** de géométrie simple, par exemple un cylindre vertical, immergé dans un fluide incompressible de masse volumique ρ_{fluide} au repos dans un champ de pesanteur uniforme. Nous savons que la pression au sein d'un fluide dépend uniquement de la profondeur et que les forces pressantes sont orientées de façon normale à l'interface fluide/solide. Ces forces pressantes sont représentées par des vecteurs en différents points du solide Σ sur la figure ci-contre.



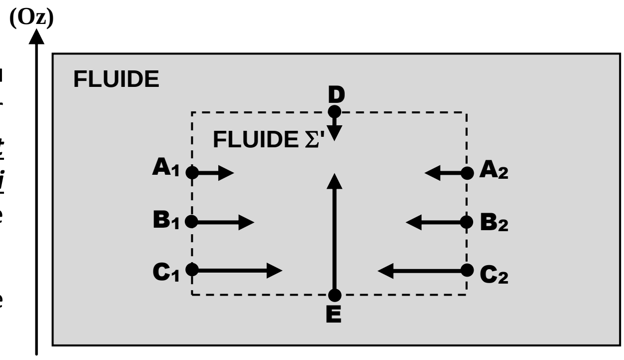
✍ ***Application 6*** : **a)** *Justifier les tailles relatives des différents vecteurs représentant les forces pressantes.*

b) *Comment est orientée la <u>résultante des forces pressantes</u> s'exerçant sur le solide Σ ?*

☛ ***Définition*** :

Intéressons-nous au fluide Σ' qui était présent à l'emplacement du solide avant que celui-ci ne soit immergé (fluide encadré en pointillé sur la figure de droite) : ***la résultante $\vec{\Pi}$ des forces pressantes qui s'exercent sur ce fluide Σ' est identique à la résultante des forces pressantes qui s'exercent sur le solide Σ*** puisque ces deux systèmes ont la même surface et sont situés à la même profondeur.

Cette propriété permet de déterminer l'expression de la poussée d'Archimède par la démonstration suivante :



☛ ***Démonstration :*** Etudions le <u>système Σ' au repos</u>.

☛ ***Conclusion*** : **THEOREME d'ARCHIMEDE**

*- Le **point d'application** de la poussée d'Archimède est le **centre de gravité <u>de la partie immergée</u> du système**.*

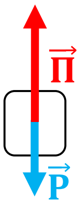
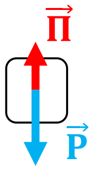
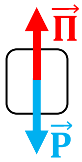
*- **La poussée d'Archimède est souvent négligeable par rapport au poids du système quand celui-ci est « lourd » et immergé dans un gaz**. Mais elle ne l'est plus quand le système est « léger » et immergé dans un gaz (ballon d'Hélium, montgolfière …) ou pour tout système immergé dans un liquide.*

*- **Le théorème d'Archimède est donné pour un système au repos immergé dans un fluide au repos**. Mais il **reste valable** en bonne approximation si le système et/ou le fluide sont en mouvement relatif **à faible vitesse** dans le référentiel d'étude.*

2) Flottabilité d'un corps

La poussée d'Archimède est étroitement liée à la notion de ***FLOTTABILITE*** d'un corps, c'est-à-dire à sa ***capacité à revenir à la surface d'un fluide*** dans lequel il aurait été préalablement totalement immergé.

Considérons pour cela un système matériel **Σ** de volume **V** et de masse volumique ρ_Σ totalement immergé dans un fluide de masse volumique ρ_{fluide}. Ce système est soumis à deux forces verticales de sens opposé : son poids $\vec{P}$ et la poussée d'Archimède $\vec{\Pi}$ exercée par le fluide dont les normes valent respectivement $\rho_\Sigma.V.g$ et $\rho_{fluide}.V.g$. Selon la norme de ces deux forces, on peut envisager les trois situations suivantes :

Poids $<$ Poussée d'Archimède	Poids $>$ Poussée d'Archimède	Poids $=$ Poussée d'Archimède
 Système entraîné vers le	 Système entraîné vers le	 Système ....

*Certains ouvrages appellent « **flottabilité** » la **résultante du poids et de la poussée d'Archimède**. Cette résultante des forces est **orientée vers le haut** dans le 1er cas (ordonnée positive pour un axe (Oz) ascendant), **vers le bas** dans le 2ème cas (ordonnée négative pour un axe (Oz) ascendant) **et nulle** dans le dernier cas, justifiant ainsi les termes de flottabilité **POSITIVE, NEGATIVE** ou **NULLE**.*

➨ ***Quelques applications courantes*** :

- Bien que les bateaux soient construits avec des matériaux de masse volumique élevée comme le fer, ***la masse volumique moyenne des bateaux est inférieure à celle de l'eau*** car ils contiennent essentiellement de l'air de masse volumique 1,29 kg.m^{-3}. Cela permet à la poussée d'Archimède d'être supérieure au poids du bateau, donnant ainsi une flottabilité positive au bateau.
- Quand un sous-marin est immergé, la poussée d'Archimède qu'il subit de la part de l'eau qui l'entoure peut être considérée comme constante. Quand on veut faire descendre le sous-marin, on remplit sa double-paroi extérieure par de l'eau : cela remplace l'air présent dans cette double paroi par de l'eau, ce qui fait ***augmenter la masse volumique moyenne du sous-marin jusqu'à dépasser celle de l'eau***, donnant une flottabilité négative au sous-marin. En revanche, si on veut faire remonter celui-ci, il faut remplacer l'eau dans la double-paroi par de l'air pour que ***la masse volumique moyenne du sous-marin soit inférieure à celle de l'eau***, donnant ainsi une flottabilité positive ; à cette fin, des réservoirs à air comprimé se trouvent à bord. Enfin, pour rester entre deux eaux, on remplit la chambre d'air avec autant d'eau que nécessaire pour que la ***masse volumique moyenne du sous-marin soit égale à celle de l'eau***, permettant au sous-marin d'avoir une flottabilité nulle.
- Les poissons peuvent descendre ou monter dans l'eau grâce à un organe appelé « vessie natatoire » : il s'agit d'une poche qui peut se remplir ou se vider de gaz par absorption d'air ou par des processus physico-chimiques d'échanges de gaz avec le sang. Si le volume de gaz présent dans cette poche augmente, la masse volumique moyenne du poisson diminue (en effet, la masse du poisson reste constante, mais son volume augmente), et ***lorsqu'elle est inférieure à celle de l'eau***, le poisson remonte car il a une flottabilité positive. Inversement, lorsque les poissons évacuent du gaz, leur ***masse volumique moyenne peut devenir supérieure à celle de l'eau***, ce qui fait descendre le poisson car celui-ci a une flottabilité négative.

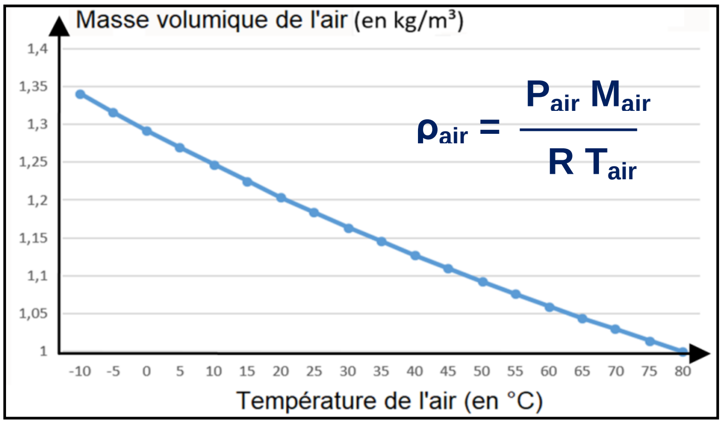
3) Mouvements de convection verticale dans un fluide

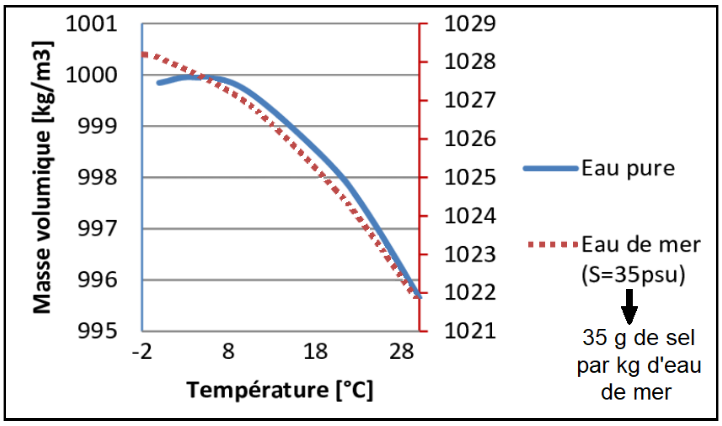
On a considéré jusqu'à maintenant que les fluides étudiés étaient au repos (sans mouvement d'ensemble), mais cela ne concerne finalement que de rares situations. Dans la plupart des cas, on observe en effet des ***déplacements macroscopiques de matière*** dans les fluides, par exemple dans notre atmosphère ou dans nos océans : intéressons-nous dans la suite aux mouvements verticaux de convection qui y sont observés.

a/ Paramètres FAVORABLES aux phénomènes de convection dans les fluides

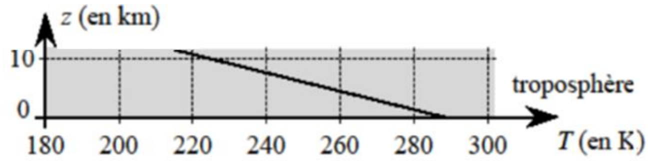
On rappelle que lors d'un phénomène de convection (cours de *Physique 04*), certaines parties du fluide montent (elles ont donc une ***flottabilité positive***) alors que d'autres descendent (elles ont une ***flottabilité négative***). Or, comme vu précédemment, les notions de flottabilité et de masse volumique sont étroitement liées : **tout paramètre modifiant la masse volumique d'une particule fluide sera donc favorable aux mouvements de convection verticaux**.

Deux principaux paramètres peuvent modifier la masse volumique d'une particule fluide (voir graphiques au verso) :

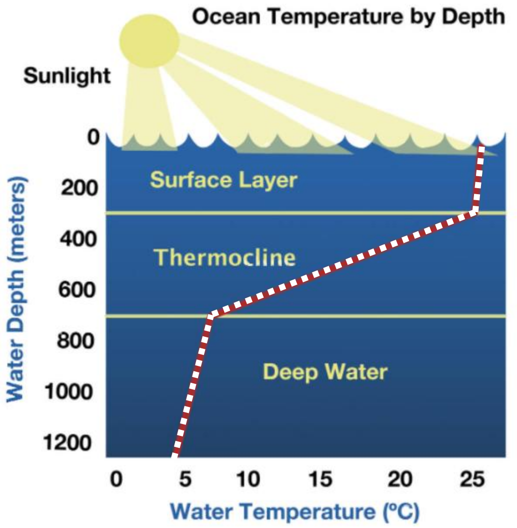




✍ ***Application 7*** : *Expliquer les mouvements de convection dans la troposphère.*



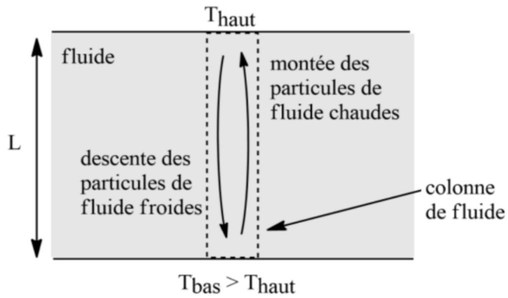
✍ ***Application 8*** : *Montrer que le seul critère de température ne permet pas de justifier un phénomène de convection océanique.*



b/ Paramètres DEFAVORABLES aux phénomènes de convection dans les fluides

Intéressons-nous dans la suite aux ***mouvements verticaux de convection THERMIQUE***, c'est-à-dire ayant pour origine une différence de température entre deux couches de fluide.

Pour que le mouvement de convection ait lieu, il faut que la couche inférieure de fluide ait une température $\mathbf{T_{bas}}$ plus grande que la température $\mathbf{T_{haut}}$ de la couche supérieure. Dans la suite on notera **L** la distance séparant les deux couches de fluide étudiées (**L** = *longueur caractéristique*).



Mais ***quelques facteurs peuvent être défavorables à cette convection*** :

Trois phénomènes sont donc à considérer : les particules fluides situées dans la couche inférieure sont « désireuses » de s'élever mais la conduction thermique et les frottements mettent un frein à leur envie ! **Pour comparer l'efficacité de ces trois phénomènes**, et donc savoir lequel l'emporte sur l'autre, **on peut associer un *TEMPS CARACTERISTIQUE* τ à chacun** :

- le **temps caractéristique de la convection τ_{CONV}** : cette durée permettra d'estimer la durée nécessaire pour qu'une particule fluide parcoure toute la longueur L de la colonne de fluide par convection ;

- le **<u>temps caractéristique de la conduction τ_{COND}</u>** : cette durée permettra d'estimer la durée nécessaire pour que le phénomène de conduction thermique uniformise la température au sein de colonne de fluide de longueur L ;

- le **<u>temps caractéristique du frottement τ_{FROT}</u>** : cette durée permettra d'estimer la durée nécessaire pour qu'une particule fluide mise en mouvement de convection s'immobilise par la seule action des forces de frottement.

Méthode pour déterminer le temps caractéristique d'un phénomène

❶ Faire la liste des paramètres physiques, noté p_i, dont dépend le temps caractéristique $\boldsymbol{\tau}$ du phénomène (on détermine les paramètres d'influence à l'aide d'expériences) ;
❷ Exprimer ce temps caractéristique en fonction de ces paramètres, sous la forme suivante : $\boldsymbol{\tau = p_1^a \times p_2^b} \ldots$;
❸ Écrire l'équation dimensionnelle correspondante : $[\boldsymbol{\tau}] = [\mathbf{p_1}]^{\mathbf{a}} \times [\mathbf{p_2}]^{\mathbf{b}} \times \ldots$ en définissant les dimensions de chaque grandeur à l'aide des dimensions fondamentales (les principales étant : masse M, longueur L, temps T, température θ, quantité de matière N) ;
❹ Les deux membres devant avoir la même dimension, l'exposant de chaque dimension fondamentale doit être identique de part et d'autre de l'égalité. On en déduit ainsi autant d'équations qu'il y a de dimensions et on peut alors trouver les valeurs des coefficients **a**, **b** … puis une formule pour $\boldsymbol{\tau}$.

✍ ***<u>Application 9</u>*** : *En appliquant le point méthode ci-dessus, déterminer l'expression des temps caractéristiques* $\boldsymbol{\tau_{CONV}}$, $\boldsymbol{\tau_{COND}}$ *et* $\boldsymbol{\tau_{FROT}}$ *sachant que :*

a) $\boldsymbol{\tau_{CONV}}$ *dépend de la longueur* **L** *de la colonne de fluide, de la masse* **m** *de la particule et de sa flottabilité ;*

b) $\boldsymbol{\tau_{COND}}$ *dépend de la longueur* **L** *de la colonne de fluide, de la conductivité thermique* $\boldsymbol{\lambda}$ *du fluide (en* $W.m^{-1}.K^{-1}$*), de la masse volumique* $\boldsymbol{\rho}$ *du fluide et de la capacité thermique massique* **c** *du fluide ;*

c) $\boldsymbol{\tau_{FROT}}$ *dépend de la longueur* **L** *de la colonne de fluide, de la masse volumique* $\boldsymbol{\rho}$ *du fluide et de la viscosité dynamique* $\boldsymbol{\eta}$ *du fluide (grandeur caractérisant la résistance à l'écoulement du fluide, exprimée en* $kg.m^{-1}.s^{-1}$*).*