

# Éléments de statique des fluides dans un référentiel galiléen

---

## Extrait du programme

La partie **1** introduit sur le support concret de la statique des fluides le principe du découpage d'un domaine physique (volume, surface) en éléments infinitésimaux et la sommation d'une grandeur extensive (force) pour ce découpage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1. Éléments de statique des fluides dans un référentiel galiléen.</b>	
Forces surfaciques, forces volumiques. Champ de pression.	Distinguer les forces de pression des forces de pesanteur.
Statique dans le champ de pesanteur uniforme : relation $dp/dz = -\mu g$ .	Exprimer l'évolution de la pression avec l'altitude dans le cas d'un fluide incompressible et dans le cas de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait. Comparer les variations de pression dans le cas de l'océan et de l'atmosphère modélisés.

# Sommaire

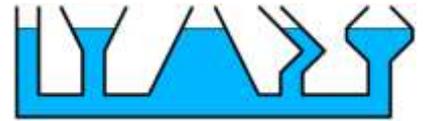
<b>1</b>	<b>FORCES AU SEIN D'UN FLUIDE AU REPOS</b>	<b>2</b>
1.1	DEFINITION DE L'ECHELLE	2
1.2	DEFINITION DU SYSTEME	2
1.3	BILAN DES FORCES	2
<b>2</b>	<b>RELATION DE STATIQUE DES FLUIDES</b>	<b>2</b>
2.1	PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA DYNAMIQUE	2
2.2	RELATION DE STATIQUE DES FLUIDES	2
<b>3</b>	<b>EXERCICES DE COURS</b>	<b>3</b>
3.1	CAS D'UN FLUIDE INCOMPRESSIBLE ET HOMOGENE	3
3.2	CAS DE L'ATMOSPHERE ISOTHERME DANS LE MODELE DU GAZ PARFAIT	3
3.3	COMPARAISON DES DEUX MODELES	3
<b>4</b>	<b>QUESTIONS DE COURS</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>QUESTIONS A CHOIX MULTIPLES</b>	<b>4</b>
<b>6</b>	<b>EXERCICES TERMINALE STI2D</b>	<b>5</b>
6.1	PRESSION AU FOND D'UNE PISCINE	5
6.2	LE « PARADOXE » DE PASCAL	5
6.3	PLONGEE	5
6.4	FORCE SUBIE PAR UN HUBLOT D'AVION	5
<b>7</b>	<b>EXERCICES TYPE ORAL</b>	<b>6</b>
7.1	BAROMETRE DE TORRICELLI	6
7.2	TUBE EN U CONTENANT DEUX LIQUIDES	6
7.3	MODELES D'ATMOSPHERE	6
<b>8</b>	<b>EXERCICES TYPE ECRIT (A FAIRE EN DM POUR LE 04/10/2021)</b>	<b>7</b>
8.1	ATMOSPHERE MARTIENNE (CENTRALE TSI 2019)	7

### 3 Exercices de cours

#### 3.1 Cas d'un fluide incompressible et homogène

On se place dans le référentiel terrestre supposé galiléen. On utilisera une base cartésienne. L'accélération de la pesanteur est supposée uniforme et vaut :  $\vec{g} = -g\vec{u}_z$ .

- 1) Définir les termes « fluide incompressible » et « fluide homogène ». Donner un exemple.
- 2) En partant de la relation fondamentale de la statique des fluides, montrer que, dans un fluide incompressible et homogène, la variation de pression entre deux points  $A$  et  $B$ ,  $P(B) - P(A)$ , est proportionnelle à la différence de hauteur entre ces deux même points,  $z(B) - z(A)$ .
- 3) On souhaite ainsi modéliser la variation de pression dans le cas de l'océan. On choisit l'origine de l'axe  $Oz$  à la surface de l'eau et on note la pression  $P_{atm}$ . Montrer que la pression varie selon :  $P(z) = P_{atm} - \mu gz$  pour  $z \leq 0$ .
- 4) Commenter l'expression précédente. On pourra notamment calculer la pression à 10m de profondeur.
- 5) Expliquer le principe des vases communicants. Dans ces vases reliés entre eux mais de taille et formes différentes, on peut remarquer que la hauteur du liquide est la même dans tous les vases.



#### 3.2 Cas de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait

On se place dans le référentiel terrestre supposé galiléen. On utilisera une base cartésienne. L'accélération de la pesanteur est supposée uniforme et vaut :  $\vec{g} = -g\vec{u}_z$ . On note la pression à l'altitude  $z = 0$ ,  $P_{atm}$ .

- 1) Définir les termes « atmosphère isotherme », « gaz parfait » et « fluide compressible ». Donner un exemple.
- 2) En partant de la relation des gaz parfaits, relier la masse volumique  $\mu$  du gaz parfait et sa pression  $P$ .
- 3) Intégrer la relation fondamentale de la statique des fluides entre l'altitude  $z = 0$  et l'altitude  $z$ . Montrer que la variation de pression varie de manière exponentielle avec l'altitude selon :  $P(z) = P_{atm} \exp\left(-\frac{z}{H}\right)$  avec  $H = \frac{RT_0}{Mg}$ . On précisera la dimension de la grandeur  $H$ .
- 4) Commenter l'expression précédente. On pourra notamment calculer la pression à  $z = 3H$ .

#### 3.3 Comparaison des deux modèles

Dans le cas d'un fluide incompressible, la dépendance avec l'altitude est linéaire. Dans le cas d'un fluide compressible et isotherme, la dépendance avec l'altitude est exponentielle.

- 1) Pour des altitudes (ou profondeur) très faibles, comparer les deux expressions obtenues précédemment.

## 4 Questions de cours

- 1) Exprimer la densité volumique de forces de pesanteur.
- 2) Exprimer la densité surfacique de forces de pression.
- 3) Démontrer la relation de la statique des fluides. On considèrera une particule de fluide de volume  $dV = dx dy dz$  et l'axe (Oz) ascendant.
- 4) Démontrer la relation de la statique des fluides. On considèrera une particule de fluide de volume  $dV = dx dy dz$  et l'axe (Oz) descendant.
- 5) Démontrer la relation de la statique des fluides. On considèrera une particule de fluide de volume  $dV = r dr d\theta dz$  et l'axe (Oz) ascendant.
- 6) Démontrer la relation de la statique des fluides. On considèrera une particule de fluide de volume  $dV = r dr d\theta dz$  et l'axe (Oz) descendant.
- 7) Retrouver l'évolution de la pression dans le cas d'un fluide incompressible et homogène, l'axe (Oz) étant ascendant.
- 8) Retrouver l'évolution de la pression dans le cas d'un fluide incompressible et homogène, l'axe (Oz) étant descendant.
- 9) Redémontrer la loi de pression en fonction de l'altitude dans le cas d'une atmosphère isotherme à la température  $T_0$ . L'atmosphère peut être considérée comme un gaz parfait. La pression au niveau du sol est notée  $P_0$ . On introduira une hauteur caractéristique  $H$  du phénomène que l'on précisera.
- 10) Définir les trois échelles que l'on rencontre dans la cadre du cours de thermodynamique.

## 5 Questions à choix multiples

En ligne sur la plateforme Moodle accessible via Atrium : section « Thermo / Statique des fluides / Test ».

## 6 Exercices Terminale STI2D

### 6.1 Pression au fond d'une piscine

Avant de se lancer dans la construction d'une piscine privée, il faut étudier les forces pressantes, autrement dit la pression exercée sur le fond de la piscine, afin de construire une piscine résistante à ces forces. La piscine fait 8,80m de long sur 4,20m de large. Sa profondeur varie linéairement de 1,00m à 1,90m pour sa partie la plus profonde.

- 1) Quelle la valeur de la pression de l'eau à une profondeur  $z$  ?
- 2) En déduire la valeur maximale des forces de pression s'exerçant sur le fond de la piscine.

### 6.2 Le « paradoxe » de Pascal

Un tonneau de bois rempli d'eau, surmonté d'un tube creux ouvert aux deux extrémités, peut éclater si l'on verse de l'eau dans le tube à une hauteur suffisante, quelle que soit la section de ce tube, même si elle est très faible ; ce qui semble contraire au « bon sens ». Expliquer ce phénomène.



### 6.3 Plongée

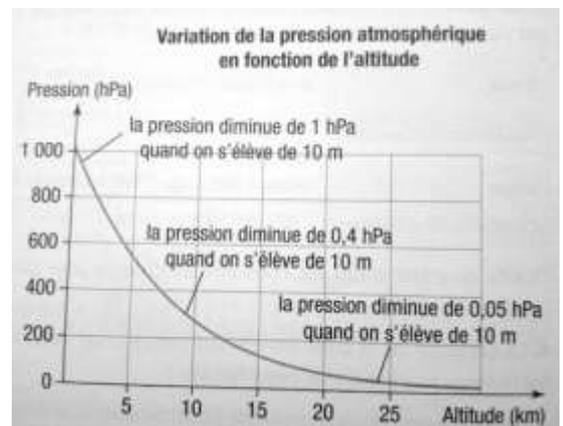
Un plongeur en apnée évolue à la profondeur  $h=15\text{m}$  où règne une pression absolue d'environ 2,5 bar. Chacun de ses tympans a une surface d'aire  $S=0,60\text{cm}^2$ .

- 1) Calculer l'intensité de la force pressante  $F$  s'exerçant sur la face externe de chaque tympan.
- 2) Quelle serait la masse qui produirait une force de même intensité ?

### 6.4 Force subie par un hublot d'avion

Un avion de ligne vole à environ 11000m d'altitude avec une « altitude cabine » d'environ 2500m.

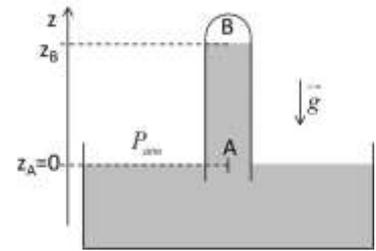
- 1) Déterminer la pression à l'extérieur et à l'intérieur de l'avion.
- 2) Sachant que la différence entre ces deux pressions se traduit par une force sur le hublot, déterminer l'intensité de cette force pour un hublot de  $600\text{cm}^2$ .
- 3) Quelle serait la masse qui produirait une force de même intensité ?



## 7 Exercices type oral

### 7.1 Baromètre de Torricelli

Le baromètre de Torricelli est composé d'un tube, rempli de mercure retourné sur une cuve, contenant également du mercure. L'atmosphère, qui exerce une pression  $P_{atm}$  sur la surface libre du mercure dans la cuve, empêche le tube de se vider.



1) A partir de quelle hauteur  $AB$ , la pression en  $B$  est-elle nulle ?

2) Expliquer alors le principe de la mesure barométrique (mesure de la pression atmosphérique).

3) Une unité employée parfois pour les pressions est le millimètre de mercure. Comment le convertit-on en Pascal ?

4) Quel serait le problème si l'on utilisait de l'eau, plutôt que du mercure ?

Données :

- masse volumique du mercure :  $\mu_{Hg} = 13,5 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- masse volumique de l'eau :  $\mu_{eau} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- pression atmosphérique :  $P_{atm} = 1 \text{ bar}$
- accélération de la pesanteur :  $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

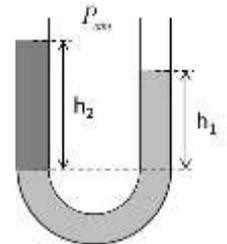
### 7.2 Tube en U contenant deux liquides

Un tube en U contient deux liquides non miscibles de masses volumiques  $\mu_1$  et  $\mu_2$ . Ces deux liquides sont en contact avec l'air libre à la pression  $P_{atm}$ .

1) Exprimer la masse volumique  $\mu_2$  en fonction de  $\mu_1$ ,  $h_1$  et  $h_2$ .

2) Quel est le liquide le plus dense ?

3) Que dire du principe des vases communicants ?



### 7.3 Modèles d'atmosphère

L'air de la troposphère (partie de l'atmosphère dans laquelle nous vivons) est considéré comme un gaz parfait de masse molaire  $M$ . On suppose le champ de pesanteur uniforme. Au niveau du sol ( $z = 0$ ), la pression est  $P_0$  et la température  $T_0$ .

1) On suppose que la température de l'atmosphère est uniforme. A partir de la relation de statique des fluides, établir la loi de variation de la pression en fonction de l'altitude  $z$ . On introduira une hauteur caractéristique  $H$  du phénomène.

2) On suppose maintenant que la température de l'air décroît linéairement avec l'altitude  $z$  selon la loi ( $\lambda > 0$ ) :

$$T(z) = T_0 - \lambda z$$

2.a) Montrer que la pression à l'altitude  $z$  est de la forme :

$$P(z) = P_0 \left(1 - \frac{\lambda}{T_0} z\right)^{\frac{T_0}{\lambda H}}$$

2.b) Calculer, dans ce modèle, la pression au sommet de l'Everest (8850 m).

3) Pour  $z \ll H$ , montrer que les résultats obtenus à l'aide des deux modèles précédents conduisent à une même fonction affine  $P(z)$  donnant la pression en fonction de l'altitude.

Données :  $M = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;  $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  ;  $P_0 = 1,0 \text{ bar}$  ;  $T_0 = 310 \text{ K}$  ;  $\lambda = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$

## 8 Exercices type écrit (à faire en DM pour le 04/10/2021)

### 8.1 Atmosphère martienne (Centrale TSI 2019)

#### II.A - Atmosphère martienne

L'atmosphère martienne est essentiellement constituée d'un mélange gazeux de dioxyde de carbone, d'argon et de diazote. On assimile ces constituants à un gaz parfait unique de masse molaire  $M = 43,3 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ , à la pression  $P$  et à la température  $T$ . Dans cette sous-partie II.A, le champ de pesanteur est supposé uniforme, de valeur égale à sa valeur au sol ( $z = 0$ ) :  $g_0 = 3,71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

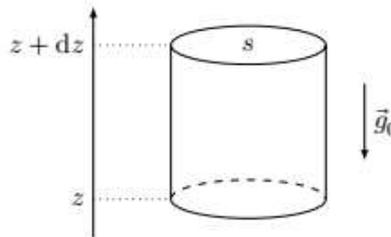
#### II.A.1) Généralités

**Q 19.** Rappeler l'équation des gaz parfaits. On donnera l'unité de chacune des grandeurs qui interviennent dans cette équation.

**Q 20.** Notons  $\rho$  la masse molaire d'un gaz parfait. Exprimer  $\rho$  en fonction de  $P$ ,  $T$ ,  $M$  et  $R$  (constante des gaz parfaits).

#### II.A.2) Modèle de l'atmosphère isotherme

On se place dans le cadre du modèle de l'atmosphère isotherme à la température  $T = T_0 = 210 \text{ K}$  ( $T_0$  est la température de surface moyenne martienne). On considère une petite colonne de gaz parfait à l'équilibre mécanique, de sections égales  $s$  comprises entre les altitudes  $z$  et  $z + dz$ . L'axe vertical est pris ascendant (figure 2).



**Figure 2** Petite colonne de gaz à l'équilibre mécanique

**Q 21.** Montrer que la pression atmosphérique  $P$  ne dépend que de  $z$  et l'exprimer en fonction de  $P_0$  (la pression atmosphérique martienne au sol),  $g_0$ ,  $M$ ,  $z$ ,  $R$  et  $T_0$ .

**Q 22.** Au fond du bassin d'*Hellas Planitia* (altitude  $z_1 = -9,5 \times 10^3 \text{ m}$ ), point le plus bas de la planète, la pression atmosphérique vaut  $P_1 = 1,15 \times 10^3 \text{ Pa}$ . Calculer la valeur de la pression  $P_0$  et la comparer à la valeur de la pression atmosphérique terrestre au niveau du sol (qu'on prendra égale à la pression standard  $P^*$ ).

**Q 23.** En déduire l'expression littérale de la masse volumique  $\rho$  de l'atmosphère martienne en fonction de  $P_0$ ,  $g_0$ ,  $M$ ,  $z$ ,  $R$  et  $T_0$ . On notera  $\rho_0$  la masse volumique au sol ( $z = 0$ ), grandeur à exprimer en fonction de  $P_0$ ,  $M$ ,  $R$  et  $T_0$ . Calculer numériquement  $\rho_0$ .

Dans la suite de cette partie II, nous prendrons une valeur de  $P_0$  égale à  $8,0 \times 10^2 \text{ Pa}$ .

**Q 24.** Comparer cette valeur à celle calculée à la question 22. Quelle(s) hypothèse(s) du modèle pourrait-on remettre en cause pour expliquer l'écart entre les valeurs mesurée et calculée de  $P_0$  ?

#### II.A.3) Épaisseur de l'atmosphère martienne dans le modèle de l'atmosphère isotherme

L'épaisseur de l'atmosphère  $H$  est définie comme l'altitude pour laquelle la pression atmosphérique vaut  $P_0/e$  avec  $e = \exp(1)$  ( $\exp$  désigne la fonction exponentielle).

**Q 25.** Exprimer  $H$  en fonction de  $T_0$ ,  $R$ ,  $g_0$  et  $M$ .

**Q 26.** Calculer  $H$  et comparer à l'épaisseur  $H_{\text{Terre}}$  de la troposphère sur Terre (on donne pour la Terre,  $M = 28,9 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,  $T_0 = 285 \text{ K}$  et  $g_0 = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ).