



## Thème III. L'énergie : conversions et transferts

# Chapitre n°28 Statique des fluides dans un référentiel galiléen



À gauche, une montgolfière volant dans le ciel Ardéchois (Terre des frères Montgolfier)

À droite, une gravure de Blaise PASCAL (1623-1662), physicien, mathématicien, philosophe français, qui a notamment travaillé sur la pression. Une représentation du tube de TORRICELLI utilisé par Pascal en 1648 pour mesurer la variation de pression entre Clermont-Ferrand et le Puy-de-Dôme et ainsi justifier l'existence d'une « pression atmosphérique »



Comment évolue la pression dans l'océan ?

Comment évolue la pression dans l'atmosphère ? Pourquoi manque-t-on d'oxygène au sommet du Mont Blanc et de l'Éverest ?

Comment s'élève une Montgolfière ?

## Pré-requis

- 1<sup>re</sup> : Thème L'énergie : conversions et transferts. Description d'un fluide au repos : forces pressions et loi fondamentale de la statique des fluides dans un fluide incompressible au repos.
- PCSI : Thème 2. Mouvements et interactions. Chapitre n°12. Les systèmes de coordonnées

## Objectifs du chapitre

**Introduction :** La statique des fluides est l'étude mécanique des fluides (gaz ou liquide) à l'équilibre. C'est une introduction à la mécanique des fluides en mouvement qui sera étudiée en 2<sup>e</sup> année.

### Objectifs du chapitre :

- ✓ Étudier le champ de pression dans les fluides (liquide et atmosphère) et en illustrer les effets dans quelques applications.
- ✓ Introduire un premier opérateur d'analyse vectorielle : l'opérateur gradient.
- ✓ Évaluer une résultante des forces de pression.
- ✓ Exploiter la relation d'Archimède.

## Plan du cours

### I Champ de pression dans un fluide au repos 3

I.1	Position du problème . . . . .	3
I.2	Forces dans un fluide au repos . . . . .	3
I.2.a)	Forces en volume . . . . .	3
I.2.b)	Forces en surface . . . . .	4
I.2.c)	Équivalent volumique des forces de pression . . . . .	4
I.2.d)	Opérateur gradient . . . . .	5
I.3	Équation de la statique des fluides . . . . .	6
I.3.a)	Cas général . . . . .	6
I.3.b)	Dans le champ de pesanteur . . . . .	7
I.4	Champ de pression dans un liquide . . . . .	8
I.4.a)	Hypothèses . . . . .	8
I.4.b)	Champ de pression . . . . .	8
I.5	L'atmosphère isotherme . . . . .	9

I.5.a)	Modèle de l'atmosphère isotherme . . . . .	9
I.5.b)	Champ de pression dans l'atmosphère . . . . .	9
I.5.c)	Résolution numérique . . . . .	10
I.5.d)	Facteur de Boltzmann . . . . .	13

### II Résultante des forces de pression 15

II.1	Expression . . . . .	15
II.2	Éléments de surface . . . . .	15
II.2.a)	Coordonnées cartésiennes . . . . .	15
II.2.b)	Coordonnées cylindriques . . . . .	15
II.2.c)	Coordonnées sphériques . . . . .	16
II.3	Calculs de résultantes de forces de pression . . . . .	16

### III Poussée d'Archimède 18

III.1	Origine physique de la poussée d'Archimède . . . . .	18
III.2	Loi d'Archimède . . . . .	18
III.3	Applications . . . . .	20

## Programme officiel

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.6. Statique des fluides dans un référentiel galiléen</b>	
Forces surfaciques, forces volumiques.	Citer des exemples de forces surfaciques ou volumiques.
Résultante de forces de pression.	Exprimer une surface élémentaire dans un système de coordonnées adaptées. Utiliser les symétries pour déterminer la direction d'une résultante de forces de pression. Évaluer une résultante de forces de pression.
Équivalent volumique des forces de pression.	Exprimer l'équivalent volumique des forces de pression à l'aide d'un gradient.
Équation locale de la statique des fluides.	Établir l'équation locale de la statique des fluides.
Statique dans le champ de pesanteur uniforme : relation $\frac{dP}{dz} = -\rho g$ .	Citer des ordres de grandeur des champs de pression dans le cas de l'océan et de l'atmosphère. Exprimer l'évolution de la pression avec l'altitude dans le cas d'un fluide incompressible et homogène et dans le cas de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait. <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, étudier les variations de température et de pression dans l'atmosphère.
Poussée d'Archimède.	Expliquer l'origine de la poussée d'Archimède. Exploiter la loi d'Archimède.
Facteur de Boltzmann.	S'appuyer sur la loi d'évolution de la densité moléculaire de l'air dans le cas de l'atmosphère isotherme pour illustrer la signification du facteur de Boltzmann. Utiliser $k_B T$ comme référence des énergies mises en jeu à l'échelle microscopique.

## Ai-je bien appris mon cours ?

- 1 – 😊 – 😞 – Établir l'expression de l'équivalent volumique des forces de pression s'exerçant sur une particule fluide à l'aide du vecteur gradient.
- 2 – 😊 – 😞 – Donner l'expression du vecteur gradient en coordonnées cartésiennes.
- 3 – 😊 – 😞 – Donner les deux propriétés du vecteur gradient.
- 4 – 😊 – 😞 – Établir l'équation locale de la statique des fluides en traduisant l'équilibre d'une particule fluide.
- 5 – 😊 – 😞 – Exprimer l'équation locale de la statique des fluides lorsque seule la pesanteur est prise en compte.
- 6 – 😊 – 😞 – Établir l'expression du champ de pression dans un liquide incompressible et indilatable.
- 7 – 😊 – 😞 – Donner les hypothèses de l'atmosphère isotherme.
- 8 – 😊 – 😞 – Établir l'expression du champ de pression dans l'atmosphère isotherme.
- 9 – 😊 – 😞 – Citer les ordres de grandeurs de pression dans l'océan et dans l'atmosphère.
- 10 – 😊 – 😞 – Donner les expressions des surfaces élémentaires dans les différents systèmes de coordonnées.
- 11 – 😊 – 😞 – Calculer la résultante des forces de pression qui s'exercent sur une surface plane.
- 12 – 😊 – 😞 – Calculer la résultante des forces de pression qui s'exercent sur une surface hémicylindrique.
- 13 – 😊 – 😞 – Quelle est l'origine de la poussée d'Archimède ?
- 14 – 😊 – 😞 – Exprimer la poussée d'Archimède qui s'exerce sur un solide immergé.

# I Champ de pression dans un fluide au repos

## I.1 Position du problème

L'objectif de cette partie est d'établir l'expression du champ de pression au sein d'un fluide, notamment dans l'océan (ou un grand volume d'eau) ou l'atmosphère (ou un grand volume de gaz).

L'océan et l'atmosphère ne peuvent pas être considérés à l'équilibre thermodynamique macroscopique car la pression, la masse volumique ... ne sont pas les mêmes en tout point du système. **L'échelle macroscopique n'est pas adaptée** ici pour décrire l'évolution de la pression avec l'altitude au sein de ces systèmes.

On va se placer à **l'échelle mésoscopique**, en étudiant une **particule de fluide** qui est un volume qui contient un grand nombre de particules (ce qui permet de réaliser des moyennes des grandeurs intensives, et donc définir la masse volumique  $\rho$ , la pression  $P$ , la température  $T$ , ...) mais suffisamment petit pour permettre de rendre compte des variations des grandeurs intensives au niveau local, qui y sont uniformes.

On suppose que le système est à **l'état d'équilibre thermodynamique local**. Alors, à l'échelle mésoscopique, on peut définir les grandeurs intensives  $\rho$ ,  $T$ ,  $P$  à l'échelle de la particule de fluide.

### Hypothèses pour tout le chapitre :

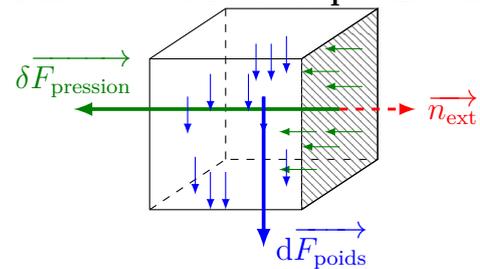
- Le référentiel d'étude (le référentiel terrestre) est supposé **galiléen** à l'échelle de l'étude menée.
- Le fluide est **au repos dans le référentiel d'étude** (cadre de la **statique**).
- Le **champ de pesanteur est uniforme** à l'échelle de l'étude.

## I.2 Forces dans un fluide au repos

**Capacité exigible : Distinguer le statut des forces de pression et des forces de pesanteur**

On étudie une particule de fluide de volume  $d\tau$  au sein d'un **fluide au repos** dans le référentiel terrestre, considéré galiléen à l'échelle de l'étude.

Les actions mécaniques s'exerçant sur la particule de fluide sont de deux statuts différents.



### I.2.a) Forces en volume

#### 📖 Définitions : Forces de volume

Les forces de volume correspondent aux actions mécaniques de longue portée, et agissent au cœur du fluide étudié.

Les forces élémentaires de volume s'exerçant sur la particule de fluide en  $M$  de volume  $d\tau$  peuvent se mettre sous la forme  $\delta \vec{F}_v(M) = \vec{\varphi}(M)d\tau$ , où  $\vec{\varphi}(M)$  est la densité volumique de force en  $M$ .

#### ♥ À retenir : Le poids

Le poids est une force de volume. Le poids de la particule de fluide en  $M$  où la masse volumique est  $\rho(M)$ , de volume  $d\tau$ , de masse  $dm$  s'écrit :

$$\delta \vec{F}_{\text{poids}} = dm \vec{g} = \rho(M) \vec{g} d\tau$$

#### Exemple 1. Forces en volume

- On étudie un fluide chargé qui présente une densité volumique de charge électrique  $\rho_e(M)$ , plongé dans un champ électrique.

Un volume  $d\tau$  est de charge  $dq = \rho_e d\tau$  et est soumis à la force de Lorentz :  $\delta \vec{F}_{\text{Lorentz}} = \rho_e d\tau \vec{E}(M)$ , de densité volumique  $\vec{\varphi}_e(M) = \rho_e(M) \vec{E}(M)$

- Dans un référentiel non galiléen (cf 2<sup>e</sup> année PC), il est nécessaire d'ajouter des « pseudo-forces » aux bilans des forces menés habituellement en référentiel galiléen.

Une particule fluide dont on étudie l'équilibre dans un référentiel non galiléen est soumise à la

force d'inertie d'entraînement  $\delta \vec{f}_{ie} = -dm \vec{a}_e(M) = -\rho(M) d\tau \vec{a}_e(M)$ , où  $\vec{a}_e(M)$  est l'accélération d'entraînement de la particule de fluide, qui est liée au mouvement du référentiel d'étude par rapport au référentiel galiléen de référence.

C'est une force en volume de densité volumique  $\vec{\varphi}_{ie} = -\rho(M) \vec{a}_e(M)$

## I.2.b) Forces en surface

### 📖 Définitions : Forces de surface

Les forces de surface correspondent à des actions de contact, c'est-à-dire à des actions de courte portée.

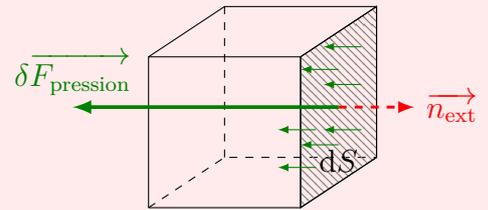
### ♥ À retenir : Les forces de pression

La force élémentaire de pression exercée par le fluide sur l'élément de surface  $dS$  où règne la pression  $P(M)$  s'écrit :

$$\delta \vec{F}_{\text{pression}} = -P(M) dS \vec{n}_{\text{ext}}$$

avec

- $P(M)$  la pression en  $M$  en Pascal (Pa) ;
- $dS$  l'élément infinitésimal de surface au voisinage de  $M$  ;
- $\vec{n}_{\text{ext}}$  le vecteur unitaire dirigé vers l'extérieur.

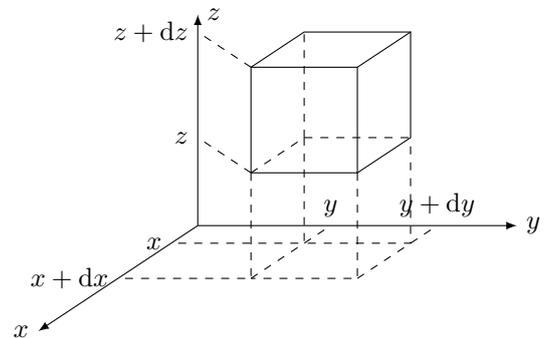


## I.2.c) Équivalent volumique des forces de pression

**Capacité exigible :** Exprimer l'équivalent volumique des forces de pression à l'aide d'un gradient.

On considère une particule de fluide parallélépipédique de côtés  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ , située entre  $x$  et  $x + dx$ , entre  $y$  et  $y + dy$ , entre  $z$  et  $z + dz$ .

On souhaite déterminer la résultante des forces de pression qui s'exercent sur la particule de fluide.



### 📖 Définition : Dérivée partielle d'une fonction de plusieurs variables

La dérivée partielle de  $f$  par rapport à la variable  $x$ , avec  $y$  et  $z$  maintenues constantes est définie par :

$$\left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)_{y,z} = \lim_{\delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \delta x, y, z) - f(x, y, z)}{\delta x}$$

### ♥ Point maths : développement limité au premier ordre

Pour une fonction de trois variables  $f : (x, y, z) \mapsto f(x, y, z)$ , le développement limité au premier ordre au voisinage de  $x$ , avec  $dx \ll x$  (avec  $y$  et  $z$  constants) s'écrit

$$f(x+dx, y, z) \approx f(x, y, z) + \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)_{y,z} (x, y, z) \times dx \Leftrightarrow f(x+dx, y, z) - f(x, y, z) \approx \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)_{y,z} (x, y, z) \times dx$$

$\left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)_{y,z} (x_0, y_0, z_0)$  se dit « dérivée partielle de  $f$  par rapport à  $x$ , à  $y$  et  $z$  constants, évaluée en  $x_0, y_0, z_0$  », ou se lit « d-rond  $f$  sur d-rond  $x$  à  $y$  et  $z$  constants »

### Démonstration à connaître : Équivalent volumique des forces de pression

- Q1. Exprimer la résultante des forces de pression  $\delta \overrightarrow{F}_{\text{pression}}$  s'exerçant sur la particule de fluide comme une somme de 6 forces de pression.
- Q2. Pour chaque direction, successivement, exprimer la somme des deux forces s'exerçant dans cette direction.  
En utilisant le point maths ci-dessus, exprimer la résultante des forces de pression en fonction de dérivées partielles de la pression  $P$ , des vecteurs unitaires et du volume  $d\tau$  de la particule de fluide.
- Q3. En déduire l'expression de la résultante des forces de pression s'exerçant sur la particule de fluide. Identifier le vecteur gradient.

### À retenir : Équivalent volumique des forces de pression

La résultante des forces de pression s'exerçant sur une particule de fluide de volume  $d\tau$  est équivalente à une force volumique et s'écrit :

$$\delta \overrightarrow{F}_{\text{pression}} = - \overrightarrow{\text{grad}} (P) d\tau$$

de densité volumique :  $\overrightarrow{\varphi}_{\text{pression}} = - \overrightarrow{\text{grad}} (P)$

#### REMARQUES

 Le calcul précédent montre que, **bien que les forces de pression soient des forces de surface, il est possible de les prendre en considération en introduisant une densité volumique de force liée au gradient du champ de pression.**

#### 1.2.d) Opérateur gradient

### Définition : Différentielle totale d'une fonction de plusieurs variables

La différentielle totale d'une fonction  $f$ , notée  $df$ , de 3 variables  $(x, y, z)$  indépendantes,  $f : (x, y, z) \mapsto f(x, y, z)$ , est définie par :

$$df = \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)_{y,z} dx + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)_{x,z} dy + \left( \frac{\partial f}{\partial z} \right)_{x,y} dz$$

### Définition : Opérateur gradient

Soit  $f$  une fonction scalaire réelle des trois coordonnées d'un point  $M$ , de différentielle totale  $df$ .  
On définit le **vecteur gradient de la fonction scalaire  $f$** , noté  $\overrightarrow{\text{grad}} f$ , par :

$$df = \left( \overrightarrow{\text{grad}} (f) \right) \cdot d\overrightarrow{OM}$$

REMARQUES

— Le vecteur gradient de la fonction scalaire  $f$  en coordonnées cartésiennes s'exprime selon :

$$\overrightarrow{\text{grad}}(f) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{y,z} \vec{u}_x + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_{x,z} \vec{u}_y + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)_{x,y} \vec{u}_z$$

— Le vecteur gradient de la fonction scalaire  $f$  en coordonnées cylindriques  $(r, \theta, z)$  s'exprime selon :

$$\overrightarrow{\text{grad}}(f) = \left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)_{\theta,z} \vec{u}_r + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial f}{\partial \theta}\right)_{r,z} \vec{u}_\theta + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)_{r,\theta} \vec{u}_z$$

— Le vecteur gradient de la fonction scalaire  $f$  en coordonnées sphériques  $(r, \theta, \varphi)$  s'exprime selon :

$$\overrightarrow{\text{grad}}(f) = \left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)_{\theta,\varphi} \vec{u}_r + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial f}{\partial \theta}\right)_{r,\varphi} \vec{u}_\theta + \frac{1}{r \sin(\theta)} \left(\frac{\partial f}{\partial \varphi}\right)_{r,\theta} \vec{u}_\varphi$$



♥ À retenir : Propriétés du vecteur gradient

■ Direction de  $\overrightarrow{\text{grad}}(f)$  :

Sur une surface  $\mathcal{S}$  iso- $f$  définie comme l'ensemble des points  $M$  tel que  $\forall M \in \mathcal{S}, f(M) = \text{cst}$  :

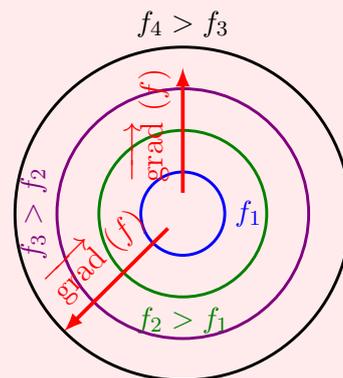
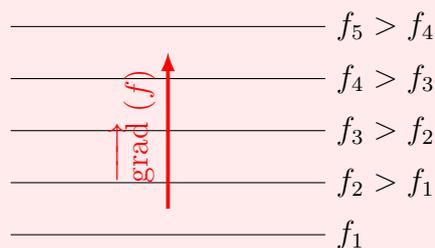
$$df = 0 = \overrightarrow{\text{grad}}(f) \cdot d\overrightarrow{OM} \Leftrightarrow \left\{ \overrightarrow{\text{grad}}(f) \perp d\overrightarrow{OM} \quad \text{ou} \quad \overrightarrow{\text{grad}}(f) = \vec{0} \right\}$$

Le vecteur gradient  $\overrightarrow{\text{grad}}(f)$  est perpendiculaire aux surfaces iso- $f$ .

■ Sens de  $\overrightarrow{\text{grad}}(f)$  :

Lorsque  $f$  augmente,  $df > 0$ , donc  $\overrightarrow{\text{grad}}(f) \cdot d\overrightarrow{OM} > 0$

Le vecteur gradient  $\overrightarrow{\text{grad}}(f)$  est orienté dans le sens des valeurs de  $f$  croissantes.



1.3 Équation de la statique des fluides

1.3.a) Cas général

**Capacité exigible** : Établir l'équation locale de la statique des fluides.

💡 Méthode : Établir l'équation locale de la statique des fluides

1. Faire le bilan des forces s'exerçant sur une particule de fluide (petit cube).
2. Traduire la condition d'équilibre de la particule de fluide (statique = pas de mouvement!).
3. En déduire l'équation locale de la statique des fluides.

## 🔗 Démonstration à connaître : Équation locale de la statique des fluides

On considère une particule de fluide en  $M$ , de volume  $d\tau$ , où la masse volumique est  $\rho(M)$ , à l'équilibre dans le référentiel terrestre galiléen.

Q1. Faire un bilan des forces s'exerçant sur la particule de fluide.

On notera  $\overrightarrow{\varphi_{v,autres}}$  la densité volumique des forces autres que le poids et les force de pression.

Q2. Traduire l'équilibre de la particule fluide pour en déduire l'équation de la statique des fluides.

### ♥ À retenir : Équation de la statique des fluides

L'équation locale de la statique des fluides s'écrit :

$$\vec{0} = - \overrightarrow{\text{grad}} (P) + \rho \vec{g} + \overrightarrow{\varphi_{v,autres}} \Leftrightarrow \overrightarrow{\text{grad}} (P) = \rho \vec{g} + \overrightarrow{\varphi_{v,autres}}$$

#### 1.3.b) Dans le champ de pesanteur

On s'intéresse au champ de pression dans le champ de pesanteur : la particule fluide n'est soumise qu'à son poids et aux forces de pression. L'équation locale de la statique des fluides s'écrit alors :

$$\rho(M) \vec{g} - \overrightarrow{\text{grad}} (P) = \vec{0} \Leftrightarrow \overrightarrow{\text{grad}} (P) = \rho(M) \vec{g}$$

En choisissant l'axe ( $Oz$ ) vertical ascendant :  $\vec{g} = -g\vec{u}_z$  :  $\overrightarrow{\text{grad}} (P) = -\rho(M)g\vec{u}_z$

$$\text{En projection : } \begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial z} = -\rho(M)g \end{cases}$$

Donc le champ de pression ne dépend ni de  $x$  ni de  $y$ , et l'équation locale de la statique des fluides s'écrit :

$$\frac{dP}{dz} = -\rho(M)g$$

En choisissant l'axe ( $Oz$ ) vertical descendant :  $\vec{g} = +g\vec{u}_z$  :  $\overrightarrow{\text{grad}} (P) = \rho(M)g\vec{u}_z \Rightarrow \frac{dP}{dz} = +\rho(z)g$

### ♥ À retenir : Équation de la statique des fluides dans le champ de pesanteur

L'équation locale de la statique des fluides dans le champ de pesanteur terrestre s'écrit :

$$\frac{dP}{dz} = -\rho(z)g \quad \text{Si } (Oz) \text{ est ascendant} \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dz} = +\rho(z)g \quad \text{Si } (Oz) \text{ est descendant} \quad (2)$$

où  $\rho$  est la masse volumique du fluide et  $g$  l'intensité de la pesanteur.

Cette équation permet de déterminer l'expression du champ de pression  $P(z)$  en fonction de l'altitude.

#### ⚠ Attention aux signes

- Si  $Oz$  est ascendant : la pression diminue lorsque  $z$  augmente, donc  $\frac{dP}{dz} < 0$ , donc  $\frac{dP}{dz} = \boxed{-}\rho g$
- Si  $Oz$  est descendant : la pression augmente lorsque  $z$  augmente, donc  $\frac{dP}{dz} > 0$ , donc  $\frac{dP}{dz} = \boxed{+}\rho g$

## I.4 Champ de pression dans un liquide incompressible et homogène

**Capacité exigible** : Exprimer l'évolution de la pression avec l'altitude dans le cas d'un fluide incompressible et homogène. Connaître des ordres de grandeur des champs de pression dans le cas de l'océan.

### I.4.a) Hypothèses

On cherche dans cette partie à exprimer le champ de pression au sein d'un **liquide**, nous faisons les hypothèses suivantes :

- **champ de pesanteur uniforme** ;
  - liquide **incompressible** : la masse volumique du liquide ne dépend pas de la pression ;
  - liquide **homogène** : la masse volumique du liquide ne dépend pas de la position  $M$  dans le liquide.
- La masse volumique sera considérée constante au sein du liquide** dans la suite de la partie.

### I.4.b) Champ de pression

#### 💡 Méthode : Exprimer le champ de pression dans un fluide incompressible et homogène

1. Écrire l'équation locale de la statique des fluides  $\frac{dP}{dz} = \pm \rho g$  (attention au signe!).
2. Le champ de pesanteur  $g$  est supposé uniforme et dans un fluide homogène et incompressible,  $\rho$  est constante, intégrer l'équation locale précédente, **sans oublier la constante d'intégration** !
3. Déterminer la constante d'intégration en utilisant la continuité de la pression à l'interface entre deux fluides.

### Exercice de cours A Ordres de grandeur des champs de pression dans le cas de l'océan

On se place dans l'océan, en considérant l'axe ( $Oz$ ) descendant avec  $O$  situé à la surface de l'eau. On assimile l'océan à un fluide homogène et incompressible de masse volumique proche de celle de l'eau liquide  $\rho \approx 1 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

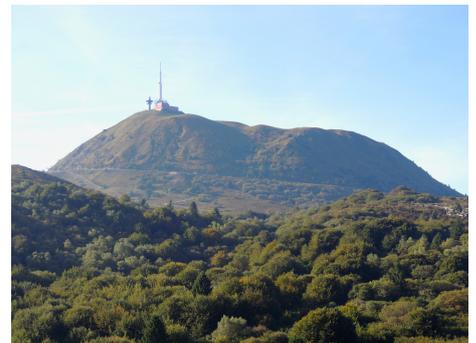
La pression atmosphérique est notée  $P_0$ .

On admet que la pression est continue à la surface du liquide :  $P(z = 0^-) = P(z = 0^+)$  (vrai si on peut négliger les effets de tension superficielle).

- Q1. Établir l'expression du champ de pression  $P(z)$  dans l'océan.
- Q2. Exprimer l'augmentation de la pression dans l'océan pour une variation de profondeur de 10 m.
- Q3. Calculer la pression dans les fonds océaniques (profondeur de l'ordre de 10 km).

### Exercice de cours B Expérience de Torricelli <https://blaisepascal.bibliotheques-clermontmetropole.eu/son-oeuvre/pascal-savant/physique/experience-du-puy-de-dome?rCH=2>

En 1647, Blaise Pascal reprit l'expérience de Torricelli : il remplit un tube de mercure qu'il retourne dans une cuve de mercure. Le mercure, métal liquide, descend dans le tube puis se stabilise. Il la réalise au Puy de Dôme à différentes altitudes. L'espace dans le tube au-dessus du liquide sera assimilé à du vide (rigoureusement, il s'agit de la vapeur de mercure à l'équilibre avec son liquide, à la pression de vapeur saturante).



- Q1. Faire un schéma de l'expérience.
- Q2. Relier la pression atmosphérique  $P_0$  à la hauteur du mercure dans le tube, le champ de pesanteur et la masse volumique du mercure ( $\rho_{Hg} = 13,546 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ ).
- Q3. Lors de la réalisation de l'expérience, la mesure de la hauteur du mercure dans le tube a été faite en bas du Puy de Dôme et en haut. Sachant que le mercure est descendu de 9 cm, déterminer la différence de pression atmosphérique entre le bas et le haut du Puy de Dôme.

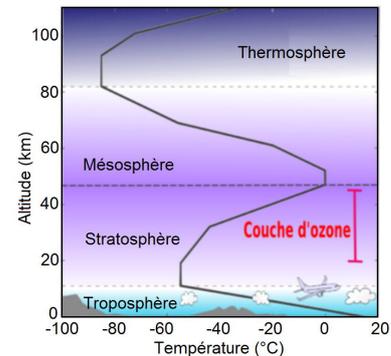
## I.5 Champ de pression dans un gaz : l'atmosphère isotherme

**Capacité exigible :** Exprimer l'évolution de la pression avec l'altitude dans le cas de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait. Citer des ordres de grandeurs des champs de pression dans le cas de l'atmosphère.

### I.5.a) Modèle de l'atmosphère isotherme

Pour l'étude de la pression au sein de l'atmosphère, on fait les hypothèses suivantes :

- référentiel d'étude (le référentiel terrestre) galiléen ;
- fluide au repos dans le référentiel d'étude ;
- champ de pesanteur uniforme ;
- air assimilé à un gaz parfait diatomique ;
- atmosphère isotherme : la température est uniforme dans l'atmosphère



### I.5.b) Champ de pression dans l'atmosphère

#### ⚡ Méthode : Exprimer le champ de pression dans l'atmosphère isotherme

1. Écrire l'équation locale de la statique des fluides  $\frac{dP}{dz} = \pm \rho(z)g$  (attention au signe!).
2. Utiliser la loi des gaz parfaits pour exprimer la masse volumique  $\rho(z)$  en fonction de la pression  $P(z)$  et de la température  $T_0$  constante dans l'atmosphère.

#### ⚠ Attention

La masse volumique  $\rho$  n'est PAS CONSTANTE dans l'atmosphère !

3. En déduire l'équation différentielle vérifiée par la pression  $P$  sous la forme :  $\frac{dP}{dz} + \frac{1}{H} \times P(z) = 0$ , où  $H$  est une constante.
4. Résoudre l'équation différentielle en déterminant la constante d'intégration.

#### 🔗 Démonstration à connaître : Champ de pression dans l'atmosphère

On cherche, à établir l'expression de la pression en fonction de l'altitude dans le cadre des hypothèses précédentes. On prendra l'axe  $(Oz)$  est l'axe vertical ascendant avec l'origine  $O$  située au « niveau de la mer » et on notera  $T_0$  la température constante de l'atmosphère.

- Q1. Exprimer la masse volumique de l'air dans l'atmosphère en fonction de  $P$ ,  $R$ ,  $T_0$ ,  $M_{\text{air}}$ .
- Q2. Sachant que l'air est composé, en quantité de matière, de 80 % de diazote et de 20% de dioxygène, déterminer la masse molaire de l'air.
- Q3. En déduire l'équation différentielle vérifiée par  $P(z)$ .
- Q4. Introduire une hauteur  $H$  caractéristique de la variation de  $P$ . Faire l'application numérique.
- Q5. Déterminer l'expression de la pression  $P$  en fonction de  $z$ . On notera  $P_0$  la pression en  $z = 0$ . Représenter l'allure de la fonction  $P$  en fonction de  $z$ .

### Exercice de cours C Ordres de grandeur dans l'atmosphère

- Q1. Calculer la variation de pression dans l'air pour une variation d'altitude de 10 m. Comparer à celle obtenue dans l'océan.  
Peut-on faire l'hypothèse que la pression est la même en tout point de la salle ? en tout point d'une piscine ?
- Q2. Calculer la pression au sommet du Puy de Dôme ( $z_{PD} = 1464$  m).
- Q3. Que pensez-vous de l'hypothèse « atmosphère isotherme » ? Pour quelles altitudes est-elle valable ? Pour les basses altitudes, quel modèle de variation de  $T$  pouvez-vous proposer ?

### I.5.c) Résolution numérique

**Capacité numérique** : à l'aide d'un langage de programmation, étudier les variations de température et de pression dans l'atmosphère.

#### i- Position du problème

Comme on peut le voir sur la figure du paragraphe § I.5.a), le modèle isotherme n'est valable qu'entre 10 et 20 km environ.

Voici une résolution numérique de l'équation de la statique des fluides en prenant en compte les variations de la température avec l'altitude. Pour cela, on doit résoudre :

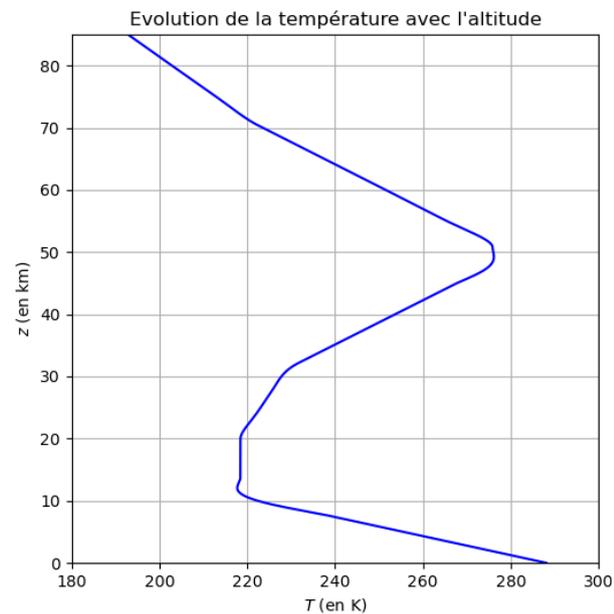
$$\begin{cases} \frac{dT}{dz} = kISA(z) \\ \frac{dP}{dz} = -\frac{M_{\text{air}}}{R} \frac{P(z)}{T(z)} \end{cases}$$

où  $kISA(z)$  est la fonction de l'altitude qui donne le gradient de température avec l'altitude.

#### ii- Gradient de température

On utilise le **modèle ISA** qui divise l'atmosphère en différentes couches avec une distribution linéaire de la température.

$$\begin{aligned} 0 \leq z < 11 \text{ km} & : \frac{dT}{dz} = -6,5 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1} \\ 11 \text{ km} < z < 20 \text{ km} & : \frac{dT}{dz} = 0 \\ 20 \text{ km} < z < 32 \text{ km} & : \frac{dT}{dz} = 1 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1} \\ 32 \text{ km} < z < 47 \text{ km} & : \frac{dT}{dz} = 2,8 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1} \\ 47 \text{ km} < z < 51 \text{ km} & : \frac{dT}{dz} = 0 \\ 51 \text{ km} < z < 71 \text{ km} & : \frac{dT}{dz} = -2,8 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1} \\ 71 \text{ km} < z < 85 \text{ km} & : \frac{dT}{dz} = 2,0 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1} \end{aligned}$$



En python, on définit la fonction `kISA(z)` qui renvoie la valeur de la dérivée de  $T$  en fonction de  $z$ .

#### iii- Outil numérique de résolution

On utilise la fonction `solve_ivp` disponible dans la bibliothèque `scipy.integrate` :

```
1 resol=solve_ivp(f,(t0,tf),y0,t_eval=t)
2 temps=resol.t # on récupère les instants de résolutions
3 # resol.y est le tableau des valeurs de y, chaque colonne correspondant à un
  instant de résolution.
4 y0=resol.y[0] # récupération de la 1ère ligne de resol.y
5 y1=resol.y[1] # récupération de la 1ère ligne de resol.y
```

Paramètres d'entrée :

- $f$  : la fonction  $f(t, y)$  telle que  $\frac{dy}{dt} = f(t, y)$  ;
- $(t_0, t_f)$  : l'intervalle de temps de résolution  $(t_0, t_f)$ , tuple de 2 flottants ;
- $y_0$  le vecteur de condition initiale  $y_0$  (tableau `numpy`) ;
- `t_eval=t`, avec `t` le tableau des instants de résolution.

Sortie :

- `resol.t` : renvoie les instants de résolution (identique à `t`)
- `resol.y[k]` renvoie la  $k^e$  ligne du tableau, c'est-à-dire les valeurs de la  $k^e$  composante du vecteur  $y$  (tableau), à chaque instant de résolution.

#### iv- Réécriture du système d'équation différentielle

Pour résoudre le système des deux équations différentielles précédent, il faut commencer par **réécrire le système d'équations différentielles en une seule équation différentielle vectorielle** pour qu'on puisse la résoudre avec la fonction `solve_ivp`.

$$\text{On pose } X(z) = \begin{pmatrix} T(z) \\ P(z) \end{pmatrix}$$

$$\text{Alors } \frac{dX}{dz} = \begin{pmatrix} \frac{dT}{dz} \\ \frac{dP}{dz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} kISA(z) \\ -\frac{M_{\text{air}}}{R} \frac{P(z)}{T(z)} \end{pmatrix} = f(z, X)$$

La fonction qui définit l'équation différentielle, sous la forme attendue par la fonction `solve_ivp` :

$$\frac{dX}{dz} = f(z, X), \text{ s'écrit } f(z, X) = \begin{pmatrix} kISA(z) \\ -\frac{M_{\text{air}}}{R} \frac{P(z)}{T(z)} \end{pmatrix}$$

En python, la fonction  $f(z, X)$  est définie par une fonction `systDiff(z,X)` qui prend deux arguments : `z` un flottant (c'est l'altitude) et `X` un tableau de deux éléments `X=np.array([...,...])`, avec `X[0]` la température à l'altitude `z` et `X[1]` la pression à l'altitude `z`. `systDiff(z,X)` renvoie un tableau de deux éléments : le premier élément est la dérivée de la température en `z` (donnée par `kISA`), et le deuxième élément est la dérivée de la pression en `z` (donnée par l'équation de la statique des fluides).

#### v- Code python complet .

```

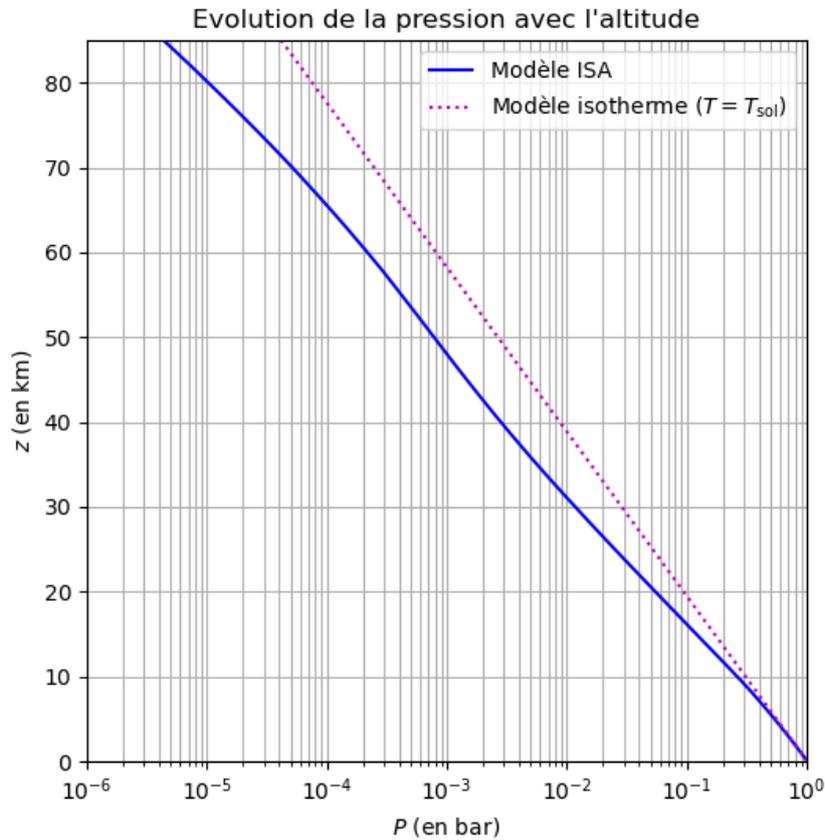
1 ## Importation des bibliothèques utiles
2 import numpy as np # pour la manipulation des tableaux
3 import matplotlib.pyplot as plt # pour les représentations graphiques
4 from scipy.integrate import solve_ivp # pour la résol° des éq° diff
5
6 ## Définition des constantes du problème
7 g = 9.81 # accélération de la pesanteur (en m/s^2)
8 Mair = 29e-3 # masse molaire de l'air (en kg/mol)
9 R = 8.314 # constante du gaz parfait (en J/K/mol)
10 Tsol = 288 # température de l'atmosphère au niveau du sol (en K)
11 Psol = 1.013e5 # pression de l'atmosphère au niveau du sol (en Pa)
12
13 ## Définition du gradient thermique vertical selon le modèle ISA
14 def kISA(z):
15     """ z est l'altitude en mètres. La fonction renvoie la valeur du
16     gradient thermique vertical à l'altitude z (en K/m). """
17     if 0 <= z < 11e3:
18         return -6.5e-3
19     elif z < 20e3:
20         return 0
21     elif z < 32e3:
22         return 1.0e-3
23     elif z < 47e3:
24         return 2.8e-3
25     elif z < 51e3:
26         return 0
27     elif z < 71e3:
28         return -2.8e-3
29     elif z < 85e3:
30         return -2.0e-3
31     else:
32         return None
33
34 ## Définition du système différentiel à résoudre
35 def systDiff(z,X):

```

```

35     """X désigne le vecteur inconnu de dimension 2
36     X[0] : température ; X[1] : pression ; z désigne l'altitude.
37     La fonction renvoie respectivement la dérivée de la température et la
    dérivée de la pression à l'altitude z."""
38     dT =          # dérivée verticale de la température
39     dP =          # dérivée verticale de la pression (équ°
    de la statique des fluides)
40     return np.array([dT, dP])
41
42 ## Définition des conditions aux limites
43 CAL = [Tsol, Psol]
44 ## Définition de l'ensemble des valeurs de z pour lesquelles on cherche la
    solution numérique approchée du système différentiel précédent
45 z =          # on choisit 10000 points régulièrement
    espacés entre 0 et 85 km d'altitude
46 ## La résolution en elle-même
47 sol =
48 Z=          # extraction des valeurs de l'altitude
49 T =          # extraction des valeurs de la
    température
50 P =          # extraction des valeurs de la pression
51
52 ## Pression dans le modèle isotherme (pour comparaison)
53 def PisoT(z, T0 = 288):
54     """ Calcule la valeur de P à l'altitude z selon le modèle isotherme. Par
    défaut, T0 est fixée à 288 K. """
55     return
56
57 ## Représentation graphique des résultats
58 plt.title("Evolution de la pression avec l'altitude")
59 plt.semilogx(          ,          , 'b-', label = "Modèle ISA")
60 plt.semilogx(          ,          , 'm:', label = r"Modèle isotherme ($T=T_{\rm
    sol}$)")
61 plt.xlim(1e-6,1)
62 plt.ylim(0,85)
63 plt.xlabel(r"$P$ (en bar)")
64 plt.ylabel(r"$z$ (en km)")
65 plt.legend(loc=0)
66 plt.grid(which = 'both')
67 plt.show()

```



#### 1.5.d) Facteur de Boltzmann

**Capacité exigible :** S'appuyer sur la loi d'évolution de la densité moléculaire de l'air dans le cas de l'atmosphère isotherme pour illustrer la signification du facteur de Boltzmann. Utiliser  $k_B T$  comme référence des énergies mises en jeu à l'échelle microscopique.

La densité moléculaire, c'est-à-dire le nombre de molécules par unité de volume, s'exprime, à l'aide de la loi des gaz parfaits :

$$\begin{aligned}
 n^*(z) &= \frac{N}{V} \\
 &= \frac{n \times \mathcal{N}_A}{V} \\
 &= \frac{P(z) \mathcal{N}_A}{RT_0} \\
 &= \frac{P(z)}{k_B T_0} \\
 &= \frac{P(0)}{k_B T_0} \exp\left(-\frac{Mgz}{RT_0}\right) \\
 &= n^*(0) \exp\left(-\frac{Mgz}{RT_0}\right)
 \end{aligned}$$

On peut relier la masse molaire à la masse  $m^*$  moyenne d'une molécule :  $M = m^* \times \mathcal{N}_A$

$$\begin{aligned}
 n^*(z) &= n^*(0) \exp\left(-\frac{Mgz}{RT_0}\right) \\
 &= n^*(0) \exp\left(-\frac{m^* \times \mathcal{N}_A gz}{RT_0}\right) \\
 &= n^*(0) \exp\left(-\frac{m^* gz}{\frac{R}{\mathcal{N}_A} T_0}\right) \\
 &= n^*(0) \exp\left(-\frac{m^* gz}{k_B T_0}\right)
 \end{aligned}$$

On reconnaît, à l'intérieur de l'exponentielle, deux énergies :

- $m^*gz$  qui est l'énergie potentielle de pesanteur d'une molécule située à l'altitude  $z$  ;
- $k_B T$  qui est l'énergie d'agitation thermique d'une molécule à la température  $T$ .

La densité moléculaire à l'altitude  $z$  dépend de la valeur du rapport des deux énergies mises en jeu ici, qui sont d'effets inverses. La pesanteur tend à ramener toutes les molécules à l'altitude minimale pour minimiser l'énergie potentielle, tandis que l'agitation thermique tend à homogénéiser la densité moléculaire.

On peut alors décrire deux cas limites selon la valeur de l'énergie potentielle de pesanteur (c'est-à-dire de l'altitude) et de l'énergie d'agitation thermique (c'est-à-dire de la température) :

- Si  $k_B T_0 \gg m^*gz$ , alors  $\exp\left(-\frac{m^*gz}{k_B T_0}\right) \sim 1$ , ainsi  $\forall z, n^*(z) \approx n^*(0)$  : les molécules sont uniformément réparties dans l'atmosphère. L'agitation thermique arrive à vaincre la pesanteur.
- Si  $k_B T_0 \ll m^*gz$ , alors, pour  $z \neq 0$ ,  $\exp\left(-\frac{m^*gz}{k_B T_0}\right) \sim 0$  et  $n^*(z) \approx 0$  dès que  $z \neq 0$  : les molécules sont toutes situées en  $z = 0$ , c'est-à-dire à l'altitude pour laquelle l'énergie potentielle est minimale. L'agitation thermique est trop faible et n'arrive pas à vaincre la pesanteur.

### ♥ À retenir : Facteur de Boltzmann

On considère un système thermodynamique à l'équilibre à la température  $T$ , dans lequel les énergies prises par les particules peuvent avoir des valeurs  $E_i$  différentes.

Le nombre moyen  $N_i$  de particules ayant l'énergie  $E_i$  est proportionnelle au **facteur de Boltzmann** :

$$N_i(E_i) \propto \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right)$$

## II Résultante des forces de pression sur une surface

L'objectif de cette partie est de calculer la résultante des forces de pression qui s'exercent sur une surface.

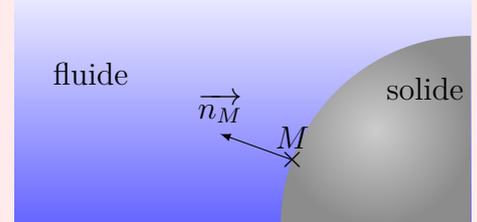
### II.1 Expression

#### ♥ À retenir : Résultante des forces de pression

La résultante des forces de pression exercée par un fluide sur la surface totale  $\mathcal{S}$  d'un solide en contact avec le fluide est égale à la somme des forces élémentaires de pression s'exerçant sur les éléments de surface  $dS_M$  à la surface du solide :

$$\vec{F}_P = \iint_{M \in \mathcal{S}} d\vec{F}_P(M) = \iint_{M \in \mathcal{S}} -P(M) \vec{n}_M dS_M$$

avec  $\vec{n}_M$  le vecteur unitaire dirigé du solide vers le fluide, et perpendiculaire à la surface solide.



Il s'agit d'une intégrale double car on intègre sur une surface, et donc sur deux variables d'espace.

#### ⚠ Attention – Ne pas confondre

Il ne faut pas confondre :

- l'équivalent volumique des forces de pression, qui permet d'exprimer la résultante des forces de pression sur une particule de fluide, pour déterminer l'expression de la pression localement.
- la résultante des forces de pression s'exerçant sur une surface à l'échelle macroscopique.

### II.2 Éléments de surface

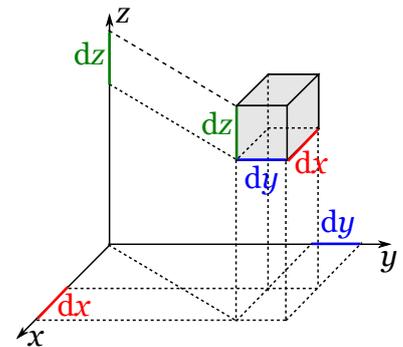
Capacité exigible : Exprimer une surface élémentaire dans un système de coordonnées adaptées.

#### II.2.a) Coordonnées cartésiennes

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Meca/Cinematique/coord\\_cartesiennes.php](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Meca/Cinematique/coord_cartesiennes.php)

Éléments de surface :

- dans le plan  $(Oxy)$  :  $dS = dxdy$
- dans le plan  $(Oxz)$  :  $dS = dx dz$
- dans le plan  $(Oyz)$  :  $dS = dy dz$

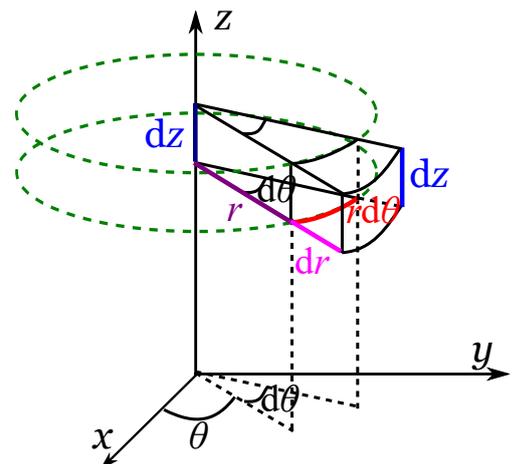


#### II.2.b) Coordonnées cylindriques

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Meca/Cinematique/coord\\_cylindriques.php](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Meca/Cinematique/coord_cylindriques.php)

Éléments de surface :

- pour une surface à  $z = \text{cste}$  :  
 $dS = r d\theta \times dr$
- pour une surface à  $r = \text{cste}$  :  
 $dS = r d\theta \times dz$
- pour une surface à  $\theta = \text{cste}$  :  
 $dS = dr \times dz$



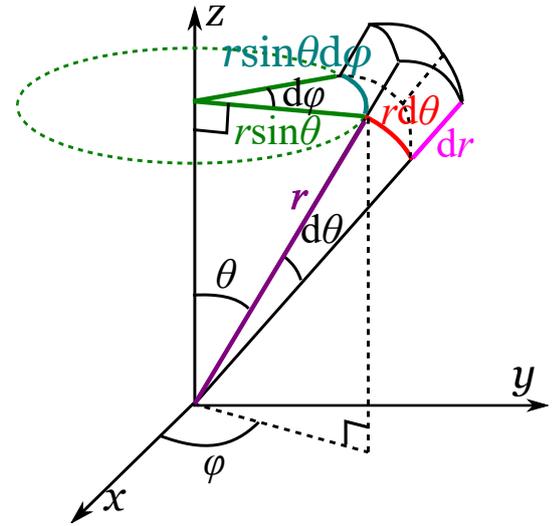
## II.2.c) Coordonnées sphériques

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Meca/Cinematique/coord\\_spheriques.php](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Meca/Cinematique/coord_spheriques.php)

### Élément de surface :

Pour un élément de surface à la surface de la sphère de rayon  $r$  :

$$dS = r d\theta r \sin(\theta) d\varphi = r^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi$$



## II.3 Calculs de résultantes de forces de pression

**Capacité exigible :** Utiliser les symétries pour déterminer la direction d'une résultante de forces de pression. Évaluer une résultante de forces de pression.

### 💡 Méthode : Calcul de la résultante des forces de pression

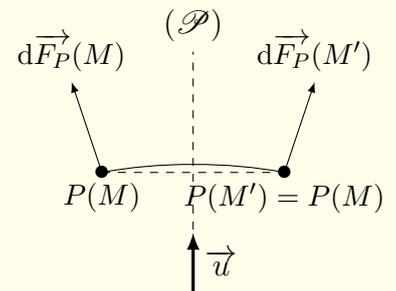
On souhaite calculer la résultante des forces de pression exercée par un fluide sur une surface  $\mathcal{S}$  d'un solide.

- Déterminer le champ de pression  $P(M)$ , dans le fluide, en tout point  $M$  de la surface.
- Choisir le système de coordonnées adapté au problème pour se repérer sur la surface et exprimer l'élément de surface  $dS_M$  sur la paroi.
- En déduire la force de pression élémentaire  $d\vec{F}_P(M) = -P(M)dS_M\vec{n}_M$ , avec  $\vec{n}_M$  le vecteur unitaire dirigé du solide vers le fluide.  
⚠ attention au sens de la force par rapport au sens du vecteur unitaire (vérifier le sens physique).
- Dans le cas où la direction de la force de pression élémentaire dépend du point  $M$  considéré.  
Étudier les symétries du problème et en déduire, à l'aide d'un schéma, la direction de la résultante des forces de pression :  $\vec{F}_P = F_P \vec{u}$ .

### 📖 Définition : plan de symétrie

On dit que le problème admet un plan de symétrie  $(\mathcal{P})$  si :

- la surface solide est symétrique par rapport au plan  $(\mathcal{P})$ ,
- et si la pression est la même en deux points  $M$  et  $M'$  symétriques par rapport au plan  $(\mathcal{P})$ .



- Exprimer la projection de la résultante des forces de pression sur la direction déterminée par symétrie

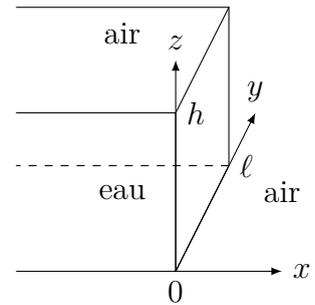
$$\begin{aligned} F_P &= \vec{F}_P \cdot \vec{u} = \iint_{M \in \mathcal{S}} d\vec{F}_P(M) \cdot \vec{u} \\ &= \iint_{M \in \mathcal{S}} \left( -P(M) \vec{n}_M \cdot \vec{u} dS_M \right) \end{aligned}$$

- En déduire le vecteur  $\vec{F}_P = F_P \vec{u}$ .

### Exercice de cours D Force de pression sur une vitre d'aquarium plane

On considère la vitre plane d'un aquarium de hauteur  $h = 50$  cm et de largeur  $\ell = 1,0$  m. L'eau affleure au sommet de la vitre.

On note  $\rho$  la masse volumique constante de l'eau liquide,  $g$  le champ de pesanteur et  $P_0$  la pression atmosphérique à la surface de l'eau.



- Q1. Exprimer la pression au sein de l'eau et dans l'air.
- Q2. Exprimer la surface élémentaire  $dS_M$  de la paroi dans le système de coordonnées adapté.  
En déduire l'expression de la force de pression élémentaire exercée par l'eau et l'air sur la surface  $dS_M$ .
- Q3. Exprimer la résultante des forces de pression exercées par l'air et l'eau sur la vitre à l'aide d'une intégrale double et la calculer.

On admet le théorème de Fubini, pour une fonction  $f : (x, y) \mapsto f_1(x) \times f_2(y)$ , où  $f_1$  et  $f_2$  sont des fonctions continues :

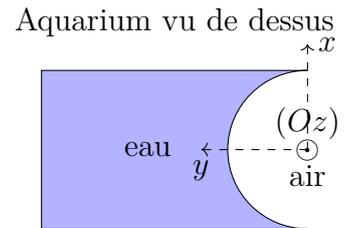
$$\iint_{[a,b] \times [c,d]} f(x, y) dx dy = \int_a^b f_1(x) dx \times \int_c^d f_2(y) dy$$

Faire l'application numérique.

### Exercice de cours E Force de pression sur une vitre d'aquarium hémicylindrique

La vitre d'un aquarium a la forme d'un demi-cylindre d'axe vertical, de hauteur  $h$  et de rayon  $R$ . L'eau affleure au sommet de la vitre.

On note  $\rho$  la masse volumique constante de l'eau liquide,  $g$  le champ de pesanteur et  $P_0$  la pression atmosphérique à la surface de l'eau.



- Q1. Quel est le système de coordonnées adapté pour se repérer sur la surface de la vitre ?
- Q2. Exprimer la pression au sein de l'eau et la pression au sein de l'air en un point de la surface.
- Q3. Écrire l'élément de surface  $dS_M$  dans le système de coordonnées choisi précédemment.
- Q4. En déduire la force élémentaire de pression exercée sur l'élément de surface  $dS_M$  par l'eau et l'air. On n'oubliera pas de préciser le vecteur unitaire.
- Q5. En déduire l'expression de la résultante des forces de pression s'exerçant sur la paroi à l'aide d'une intégrale double.

**Attention !** Le calcul de l'intégrale précédente ne peut pas être fait directement à cause de la présence du vecteur unitaire  $\vec{u}_r(\theta)$  qui dépend de la position à la surface de l'aquarium.

- Q6. Déterminer un plan de symétrie du problème.

Tracer sur un schéma les forces  $d\vec{F}_P(M)$  et  $d\vec{F}_P(M')$  qui s'exercent en deux points  $M$  et  $M'$  symétriques par rapport au plan de symétrie précédent. Quelle est la direction de la somme  $d\vec{F}_P(M) + d\vec{F}_P(M')$  ?  
En déduire la direction de la résultante des forces de pression.

- Q7. Projeter la résultante des forces de pression dans la direction déterminée précédemment, puis calculer l'intégrale.

Faire l'application numérique pour une vitre de même taille que dans le cas précédent.

### III Poussée d'Archimède



Les frères Montgolfier, Joseph (1740-1810) et Étienne (1745-1799), sont des industriels et inventeurs français, constructeurs des montgolfières, ballons à air chaud grâce auxquels a été réalisé en 1783 le premier vol d'un être humain.

À gauche : montgolfière de 1783 des frères Montgolfier (Prints and Photographs, Bibliothèque du Congrès des États-Unis).

À droite : Monument des Frères Montgolfier à Annonay.



#### III.1 Origine physique de la poussée d'Archimède

**Capacité exigible** : Expliquer l'origine de la poussée d'Archimède.

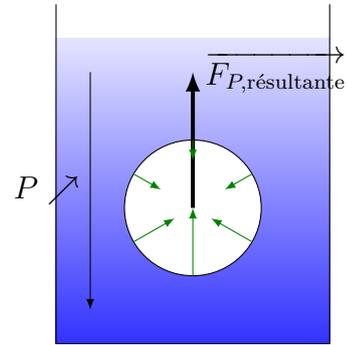
On considère un corps solide entièrement immergé dans un ou plusieurs fluides (liquide ou gaz).

Le corps est soumis aux forces de pression sur toute sa surface :

$$\vec{F}_P = \iint_{\mathcal{S}_{\text{corps}}} -P(M)\vec{n}_{M,\text{ext}} dS_M$$

La pression n'est pas homogène au sein d'un fluide, elle est d'autant plus élevée que l'on est bas en altitude, ainsi la force de pression est plus importante sur la partie inférieure du corps que sur la partie supérieure.

La résultante des forces de pression s'exerçant sur le corps immergé est donc dirigée vers le haut.



#### ♥ À retenir : Poussée d'Archimède

La **poussée d'Archimède** est la résultante des forces de pression s'exerçant sur un corps **totale**ment immergé.

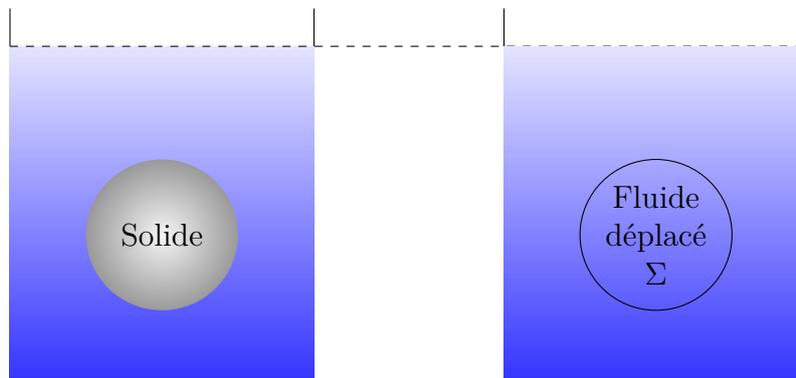
C'est la variation de pression avec l'altitude qui est à l'origine de la pression d'Archimède.

#### III.2 Loi d'Archimède

La loi de la statique des fluides établie au chapitre précédent dépend du champ de pesanteur et de la masse volumique du fluide. À aucun moment nous avons pris en compte la présence d'un corps, le champ de pression dans un fluide ne dépend pas de la présence ou non d'un corps.

On définit le **fluide déplacé** comme étant le fluide qui occuperait la place du solide.

La force pressante s'exerçant sur la surface du corps est la même que celle s'exerçant sur la surface séparant le fluide déplacé  $\Sigma$  du reste du fluide.



Le système de fluide déplacé  $\Sigma$  est soumis à deux forces :

- son poids :  $m_{\text{fluide déplacé}} \vec{g}$ , avec  $m_{\text{fluide déplacé}}$  la masse de fluide du volume occupé par le solide (appelé fluide déplacé) qui s'exerce au **centre de poussée** (=le centre de masse du volume de fluide déplacé) ;
- la résultante des forces de pression  $\vec{F}_P$  exercée sur la surface  $\mathcal{S}$  de  $\Sigma$  par le fluide extérieur à  $\Sigma$  :  $\vec{F}_P$ .

À l'équilibre :

- la somme des forces est égale au vecteur nul :  $\vec{F}_P + m_{\text{fluide déplacé}} \vec{g} = \vec{0}$ .

Donc la résultante des forces de pression est égale à l'opposée de la résultante du poids du fluide déplacé :

$$\vec{F}_P = -m_{\text{fluide déplacé}} \vec{g}$$

- la somme des moments des forces est égal au vecteur nul :  $\vec{\mathcal{M}}_O(m_{\text{fluide déplacé}} \vec{g}) + \vec{\mathcal{M}}_O(\vec{F}_P) = \vec{0}$ ,  
soit  $\vec{\mathcal{M}}_O(\vec{F}_P) = -\vec{\mathcal{M}}_O(m_{\text{fluide déplacé}} \vec{g})$ , soit :

$$\vec{\mathcal{M}}_O(\vec{F}_P) = \vec{OC} \wedge (-m_{\text{fluide déplacé}} \vec{g})$$

Donc  $\vec{F}_P$  s'exerce au centre de poussée, c'est-à-dire au centre de masse du volume de fluide déplacé.

Le champ de pression étant inchangé par la présence du solide, la poussée d'Archimède est égale à la résultante des forces de pression s'exerçant sur  $\Sigma$  :  $\vec{\Pi}_A = -m_{\text{fluide déplacé}} \vec{g}$  et s'exerce au centre de poussée.

### ♥ À retenir : Loi (Théorème) d'Archimède

Tout corps entièrement immergé dans un fluide au repos est soumis à une force égale à l'opposée au poids du volume de fluide déplacé : c'est la **poussée d'Archimède**.

Elle s'exerce au centre de masse du volume de fluide déplacé, appelé le **centre de poussée**.

### ⚠ Attention – Erreur à ne pas commettre

Le théorème d'Archimède ne s'applique pas lorsqu'une partie du corps immergé n'est pas en contact avec le fluide, c'est par exemple le cas pour un objet posé au fond de l'eau (la surface inférieure de l'objet n'est pas en contact avec l'eau).

Dans ce cas, la résultante des forces de pression est donnée par le calcul de l'intégrale comme précédemment.

### Capacité exigible : Exploiter la loi d'Archimède

### ♥ À retenir : Utilisation pratique de la loi d'Archimède

- Si le corps et le fluide sont homogènes, alors

$$\vec{\Pi}_A = -m_{\text{fl déplacé}} \vec{g} = -\rho_{\text{fluide}} V_{\text{corps}} \vec{g}$$

et le centre de poussée est confondu avec le centre de masse du solide.

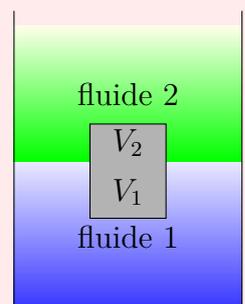
- Si le corps est à l'équilibre entre deux fluides homogènes, il faut ajouter les poussées d'Archimède dues aux deux fluides.

$$\vec{\Pi}_A = -m_{\text{fl déplacé}} \vec{g} = -(m_{\text{fl déplacé},1} + m_{\text{fl déplacé},2}) \vec{g}$$

soit avec  $V_1$  le volume du corps immergé dans le fluide 1 et  $V_2$  le volume du corps immergé dans le fluide 2 :

$$\vec{\Pi}_A = -(\rho_{\text{fluide1}} V_1 + \rho_{\text{fluide2}} V_2) \vec{g}$$

Le centre de poussée est différent du centre d'inertie du solide.



### III.3 Applications

■ **Montgolfières et aérostats** : Un ballon évoluant dans l'atmosphère est soumis à son poids et à la poussée d'Archimède exercée par l'air. Il subit une force ascensionnelle si sa masse reste inférieure à la « masse de l'air déplacé ».

- 1<sup>er</sup> cas : On introduit un gaz de masse molaire plus faible que l'air (hélium, dihydrogène) dans un ballon fermé, le gaz intérieur est alors moins dense que l'air extérieur. C'est le cas de l'aérostat.
- 2<sup>ème</sup> cas : On chauffe l'air dans un ballon fermé. Cet air est alors moins dense que l'air environnant. C'est le principe des montgolfières.

■ **Navire** : Un navire est un corps flottant, le fluide déplacé est alors constitué d'air et d'eau. La masse volumique de l'eau étant bien plus grande que celle de l'air ( $1000 \gg 1,2$ ), la poussée d'Archimède est confondue avec celle de l'eau.

■ **Sous-marins** : Pour plonger, un sous-marin remplit d'eau des réservoirs initialement plein d'air (ballast) et affine ensuite son poids grâce à des caisses de réglages. Pour remonter, on chasse l'eau des ballasts grâce à l'utilisation d'air comprimé contenu à l'intérieur du sous-marin.

